# **POLITECNICO DI TORINO**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile



# Tesi di Laurea Magistrale

## LA GESTIONE DEL RISCHIO SISMICO DEI CENTRI STORICI: IMPLEMENTAZIONE DEI DATI ARCHIVISTICI NEGLI STRUMENTI DI ANALISI A SCALA TERRITORIALE

**Relatore** Candidata

Prof. Ing. Rosario Ceravolo

Valentina Lambiase

Correlatore

Arch. Erica Lenticchia

Anno Accademico 2018/2019

"Se una voce dentro di te continua a ripeterti "non sarai mai in grado di dipingere", allora dedicati alla pittura con tutto te stesso, e vedrai che quella voce sarà messa a tacere."

Vincent Van Gogh

## Sommario

lr	ıtroduzı	one.		1
1	Stat	o del	l'arte	3
	1.1	Ana	ılisi del rischio sismico a scala territoriale per i beni monumentali	6
	1.2	L'ir	mportanza dell'acquisizione delle informazioni: dagli archivi cartacei al digitale	7
	1.3	Il co	oncetto di resilienza applicato ai centri urbani con connotazione storica	8
	1.4	Rise	chio sismico	. 10
	1.4.	1	Analisi della pericolosità	. 12
	1.4.	2	Analisi della vulnerabilità	. 14
	1.4.	3	Le funzioni di fragilità	. 23
	1.4.	4	Analisi dell'esposizione	. 26
2	Soft	ware	utilizzati	. 27
	2.1	Оре	enQuake: software per l'analisi del rischio sismico	. 27
	2.1.	1	Tipologie di analisi per la valutazione della pericolosità e del rischio sismico .	. 28
	2.1.	2	I modelli di Input per l'analisi della pericolosità	. 34
	2.1	3	I modelli di Input per l'analisi del rischio	. 36
	2.2 rischio		il sistema di informazione geografica per la rappresentazione e simulazione nico	
	2.3	Mat	lab Toolbox: il metodo di inferenza fuzzy	. 42
3	Case	o Stu	dio: Il Centro Storico di Moncalieri	. 45
	3.1	Nas	cita del centro storico di Moncalieri	. 45
	3.2	Cos	truzione del database	. 51
	3.2.	1	La raccolta delle informazioni: metodologie utilizzate e dati rilevati	. 52
	3.3	Tip	ologie di analisi effettuate	. 74
	3.4	I fil	e di Input per la valutazione della pericolosita sismica del centro storico	. 76
	3.4.	1	Modellazione dei terremoti	. 77
	3.4.	2	Modello di movimento del terreno	. 82
	3.5	I fil	e di Input per la valutazione del rischio sismico del centro storico di Moncalieri	83
	3.5.	1	Il modello di rottura	. 83
	3.5.	2	Il modello di esposizione	. 84
	3.5	3	Il modello di fragilità	. 91
	3.5.4	4	Il modello di vulnerabilità	. 95

	3.6	File	di Configurazione	98
	3.7	Ana	ılisi comparativa dei risultati	99
	3.7.	.1	Stochastic event based probabilistic seismic risk analysis	99
	3.7.	.2	Scenario damage assessment e scenario risk assessment analysis	108
4	Ana	alisi d	del rischio sismico del sistema viario dei centri storici	203
	4.1	Det	erminazione dell'occupazione stradale a seguito di un crollo	203
5	Cor	nclus	oni	213
6	Bib	liogr	afia	217

## Introduzione

I recenti eventi sismici hanno dimostrato come la prevenzione e gestione del rischio attinente ai terremoti sia una tematica attuale. Essa infatti lega diversi ambiti disciplinari tra cui la ricerca, la progettazione degli edifici e la gestione delle emergenze. Un terremoto rappresenta spesso un fenomeno improvviso e devastante, pertanto, risulta necessario potenziare la ricerca e costruire adeguatamente utilizzando le norme opportune, con il fine di salvaguardare le vite umane e aumentare il livello di sicurezza dei sistemi urbani.

Un'analisi del rischio sismico a scala territoriale fornisce una descrizione ipotetica e quantitativa delle conseguenze di un terremoto su un'area geografica definendo i danni fisici degli edifici, le perdite economiche dovute ai danni diretti o indiretti, la perdita di funzionalità nelle strutture strategiche, nei sistemi infrastrutturali, nonché l'impatto sociale, organizzativo e istituzionale. Analizzando i danni sulle strutture, l'azione sismica può comportare collassi locali o fessurazioni diffuse a causa della vulnerabilità degli elementi, se si focalizza l'attenzione sui centri storici si evince come essi siano particolarmente vulnerabili a causa della presenza di un elevato patrimonio monumentale, artistico e culturale. Infatti, gli elementi strutturali degli edifici storici venivano realizzati tramite uno studio del loro comportamento basato sull'esperienza. Questo approccio comportava l'analisi delle sole azioni statiche e non prendeva in considerazioni le azioni dinamiche, lo smorzamento o l'interazione suolo-struttura. Pertanto, gli edifici venivano dimensionati in modo tale da resistere ai carichi verticali e alla spinta statica orizzontale di archi e volte. Di conseguenza, l'analisi di vulnerabilità sismica sugli edifici monumentali risulta particolarmente importante per poter studiare interventi preventivi al fine di preservare il patrimonio culturale e poter gestire le emergenze dopo un evento sismico. In prima approssimazione è utile effettuare un'analisi a scala territoriale, la quale rappresenta un punto di partenza per evidenziare gli edifici con maggiore criticità. Tale analisi permette una riduzione dei tempi e delle risorse che nel caso di un'analisi sulla singola struttura sarebbero ingenti dato l'elevato numero di edifici presenti sul territorio.

Il presente studio propone una metodologia di analisi del rischio sismico a scala territoriale che consenta di individuare i danni strutturali degli edifici e le perdite economiche ad essi associati. Infatti, l'obiettivo della ricerca è stato quello di fornire previsioni dell'impatto sul sistema socio-economico di scenari sismici con lo scopo di esplorare aspetti metodologici partendo da analisi del costruito storico e del tessuto urbano, conoscendo le tipologie edilizie, la consistenza del patrimonio costruito per prevedere scenari di rischio e definire proposte di prevenzione e piani di gestione delle emergenze. Anche l'analisi a scala territoriale prevede a monte la raccolta di una serie di informazioni che a differenza di un'analisi sul singolo edificio risultano di più facile reperibilità, ma può capitare che le informazioni disponibili non sempre siano adeguate a causa dell'attuale sistema di catalogazione in cui c'è ancora poca omogeneità tra fase di produzione, utilizzo gestione e conservazione dei documenti. Con la rivoluzione digitale le tecniche di catalogazione prevedono una trasformazione di dati in forma cartacea a dati in forma digitale, ma

non sempre il processo di dematerializzazione avviene in maniera opportuna causando una forte discrepanza tra le diverse tipologie di database.

Ma quanto incide l'utilizzo di diversi sistemi di catalogazione su un'analisi del rischio sismico? La presente tesi mette in luce la necessità di realizzare degli archivi dati omogenei tramite l'attuazione di un'analisi comparativa che mira all'individuazione di indici, caratterizzanti gli edifici, facilmente acquisibili e che maggiormente incidono sull'analisi del rischio sismico. In particolare, la realizzazione di una duplice analisi, riportata nel capitolo 3 del presente documento, permette di evidenziare la metodologia di acquisizione dati opportuna per un'analisi del rischio sismico affidabile, valutando se l'utilizzo di dati differenti, in riferimento ad uno stesso elemento, comporta una forte variazione dei risultati. Le ricerche e le analisi comparative inerenti al diverso utilizzo di dati sono state implementate tramite l'utilizzo di uno strumento GIS (Geografic Information System) il quale fornisce uno strumento di graficizzazione dei risultati garantendone una facile lettura.

All'interno del capitolo 4 viene riportato uno sviluppo dell'analisi del rischio sismico in riferimento ai sistemi infrastrutturali, ed in particolare al sistema viario il quale danno causa un rallentamento o l'impedimento delle attività di soccorso post-sisma. Durante un evento sismico può accadere che la rete stradale venga interrotta in alcuni tratti a causa del crollo di parte di edifici. L'applicazione dell'analisi del rischio sismico al sistema stradale consente la conoscenza della perdita di funzionalità a cui è soggetto un sistema urbano consentendo l'attuazione di piani di prevenzione prima di un evento e la gestione delle emergenze in situazioni post-evento rappresentando un'informazione utile alle istituzioni e alle organizzazioni come la protezione civile per poter intervenire sulle aree colpite.

# 1 Stato dell'arte

La memoria degli eventi che si sono verificati in un'area rappresenta un punto di partenza per poter effettuare un'analisi del rischio sismico. La storia dei fenomeni tellurici di un territorio è definita come "l'insieme degli effetti di terremoti che vi sono stati osservati nell'arco di tempo più ampio possibile, secondo testimonianze storiche attendibili" (Ientile e Naretto 2013). La conoscenza degli eventi del passato ha permesso la realizzazione di forme di catalogazione avanzate come il CFTI5Med (Catalogo dei Forti Terremoti in Italia), risultato di una collaborazione tra INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia), principale istituzione che si occupa della sismologia e della geofisica della terra solida, e SGA (Storia Geofisica Ambiente), società privata che studia i fenomeni naturali del passato e la sistematizzazione dei relativi dati (Guidoboni, et al. 2008). La sismologia storica fornisce dati importanti per la costruzione di modelli di pericolosità e rischio sismico grazie all'analisi dell'entità del danno località per località valutati in funzione dell'intensità. Il territorio italiano è una zona altamente sismica, dato il suo posizionamento geografico, in quanto posta tra due placche tettoniche che collidono, quella euroasiatica e quella africana. Pertanto, gli eventi sismici, anche a distanza di anni, risultano molto frequenti. Nel corso degli ultimi 2500 anni, il territorio nazionale italiano è stato interessato da oltre 30.000 terremoti di media e forte intensità superiore al IV-V grado della scala Mercalli, e da circa 560 eventi di intensità uguale o superiore al VII grado Mercalli (Sito del Dipartimento della Protezione Civile - Presidenza del Consiglio dei Ministri 2019).

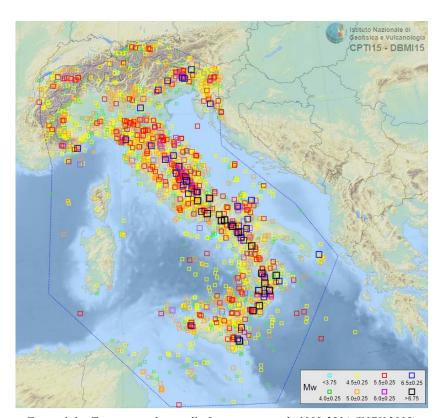


Figura 1-1 – Terremoti italiani nella finestra temporale 1000-2014 (INGV 2015).

Alcuni eventi sismici che hanno segnato in particolar modo la nazione sono il terremoto del 1908 di Reggio Calabria e Messina che ha causato circa 30.000 vittime, il terremoto del 1980 dell'Irpinia con 2.734 vittime, quello del Friuli nel 1976 con 965 vittime, terremoti più recenti come quello in Abruzzo nel 2009 che ha causato la perdita di 309 persone, quello nel centro Italia nel 2016 con 299 vittime. Tali eventi non hanno solo causato una perdita di vite umane, ma hanno comportato anche danni al patrimonio artistico storico e monumentale, oltre a quelli economici. Gli eventi sismici avvenuti negli ultimi quarant'anni hanno causato danni che ammontano a circa 80 miliardi di euro (Sito del Dipartimento della Protezione Civile - Presidenza del Consiglio dei Ministri 2019). I centri storici si sono rilevati particolarmente vulnerabili agli eventi sismici in quanto l'edificato è caratterizzato da un vasto patrimonio culturale. Tra gli eventi sismici che hanno danneggiato edifici di particolare interesse, avvenuti negli ultimi venti anni, ricordiamo quello del 1997 in Umbria e nelle Marche, del 2002 in Molise, 2004 Lago di Garda ma l'esempio più emblematico è rappresentato dal terremoto del 2009 avvenuto all'Aquila, che ha causato danni ad una vasta area del centro dove erano presenti edifici di diverse epoche e realizzati con stili architettonici differenti (Adami, et al. 2016). I terremoti in Emilia, avvenuti nel 2012, hanno causato forti danni agli edifici rurali ed industriali, ma hanno risentito della scossa anche molti palazzi e monumenti di interesse artistico presenti nelle province di Ferrara, Modena, Reggio Emilia e Bologna (Adami, et al. 2016).



Figura 1-2 – A) La torre dell'orologio, Finale Emilia 2012 (Dirani 2012) B) Palazzo del Governo, Aquila 2009 (Studio di Ingegneria DAR 2019) C) Cupola della Chiesa di Santa Maria del Suffragio, Aquila 2009 (Il Sole 24 ore 2016) D) Il Castello delle Rocche, Finale Emilia 2012 (NEXTIE 2018).

Un evento di grande impatto comporta perdita di vite umane, perdite economiche e ingenti danni al patrimonio artistico, storico e monumentale con conseguente perdita della connotazione storica della città, in quanto difficilmente un monumento riesce a riacquisire la sua integrità dal punto di vista storico-artistico. Pertanto lo studio dell'effetto di un evento sismico su un'area urbana è di fondamentale importanza per diverse ragioni: una delle più importanti riguarda lo studio dello scenario del danno, il quale può aiutare ad attuare delle misure preventive con lo scopo di mitigare l'impatto di un evento catastrofico sul tessuto sociale ed economico di un sistema (Athmani, Ferreira e Vicente 2017). I risvolti catastrofici degli eventi sismici sono perlopiù imputabili all'inadeguatezza delle strutture, o del sistema, invece che all'intensità del sisma. L'attuazione di una politica di prevenzione può contrastare i danni legati ad un evento sismico. La prevenzione può essere attuata tramite la classificazione sismica del territorio, individuando la pericolosità sismica dell'area geografica di interesse e, tramite una normativa antisismica, descrivendo le misure da adottare sulle strutture. L'impatto che hanno avuto i diversi terremoti ha portato alla mobilitazione di diversi enti e alla nascita di norme sulle costruzioni in materia a partire dall'inizio del XX secolo. Una delle prime pubblicazioni è stato il R.D. 29/04/1915 n. 573 emanato nel 1915, a seguito di terremoti distruttivi avvenuti a Reggio Calabria e Messina nel 1908. Il regio decreto definiva le regole relative ai sistemi di fondazione, dimensioni delle costruzioni, le distanze fra gli edifici e i metodi di analisi da adottare per le costruzioni in zona sismica (Oliveto, Liberatore e Decanini 2011). Nel 1927 vengono realizzate le prime mappe sismiche che classificavano i soli territori colpiti da forti eventi avvenuti dopo il 1908, in base al grado di sismicità e alla costituzione geologica. Le aree interessate dagli eventi erano state suddivise in due categorie e prevedevano l'obbligo di applicazione delle direttive presenti nelle norme per la realizzazione di nuove costruzioni. Tale vincolo non era applicato a tutte le zone colpite da terremoti prima del 1908 che non erano state classificate, infatti le mappe comprendevano i soli comuni della regione Sicilia e della Calabria colpiti dagli eventi e venivano aggiornate dopo un evento inserendo i comuni danneggiati. Solo successivamente, nel 1974, con la legge n.64, è stata effettuata una nuova classificazione sismica che comprendeva tutto il territorio nazionale e definiva delle nuove norme tecniche per le costruzioni. I terremoti del Friuli Venezia Giulia del 1976 e quello dell'Irpinia del 1980 hanno contribuito a migliorare la conoscenza della sismicità della nazione e hanno portato alla formulazione, da parte del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) al Governo, di una nuova proposta di classificazione sismica tradotta in una serie di decreti del Ministero dei lavori pubblici, approvati tra il 1980 e il 1984, che classificavano la sismicità, sulla base di indagini probabilistiche, considerando tre categorie sismiche. Nel 1998, la competenza di individuazione delle zone sismiche passava allo Stato, che con il DPR n.380 del 6 giugno 2001, ridefiniva con alcune modifiche la legge n.64 del 1974. Un'ulteriore modifica è stata realizzata, a seguito del terremoto del 2002, nelle aree confinanti con Puglia e Molise, con l'ordinanza del 2003, n. 3274, in particolare, tale ordinanza delegava l'individuazione delle zone sismiche alle regioni e classificava tutta l'Italia come zona sismica, la nazione veniva suddivisa in quattro zone, con pericolosità sismica decrescente, individuate da quattro classi di accelerazione massima del suolo con probabilità di eccedenza del 10% ed un periodo di ritorno di 50 anni. Con lo scopo di riunire in unico testo la disciplina tecnica relativa alla progettazione ed all'esecuzione delle

costruzioni viene emanato il DM 14 settembre 2005, con il quale venivano approvate le Norme tecniche per le costruzioni. Successivamente, nel 2009 entra in vigore il decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 14 gennaio 2008 (Norme Tecniche delle Costruzioni del 2008, NTC 2008), aggiornate successivamente dal decreto del 17 gennaio 2018 (NTC2018) (Camera dei deuputati - XV Legislatura 2019). Il processo normativo attuato nel corso degli anni ha permesso un miglioramento della risposta degli edifici alle sollecitazioni sismiche. Studiare una metodologia di analisi che permetta di aiutare nella valutazione del rischio sismico di un'area è stato, e continua ad essere, una tematica ricorrente per la società moderna. Una strategia di riduzione del rischio e di gestione e mitigazione dei disastri è stata studiata dalle Nazioni Unite, con il quadro di riferimento di "Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030". Esso fornisce una politica comune per la gestione del rischio, si basa sulla comprensione della vulnerabilità e dell'esposizione di persone e beni ed è finalizzata a fronteggiare le catastrofi future, sulla base delle conoscenze acquisite dagli avvenimenti degli ultimi decenni (Pica 2018).

# 1.1 Analisi del rischio sismico a scala territoriale per i beni monumentali

Il territorio nazionale è caratterizzato da centri urbani di varia grandezza con preesistenza storica, con un elevata importanza artistica, culturale o naturale. La protezione, la tutela e la trasmissione alle generazioni future del patrimonio culturale rappresenta uno dei principali obiettivi dell'analisi del rischio sismico, attuabili tramite l'identificazione dei beni maggiormente suscettibili ad un evento. Tali obiettivi risultano elementi comuni al progetto UNESCO (Organizzazione delle Nazioni Unite per L'Educazione, la Scienza e la Cultura), istituito nel 1946, che incoraggia i Paesi Membri a proporre siti, presenti nel loro territorio nazionale, da inserire all'interno della lista dei patrimoni dell'umanità. Inoltre assicura la loro protezione, conservazione, valorizzazione e tutela (UNESCO 2019). L'analisi del rischio si basa sulla valutazione della vulnerabilità, dell'esposizione e della pericolosità del costruito. La determinazione di tali elementi su un'area molto vasta richiede la determinazione di molteplici elementi. Inoltre, i beni monumentali, necessitano di un'analisi selettiva che evidenzi caso per caso le diverse problematiche a cui può essere soggetta la struttura a seguito di un evento sismico. Tuttavia, per una prima valutazione della sicurezza delle strutture è possibile effettuare un'analisi a larga scala che richiede strumenti di analisi molto più snelli rispetto al caso del singolo manufatto, in modo da sintetizzare i parametri di interesse in maniera speditiva e permette una loro elaborazione in tempi brevi. Lo studio a scala territoriale permette di indirizzare la gestione delle risorse e degli interventi sul territorio. La realizzazione di un sistema per effettuare un'indagine diagnostica che permetta di caratterizzare ed individuare lo stato di fatto delle strutture attraverso metodologie di analisi sistematiche è stata messa a punto dal progetto RE.S.I.S. (Ricerca e Sviluppo per la Sismologia e l'Ingegneria sismica). Gli obiettivi principali del progetto sono l'individuazione di tecniche che permettano la riduzione del rischio, determinazioni di indicazioni per la gestione del patrimonio urbano e lo sviluppo di tecniche diagnostiche e di monitoraggio utilizzando un approccio multiscala in funzione delle finalità e delle esigenze dell'analisi (Acanfora, Fabbrocino e Vultaggio 2005). In definitiva un'analisi del rischio sismico a scala territoriale pone l'obiettivo di definire metodi di analisi semplificati utilizzando una classificazione degli edifici presenti sul territorio. La catalogazione degli edifici è eseguibile tramite una lettura del manufatto più o meno approfondita a seconda delle variabili che entrano in gioco durante un evento sismico, per le diverse tipologie costruttive.

# 1.2 L'importanza dell'acquisizione delle informazioni: dagli archivi cartacei al digitale

Nell'attuale sistema di catalogazione dei dati c'è ancora poca omogeneità tra fase di produzione, utilizzo gestione e conservazione dei documenti. L'impatto della rivoluzione digitale ha radicalmente modificato le tecniche di catalogazione prevedendo una trasformazione di dati in forma cartacea a dati in forma digitale. La trasformazione digitale è un processo di dematerializzazione e integrazione che permette di convertire in codice e computerizzare le informazioni, incrementando la capacità di avvalersi del capitale di informazioni presente ma non di facile accesso. Il formato digitale dei dati, integrato con adeguati software di gestione, consente di automatizzare e velocizzare i processi di analisi. La dematerializzazione dei documenti su carta fornisce un punto di partenza per creare delle librerie più ampie e fruibili, infatti i documenti digitali garantiscono in primo luogo una migliore conservazione del bene e soprattutto per tempi molto lunghi tutelando fisicamente la documentazione. I documenti cartacei sono sottoposti a fasi di deterioramento con il passare degli anni, pertanto, la conservazione degli archivi in un ambiente digitale consente un trattamento continuo dei documenti oltre ad intelligibilità, integrità, identificazione univoca e accessibilità. Inoltre l'uso di tecniche computerizzate fornisce la possibilità di preservare le informazioni del patrimonio documentario storico presente negli archivi. Il progresso tecnologico presenta un ampio margine di miglioramento e tale tecnologia può essere sfruttata in maniera proficua in diversi ambiti disciplinari e da diversi specialisti (ricercatori, professori, studenti ecc.). A livello nazionale diversi enti, sia pubblici che privati, hanno progettato sistemi digitali che permettono la consultazione e la diffusione del patrimonio archivistico. In particolare la Direzione Generale per gli Archivi (DGA), ente predisposto al coordinamento e alla promozione di attività relative alla conservazione, tutela e valorizzazione del patrimonio archivistico nazionale, ha realizzato due sistemi archivistici (il Sistema Guida Generale degli Archivi di Stato e il Sistema Informativo degli Archivi di Stato). Tali sistemi sono stati raccordati con il progetto SAN (Sistema Archivistico Nazionale) con il quale si fornisce un punto di accesso tramite piattaforma online alle banche dati e ai documenti di archivio digitalizzati. Tale progetto consente l'interoperabilità con altri portali ed archivi garantendo la dinamicità delle informazioni. Inoltre, ogni regione ha sviluppato un proprio sistema di catalogazione e condivisione delle informazioni fornendo tramite piattaforme online accesso a database ed informazioni regionali in diversi ambiti. Nonostante il continuo sviluppo molti dati, come spesso accade, non sono stati digitalizzati o sono in fase di digitalizzazione. Pertanto non sempre tutte le informazioni necessarie sono reperibili tramite supporto online, quindi risulta necessario effettuare una ricerca, in base al campo di interesse, tra i documenti cartacei presenti

negli archivi degli enti della regione. Creare un database omogeneo e facilmente accessibile risulta un elemento di fondamentale importanza in quanto esso rappresenta un punto di partenza per poter effettuare analisi a larga scala in diversi ambiti disciplinari con il minimo dispendio di risorse. Per quanto concerne l'analisi del rischio sismico, essa necessita di una base dati consistente ed omogenea, che spesso risulta assente. La presente tesi approfondirà questi aspetti attraverso l'analisi comparativa di diverse fonti archivistiche e database online, per poter definire la fonte di informazioni migliore per l'assimilazione di dati rilevanti per la gestione del rischio sismico di un centro storico.

# 1.3 Il concetto di resilienza applicato ai centri urbani con connotazione storica

Il termine resilienza viene utilizzato in diversi campi, tra cui quello ecologico, ingegneristico, psicologico, sociale, economico e nella scienza dei materiali. Le diverse discipline definiscono tale termine in modo differente. In ambito ecologico è definita come: "la misura della persistenza dei sistemi e la loro abilità di assorbire i cambiamenti mantenendo le stesse relazioni tra le popolazioni e le variabili di stato" (Vargo e Seville 2014) mentre la resilienza ingegneristica si basa su sistemi fisici, la sociologia su sistemi sociali, entrambi definiscono l'abilita di tali sistemi di rispondere ad eventi inaspettati. Nonostante le molteplici definizioni, il termine presenta dei punti in comune ad ogni campo disciplinare:

- la resilienza è una caratteristica di un sistema;
- il sistema è in grado di rispondere a cambiamenti, interruzioni, o pericoli attraverso la resistenza, assorbimento o tramite una loro combinazione;
- il sistema è in grado di continuare a funzionare ad un certo livello dopo l'interruzione. (Vargo e Seville 2014).

Il concetto di resilienza legato alle aree urbane risulta un problema multidisciplinare essendo le città un sistema complesso all'interno del quale interagiscono diversi elementi tra cui quello sociale, economico, politico ed urbano. Data la molteplicità degli elementi in gioco la gestione del sistema e lo studio di una città resiliente risultano particolarmente complessi (Vona, Harabaglia e Murgante 2015). Analizzando il sistema della città si possono identificare le diverse definizioni di resilienza in campo urbano (Cutter, et al. 2008):

- Resilienza infrastrutturale, "riferita alla capacità di risposta e recupero della comunità e del comparto costruito (edifici, sistema dei trasporti e sottoreti)";
- Resilienza istituzionale, "riferita ai sistemi governativi e non governativi che amministrano una comunità";
- Resilienza economica, "riferita alle diversità economiche della comunità come posti di lavoro, numero di imprese e loro capacità di funzionamento dopo un evento disastroso";
- Resilienza sociale, "riferita alle caratteristiche demografiche della comunità".

Nell'ingegneria sismica la resilienza è "l'abilità delle unità sociali (organizzazioni, comunità) di mitigare i pericoli, contenere gli effetti del disastro quando questi si verificano e svolgere attività di recupero in modo da ridurre al minimo le interruzioni sociali e ridurre gli effetti dei terremoti futuri." (Bruneau, et al. 2004) . In Italia la maggior parte delle perdite causate dai terremoti è legata ai danni degli edifici sia privati che pubblici, dovute ad una risposta scarsamente resiliente del sistema. Infatti, a seguito degli eventi che si sono verificati negli ultimi anni, il ritorno alle condizioni normali è stato possibile con considerevoli investimenti economici. La politica, proposta da alcuni studiosi, su cui deve basarsi un sistema resiliente presuppone tre principali aspetti "preparare-rispondere-recuperare" (Vona, Harabaglia e Murgante 2015):

- Il *progetto di pianificazione* è un approccio proattivo che si basa sul miglioramento delle capacità strutturali e infrastrutturali del sistema con lo scopo che esse possano resistere ad un evento catastrofico.
- La *capacità di risposta* è un approccio reattivo del sistema e consiste nel garantire un aiuto immediato fornendo beni, strutture e servizi che possano quanto prima ristabilire la normalità nel sistema.
- Il *recupero* è un approccio reattivo ed è attuabile tramite la capacità economica del sistema di riportare l'assetto urbano alla sua connotazione iniziale.

In definitiva, la valutazione della resilienza ha l'obiettivo di minimizzare le perdite di vite umane e le perdite economiche associate ad un evento catastrofico. Il concetto è legato a quello di vulnerabilità, quest'ultima è un processo di identificazione e quantificazione di un sistema che fornisce un'analisi ed un'indicazione su come gli esseri umani vivano in modo sostenibile all'interno del loro ambiente valutando l'esposizione del sistema soggetto a cambiamenti. La vulnerabilità e la resilienza possono essere studiati su diversi livelli. Negli edifici siano essi di particolare interesse artistico, storico, monumentale o residenziali, facenti parte di sistemi urbani storici, il concetto di vulnerabilità è correlato con più forza a quello di resilienza (Mamì 2015). Gli edifici presenti storici sono stati realizzati in epoche in cui non erano presenti normative di riferimento infatti essi, generalmente, presentano un grande numero di componenti funzionalmente simili, in modo che il fallimento di un componente non provochi il collasso, strutturale e non, del sistema. L'effetto di un terremoto sui centri storici oltre a provocare ingenti perdite da un punto di vista economico causa anche la perdita della singolarità dell'area e della sua storia culturale. Il crescere degli insediamenti, le varie trasformazioni che avvengono in un centro urbano e le calamità naturali hanno portato alla necessità di conoscere l'impatto a lungo termine di un terremoto per poter aumentare la "coping capacity", ossia la capacità di un sistema di gestire disastri e rischi e la capacità di risposta. Conoscere gli effetti più o meno gravi che un evento sismico comporta da un punto di vista socio-economico permette di gestire al meglio le emergenze ed evitare i danni che ne conseguono. Un passo importante è stato fatto con lo sviluppo della normativa in materia sismica che ha permesso una riduzione dei danni nelle aree colpite dal sisma. Inoltre l'introduzione delle "Linee guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008" ha introdotto

modelli di calcolo più consoni agli edifici storici e criteri di gestione dei livelli di sicurezza con l'obiettivo di ridurre il rischio sismico del patrimonio. La direttiva ridefinisce gli stati limite da applicare ad edifici tutelati, che non riguardano solo le esigenze di salvaguardia del manufatto e l'incolumità delle persone (stato limite di salvaguardia della vita, SLV) e di funzionalità (stato limite del danno, SLD) ma anche ai danni dei beni di valore artistico (stato limite del danno ai beni artistici, SLA). Nonostante i progressi dal punto di vista normativo il sistema socioeconomico è ancora suscettibile di distruzione su larga scala. La resilienza per quanto concerne i disastri naturali può essere aumentata grazie ad una migliore pianificazione, mitigazione del rischio e risposta post-sismica. Tutti queste valutazioni hanno portato centri di ricerca a soffermarsi sugli argomenti, ed attuare progetti che permettessero di preservare i siti culturali dai disastri naturali. Un esempio è fornito dal progetto PROTHEGO (PROTection of European Cultural Heritage from GeO-hazards; 2015-2018), il cui scopo è quello di scoprire e validare una metodologia innovativa su larga scala per il rilevamento e il monitoraggio del patrimonio culturale europeo esposto agli eventi naturali (Themistocleous 2017). Progetti di ricerca come quello citato rappresentano il punto di partenza per poter costruire città resilienti.

#### 1.4 Rischio sismico

Il rischio sismico rappresenta la probabilità che nel corso di un assegnato periodo temporale, un dato sistema funzionale subisca un certo livello di danno e da questo derivi una perdita per la collettività che riguarda determinate risorse. La determinazione del rischio è legata a tre fattori principali:

$$R = f(P, V, E)$$

Dove P rappresenta la pericolosità sismica di un'area, definita come la probabilità che, in un certo intervallo di tempo, essa sia interessata da terremoti di una data intensità che possono produrre danni. V è la vulnerabilità, valuta la possibilità che persone, edifici o attività subiscano danni o modifiche al verificarsi di un evento sismico. Fornisce informazioni riguardanti la perdita o la riduzione di efficienza ma anche la capacità residua a svolgere le normali condizioni di funzionamento di un sistema territoriale. E è l'esposizione, fornisce un'indicazione dell'importanza dell'oggetto esposto al rischio. Permette di individuare da un punto di vista numerico ed economico gli elementi del territorio che potrebbero variare il loro comportamento e sviluppo a seguito dell'evento sismico. Per poter ridurre il rischio sismico l'unico fattore su cui è possibile intervenire è la vulnerabilità, essa dipende, nel caso di edifici, dai materiali, dalle caratteristiche costruttive e dallo stato di manutenzione. Pertanto, tramite miglioramento o adeguamento sismico è possibile ridurre la vulnerabilità di un edificio. Pericolosità ed esposizione sono fattori su cui non è possibile intervenire, la pericolosità dipende dal tipo di terremoto, dalle condizioni geomorfologiche e dalla distanza tra l'epicentro e l'area interessata mentre l'esposizione è funzione della quantità e della qualità dei beni esposti, del patrimonio artistico/culturale, della produttività delle zone industriali e della densità abitativa.

L'analisi della vulnerabilità, della pericolosità e dell'esposizione possono essere effettuate a scala regionale e/o nazionale, riguardare un aggregato urbano o un singolo edificio. A seconda del livello di conoscenza che si vuole ottenere mutano le metodologie e le tecniche da poter utilizzare per effettuare le analisi.

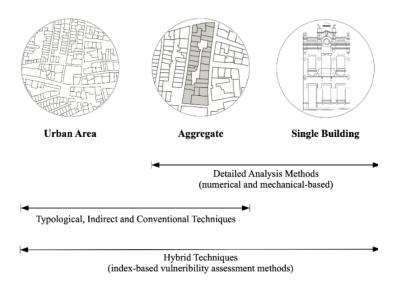


Figura 1-3 – Tecniche di analisi per un'area urbana, un aggregato edilizio e un singolo edificio. (Ferreira 2018)

La valutazione del rischio sismico di un'area urbana comporta l'acquisizione e l'utilizzo di una mole di dati, ne consegue la necessità di utilizzare strumenti di ispezione e registrazione meno onerosi e più pratici. La valutazione del rischio nelle aree urbane può essere implementata con l'ausilio di software georeferenziati, come la metodologia GIS, che fornisce una prospettiva globale del problema. Informazioni dettagliate ed approfondite conducono a risultati più attendibili e precisi, grazie all'ausilio di metodi meccanici e numerici. D'altro canto, per effettuare una stima sul rischio sismico a cui è soggetto un'area, un'analisi a scala territoriale fornisce una metodologia più vantaggiosa in termini di costi e di tempo. È importante ricordare come la quantificazione del rischio sia un processo altamente probabilistico, caratteristica legata all'incertezza connessa al fenomeno sismico, il che significa che i risultati devono essere analizzati da un punto di vista probabilistico (Ferreira 2018). Conoscere il rischio sismico di un territorio permette di incrementare la resilienza del patrimonio edilizio. I centri storici risultano particolarmente vulnerabili agli eventi naturali, specialmente per quanto riguarda un evento sismico. La loro salvaguardia è uno degli obbiettivi principali della società moderna, dato il loro valore da un punto di vista culturale, paesaggistico, sociale ed economico. I recenti casi di eventi sismici, hanno evidenziato l'importanza dello studio del rischio, in quanto la sua analisi comporta la valutazione di strategie di "protezione" e gestione delle emergenze. Per poter studiare il rischio è necessario analizzare le componenti che la definiscono, ossia la pericolosità, la vulnerabilità e l'esposizione.

## 1.4.1 Analisi della pericolosità

La pericolosità sismica, dipendendo dalle caratteristiche del territorio, risulta tanto maggiore quanto maggiore è la frequenza e l'intensità degli eventi che si sono verificati in una determinata area geografica. La conoscenza della pericolosità è uno strumento di previsione del grado di severità del sisma atteso. La pericolosità sismica viene definita per la prima volta in Italia, tra il 1981 ed il 1984, con i decreti ministeriali emanati dal ministero dei Lavori Pubblici, i quali classificavano il territorio in tre categorie sismiche. Nel 2003, con gli studi relativi alla pericolosità sismica e con la pubblicazione dell'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n.3274 sulla Gazzetta Ufficiale n.105 viene introdotta la zona quattro, con conseguente riclassificazione del territorio nazionale. Aggiornata, nel 2006, a seguito degli eventi catastrofici che hanno colpito l'Italia, l'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n.3519 riporta sulla Gazzetta Ufficiale n.108 i "Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone". A ciascuna zona viene attribuito un valore dell'azione sismica espresso in termini di accelerazione massima su terreno rigido, con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni, i valori attributi a ciascuna zona sono visibili nella Tabella 1-1 (Presidente del Consiglio dei Ministri 2006).La classificazione sismica risulta utile per la gestione della pianificazione e per il controllo del territorio da parte degli enti preposti quali la Regione, il Genio civile, ecc.

Zona Sismica	Accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni(ag)
1	ag > 0.25
2	$0.15 < ag \le 0.25$
3	$0.05 < ag \le 0.15$
4	$ag \le 0.05$

Tabella 1-1 - Suddivisione delle zone sismiche in relazione all'accelerazione di picco su terreno rigido (Presidente del Consiglio dei Ministri 2006)

A seguito del provvedimento l'istituto nazionale di geofisica e vulcanologia (INGV) ha realizzato delle mappe di pericolosità sismica nazionale che descrivono la pericolosità sismica tramite il parametro di accelerazione massima attesa con una probabilità di eccedenza del 10% in un periodo di ritorno di 50 anni, su suolo rigido e pianeggiante.

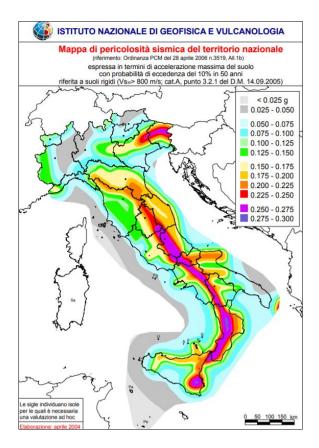


Figura 1-4 - Mappa di pericolosità Sismica Nazionale 2005[INGV]

I colori associati ad accelerazioni più basse indicano zone meno pericolose, dove la frequenza di terremoti più forti è minore. In base a tali dati è possibile costruire una mappa delle zone sismiche che permette di individuare sul territorio nazionale la suddivisone delle zone sismiche (*Figura 1-5*).

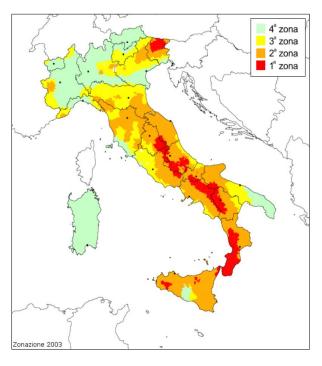


Figura 1-5:Mappa delle zone sismiche del territorio Italiano [INGV]

La mappa di pericolosità sismica può essere definita tramite due parametri differenti, l'intensità macrosismica, che definisce una misura oggettiva della forza del sisma, misurata tramite scale strumentali o tramite grandezze meccaniche come i parametri relativi al moto del suolo (PGA, Peak Ground Acceleration). Lo studio della pericolosità può avvenire tramite due metodologie:

- Metodo deterministico (DSHA, Deterministic Seismic Hazard Analysis);
- Metodo probabilistico (PSHA, Probabilistic Seismic Hazard Analysis).

Il metodo DSHA è stato sconsigliato dal Comitato per il Rischio sismico dell'EERI nel 1984 in quanto esso considera un piccolo numero di scenari e fornisce lo scenario più grave al sito ma non la probabilità che si verifichi il sisma. Inoltre, non fornisce il livello d'intensità in un prefissato periodo di riferimento e non considera gli effetti delle incertezze legati ad un sisma. Il metodo probabilistico considera tutti gli scenari possibili e valuta la probabilità che si verifichi un livello di scuotimento sismico maggiore di un assegnato valore, entro un dato periodo di tempo. La normativa italiana si basa su mappe di pericolosità sismiche che utilizzano il metodo di analisi probabilistico. Sono molti i centri di ricerca che si occupano della determinazione della pericolosità sismica, individuiamo ad esempio l'istituto nazionale di geofisica e vulcanologia (INGV) sopra citato che con il progetto INGV-DPC S2 (2007-2009) ha realizzato un modello dinamico sperimentale di valutazione della pericolosità sismica a scala nazionale o ancora il progetto SHARE EU Project-Seismic Hazard Harmonization in Europe. Stime di pericolosità sismiche a livello mondiale sono invece definite dalla GEM (Global EarthQuake Model) o dal GSHAP-Global Seismic Hazard Assessment Program.

#### 1.4.2 Analisi della vulnerabilità

I terremoti recenti e passati hanno mostrato un alto livello di vulnerabilità sismica sul territorio nazionale ed hanno evidenziato delle criticità soprattutto nelle aree dei centri storici. Tali informazioni hanno portato alla necessità di effettuare un'analisi di vulnerabilità dal punto di vista economico, culturale e di salvaguardia delle vite umane tramite degli studi a larga scala. Gli obiettivi principali della valutazione della vulnerabilità a larga scala sono (Gueguen 2013):

- Conoscere l'impatto di un terremoto su gruppi di edifici;
- Pianificare gli interventi di prevenzione e mitigazione del rischio sismico;
- Aiutare la gestione dell'emergenza dopo un evento sismico.

Per poter analizzare la vulnerabilità è necessario acquisire ed esaminare i dati disponibili nell'area di interesse, identificare la classe degli edifici presenti nell'area e costruire i modelli di vulnerabilità. Successivamente, per ogni classe di edifici bisogna definire i parametri su cui si baseranno i modelli di vulnerabilità, i parametri possono far riferimento al singolo edificio o a micro aree. Il territorio viene suddiviso in zone caratterizzate da pericolosità uniforme e per ogni classe di edificio e micro area vengono determinate le curve di fragilità, il performance point e la probabilità di danno, considerando le incertezze coinvolte. I modelli di vulnerabilità stabiliscono

una correlazione tra la pericolosità e i danni strutturali. È possibile definire il modello di vulnerabilità utilizzando due procedimenti differenti, in relazione al fatto che la mappa di pericolosità sismica può essere definita tramite due parametri, come riportato nel paragrafo 1.4.1, (Lagormarsino 2006):

- Intensità macrosismica, la quale rappresenta una misura ibrida dell'input sismico in quanto dipende indirettamente dalla vulnerabilità dell'edificio. I dati storici degli eventi sismici sono perlopiù indicati in termini di Intensità;
- PGA (Peak Ground Acceleration) e valori spettrali, sono parametri utilizzati in una rappresentazione di tipo meccanico dell'input sismico. Sono legati alla risposta strutturale di un sistema SDOF (single degree of freedom).

Distinguiamo un metodo macrosismico in cui la vulnerabilità viene misurata tramite un indice di vulnerabilità V, il quale fornisce una misura della "debolezza" della costruzione soggetta all'azione sismica e un indice di duttilità Q, il quale controlla l'incremento del tasso di danno con l'intensità. Entrambi gli indici sono valutati a seconda della tipologia di edificio e delle caratteristiche costruttive. Questa metodologia consente la valutazione della vulnerabilità di numerosi e diversi set di edifici (Lagomarsino e Giovinazzi, Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings 2006). La vulnerabilità viene rappresentata tramite curve che stabiliscono una correlazione tra pericolosità, descritta in termini di intensità, e danni strutturali di classi di edifici con uno stesso comportamento (Gueguen 2013). Le curve di vulnerabilità sono ottenute tramite l'analisi di dati, collezionati dopo eventi sismici di diversa intensità, e dei danni, che si sono verificati sulle strutture. Il danno è descritto tramite la matrice di probabilità del danno (DPM). È possibile avere matrici incomplete nel caso di assenza di informazioni relative al grado di danno degli edifici sottoposti ad un dato livello di intensità e posti in un'area geografica specifica. L'intensità è considerata come un parametro continuo valutata rispetto a delle condizioni di terreno rigido; i possibili effetti delle amplificazioni dovute a differenti condizioni del terreno sono comprese all'interno del parametro di vulnerabilità V. Per quanto concerne il danno fisico degli edifici si può considerare la classificazione riportata dalla scala macrosismica europea EMS-98, distinguendo cinque livelli di danno  $D_k$  (con k = 1, ..., 5), nel dettaglio (Rapone, et al. 2018):

- D0, nessun danno;
- D1, *danno da trascurabile a leggero*, nessun danno strutturale e un leggero danno non strutturale. Caratterizzato dalla presenza di crepe capillari su pochissimi muri, caduta di piccoli pezzi di intonaco;
- D2, *danno moderato*, leggero danno strutturale, moderato danno non strutturale. Caratterizzato da lesioni in molti muri, caduta di pezzi di intonaco piuttosto grandi;
- D3, danno da sostanziale a grave, moderato danno strutturale e grave danno non strutturale. Caratterizzato da larghe lesioni sulla maggior parte dei muri e cedimento di singoli elementi non strutturali.

- D4, *danno molto grave*, grave danno strutturale e danno non strutturale molto grave. Caratterizzato da un importante cedimento dei muri e parziale cedimento di tetti e solai;
- D5, distruzione, danno strutturale molto grave. Caratterizzato dal collasso totale o quasi totale.

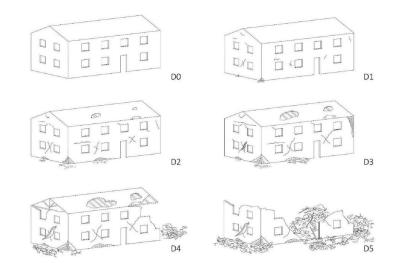


Figura 1-6 – Descrizione schematica dei livelli di danno (Rapone, et al. 2018)

Le curve di vulnerabilità permettono di correlare l'input sismico e il danno atteso e vengono descritte tramite la funzione analitica:

$$\mu_D = 2.5 \left[ 1 + \tanh \left( \frac{\text{I} + 6.25\text{V} - 13.1}{Q} \right) \right]$$
 Equazione 1

Dove I, rappresenta l'input sismico descritto in termini di intensità macrosismica, V e Q sono rispettivamente gli indici di vulnerabilità e duttilità. L'equazione 1 permette di stimare il "mean damage value"  $\mu_D$  (0 <  $\mu_D$  <5), valore che esprime la distribuzione di danno discreta attesa:

$$\mu_D = \sum_{k=0}^{5} p_k k$$
 Equazione 2

La valutazione probabilistica in termini sia di distribuzioni del danno e di curve di fragilità, per il mean damage value  $\mu_D$  valutato secondo l'equazione 1, è ottenuta assumendo una distribuzione binomiale. Pertanto, la probabilità  $p_k$  di avere ogni grado di danno  $D_k$ , per un certo mean damage  $\mu_D$  è valutata in accordo alla funzione di probabilità di massa (PMF), della distribuzione binomiale:

$$P[D_K | \mu_D] = \sum_{k=1}^{5} p_k = \sum_{k=1}^{5} \frac{5!}{k!(5-k)!} \left(\frac{\mu_D}{5}\right)^k \left(1 - \frac{\mu_D}{5}\right)^{5-k}$$
 Equazione 3

Dove "!" indica l'operatore fattoriale. La dispersione per la distribuzione del danno atteso è definita in funzione del mean damage value  $\mu_{D}$ :

$$\sigma_D = \sqrt{\mu_D \left(1 - \frac{\mu_D}{5}\right)}$$
 Equazione 4

Un aspetto critico della distribuzione binomiale è che essa non permette la definizione di diverse dispersioni in prossimità della media  $\mu_D$ . Se di vuole tener conto di questo aspetto si può utilizzare una distribuzione di densità di tipo beta.

Un'ulteriore metodologia che permette di studiare la vulnerabilità sismica è rappresentata dall'approccio di tipo meccanico, in questo caso il modello viene valutato tramite l'ausilio dello spettro di capacità. La curva di capacità rappresenta il comportamento non lineare dell'edificio, soggetto all'azione orizzontale del sisma, rappresentato tramite un sistema ad un solo grado di libertà (SDOF). La curva di capacità viene definita in base al periodo fondamentale, l'accelerazione spettrale e la duttilità della struttura e generalmente essa può essere ricavata tramite un'analisi di tipo pushover. Nel caso di uno studio a larga scala non è possibile reperire i dati necessari per effettuare tale analisi. In questo caso è possibile ricavare la curva di capacità in base alla tipologia dell'edificio e sulla base di informazioni qualitative in modo da idealizzare la risposta di un gruppo di strutture con comportamento omogeneo sottoposte all'azione orizzontale dovute al sisma. Nel dettaglio tale curva rappresenta una relazione tra la domanda e la capacità strutturale e mostra il progresso della risposta strutturale evidenziando il comportamento iniziale elastico in cui l'edifico non è danneggiato, il livello successivo che comporta la formazione di crepe fino alla perdita di stabilità vicina al collasso. In particolare si evidenziano quattro stati di danno relazionati ai livelli di risposta (performance level) della struttura (Tabella 1-2), e ad ogni livello di danno vengono associati i livelli di spostamento della struttura (S<sub>d,k)</sub> (Lagormarsino 2006).

$D_k$	Damage state	Performance level	$S_{d,k}$	
1	Slight	Fully operational	$0.7d_{ m V}$	
2	Moderate	Operational	$1.5d_{\mathrm{V}}$	
3	Heavy	Life safe	$0.5(1 + \mu)d_{V}$	
4	Complete	Near collapse	$\mu d_{\mathrm{y}}$	

Tabella 1-2 – Valori significativi dello stato di danno ricavati da un approccio meccanico. (Lagormarsino 2006)

L'analisi della vulnerabilità definisce la distribuzione di probabilità dello stato di danno atteso. Pertanto poiché le curve di fragilità forniscono la probabilità che il danno sia uguale o più alto di uno stato di danno  $D_k$  in funzione dello spostamento  $S_d$ , la distribuzione di probabilità può essere ricavata utilizzando una funzione di probabilità cumulativa lognormale:

$$P[D_K|S_{d^*}] = \phi \left[ \frac{1}{\beta_k} \ln \left( \frac{S_{d^*}}{S_{d,k}} \right) \right]$$
 Equazione 5

Dove  $\phi$  è la funzione di distribuzione cumulativa normale,  $\beta_k$  è la deviazione standard normalizzata del logaritmo naturale dello spostamento limite  $S_{d,k}$  e  $S_{d^*}$  rappresenta il valore di spostamento individuato dal punto di performance point (target displacement) (Lagormarsino 2006). Utilizzando una distribuzione binomiale, la quale permette di rappresentare la dispersione in modo attendibile, il coefficiente  $\beta_k$  dipende dalla duttilità  $\mu$  della curva di capacità, può essere assunto lo stesso valore per tutti gli stati di danno:

$$\beta_k = 0.4 \ln \mu \text{ (k=1,2,3,4)}$$
 Equazione 6

Generalmente lo scenario di pericolosità è definito tramite la PGA, pertanto, fissando la forma spettrale per un numero limitato di condizioni del terreno le funzioni di fragilità possono essere espresse tramite una funzione diretta della PGA:

$$P\left[D_{K} \mid a_{g}\right] = \phi \left[\frac{1}{\beta_{k}} \ln \left(\frac{a_{g}}{a_{g,k}}\right)\right]$$
 Equazione 7

Dove  $a_{g,k}$  è l'accelerazione al suolo che produce lo stato di danno  $D_k$  (k=1,2,3,4) (Lagormarsino 2006).

#### 1.4.2.1 Correlazione tra il metodo macrosismico e il metodo meccanico

Per poter stabilire una correlazione dei risultati ottenuti tramite l'approccio macrosismico e quello meccanico è necessario stabilire una correlazione tra l'intensità e la peak ground acceleration (PGA). La PGA è un parametro di natura fisica che cambia da punto a punto a seconda delle condizioni del suolo mentre l'intensità è una misura soggettiva riferita ad un'area estesa che include implicitamente la vulnerabilità. In letteratura sono presenti diverse relazioni analitiche tra i due parametri, molte espresse in forma simile. In particolare, la PGA viene relazionata all'intensità tramite la funzione:

$$a_g = c_1 c_2^{(1-5)}$$
 Equazione 8

Mentre l'intensità macrosismica è relazionata alla PGA tramite la funzione:

$$I=5+\frac{1}{\ln c_2}(\ln a_g-\ln c_1)$$
 Equazione 9

Dove  $c_1$  è un fattore moltiplicativo,  $c_2$  rappresenta la base della potenza e della funzione logaritmica, I è l'intensità macrosismica e  $a_g$  il valore di accelerazione al suolo. In particolare il fattore  $c_2$  fornisce un'indicazione di quanto cresce il valore della PGA con l'aumentare

dell'intensità. I fattori c<sub>1</sub> e c<sub>2</sub> vengono ricavati dalla letteratura, si riportano in *Tabella 1-3* i valori forniti da diversi esperti. (Giovinazzi 2005)

I-a <sub>g</sub> correlation	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>
Guagenti-Petrini (2.2)	0.018	1.8
Margottini (2.3a)	0.04	1.5
Assumed correlation	0.03	1.6

Tabella 1-3 – Valori dei parametri c<sub>1</sub> e c<sub>2</sub> per diverse leggi I- a<sub>g</sub> (Giovinazzi 2005)

## 1.4.2.2 Curve di vulnerabilità nel caso di edifici monumentali

Un modello di vulnerabilità utilizzabile per analisi a larga scala necessita della classificazione per tipologie di edifici. Nel caso di edifici con connotazione storica risulta complesso definire delle tipologie standard sia per le diverse caratteristiche costruttive legate all'epoca di costruzione, sia per i diversi stili architettonici. Data la complessità del problema è possibile effettuare una classificazione in base alla destinazione d'uso e in base al possibile comportamento sismico di tali edifici. È possibile classificare i monumenti per i paesi europei in: palazzi, chiese, conventi/monasteri, moschee, torri, obelischi, teatri, castelli archi di trionfo e ponti ad archi (Bernardini e Lagomarsino 2008). Le curve di vulnerabilità degli edifici monumentali possono essere ricavate tramite metodo macrosismico o meccanico a seconda dei casi e si basano su un'analisi statistica dei danni osservati dopo i recenti terremoti italiani. L'osservazione dei danni ha portato alla determinazione dei vari parametri, necessari alla determinazione del modello di vulnerabilità, da parte di esperti. Tali dati sono riportati in Tabella 1-4. L'indice di vulnerabilità V assegnato ad un edificio monumentale sulla base di una classificazione tipologica rappresenta un valor medio che non considera nessuna distinzione tra i singoli edifici e pertanto non permette di individuare la struttura più vulnerabile tra un complesso di edifici della stessa tipologia. Per garantire un'adeguata analisi di vulnerabilità per gli edifici monumentali è stata effettuata una rapida indagine che permettesse di ricavare parametri inerenti allo stato di conservazione, la qualità dei materiali, la regolarità in pianta e in elevato, la grandezza e la snellezza degli elementi strutturali rilevanti, presenza di interventi di ristrutturazione e morfologia del sito. Prendendo in considerazione tali aspetti è possibile ridefinire l'indice di vulnerabilità di ogni monumento modificando il valore tipologico tramite la relazione:

$$V=V_0+\sum V_k$$
 Equazione 10

In cui la sommatoria considera tutte le possibili modifiche. In questo modo l'indice di vulnerabilità può assumere valori differenti a seconda del monumento ed evidenziare delle informazioni rilevanti per alcuni di essi. I valori di tali parametri sono stati studiati a seguito dell'analisi sui dati dei danni riportati dagli edifici e sono riportati in *Tabella 1-5*.

Model parameters	Macro	oseismic	mic Mechan		nical	
Typology	$V_0$	Q	T (s)	$a_{V}(g)$	μ	
Palace	0.62	2.3	0.35	0.35	4.8	
Church	0.89	3.0	0.40	0.09	7.5	
Monastery/Convent	0.74	2.3	0.40	0.23	4.3	
Mosque	0.81	2.6	0.35	0.15	6.1	
Tower	0.78	2.0	0.70	0.13	3.4	
Obelisk	0.74	3.0	1.00	0.06	7.5	
Theatre	0.70	2.3	0.45	0.23	4.3	
Castle	0.54	2.0	0.25	0.56	4.8	
Triumphal arch	0.58	2.6	0.60	0.23	5.5	
Arch bridge	0.46	2.3	0.30	0.63	5.4	

Tabella 1-4 – Parametri per il modello macrosismico e il modello meccanico (Lagormarsino 2006)

Parameter	$V_k$
State of maintenance Quality of materials Planimetric regularity Regularity in elevation Interactions (aggregate) Retrofitting interventions Site morphology	very bad (0.08)—bad (0.04)—medium (0)—good (-0.04) bad (0.04)—medium (0)—good (-0.04) irregular (0.04)—regular (0)—symmetrical (-0.04) irregular (0.02)—regular (-0.02) corner position (0.04)—isolated (0)—included (-0.04) effective interventions (-0.08) ridge (0.08)—slope (0.04)—flat (0)

Tabella 1-5 – Valori di riferimento per la valutazione degli indici significativi di vulnerabilità (Lagormarsino 2006)

Un'analisi approfondita è stata eseguita per le chiese, dato l'elevato numero presente sul territorio nazionale e la loro propensione al danneggiamento anche con bassi livelli di sismicità. La loro vulnerabilità è attribuita alle loro proporzioni geometriche e al loro assetto strutturale, infatti, presentano pareti molto snelle, elementi spingenti quali archi e volte, assenza di orizzontamenti intermedi e particolari elementi architettonici (Casapulla 2016). Nonostante la molteplicità di elementi diversi riscontrabili al loro interno, è possibile effettuare una schematizzazione delle sue parti che risultano distintamente individuabili (torre campanaria, facciata, transetto ecc.). Le Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale allineate alle nuove Norme Tecniche per le costruzioni di cui al DM del 14 gennaio 2008 identificano tre livelli di analisi in funzione della finalità di studio. Un livello di conoscenza LV1 è caratterizzato da uno studio della vulnerabilità a scala territoriale, invece, il livello LV2 effettua analisi più dettagliate che permettono di studiare interventi di miglioramento sismico sui macro elementi, infine, un livello LV3 permette di studiare interventi di miglioramento sull'intero manufatto. Passando dal livello di conoscenza LV1 a LV3 si ha un contenuto delle informazioni crescente e sempre più dettagliato. Per un'analisi speditiva che comprende un gran numero di edifici risulta in prima approssimazione utile analizzare la vulnerabilità tramite un livello LV1. Per questo tipo di analisi è prevista la scomposizione in macro elementi che presentano una risposta strutturale autonoma rispetto alla chiesa nel suo complesso (Casapulla 2016) e le diverse tipologie di danneggiamento sono stati descritti da un certo numero di meccanismi di collasso (Figura 1-7). In particolare vengono associati 28 diversi meccanismi ai macro elementi presenti in una chiesa.

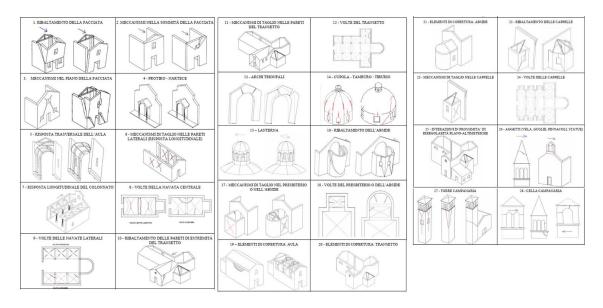


Figura 1-7 – I 28 meccanismi di collasso delle chiese per la valutazione della vulnerabilità (Direttiva Presidente del Consiglio dei Ministri 2011)

La scomposizione in elementi architettonici è presente all'interno della "scheda chiese" nella quale vengono riportati dati di rilievo del danno e della vulnerabilità con riferimento ai 28 meccanismi di collasso. La finalità della scheda è di fornire uno strumento per la verifica della sicurezza dopo un evento sismico ed effettuare una valutazione preventiva del rischio. Infatti molte schede vengono realizzate per le chiese censite presenti sul territorio nazionale con lo scopo di prevenzione, la loro elaborazione richiede un livello di conoscenza speditivo che fornisca informazioni geometriche e strutturali. La scheda si suddivide in tre parti, la prima nella quale vengono riportate informazioni generali quali la dimensione degli elementi architettonici e caratteristiche delle murature dei vari macroelementi. Nella seconda parte vengono analizzati i particolari costruttivi di ciascun macroelemento associando ad essi uno dei 28 meccanismi di collasso. Il rilievo dei particolari costruttivi ha lo scopo di studiare le soluzioni tecnologiche-costruttive, che possono contrastare l'attivazione del meccanismo di danno, e di valutare gli indicatori di vulnerabilità, che causano l'attivazione del meccanismo di danno. Infine, nella terza parte ci sono informazioni che aiutano ad una migliore comprensione della struttura come schizzi, disegni e foto. L'analisi dei dati ricavati fornisce due indici (Casapulla 2016):

• Indice di danno, "valore compreso tra 0 e 1 e quantifica il livello medio di danno subito dalla chiesa allo stato attuale (l'indice vale 1 se il livello di danno è risultato grave in tutti i meccanismi"

$$i = \frac{1}{5} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k d_k}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k}$$
 Equazione 11

Dove  $d_k$  è il livello di danno subito (da 0 a 5),  $\rho_k$  è il peso attribuito al meccanismo (vale 0 per i meccanismi che non possono attivarsi a causa della mancanza del macroelemento mentre negli altri casi  $0.5 < \rho_k < 1$ ).

• Indice di vulnerabilità, "è un numero compreso tra 0 e 1, rappresentativo della propensione della chiesa ad essere danneggiata da azioni sismiche, è pari ad 1 se la chiesa è estremamente vulnerabile".

$$i_{\nu} = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2}$$
 Equazione 12

Dove  $v_{ki}$  è il punteggio ottenuto dal rilievo degli indicatori di vulnerabilità e  $v_{kp}$  è il punteggio ottenuto dai presi antisismici.

La scheda per il rilievo del danno e della vulnerabilità delle chiese è stata utilizzata a partire dal 1995, dopo eventi di natura distruttiva che hanno colpito diverse zone del territorio nazionale. I dati raccolti hanno relazionato, tramite uno studio statistico, l'azione sismica ed il danno in funzione del parametro di vulnerabilità della singola chiesa.

In alcuni casi può essere utile effettuare degli studi sulle perdite economiche legate ai terremoti. Un metodo che consente tale analisi è definito metodo "inventory", approccio con il quale i danni previsti nelle varie categorie di strutture, a seguito di un terremoto, vengono stimati in termini di costi di riparazione (Mean Damage Factor, MDF) (Chen, Chen e Chen 2001). Questo tipo di analisi descrive la funzione di vulnerabilità come relazione tra l'intensità sismica e le perdite medie previste per una specifica tipologia di struttura. Il Mean Damage Factor viene definito come "il rapporto tra i costi di riparazione e i costi di costruzione" (Giovinazzi 2005).

Damage Factor (DF) = 
$$MDF = \frac{\text{costi di riparazione}}{\text{costi di sostituzione}}$$
 Equazione 13.

Il Mean Damage Factor di una serie di edifici simili esposti allo stesso livello di intensità di scuotimento del suolo viene definito dalla sommatoria degli MDF di ogni singolo edificio. L'onere computazionale per la definizione del damage factor risulta spesso complesso e non immediato, pertanto, il MDF può essere calcolato considerando la probabilità che un particolare stato di danno DGi, i=1,...,5, possa verificarsi ad una data intensità I, P<DGi|I. "Per ogni damage grade viene definito il Central Damage Factor che esprime la percentuale di danno." (Chen, Chen e Chen 2001).

$$MDF_{l} = \sum_{i=1}^{5} P < DG_{i} | I > CDF_{DG_{i}}$$
 Equazione 14

Dove DGi rappresenta il *damage grade*, CDF è il *Central Damage Factor* e I è l'intensità del sisma.

Damage grade	Damage ratio, %	Central damage factor, %
Grade 0: No damage	0	0
Grade 1: Negligible to slight damage	0-1	0.5
Grade 2: Moderate damage	1-20	10
Grade 3: Substantial to heavy damage	20-60	40
Grade 4: Very heavy damage	60-100	80
Grade 5: Destruction	100	100

Tabella 1-6 - Classificazione del Central Damage Factor secondo l'EMS-98 (Tyagunov, et al. 2006)

### 1.4.3 Le funzioni di fragilità

Le curve di fragilità mettono in relazione la pericolosità sismica di un sito e gli effetti del movimento del terreno previsti sull'ambiente costruito ed "esprimono relazioni tra la probabilità che una specificata classe di attività raggiunga o superi gli stati di danno predefiniti, per un range di intensità di movimento del suolo di un dato terremoto." (Pitilakis, Crowley e Kaynia 2014). Matematicamente viene espresso tramite la funzione:

$$P(DS \ge d_{s_i} | IM)$$
 per  $IM_{min} \le IM \le IM_{max}$  Equazione 15

Dove DS rappresenta lo stato di danno della classe di edifici che deve essere analizzata,  $ds_i$  è uno stato di danno predefinito e IM è il parametro utilizzato per definire il movimento del terreno. La letteratura fornisce diverse metodologie per il calcolo delle curve di fragilità che si basano sull'analisi statistica del danno subito dagli edifici, si differenziano:

- Curve di fragilità empiriche;
- Curve di fragilità fornite da esperti;
- Curve di fragilità analitiche, fornite dalla risposta di classi di edifici sottoposti ad una simulazione sismica;
- Curve di fragilità ibride, date da una combinazione delle curve sopra citate.

L'approccio empirico si basa sull'indagine dei danni che hanno subito degli edifici a seguito di un evento sismico. Le curve di fragilità ricavate con questa metodologia risultano le più attendibili, essendo basate su dati di danni realmente osservati sulle strutture. Le curve di fragilità calcolate tramite il metodo empirico si differenziano per il database di dati utilizzati, forma della

funzione per rappresentare i dati, la misura dell'intensità del movimento del terreno scelto e la tecnica di modellazione statistica usata. Il metodo analitico definisce una relazione meccanica diretta tra le caratteristiche costruttive, la risposta strutturale all'azione sismica e gli effetti dei danneggiamenti. Le curve di fragilità vengono ricavate partendo dalle analisi delle equazioni di previsioni del movimento del terreno fornite dalla GMPE, per specifiche regioni sismiche e dalla corrispondente derivazione delle mappe di pericolosità sismica in termini di ordinata spettrale rispetto all'intensità macrosismica o all'accelerazione di picco al suolo (PGA). Gli esperti, invece, forniscono una metodologia sia per ricavare le curve di fragilità che per valutare i danni statistici derivanti da esse. In questo caso le funzioni di fragilità risultano utili qualora vengano fornite informazioni empiriche sullo stato di danno di terremoti passati o qualora risulti difficile modellare gli edifici numericamente o analiticamente. Negli ultimi quarant'anni sono state pubblicate numerose curve di fragilità riferite a diverse classi di edifici. Un database è fornito dalla GEM e definisce curve di fragilità per edifici in legno, acciaio, muratura e cemento armato. Mentre il progetto SYNER-G ha realizzato un database di 415 curve di fragilità per i paesi Europei che fanno riferimento, perlopiù, ad edifici in muratura e in cemento armato. Le curve di fragilità possono essere acquisite tramite il programma SYNER-G Fragility Function Manager (FFM). Tale strumento consente di prendere visione di un elevato numero di curve di fragilità standardizzate, che possono essere utilizzate per il calcolo del rischio sismico. Per ogni funzione selezionata vengono descritte le sue principali caratteristiche, quali la classificazione tipologica, lo stato di danno, la misura dell'intensità e i parametri che descrivono la curva per ogni stato di danno e tipologia.

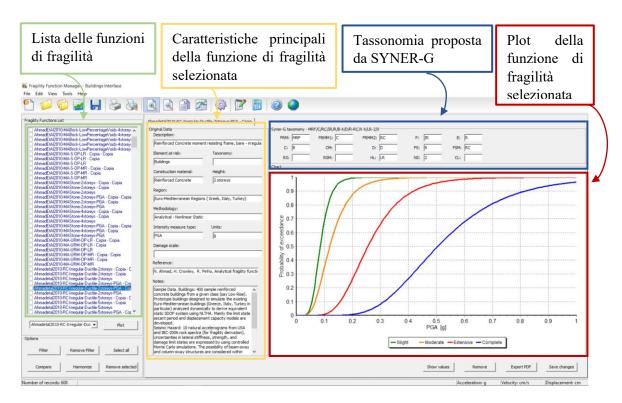


Figura 1-8 – Finestra principale dello strumento Fragility Function Manager (FFM) (Pitilakis, Crowley e Kaynia 2014)

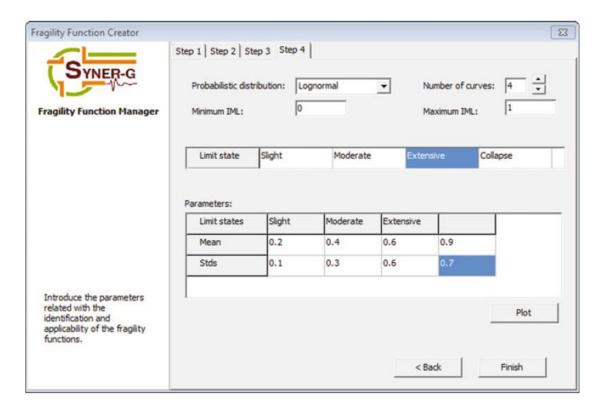


Figura 1-9 – Parametri che descrivono la curva di fragilità (Pitilakis, Crowley e Kaynia 2014)

## 1.4.4 Analisi dell'esposizione

L'analisi dell'esposizione risulta un elemento non trascurabile per la valutazione del rischio sismico. La realizzazione dell'analisi necessita dell'identificazione degli elementi antropici, quali sistemi infrastrutturali, edifici e popolazione insediata che ricadono in un ambito territoriale delineato da un'elevata pericolosità e le cui condizioni e/o il funzionamento possono essere alterati, danneggiati o distrutti da un evento sismico. L'esposizione è legata al livello di concentrazione degli elementi esposti al rischio. Il territorio italiano è caratterizzato da un alto tasso di urbanizzazione e un notevole patrimonio edilizio. Generalmente popolazione, manufatti, e beni sono distribuiti in maniera non uniforme sul territorio. Il livello di esposizione risulta tanto maggiore quanto maggiore è il livello di concentrazione degli elementi a rischio. Inoltre, l'analisi oltre ad effettuare una valutazione numerica degli elementi esposti deve valutare le funzioni esplicate dai veri elementi del sistema urbano. Di fondamentale importanza è lo studio delle strutture strategiche distribuite sul territorio, come complessi ospedalieri, sanitari, strutture della popolazione civile, caserme della forza pubblica, le quali devono gestire situazioni di emergenza per garantire soccorso e assistenza durante un evento sismico e il sistema dei trasporti che permette di valutare l'accesso alle aree colpite. È possibile effettuare diverse tipologie di analisi le quali forniscono informazioni più o meno dettagliate a seconda del livello di conoscenza che si vuole ottenere. Per una valutazione speditiva, che si basa su una vasta area è possibile individuare diverse fasi che permettono di realizzare un modello di esposizione. Prima di tutto è necessario definire un criterio di classificazione degli edifici e dei servizi, successivamente bisogna definire un inventario per stabilire il numero di strutture e sistemi appartenenti ad ogni elemento della classificazione ed infine è prevista una trattazione e memorizzazione dei dati (Giovinazzi 2005). La classificazione rappresenta un punto di fondamentale importanza in quanto assicura un'interpretazione uniforme dei dati e dei risultati. Generalmente gli edifici vengono classificati in base alla destinazione d'uso ma correlati con i modelli di vulnerabilità la classificazione dei sistemi deve permettere di raggruppare edifici con uno stesso comportamento durante l'evento sismico. Inoltre la classificazione deve tener conto dell'occupazione dell'edificio e della sua funzione sociale. Uno dei primi esempi di classificazione presente in letteratura è stato fornito da Steinbrugge (1984), utilizzato perlopiù negli Stati Uniti, il quale ha studiato una classificazione basta sul tipo di sistema strutturale, i materiali da costruzione e le prestazioni fornite a seguito di un evento sismico. Ulteriori classificazioni vengono fornite dal HAZUS e dall' EMS98. Per quanto concerne la classificazione occupazionale del sistema è possibile effettuare una distinzione in base alla destinazione d'uso differenziando il livello occupazionale per edifici residenziali, commerciali, culturali, monumentali ecc. La realizzazione di un inventario richiede elevate risorse in termini di costi e tempo. Tramite lo strumento di informazione georeferenziato (GIS) è possibile analizzare e gestire le informazioni richieste nel modello di esposizione.

## 2 Software utilizzati

## 2.1 OpenQuake: software per l'analisi del rischio sismico

OpenQuake è un software open-source, creato dalla GEM (Global Earthquake Model), utilizzato per la valutazione della pericolosità e del rischio sismico. La GEM, nasce con l'obiettivo di unire scienziati ed organizzazioni regionali, nazionali e internazionali al fine di definire standard uniformi che permettano di calcolare e condividere i risultati e le analisi legati ad eventi sismici in tutto il mondo. (Silva, Crowley, et al. 24 Febbraio 2013). La creazione di OpenQuake engine permette un pieno accesso in modo tale che i risultati abbiano una validità e un'accuratezza sempre migliore e che possa essere ritenuta affidabile da chi utilizza la piattaforma. L'idea del progetto nasce nel 2009, i suoi requisiti vengono definiti attraverso una prima fase di studio di software esistenti che analizzano il rischio sismico e che consentono la definizione dei requisiti scientifici e IT (Information Technology) iniziali. Le funzioni fornite dai diversi software differiscono perlopiù per le tipologie di sorgenti sismogenetiche e per la metodologia adottata per modellare la distribuzione nello spazio e nel tempo delle rotture dei terremoti (Pagani, Monelli, et al. 2014). La prima versione viene rilasciata nel 2013, è basata sul linguaggio di programmazione Python che avendo una licenza open-source presenta un vasto insieme di biblioteche scientifiche e numeriche. Il punto chiave del progetto è la creazione di una raccolta armonizzata e comunitaria di modelli del rischio sismico, questo avviene solo se i modelli di input della PSHA possono essere rappresentati usando schemi standardizzati (Pagani, Monelli, et al. 2014). La mancanza di dati omogenei per la descrizione delle zone sismogenetiche e l'incertezza ad essa associata, comporta un limite nel calcolo del modello di input per il rischio sismico, ciò mostra come i risultati siano funzione del modello di pericolo e non del software utilizzato. Pertanto, per poter definire accuratamente le informazioni, la piattaforma OpenQuake permette di scindere i dati dagli algoritmi, dividendo le informazioni in entrata e in uscita tramite uno schema XML personalizzato definito Natural hazard Risk Markup Lingua (NRML). Il software, infatti, consente agli utenti di utilizzare i propri dati di input come ad esempio i modelli di fragilità, di vulnerabilità e di esposizione, il proprio rischio sismico ecc. Inoltre esso è in grado di modellare l'incertezza epistemica e le variabili aleatorie tramite un albero logico (Logic tree), ciò permette al software di eseguire analisi di pericolosità e di rischio sismico basandosi su scenari ed eventi probabilistici. Il software permette di effettuare sei calcolatori di rischio, due che permettono di stimare le perdite e la distribuzione dei danni a causa di un singolo evento, altre tre che si concentrano sulle perdite a seguito di un'analisi simica probabilistica e l'ultimo che valuta le perdite probabilistiche per valutare se gli interventi di ristrutturazione sarebbero economicamente redditizi (Silva e Horspool 2019). OpenQuake fornisce una banca dati molto ampia accessibile tramite la piattaforma online, al suo interno infatti sono condivisi i dati relativi alla pericolosità e al rischio sismico, set di eventi stocastici, campi di movimento del terreno, curve e mappe di pericolosità, grafici di disaggregazione e altri dati utili per poter sviluppare l'analisi richiesta dall'utente. Per la creazione del database sono stati analizzati molteplici testi presenti in letteratura riguardanti curve di capacità, funzioni di fragilità, di vulnerabilità e di danno (Yepes-Estrada,

Silva e Crowley 2014). Tali funzioni/curve hanno lo scopo comune di definire le prestazioni di un particolare bene come ad esempio un edificio o le prestazioni di una tipologia di bene come un insieme di edifici con stesse caratteristiche, soggetti all'azione sismica. È possibile effettuare le analisi utilizzando le funzioni presenti nel database o caricarne proprie. Le analisi vengono eseguiti tramite la console OQ-Engine dopo aver preparato i modelli di input necessari realizzati tramite OQ-Tools.

# 2.1.1 Tipologie di analisi per la valutazione della pericolosità e del rischio sismico

La piattaforma OpenQuake permette di valutare la pericolosità e il rischio tramite diverse analisi che si basano su dati di input differenti. Per quanto concerne la valutazione della pericolosità, il software utilizza tre tipologie di analisi:

• Classical Probabilistic Seismic Hazard Analysis, questo tipo di analisi "permette di calcolare le mappe e le curve di pericolosità tramite la classica procedura di integrazione formulata da (Field, Jordan e C.A. 2003)" (GEM 2019). I dati di input schematizzati in Figura 2-1, consistono in un modello di input PSHA il quale definisce un sistema di sorgenti sismiche e l'incertezza epistemica ad essi associata e un sistema GMPEs che rappresenta l'insieme delle equazioni di previsione del movimento del suolo richieste per la modellazione di scuotimento del terreno. Tali dati vengono processati con l'utilizzo del logic tree che permette di estrarre un modello di sorgenti sismiche e una serie GMPEs, uno per ogni tipo di regione tettonica definito nel modello sorgente, da utilizzare per il calcolo. Il modello della sorgente sismica è un dato di input per il calcolo della previsione di rottura del terremoto, il quale permette di raccogliere le rotture per un'associata probabilità di occorrenza in un intervallo di tempo definito. L'insieme dei modelli di rottura e il modello GMPEs forniscono dati di input per valutare le curve di pericolosità. (Pagani, Weatherill, et al. 2012)

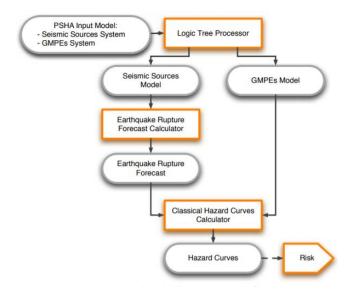


Figura 2-1- Schema di lavoro della "Classical Probabilistic Seismic Hazard Analysis"

• Event-Based Probabilistic Seismic Hazard Analysis, "consente di calcolare i movimenti del suolo considerando una serie di eventi stocastici" (GEM 2019), i dati di input per questo tipo di analisi è mostrato in Figura 2-2. I dati iniziali e i primi passi sono gli stessi effettuati nella Classical Probabilistic Seismic Hazard Analysis, dopo aver effettuato la previsione dei modelli di rottura esso risulta un dato di input per valutare la serie di eventi stocastici che campionano ogni rottura in base alla probabilità di occorrenza. Ogni evento viene poi utilizzato per calcolare un campo di movimento del terreno sui siti di interesse. Ognuno di essi è riportato nella distribuzione di movimento del terreno previsti dalla GMPEs (Pagani, Weatherill, et al. 2012)

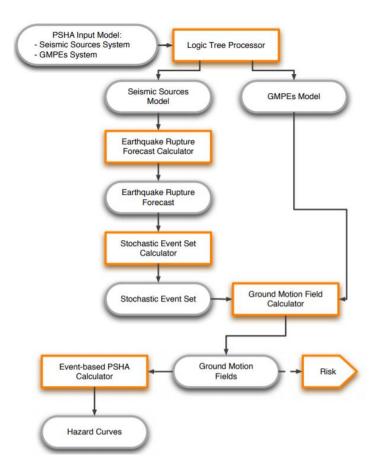


Figura 2-2- Schema di lavoro del "Event-Based Probabilistic Seismic Hazard Analysis" (Pagani, Weatherill, et al. 2012).

• Scenario based Seismic Hazard Analysis, "permette il calcolo del movimento del suolo per un singolo scenario di rottura, tenendo in considerazione le variabili aleatorie riferite al movimento del terreno" (GEM 2019). Tale modello accetta come input un modello di scenario di rottura, costituito da un solo modello di rottura definito tramite la geometria e la magnitudo, e un solo GMPE.

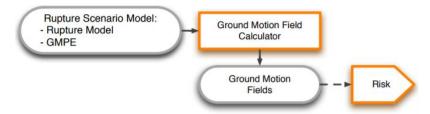


Figura 2-3- Schema di lavoro dello "Scenario based Seismic Hazard Analysis" (Pagani, Weatherill, et al. 2012).

Per la valutazione del rischio, come si evince dagli schemi presenti in *Figura 2-1,Figura 2-2,Figura 2-3*, i file di input da definire si basano sui modelli relativi al movimento del terreno calcolati con l'analisi di pericolosità. Le analisi che permettono di valutare il rischio sono riportate di seguito:

• Scenario Damage Assessment, "permette di calcolare la distribuzione statistica del danno per tutti gli elementi presenti all'interno del modello di esposizione per un singolo scenario di rottura considerando le variabili epistemiche ed aleatorie del movimento del terreno" (GEM 2019). Lo scenario di distribuzione del danno viene calcolato per ogni edificio e per ogni stato di danno tramite l'ausilio del modello di fragilità. La percentuale di danno di un edificio per ogni stato di danno viene calcolata basandosi sulla differenza della probabilità di eccedenza tra le curve consecutive di stato limite per un dato livello di intensità. Questo processo viene ripetuto per ogni campo di movimento del terreno in modo da ottenere una frazione per ogni stato di danno e per ogni edificio. Per ogni frazione e per ogni edificio l'output associa la media e la deviazione standard, moltiplicando il numero o l'area dell'edificio tramite la rispettiva frazione di ottiene la distribuzione di danno di ogni edificio. (Silva, Crowley, et al. 24 Febbraio 2013)

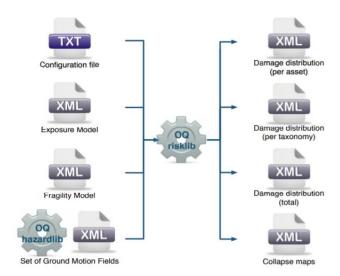


Figura 2-4 – Dati Input/Output Scenario Damage Assessment

• Scenario Risk Assessment, "permette di calcolare statisticamente le perdite economiche da un singolo scenario di rottura, tenendo conto della variabilità epistemica di movimento del suolo" (GEM 2019). Le perdite statistiche includono la media e la deviazione standard per ogni tipo di perdita considerata nell'analisi. Le perdite possono essere valutate per i componenti strutturali, non strutturali, in termini di tempo, contenuti e considerando l'occupazione. Questa tipologia di analisi prevede in input la definizione del modello di vulnerabilità, di esposizione e un modello di rottura. Gli output generati forniscono le mappe delle perdite e le perdite statistiche.

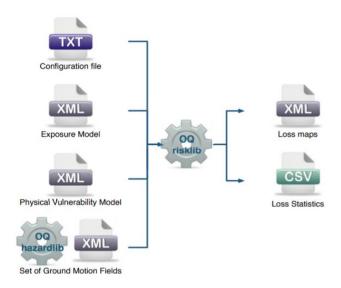


Figura 2-5 -Dati Input/Output Scenario Risk Assessment

• Classical Probabilistic Seismic Damage Analysis, "calcola la probabilità che si verifichi un certo stato di danno per un dato periodo di tempo e le mappe di probabilità di collasso partendo dalle curve di pericolosità valutate seguendo la procedura classica di integrazione formulata da (Field, Jordan e C.A. 2003)" (GEM 2019). La distribuzione dei danni si ottiene integrando le funzioni di fragilità con la curva di pericolosità di un determinato bene. Prevede la definizione di un modello di esposizione, uno di fragilità con una funzione di fragilità per ogni tassonomia presente nel modello di esposizione e delle curve di pericolosità valutate per l'area di interesse.

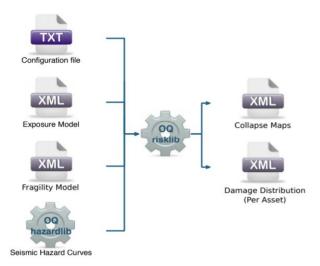


Figura 2-6 – Classical Probabilistic Seismic Damage Analysis

• Classical Probabilistic Seismic Risk Analysis, "valuta le mappe e le curve di perdita partendo dalle curve di pericolosità valutate seguendo la procedura classica di integrazione formulata da (Field, Jordan e C.A. 2003)" (GEM 2019). La procedura di integrazione numerica fornisce la distribuzione delle perdite attraverso la convoluzione delle funzioni di vulnerabilità probabilistiche per un dato bene con le curve di rischio sismico nell'area dove si trova il bene in esame. Pertanto, è necessario definire un modello di esposizione, un modello di vulnerabilità e le curve del rischio sismico per l'area di interesse. I dati di input possono essere generati in riferimento alle perdite di tipo strutturale, non strutturale, dovute all'inattività, di contenuto e agli occupanti.

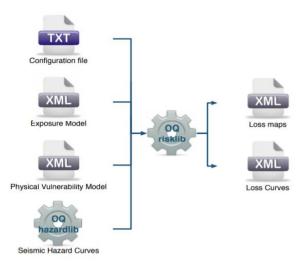


Figura 2-7 - Dati Input/Output Classical Probabilistic Seismic Risk Analysis

• Stochastic Event Based Probabilistic Seismic Risk Analysis, "utilizzato per il calcolo delle mappe e delle curve di perdita partendo da un set di eventi stocastici." (GEM 2019). Questo tipo di analisi utilizza un approccio basato sul metodo Monte-Carlo, utilizzando un metodo probabilistico per la valutazione del rischio che permette di stimare la

distribuzione delle perdite o per un singolo bene o per un aggregato. Come dati di input vengono utilizzati il modello di esposizione, di vulnerabilità valutato tramite le funzioni di vulnerabilità per ogni tipo di perdita e per ogni tassonomia presente nel modello di esposizione, e un set di eventi stocastici rappresentativo della sismicità dell'area in esame per uno specificato periodo. Anche in questa metodologia le mappe e le curve delle perdite possono essere valutate per diversi tipi di perdite, quelle strutturali, non strutturali, dovute all'inattività, di contenuto e agli occupanti.

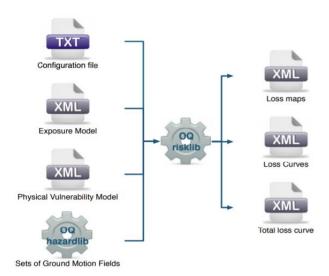


Figura 2-8 - Dati Input/Output Stochastic Event Based Probabilistic Seismic Risk Analysis

• Retrofit Benefit-Cost Ratio Analysis, "utile come strumento decisionale per stimare il valore di eventuali misure di rafforzamento o ristrutturazione su edifici esistenti e valutarne la fattibilità". (GEM 2019).

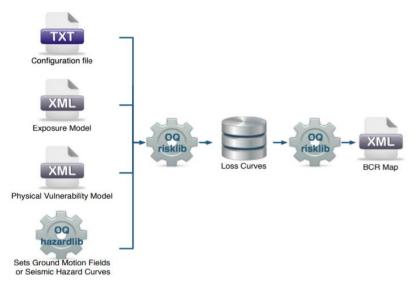


Figura 2-9 - Retrofit Benefit-Cost Ratio Analysis

# 2.1.2 I modelli di Input per l'analisi della pericolosità

Come definito al paragrafo 2.1.1 la determinazione dei file di output prevede a monte la valutazione di elementi di input che possono essere generati tramite l'ausilio della piattaforma online di OpenQuake. Si descrivono di seguito i file necessari per l'analisi.

#### Seismic Source Model

Il Seismic Source Model rappresenta insieme al Seismic Source Logic Tree il Seismic Source System, fornisce informazioni in merito alla geometria, il luogo e l'attività degli eventi sismici descritti tramite distribuzione di frequenza e magnitudo. La definizione del modello della sorgente sismica è diversa a seconda del contesto tettonico. OpenQuake engine supporta cinque tipologie di sorgenti sismogenetiche: punto, area, faglia semplice, faglia complessa, faglia caratteristica. L'evento sismico rappresentato come punto o come un'area viene utilizzato in una modellazione di distribuzione di sismicità che non comprende strutture di faglia attive ma nel primo caso considera una singola superficie e nel secondo una regione geografica più ampia. La faglia semplice e quella complessa permettono di modellare la sismicità che comprende strutture di faglia attive considerando diversi livelli di complessità nella geometria della faglia. In entrambi i casi la sismicità viene distribuita in modo uniforme lungo la superficie di faglia, con la restrizione che non può estendersi al di fuori della superficie definita. Infine la faglia caratteristica è un tipo di faglia creata con l'assunzione per cui la sua rottura ricopra l'intera superficie di rottura (Pagani, Monelli, et al. 2014).

### Logic Tree Model

Ogni modello di pericolosità comprende intrinsecamente una caratterizzazione delle incertezze epistemiche, attuabile con l'ausilio di un logic tree. OpenQuake engine presenta un framework dove è possibile inserire i dati necessari alla realizzazione della struttura ad albero. Per la definizione della pericolosità sismica è necessario definire due tipologie di Logic Tree Model, uno per la sorgente sismica e uno per il movimento del terreno. Nel primo caso esso deve contenere almeno un livello di ramificazione che è quello utilizzato per definire il modello di input della sorgente sismica iniziale. È possibile inserire livelli di ramificazione opzionali che modificano i parametri della sorgente infatti il modello ad albero prende in considerazione le incertezze epistemiche relative alla geometria, la posizione e le proprietà degli eventi sismici in grado di generare un movimento del terreno nel sito oggetto d'esame. Nel secondo caso il modello valuta le incertezze epistemiche relative al movimento del terreno, in particolare considera una lista di equazioni per ogni regione tettonica e che caratterizzano le fonti nel modello di input della pericolosità (GEM 2019).

Il "Logic Tree Model" Figura 2-10 – Struttura del "Logic Tree *Model*" (Figura 2-10), presenta tre componenti principali:

• Individual branch (ramo individuale), il singolo elemento all'interno dell'albero fornisce un'interpretazione dei valori assegnati per uno specifico tipo di incertezza e viene descritto tramite un parametro o un peso.

- Branch set (set di rami), identifica un insieme di "individual branch", la somma del peso dell'insieme dei singoli rami deve essere pari ad uno. Il suo obbiettivo è quello di fornire le alternative interpretative di un modello. Ogni set viene caratterizzato tramite un ID ed un'incertezza. Il set di incertezze può essere utilizzato per l'intero modello o solo per un sottoinsieme.
- Branching level (livello di ramificazione), identifica la posizione delle successive ramificazioni all'interno dell'"albero", ha lo scopo di mantenere una logica e un ordine all'interno della struttura e non modella le incertezze.

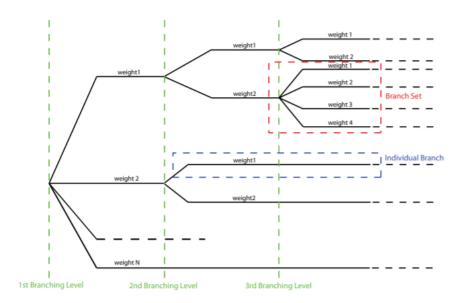


Figura 2-10 – Struttura del "Logic Tree Model" (Pagani, Weatherill, et al. 2012)

Nello schema NRML, la struttura ad albero viene definita tramite una sequenza dei suoi componenti. La posizione nella sequenza specifica il livello dell'albero dove è localizzato il livello di ramificazione.

Figura 2-11- Schema NRML per la definizione del Logic Tree

#### Il modello di movimento del terreno

Il modello di movimento del terreno viene definito tramite delle equazioni empiriche chiamate GMPEs, Ground Motion Pedict Equations. Tali equazioni vengono utilizzate sia per l'analisi probabilistica che per quella deterministica. Il progetto GMPEs è stato implementato dalla GEM, che ha selezionato un set di equazioni che possono essere utilizzate nel calcolo del rischio sia al livello globale che regionale e associargli studi di valutazione delle perdite. (Di Alessandro, et al. 2012). In particolare il software OpenQuake, tramite il modello seismic source individua i parametri che caratterizzano il sito, la distanza e il tipo di rottura e che appartengono alle diverse regioni tettoniche e seleziona automaticamente dal modello ground motion l'equazione associata a quella particolare regione tettonica.

## 2.1.3 I modelli di Input per l'analisi del rischio

Un'analisi del rischio sismico comporta, come definito al paragrafo 2.1.1, la generazione di diversi modelli. Distinguiamo il modello di esposizione, il modello di fragilità e il modello di vulnerabilità. È possibile generare i modelli tramite la piattaforma online di OpenQuake e in particolare con l'utilizzo del Risk Input Preparation Toolkit è possibile generare il file nel linguaggio NRML.

### Il modello di esposizione

Il modello di esposizione contiene informazioni di diverso livello di dettaglio inerenti alle caratteristiche degli edifici presenti nell'area oggetto di analisi. La prima parte del file contiene una sezione di metadati comune a tutti gli edifici presenti nel modello. Ci sono diversi parametri che compongono la sezione dei metadati che forniscono informazioni generali, alcuni di questi parametri sono vincolanti e devono essere obbligatoriamente specificati nel modello. Nel dettaglio i metadati vengono descritti tramite:

- *Id*, dato obbligatorio che viene usato per identificare il bene all'interno del modello;
- Category, parametro opzionale usato per definire la tipologia di bene;
- *TaxonomySource*, parametro opzionale usato per definire il tipo di taxonomy che classica il bene;
- Description, parametro obbligatorio che contiene informazioni riguardanti il modello di esposizione.

Successivamente vengono descritti per ogni singolo edificio, che rientra nell'area da analizzare, i diversi attributi che lo caratterizzano:

- *Id*, attributo obbligatorio che identifica il bene, viene utilizzato da OpenQuake per associare ogni bene al proprio risultato;
- *Taxonomy*, attributo obbligatorio che specifica la tipologia di edificio, essa può essere definita dall'utente o tramite uno schema fornito dalla GEM o da altri enti di ricerca.

- *Number*, definisce il numero di unità strutturali presenti in un edificio. È un parametro obbligatorio per il calcolo del danno mentre per l'analisi del rischio deve essere definito se l'area o i costi vengono definiti per singola unità abitativa.
- *Area*, rappresenta l'area del bene ed è un dato obbligatorio solo se uno dei costi è definito per unità di area.
- *Location*, attributo obbligatorio che fornisce la latitudine e la longitudine di un edificio, entrambi definiti in gradi decimali.
- *Costs*, definisce il costo di riparazione per il singolo edificio dopo un evento sismico. È necessario specificare il tipo di costo e il valore distinguendo nel primo caso tra i costi strutturali, non strutturali di riparazione o di business interruption mentre nel secondo caso viene indicato se il tipo di costo è riferito ad un aggregato (aggregated), ad un singolo bene (per asset) o ad un'area (per area).
- Occupancies, dato obbligatorio solamente per il calcolo dello scenario del rischio o per la valutazione probabilistica del rischio. Permette di definire il numero di persone che potrebbero essere all'interno dell'edificio durante i periodi della giornata.

### Il modello di fragilità

La fragilità viene definita come la probabilità di eccedenza di un set di stati limite per prefissati livelli di intensità. Un modello di fragilità può essere definito tramite un approccio discreto (Figura 2-13), nel quale per prefissati livelli di intensità viene fornita una lista di probabilità di eccedenza per ogni stato limite, oppure modellando ogni curva di stato limite come una funzione di distribuzione log-normale tramite la media e la deviazione standard. (Silva, Crowley, et al. 24 Febbraio 2013). Le funzioni di fragilità devono essere definite per ogni tipo di edificio presente nel modello di esposizione.

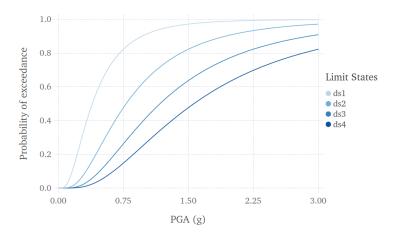


Figura 2-12 – Rappresentazione del modello di fragilità di tipo continuo (GEM 2019)

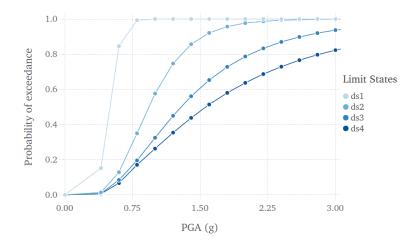


Figura 2-13 - Rappresentazione del modello di fragilità di tipo discreto (GEM 2019)

Per poter definire il modello è necessario fornire delle informazioni che sono comuni a tutte le funzioni, nel dettaglio:

- Id, campo obbligatorio che consente di individuare il modello di fragilità;
- assetCategory, campo opzionale che specifica la tipologia di bene per ogni funzione di fragilità definita nel file;
- *lossCategory*, campo obbligatorio che definisce la categoria a cui deve far riferimento la perdita e si differenzia in strutturale, non strutturale, riparazione o business interruption;
- Description, campo obbligatorio che riporta informazioni sul modello;
- *limitStates*, campo obbligatorio utilizzato per definire il limite e la nomenclatura di ogni stato limite.

Per poter generare il modello di fragilità, definiti i metadati è necessario inserire gli attributi per ogni tipologia di edificio. Tali dati variano a seconda del tipo di approccio che si usa per definire il modello. Nel caso dell'utilizzo di funzioni discrete i campi da definire risultano:

- *id*, campo necessario per identificare la tassonomia alla quale è riferita la funzione;
- format, nel caso di funzioni discrete deve essere riportata la dicitura "discrete";
- *imls*, definisce la lista dei livelli di intensità per i quali le probabilità di eccedenza degli stati limite devono essere definiti;
- *imt*, definisce il tipo di misura dell'intensità;
- poes, definisce la probabilità di eccedenza per ogni stato limite per ogni funzione di fragilità.

Nel caso si utilizzino funzioni di distribuzione log-normale i campi da definire risultano:

• format, nel caso di funzioni continue deve essere riportata la dicitura "continuous";

- *shape*, nel caso di funzioni continue deve essere riportata la dicitura "*logncdf*";
- imls, definisce la misura dell'intensità usata nelle funzioni di fragilità;
- Params, tale campo viene usato per definire i parametri della curva continua per ogni stato limite per la funzione di fragilità. I parametri richiesti per definire la curva sono la media e la deviazione standard riferiti al livello di intensità.

#### Il modello di vulnerabilità

Definire una funzione di vulnerabilità richiede la determinazione della perdita economica per un dato livello di intensità. La distribuzione del rapporto di perdita può essere definita tramite una funzione di vulnerabilità continua o discreta e il modello di vulnerabilità può contenere entrambe le tipologie di funzione. Le funzioni di vulnerabilità discrete (Figura 2-14) vengono usate per modellare direttamente le perdite dopo un evento sismico. Le perdite vengono definite come il rapporto tra i costi di riparazione e i costi di sostituzione per una data categoria di edificio. Le incertezze per ogni rapporto vengono considerate tramite un coefficiente di variazione e modellate tramite una distribuzione log-normale o di tipo beta (Figura 2-15).

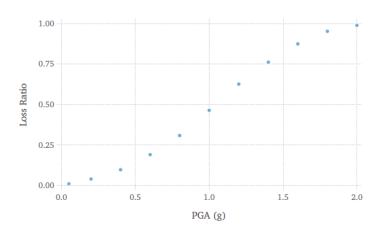


Figura 2-14 – Rappresentazione grafica del modello di vulnerabilità (GEM 2019).

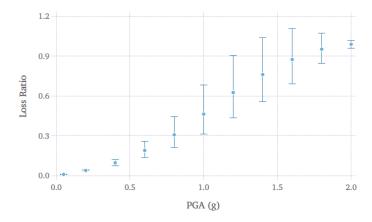


Figura 2-15 – Rappresentazione grafica della modellazione delle incertezze nella funzione di vulnerabilità (GEM 2019).

Il file contiene inizialmente delle informazioni generali che sono comuni a tutte le funzioni di vulnerabilità riportate nel modello. Nel dettaglio:

- id, campo obbligatorio che consente di individuare il modello di vulnerabilità;
- assetCategory, campo opzionale che specifica la tipologia di bene per ogni funzione di vulnerabilità definita nel file;
- *lossCategory*, campo obbligatorio che definisce la categoria a cui deve far riferimento la perdita e si differenzia in strutturale, non strutturale, riparazione o business interuption;
- description, campo obbligatorio che riporta informazioni sul modello.

Le funzioni di vulnerabilità che utilizzano una distribuzione continua per modellare le incertezze nel rapporto di perdite vengono definite tramite i seguenti attributi:

- *id*, campo necessario per identificare la tassonomia alla quale è riferita la funzione;
- *dist*, campo all'interno di cui deve essere riportata la dicitura "*LN*" se viene utilizzata una distribuzione log-normale o la dicitura "*BT*" nel caso di distribuzione beta;
- *imls*, tale attributo definisce la lista dei livelli di intensità usata nelle funzioni di vulnerabilità;
- *meanLRs*, campo usato per definire la media del rapporto di perdita per ogni livello di intensità di ogni funzione di vulnerabilità.
- *covLRs*, campo usato per definire il coefficiente di variazione (covarianza) del rapporto di perdita per ogni livello di intensità di ogni funzione di vulnerabilità.

Le funzioni di vulnerabilità che utilizzano una distribuzione di probabilità discreta per modellare le incertezze nel rapporto di perdite vengono definite tramite i seguenti attributi:

- *id*, campo necessario per identificare la tassonomia alla quale è riferita la funzione;
- *dist*, campo all'interno di cui deve essere riportata la dicitura "PM";

- *imls*, tale attributo definisce la lista dei livelli di intensità usata nelle funzioni di vulnerabilità;
- probabilities, campo utilizzato per definire la probabilità di osservare una particolare rapporto di perdita in base al set di livelli di intensità specificati per ogni funzione di vulnerabilità.

# 2.2 GIS il sistema di informazione geografica per la rappresentazione e simulazione del rischio sismico

Il GIS (Geographic Information System) è un sistema informativo georeferenziato costituito da un insieme di strumenti informatici che consentono di raccogliere, memorizzare, gestire e distribuire le informazioni utili per la gestione e l'organizzazione del territorio. Un sistema GIS è composto da una base cartografica in formato raster o vettoriale, una banca dati definita database, un sistema software che permette di gestire i dati e un insieme di strumenti hardware. Esso permette di descrivere gli oggetti in termini di posizione rispetto ad un sistema di riferimento noto, di definire attributi che descrivono le caratteristiche dell'oggetto e di descrivere relazioni spaziali con altri oggetti. Lo sviluppo tecnologico in campo informatico ha mutato e migliorato le tecniche di rilievo metrico fornendo uno strumento di conoscenza che permette di rispondere ad esigenze differenti a seconda del campo di applicazione e a seconda della scala di rappresentazione che può diversificarsi da una scala territoriale, ad una scala urbana fino ad arrivare ad un livello di dettaglio che riguarda il singolo edificio. L'informazione geospaziale messa in relazione con informazioni che coinvolgono le analisi di pericolosità, di vulnerabilità e di esposizione rappresenta un metodo di conoscenza della consistenza e dello stato di conservazione del costruito su tutto il territorio nazionale. Rappresenta quindi lo strumento ideale per sviluppare un'analisi multidisciplinare come quella del rischio sismico. L'analisi del rischio sviluppata tramite il sistema informativo georeferenziato richiede la conoscenza di dati territoriali, dati sulle strutture e informazioni sulle attività sismiche che possono interessare l'area. Tramite l'assimilazione dei dati il software può prevedere e rappresentare uno scenario di danno sia per le strutture che per le infrastrutture. Inoltre può essere utilizzato come strumento in fase di emergenza in quanto permette un rapido aggiornamento delle informazioni e può produrre in breve periodi i nuovi dati come ad esempio identificare le aree più colpite e come esse possono essere raggiunte. Ciò è particolarmente utile quando si verificano eventi improvvisi come i terremoti e il tempo di risposta diventa cruciale per la salvaguardia delle vite umane. (Bozzoni e Lai 2012).

# 2.3 Matlab Toolbox: il metodo di inferenza fuzzy

La logica fuzzy è una logica polivalente, formulata dal Dr. Lotfi Zadeh nel 1965, il suo scopo è quello di fornire una metodologia che permetta un passaggio dalla forma linguistica alla forma ingegneristica, gestendo una molteplicità di informazioni e le incertezze ad esse associate. La logica fuzzy è distinta dalla probabilità, in quanto la prima misura l'ambiguità di un avvenimento mentre la seconda misura la possibilità che un evento futuro avvenga. Tale metodo viene applicato tramite l'utilizzo di insiemi fuzzy (insiemi sfocati), definiti tali in quanto le variabili possono acquisire qualsiasi valore nell'intervallo [0,1] in base ad un grado di appartenenza dell'elemento all'insieme, infatti la logica non effettua una distinzione netta tra gli elementi appartenenti o meno ad un insieme ma considera un passaggio graduale tra queste due categorie. Il concetto di insieme fuzzy, introducendo il grado di appartenenza, estende il concetto di insieme crisp che, invece, presenta una funzione di appartenenza booleana in cui le variabili assumono solamente valori di vero e falso. Nel linguaggio della logica fuzzy i valori linguistici possono assumere diverse sfumature ad esempio, "vero", "parzialmente vero", "parzialmente falso", "falso". In termini matematici (Castellano 2010):

$$\mu_{A}: Z \rightarrow [0,1]$$

"Dato un dominio Z, con z generico elemento di Z, l'insieme fuzzy A in Z è caratterizzato da una funzione di appartenenza (membership)  $\mu_A(z)$  che associa ad ogni elemento di Z un numero reale nell'intervallo [0,1].  $\mu_A(z)$  rappresenta il grado di appartenenza di z in A, per  $\mu_A(z)=1$ , z appartiene sicuramente ad A, per  $\mu_A(z)=0$ , z non appartiene ad A, per  $0<\mu_A(z)<1$ , z appartiene parzialmente ad A, con un grado di appartenenza indicato da  $\mu_A(z)$ ".

La funzione di appartenenza  $\mu_A(z)$  può assumere diverse forme, tra le più comuni troviamo la triangolare e la trapezoidale. La forma triangolare è espressa tipicamente da A=  $(a_1, a_M, a_2)$ .

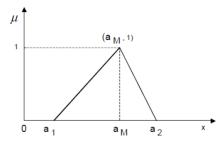


Figura 2-16 – Numero fuzzy triangolare generico (Rossi 2014)

$$A(x) = \begin{cases} \left(\frac{x - a_1}{a_M - a_1}\right) & per \ a_1 \le x \le a_M \\ \left(\frac{x - a_2}{a_M - a_2}\right) & per \ a_M \le x \le a_2 \\ 0 & altrimenti \end{cases}$$

Mentre un numero trapezoidale viene tipicamente espresso da  $A=(a_1, b_1, b_2, a_2)$ .

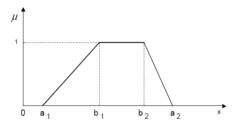


Figura 2-17 - Numero fuzzy trapezoidale generico (Rossi 2014)

$$A(x) = \begin{cases} \left(\frac{x-a_1}{b_1-a_1}\right) & per \ a_1 \leq x \leq b_1 \\ 1 & per \ b_1 \leq x \leq b_2 \\ \left(\frac{x-a_2}{b_2-a_2}\right) & per \ b_2 \leq x \leq a_2 \\ 0 & altrimenti \end{cases}$$

Gli insiemi fuzzy, come definito precedentemente, analizzano dei dati sulla base di modelli linguistici, e vengono usati per trattare l'incertezza e per rappresentare la conoscenza mediante opportune regole (Mamdani e Sedrak 1975). Le regole fuzzy permettono di relazionare la descrizione, in termini linguistici, di una premessa con una conclusione. Una regola è scritta come:

If premessa (o antecedente) Then conclusione (conseguente).

Per poter definire le regole, è necessario, a monte, definire le diverse funzioni di appartenenza e di conseguenza i corrispondenti di complemento, intersezione e unione della teoria degli insiemi, nella teoria degli insiemi fuzzy. Con i corrispondenti di intersezione e unione si ottengono alcuni degli operatori logici che permettono di costruire le regole (Rizzo 2015). In particolare gli operatori sono:

- *AND*, "operatore di congiunzione";
- OR, "operatore di disgiunzione";
- IS, "operatore tale che la relazione x is A è quantificata dal grado di appartenenza di x al fuzzy set".

Uno dei modelli linguistici maggiormente utilizzato e che permette di descrivere delle regole di inferenza fuzzy è il modello Mamdani, il quale si basa sulle classiche regole di inferenza fuzzy fra antecedente e conseguente, ambedue descritti con dei fuzzy sets che rappresentano dei concetti linguistici (IF [antecedente] THEN [conseguente]) (Bonarini 2003). In particolare la conclusione (conseguente) è un fuzzy set e la regola viene descritta come:

IF 
$$x_1$$
 is  $A_1^i$  AND  $x_2$  is  $A_2^i$  ...AND  $x_p$  is  $A_p^i$  THEN  $y_1$  is  $C_1^i$  AND ...  $y_q$  is  $Cq^i$ 

Dove  $A^i_j$  e  $C^i_j$  sono insiemi fuzzy che definiscono gli universi del discorso, rispettivamente, degli input e degli output. In definitiva la logica fuzzy definisce i meccanismi inferenziali con cui arrivare alla conclusione costruendo un sistema di inferenza (Fuzzy Inference System FIS).

Lo strumento di programmazione MATLAB tramite la toolbox "Fuzzy Logic" permette di creare ed editare Sistemi di Inferenza Fuzzy (FIS). In particolare, permette di modellare il comportamento di sistemi complessi usando semplici regole logiche implementandole all'interno del sistema di inferenza. Le funzioni di appartenenza, le regole possono essere costruite utilizzando i comandi editors e viewers all'interno della toolbox di Matlab, evidenziati in rosso in figura 2.18. In particolare è possibile utilizzare i comandi:

- FIS Editor, il quale definisce le informazioni generali del sistema di inferenza;
- *Membership Function Editor*, che mostra e definisce le funzioni di appartenenza associate alle variabili di input e output del FIS;
- Rule Editor, permette di realizzare e visualizzare le regole fuzzy;
- Rule Viewer, mostra il comportamento dettagliato del FIS per poter valutare il comportamento di una regola specifica o per studiare l'effetto della variazione di una variabile di input;
- *Surface Viewer*, genera una superficie 3-D descrivendo due variabili di input e l'output di un FIS.

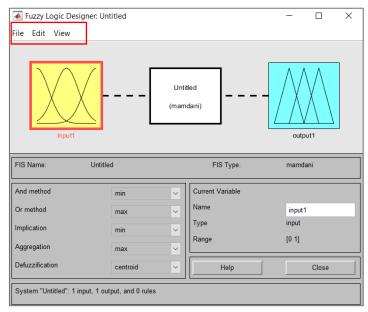


Figura 2-18 - Interfaccia fuzzy Logic Designer di Matlab

La metodologia fuzzy prevede diversi campi di applicazione nel settore scientifico in quanto consente di descrivere tramite variabili linguistiche delle regole matematiche. Nel seguente studio risulta uno strumento utile alla valutazione del rischio sismico dei sistemi viari in quanto fornisce una metodologia che permette di valutare la percentuale di occupazione stradale in seguito ad un crollo di un edificio, valutando e relazionando le diverse variabili che entrano in gioco durante un evento sismico.

# 3 Caso Studio: Il Centro Storico di Moncalieri

Per valutare l'importanza della valutazione del rischio sismico di un'area è importante effettuare l'applicazione ad un caso studio in modo da definire l'affidabilità o meno dei risultati. Nel presente lavoro è stato analizzato il comune di Moncalieri, situato in Piemonte, che nonostante rappresenti una zona a bassa sismicità consente di reperire in modo rapido le informazioni inerenti agli edifici soprattutto per evidenziare le differenze che presentano, ai giorni d'oggi, i database disponibili alla consultazione. Nei seguenti paragrafi viene riportato un excursus temporale dello sviluppo della città che permette di evidenziare le variazioni del costruito storico. Tali elementi possono essere dei punti di partenza per valutare un database informativo attendibile, elemento che molto spesso risulta assente. Infatti, il comune di Moncalieri presenta una base dati fortemente disomogenea che ha portato alla realizzazione di due database distinti e ad una duplice analisi al fine di evidenziare le differenze che esse comportano sulla valutazione del rischio sismico. La valutazione del rischio è avvenuta tramite l'ausilio del software OpenQuake introducendo al suo interno i modelli di rottura, di esposizione, di fragilità e di vulnerabilità costruiti tramite l'Input Preparation Toolkit come descritto al paragrafo 2.1. Infine l'interoperabilità tra il software OpenQuake e QGis ha permesso la graficizzazione dei risultati.

## 3.1 Nascita del centro storico di Moncalieri

Il centro storico del Comune di Moncalieri pone le sue origini nel tredicesimo secolo. Analizzando file catastali (Soprintendenza B.A.A.-Torino 2019), si evince come la formazione del borgo è attribuibile ad un graduale spostamento degli abitanti del vicino villaggio di Testona (La Rocca 1986). I declivi della collina risultavano abitati ancora prima della fondazione della città di Moncalieri. Antichi file catastali riportano insediamenti a partire dal 1037, legati alla presenza di una chiesa, dedicata alla Madonna, connessa alla chiesa di Santa Maria alla Scala di Testona. Il centro storico di Moncalieri iniziava a prendere forma con la nascita di diverse tipologie di edifici. Nel 1196, un gruppo di frati francescani fondarono un convento dove oggi è possibile trovare una chiesa settecentesca (Chiesa di San Francesco). Nel 1203, i Cavalieri del Tempio edificarono la chiesa di Sant'Egidio, l'Ospedale e successivamente nel 1255 un ponte su grossi piloni, difeso da una torre. Quest'ultimo di fondamentale importanza per traffici stradali e fluviali. Il vero e proprio centro urbano di Moncalieri venne costruito dagli abitanti di Testona nel 1230, quando gli eserciti di Chieri ed Asti rasero al suolo il borgo preromano di Testona. L'assetto urbano della città era stato organizzato secondo le esigenze della popolazione, un ceto mercantile, composta principalmente da artigiani, mercanti, contadini e pescatori. La Piazza Maggiore (Piazza Vittorio Emanuele II) presentava duplice valenza: civile e religiosa. Infatti, accanto alla chiesa di Santa Maria, sorse il Palazzo Comunale. Nel 1227, commissionato da Tommaso di Savoia, venne eretto

il Castello Reale. Con la crescita della popolazione venne allargato lo spazio urbano e vennero create nuove cinta murarie (1258).

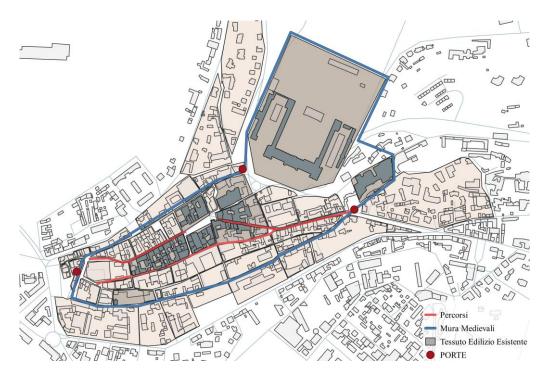


Figura 3-1 – Ipotesi interpretativa dell'assetto urbano di Moncalieri nel XIV secolo (elaborazione (Soprintendenza B.A.A.-Torino 2019)

L'assetto urbano presentava la forma di una mandorla allungata, approssimativamente triangolare. Il borgo di Moncalieri fondato su un terreno collinare, fu eretto attorno la piazza Maggiore ed era stato articolato in modo da favorire la difesa della città. Il castello era stato posizionato nella parte alta del borgo, le strade furono edificate parallelamente alle curve di livello e le stradine trasversali come via delle torrette (via Santa Croce), via dei Campagnini (via Vittorio Alfieri) e via Ranvuersa (via Torquato Tasso) furono realizzate a terrazzamento o a gradoni. Analizzando la città dal punto di vista planimetrico si nota una regolarità della struttura viaria descritta da due assi, uno longitudinale e uno trasversale (Bertolotto 1996). L'asse longitudinale denominato della via dei Cavalieri (oggi via San Martino) attraversa la piazza principale (oggi Piazza Vittorio Emanuele II), la quale è posizionata centralmente rispetto allo sviluppo della città. L'accesso all'interno della città avveniva tramite tre principali porte di ingresso: Porta Medolanesis (oggi Porta Navina), Taurinensis (Porta 13), Piacentina. Nel quattordicesimo secolo i Gerosolimitani sostituirono l'ordine dei Templari (Soprintendenza B.A.A.-Torino 2019), nascevano in quegli anni edifici conventuali per opera degli ordini degli Umiliati di San Giacomo e delle Umiliate. Nel quindicesimo secolo vennero edificati dai Carmelitani Scalzi una chiesa, un convento e un campanile. In questo secolo il borgo di Moncalieri risultava diviso in quattro quartieri che prendevano il nome delle porte principali.

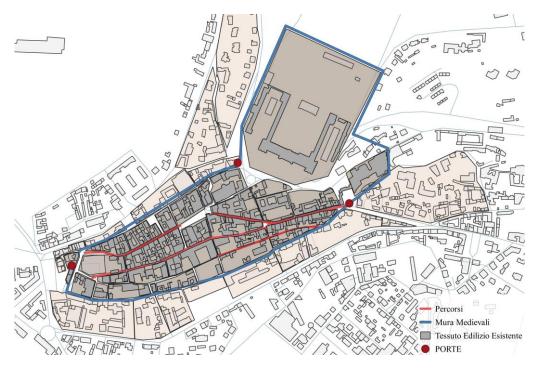


Figura 3-2 Ipotesi interpretativa dell'assetto urbano di Moncalieri nel XV secolo (elaborazione (Soprintendenza B.A.A.-Torino 2019)

Durante il quindicesimo secolo, diversi interventi permisero un cambiamento dell'immagine della città che si presentava man mano sempre più consolidata. Piazza Maggiore seguiva uno stile principalmente gotico dovuto al rifacimento della chiesa di Santa Maria della Scala e di San Francesco. Essendo la piazza, punto centrale della città sorsero in quella zona edifici di maggiore rilevanza. Il castello era collegato al borgo tramite un ponte levatoio e il corso del fiume Po era molto più vicino alle mura rispetto alla posizione attuale. A seguito dell'evoluzione delle tecniche belliche, nel sedicesimo secolo, si rese necessario un rifacimento delle mura, al fine di garantire una difesa maggiore. Nonostante le guerre continue, all'interno delle mura si continuava ad avere uno sviluppo edilizio crescente. Durante il settecento, l'architetto di corte Amedeo di Castellamonte trasforma il Castello Reale, da fortezza a dimora per gli svaghi della dinastia sabauda. Si attribuisce, invece, all'architetto Giovan Battista Ravelli il rifacimento di alcuni edifici su via delle Torrette (oggi, via Sana Croce), l'innalzamento del livello stradale ed il rinnovamento del lastricato. Venne, inoltre, ampliata piazza Maggiore, le cinta murarie, persero il ruolo di protezione e risultavano sempre più degradate, la loro importanza decresceva con l'avanzare del tempo, infatti i cittadini chiesero, a Carlo Emanuele II, di poter utilizzare i fossati per poter irrigare orti e giardini che si trovavano al di fuori delle mura. Con il crescere dell'importanza della città di Torino, Moncalieri non venne più considerata come baluardo fortificato ma divenne luogo di commercio e un punto di incontro per le città di Chieri Asti e Piacenza. Il settecento suggella un momento cruciale della storia urbana puntualizzato dal lento, ma continuo sgretolamento della cinta fortificata, culminato, nel 1783, con l'abbattimento di porta Piacentina. Il materiale di recupero di questa parte di muraglia venne utilizzato per il riassetto della via delle Torrette che, dopo l'ampliamento seicentesco delle mura, aveva inglobato il ghetto

e le strutture microproduttive della zona. Nel 1771 venne inaugurata la strada della collina e venne migliorato il collegamento con Asti e Piacenza. Inoltre, la bellezza e la vita della nobiltà sabauda all'interno del Castello di Moncalieri, incentivarono alcune famiglie di prestigio della zona a costruire delle grandi ville sulla collina e palazzi urbani di particolare pregio nel centro storico. Nel diciottesimo secolo vennero riplasmate le costruzioni urbane che affiancavano le vie principali, molte strutture vennero rialzate di un piano e le facciate degli edifici medievali vennero rese regolari tramite la realizzazione di nuove aperture. Nel 1755, i frati francescani ampliarono il convento, riorganizzando gli spazi circostanti a giardino e li collegarono alla chiesa. Nel 1789 venne ricostruita la chiesa di San Francesco ad opera di Filippo Castelli, l'intero complesso venne alzato a livello della piazza. Di fondamentale importanza per l'immagine del nucleo urbano, in quanto caratterizzate dalla nobiltà dello stile, sono: la Confraternita di Santa Croce, quella del Gesù e il convento delle Clarisse. Informazioni riguardo l'assetto morfologico del tempo viene fornito dalla mappa napoleonica della città che suddivide il territorio del borgo in una serie di lotti le cui forme sono riconducibili a figure piane come rettangoli, quadrati o triangoli intersecati ortogonalmente dagli assi principali della città (Via Alfieri, Via San Martino che interseca Piazza Maggiore e Via Real Collegio). Nella mappa del catasto ogni isolato è a sua volta suddiviso in lotti di forma regolare.

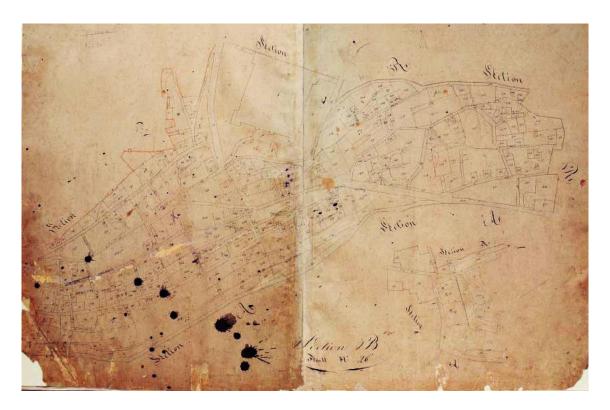


Figura 3-3 – Piano topografico del Centro Storico di Moncalieri, Mappa Napoleonica – fonte archivistica (Soprintendenza B.A.A.-Torino 2019)

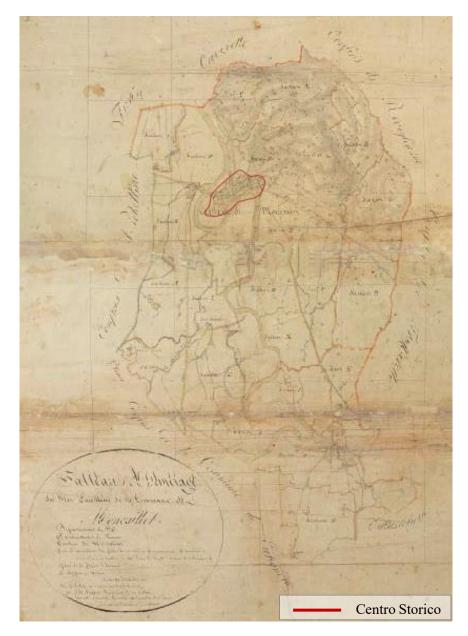


Figura 3-4 – Inquadramento Centro Storico Comune di Moncalieri, Mappa Napoleonica – fonte archivistica (Soprintendenza B.A.A.-Torino 2019)

Durante il diciannovesimo secolo a seguito dell'occupazione dei Francesi la chiesa di San Francesco e gli adiacenti spazi conventuali vennero utilizzati come alloggi per i militari. Inoltre, nello stesso secolo, venne distrutta la chiesa, risalente al cinquecento, del Santo Spirito ed il suo convento. In quell'area venne realizzata l'attuale piazza Umberto I. Nel 1801, l'unica porta di ingresso alla citta ancora esistente era porta Navina, riplasmata successivamente nel 1850. La città di Moncalieri risultava sempre più consolidata, una visione dell'assetto urbano dell'epoca è fornito dalla Figura 3-5.

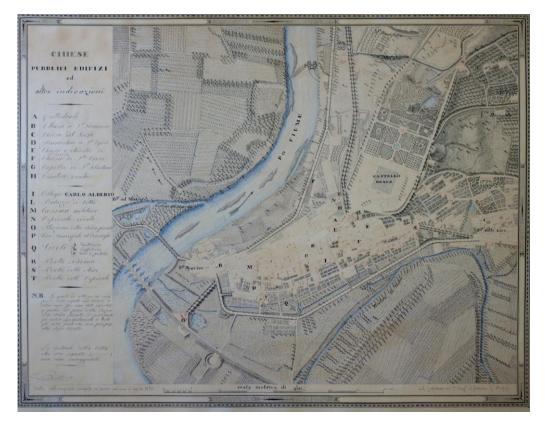


Figura 3-5 – Piano Topografico della città di Moncalieri nel 1850- fonte archivistica (Soprintendenza B.A.A.-Torino 2019).

A metà del 1800, l'arrivo della ferrovia, permise di poter collegare la città di Torino e Poirino con Moncalieri. Gli allacciamenti ferroviari e stradali azzerarono le comunicazioni ed i trasporti fluviali ma stimolarono i traffici e il commercio, nasce pertanto l'esigenza di nuove abitazioni, vengono così edificate modeste strutture unifamiliari nelle vicinanze delle fabbriche e delle stazioni. Ne consegue un incremento delle strutture sociali primarie come scuole asili ed ospedali. Venne mutata l'immagine di Piazza Maggiore con il rifacimento dei portici in muratura e del Palazzo del Comune, il quale presentava uno stile rococò con al suon interno la statua di Nettuno che successivamente divenne ornamento della fontana posta al sommo della piazza. Nella prima metà del ventesimo secolo, a seguito delle leggi sulla costruzione che autorizzavano interventi radicali nel tessuto antico, alcuni edifici abitativi hanno perso lo stile originario a causa di incongrue ristrutturazioni che ne hanno snaturato l'assetto. Le trasformazioni avvenute nel diciannovesimo e nel ventesimo secolo, mostrano Moncalieri come se fosse un ammasso di città diverse in cui la città moderna è più estesa rispetto a quella antica.



Figura 3-6 - Centro Storico Moncalieri (2019).

## 3.2 Costruzione del database

L'analisi del rischio sismico a scala territoriale richiede la conoscenza di una mole di dati, generalmente, difficilmente reperibili. Molti ricercatori ed esperti hanno realizzato database che fossero in grado di fornire informazioni sul costruito e che potessero essere utilizzati in vari ambiti disciplinari, si rende pertanto necessaria la conoscenza di parametri importanti per determinare il comportamento delle strutture dopo un terremoto. Tra quelli principali distinguiamo il sistema strutturale resistente, il materiale da costruzione e l'altezza totale degli edifici. Ovviamente, maggiore sarà il numero di parametri utilizzati, maggiore risulterà il livello di conoscenza. Da una determinazione di un elevato numero di parametri ne consegue un'analisi più accurata ed una maggiore attendibilità dei risultati. Tra le iniziative che hanno realizzato un censimento di dati nei paesi Europei individuiamo il progetto NERA (Network of European Research Infrastructures for Earthquake Risk Assessment and Mitigation) (2010-2014) e la GEM (Global Earthquake Model). Il progetto GEM ha sviluppato la GED4GEM (Global Exposure Database for the Global Earthquake Model), che incorpora informazioni fisiche, socio-economiche, demografiche, geologiche e geografiche dalle diverse sorgenti esistenti. (Stone 2017). A livello nazionale, banche dati sono fornite dall'INGV. I database forniti dai diversi progetti si basano su dati statistici e dati di progetti precedenti che vengono elaborati da esperti, le informazioni dovendo riguardare vaste aree comprendono un numero limitato di paesi europei. Inoltre, confrontando i database forniti dai diversi progetti di ricerca si evince un carattere di disomogeneità tra i dati. Ogni paese presenta una propria metodologia di catalogazione e spesso le diverse tecniche portano ad avere informazioni incongruenti tra loro. Al livello Europeo viene realizzato un censimento della popolazione e delle abitazioni ogni dieci anni. I dati forniti riguardano perlopiù aree ad alta sismicità, quali i paesi del Mediterraneo e dei Balcani, aree del centro e del centro-est Europa (Tsionis, et al. 2017). La determinazione dei database risulta una fase determinante ma allo stesso tempo caratterizzata da molteplici difficoltà. Infatti, a livello nazionale, molte informazioni sono facilmente reperibili per le aree ad alta sismicità dove sono avvenuti terremoti, mentre si riscontrano scarse informazioni nelle piccole province e nelle aree caratterizzate da una bassa

sismicità. Lo sviluppo nel campo della ricerca sta valutando metodologie di correlazione tra i vari database al fine di renderli dinamici e garantire un'interoperabilità delle informazioni in modo che siano accessibili e utilizzabili dalla comunità. Un primo passo in questo campo è stato realizzato dal progetto "100 resilient cities" il cui scopo principale è quello di creare città resilienti e definire un database che contenga un'elaborazione di tutti i dati disponibili in modo da creare uno strumento di conoscenza unico per la popolazione. Database a livello nazionale, nel caso dell'Italia, vengono definiti, tramite un censimento ad intervalli di tempo regolari, dall'ARPA (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale) o dai Geoportali. I dati forniti sono dati statici e spesso incongruenti con quelli al livello europeo e le informazioni spesso risultano incomplete o di scarsa qualità. Ciò è principalmente dovuto ad una disorganizzata gestione dei dati da parte degli enti preposti. L'organizzazione dei dati si differenzia anche a livello nazionale, da regione a regione, data la diversità degli strumenti e delle tecniche utilizzate dalla pubblica amministrazione per la catalogazione dei dati. La catalogazione dei dati è una delle fasi principali per garantire attendibilità, omogeneità e la dinamicità delle informazioni caratteristiche, generalmente, assenti per i database su larga scala.

## 3.2.1 La raccolta delle informazioni: metodologie utilizzate e dati rilevati

Al fine di effettuare un'analisi del rischio sismico del centro storico di Moncalieri è stato fondamentale analizzare l'area di interesse studiando la storia, la storia politica e gli eventi catastrofici che si sono susseguiti nel tempo in quanto tramite queste nozioni si può conoscere lo sviluppo della popolazione e i punti di pressione sulle aree urbane. Un'analisi del rischio necessita la conoscenza di molteplici informazioni che sono state ottenute con diverse metodologie con l'obiettivo di garantire informazioni approfondite delle caratteristiche degli edifici e di creare un database che riportasse i diversi parametri. In particolare sono stati analizzati:

- Archivi digitali, riportati all'interno del database geotopografico della Regione Piemonte (Regione Piemonte 2018),che grazie all'interoperabilità con software come il GIS consentono di effettuare studi a scala territoriale;
- Archivi cartacei presenti nel catasto della "soprintendenza Archeologica, belle arti e paesaggio" della regione Piemonte e negli archivi del comune di Moncalieri. Tali fonti informative hanno permesso l'acquisizione di informazioni dettagliate di ogni edificio tramite l'analisi di schede tecniche-descrittive derivanti da un censimento delle abitazioni;
- Immagini aeree e satellitari tramite il sistema Street View di Google Maps, tali elementi permettono un'analisi a larga scala e possono essere utilizzati per monitorare e valutare gli oggetti visibili dallo spazio. Un'analisi visiva può portare alla determinazione di alcune caratteristiche degli edifici e ad un archivio ricco ed estremamente rilevante, permettendo una valutazione della vulnerabilità di grandi aree urbane.

Per la costruzione del database, in primo luogo sono stati analizzati gli archivi digitali e quindi i file forniti dal Geoportale della Regione Piemonte (Regione Piemonte 2018). Dalla piattaforma, accessibile online, è possibile scaricare servizi di visualizzazione WMTS (Web Map Tile Service) che consentono di caricare immagini raster o file vettoriali (Shapefile) e di interrogarne gli attributi. Nel caso in esame, sono stati inseriti i dati vettoriali all'interno del software QGIS che oltre a definire la forma dell'edificio tramite poligoni contengono una "tabella attributi" all'interno della quale è possibile prendere visione delle caratteristiche degli edifici. Nel dettaglio sono riportate informazioni sull'epoca di costruzione, sulla destinazione d'uso, sulla tipologia costruttiva, misura dell'area e del perimetro. Successivamente, tramite il sito dell'Arpa Piemonte (http://webgis.arpa.piemonte.it/geoportalserver arpa/catalog), sono stati ricavati il DTM (Modello Digitale del Terreno) e il DSM (Modello Digitale delle Superfici), la differenza tra i due modelli fornisce le altezze degli edifici. In alcuni casi il calcolo ha condotto a dei risultati non validi pertanto, dove possibile, sono stati attribuiti dei valori di quota simbolici, in base alle caratteristiche dell'edifico e alla sua localizzazione. Partendo dalle informazioni dei dati digitali tramite strumenti logici e di ricerca sono stati attribuiti ulteriori parametri agli edifici in maniera speditiva tra cui il numero di piani e la tipologia costruttiva. Per quanto concerne il numero di piani, nota l'altezza totale degli edifici è stato valutato tramite il calcolatore dei campi presente in QGis, calcolando il rapporto tra l'altezza totale degli edifici e l'altezza di interpiano funzione dell'epoca di costruzione dell'edifico. In particolare, sono stati considerate le suddivisioni riportate all'interno della relazione ENEA (Agenzia Nazionale per le nuove tecnologie, l'Energia e lo sviluppo Economico sostenibile) (Margiotta e Puglisi 2009) definendo:

- Un'altezza di interpiano pari a 3.6 metri per gli edifici con epoca di costruzione antecedente il 1820;
- Un'altezza di interpiano pari a 3.5 metri per gli edifici con epoca di costruzione compresa tra il 1820 e il 1880;
- Un'altezza di interpiano pari a 3.4 metri per gli edifici con epoca di costruzione compresa tra il 1880 e il 1920;
- Un'altezza di interpiano pari a 3.2 metri per gli edifici con epoca di costruzione compresa tra il 1920 e il 1960;
- Un'altezza di interpiano pari a 3 metri per gli edifici con epoca di costruzione compresa tra il 1960 e il 1990;
- Un'altezza di interpiano pari a 2.7 metri per gli edifici con epoca di costruzione compresa tra il 1990 fino ai giorni nostri.

La tipologia costruttiva, invece, è stata caratterizzata in funzione dell'epoca di costruzione degli edifici. Considerando:

• Una tipologia costruttiva in muratura per gli edifici con epoca di costruzione fino al 1900;

- Una tipologia costruttiva ibrida, con telaio in cemento armato e tamponamento in muratura per gli edifici con epoca di costruzione compresa tra il 1900 e il 2000;
- Una tipologia costruttiva con telaio in cemento armato per gli edifici con epoca di costruzione compresa tra il 2000 fino ai giorni nostri.

I vari parametri degli edifici ricavati e dedotti dall'analisi di dati digitali sono stati graficizzati con l'ausilio del software QGIS.

L'ausilio di dati digitali permette di poter effettuare un primo studio del rischio di tipo speditivo, ma al fine di condurre un'analisi più affidabile risulta opportuno studiare ulteriori parametri che possono incidere sulla vulnerabilità sismica del costruito. Le informazioni degli edifici presenti nell'area da indagare, sono state ricavate dagli archivi cartacei che provengono dai documenti della soprintendenza della regione Piemonte, in Tabella 3-1 e Tabella 3-2 sono riportate delle schede tipo riguardanti un edificio ecclesiastico e un edificio residenziale. La maggior parte degli edifici presenti sul territorio comunale possiede una scheda tecnica descrittiva la cui analisi ha permesso di acquisire dati di dettaglio per ogni edificio in merito all'epoca di costruzione, la destinazione d'uso, la tipologia di vincolo a cui è sottoposto, il numero di piani con eventuale indicazione della presenza di piani sotterranei. Inoltre all'interno della scheda è possibile prendere visione della cronologia degli interventi effettuati sugli edifici nel corso degli anni. L'archivio cartaceo rappresenta un'importante fonte di informazione, l'aspetto negativo è che non tutti gli edifici presenti sul territorio presentano una schedatura tecnica. In questi casi, con l'ausilio del sistema Street View di Google Maps è stato possibile individuare informazioni tramite approccio visivo, la risoluzione delle immagini risulta sufficiente per esaminare una grande quantità di dati, tra cui parametri aggiuntivi per l'analisi tra cui la regolarità e/o irregolarità in pianta e in elevato, elementi che giocano un ruolo fondamentale nel comportamento di un edificio sottoposto ad azione sismica. Un altro elemento che viene preso in considerazione è la vicinanza tra gli edifici, fattore che può comportare fenomeni di martellamento durante un evento sismico.

Il centro storico di Moncalieri, così come la maggior parte delle città con connotazione storica, è costituito da aggregati di edifici. Le diverse situazioni che possono presentarsi sono descritte in Figura 3-7, nel caso di Moncalieri il centro storico è caratterizzato da una prevalenza di edifici in aggregato complesso, una minoranza in linea e nelle zone limitrofe è presente una quantità sempre crescente di edifici isolati. Tale informazione viene inserita all'interno della tassonomia nel caso di analisi tramite dati catastali al fine di prendere in considerazione parametri aggiuntivi che possano migliorare l'analisi del rischio sismico.



Figura 3-7 – Tipologie di aggregati: isolati (giallo), in linea (blu), edifici in aggregato complessi (in rosso).

N. CATALOGO GENERALE 01/00045336	N. CATALOGO INTERNAZIONALE	MINISTERO PER I BENI CULTURALI ED AMBIENTALI DIREZ. GENERALE DELLE ANTICHITA' E BELLE ARTI	REGIONE
PRESCREDATURA	ITA:	SOPRINTENDENZA B.A.A TORINO	PIEMONTE
PROVINCIA E COMUNE: TO-MONCALIERI.		DESCRIZIONE:  La chiesa di belle forme settecentesche, si affaccia a spina tra via Santa Croce e via Real Collegio, con il sagrato chiuso da una bella cancellata in ferro battuto su un muretto di mattoni a vista. Verso via Real Collegio il muretto diviene un muro di contenimento di altezza maggiore a causa della forte pendenza del terreno, sempre da questa parte, vi è un corpo di fabbrica di impianto irregolare, riplasmato nel settecento incorporando antiche preesistenze medievali di cui è rimasta traccia nella tessitura irregolare delle aperture nella parte bassa. Questa struttura, oggi dipinta in intonaco giallo, ha una cimasa ricurva che conclude un alzato di quattro piani fuori terra, il tetto è a padiglione con l'orditura in legno ed il manto a coppi. Sul lato opposto verso via Santa Croce è, invece, la piccola canonica di soli due piani, a pianta quadrangolare, anch'essa dipinta in intonaco giallo, come del resto la chiesa, eccezion fatta per lo zoccolo e la cornice della porta che sono in grigio. La chiesa ha una navata unica, con una cappella a pianta semicircolare sul lato sinistro ed una pianta rettangolare sul	
LUOGO: Via SANTA CROCE ANG. Via REAL COLLEGIO.			
OGGETTO: Confraternita di Santa Croce			
<b>CATASTO:</b> F°25 (1986), part. N, 57, 58.			
CRONOLOGIA: XVIII.			
AUTORE:			
DEST. ORIGINARIA: Confraternita.			
USO ATTUALE: Chiesa.			
PROPRIETA': Ente Religioso			
VINCOLI: Leggi di tutela: P.R.G.			
NUMERO DEI PIANI: (Pendio diagonale); Livelli continui.			
PIANTA: Di testata; longitudinale; due cappelle cupola.			
COPERTURE: Tetto a due falde; orditura in Legno; manto di coperture in coppi			
VOLTE E SOLAI:		lato destro, la cupola si erge sopra l'altare maggiore e termina con una lanterna. La	
SCALE:			
TENICHE MURARIE: Muratura intonacate, zoccolo di mattoni a vista.		facciata è definita, da una trabeazione, in due ordini sormontati da un timpano a più profilature animato da semplici pinnacoli. L'ordine inferiore è definito da belle paraste e cornici che si coordinano al semplice portale d'ingresso con timpano spezzato che si raccorda in volute finali. L'ordine superiore è privilegiato da un finestrone centrale con una ricca cornice intonacata. Il tetto è a falde con manto in coppi.	
PAVIMENTI:			
DECORAZIONI ESTERNE: Portale, lesene, cornici, timpano, pinnacoli, cancellata.			
DECORAZIONI INTERNE: Affreschi.			
ARREDAMENTI:			
STRUTTURE SOTTERANEE: Due piani seminterrati su via Real Collegio.			

Tabella 3-1 – Scheda tecnico-descrittivo tipo, Sede Religiosa (Soprintendenza B.A.A.-Torino 2019)

N. CATALOGO GENERALE 01/00045336	N. CATALOGO INTERNAZIONALE	MINISTERO PER I BENI CULTURALI ED AMBIENTALI DIREZ. GENERALE DELLE ANTICHITA' E BELLE ARTI	REGIONE
PRESCHEDATURA	ITA:	SOPRINTENDENZA B.A.A TORINO	PIEMONTE
PROVINCIA E COMUNE: TO-MONCALIERI.		DESCRIZIONE:  Il complesso, indicato con i numeri civici 4 e 6, risulta dalla aggregazione di due cellule distinte, entrambe di origine medievale, ma in globale dai rifacimenti sei-settecenteschi che hanno interessato questa parte della città. L'ingresso è unico, come pure la scala di collegamento verticale che è a due rampe in pietra ed è trasversale alla facciata. Al livello di calpestio, la prima cellula ha un profondo portico ad una sola campata, a pianta trapezoidale con un robusto arco a sesto ribassato; l'alzato è dipinto in intonaco bianco con quattro porte finestre, al primo piano collegate da un unico balcone, al secondo piano con due singoli balconcini, in entrambi li ringhiere sono in ferro battuto di buona fattura ottocentesca come quelli della lunetta sul portoncino d'ingresso. Tra le due porte del primo piano vi è un medaglione in gesso con un bassorilievo raffigurante la Vergine. La sezione indicata con il numero civico 6 non ha ingresso proprio, ha ancora tracce di ridipintura sulle cornici delle aperture ed una fascia con motivi floreali sul fondo rossastro al di sotto della cimasa. I balconcini in questa parte sono in pietra con mensole con volute e le ringhiere son in ferro battuto a motivi vagamente liberty. Entrambe le porzioni hanno il tetto a due falde con l'ornatura in legno ed il manto di copertura in coppi, ma le linee di gronda sono ad altezze diverse.	
LUOGO: Via Santa Croce, 4, 6.			
OGGETTO: Casa.			
<b>CATASTO:</b> F°25 (1968), part. 65, 67, 68.			
CRONOLOGIA: XV, XVII, XVIII, XX.			
AUTORE: -			
DEST. ORIGINARIA: Abitazione, botteghe.			
USO ATTUALE: Abitazione, negozi.			
PROPRIETA': Ente:			
VINCOLI: Leggi di tutela: L.1089/1939-L.1947/1939 P.R.G. E ALTRI: P.R.G. 1983.			
NUMERO DEI PIANI: (Pendio diagonale.); Livelli continui; 3.			
PIANTA: In linea; quadrangolare irregolare; portico.			
COPERTURE: Tetto a due falde; orditura in Legno; manto di coperture in coppi			
VOLTE E SOLAI:			
SCALE: Unica; a due rampe in pietra; trasversale.			
TENICHE MURARIE: Muratura intonacate.			
PAVIMENTI: -			
<b>DECORAZIONI ESTERNE:</b> Medaglione in gesso con bassorilievo, balconi con volute, fascia e motivi floreali.			
DECORAZIONI INTERNE: -			
ARREDAMENTI: -			
STRUTTURE SOTTERANEE: 1 p.s			

Tabella 3-2 - Scheda tecnico-descrittiva tipo, edificio residenziale (Soprintendenza B.A.A.-Torino 2019)

Le informazioni reperite tramite le metodologie descritte sono state riportate in due differenti database digitali all'interno del software QGis in modo da schematizzare le diverse caratteristiche delle varie unità immobiliari. Per poter cogliere le incongruenze presenti nei diversi database è utile utilizzare una rappresentazione grafica, i risultati rappresentano elementi chiave per poter effettuare osservazioni riguardanti gli indici che maggiormente incidono sulla valutazione del rischio sismico a seguito delle analisi. In particolare, con la dicitura "Archivio digitale" si fa riferimento al database ottenuto dal Geoportale della regione Piemonte mentre con la nomenclatura "Archivio cartaceo" si considera un database in cui sono riportate le informazioni delle schede-tecniche. Inoltre, tramite un'analisi comparativa è possibile definire se una valutazione di tipo speditivo garantisce risultati affidabili. Individuare la metodologia di acquisizione dati, che fornisca informazioni attendibili, è un aspetto fondamentale del lavoro. Per poter effettuare in modo adeguato un'analisi comparativa è necessario notare che nel caso di una valutazione dettagliata 35 edifici risultano non presenti sull'area oggetto di studio mentre essi sono classificati all'interno del database digitale anche se ad oggi (2019) non sono più presenti sul territorio, probabilmente a causa di un loro abbattimento. La sola informazione comune ad entrambi i database è inerente all'altezza degli edifici, tale dato viene graficizzato in Figura 3-8 e Figura 3-9.

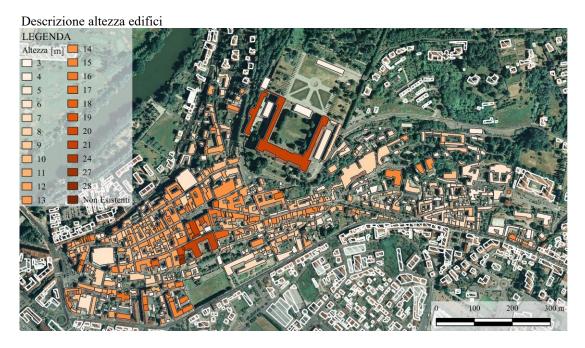


Figura 3-8 – Classificazione degli edifici del centro storico di Moncalieri in base all'altezza.

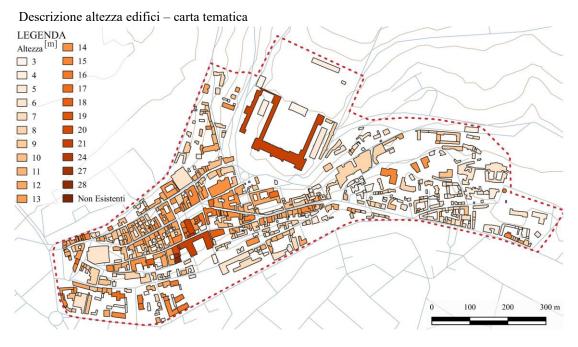


Figura 3-9 – Carta tematica, classificazione degli edifici del centro storico di Moncalieri in base all'altezza.

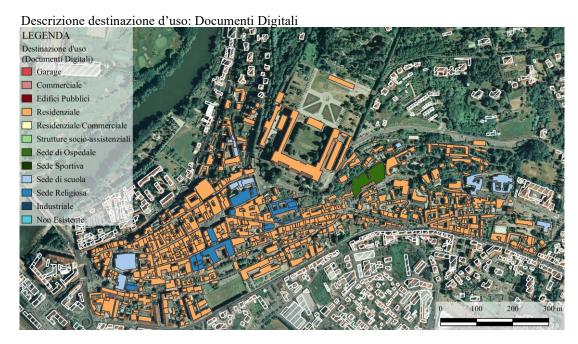


Figura 3-10 – Classificazione degli edifici del centro storico di Moncalieri in base alla destinazione d'uso - Archivio digitale (Regione Piemonte 2018).

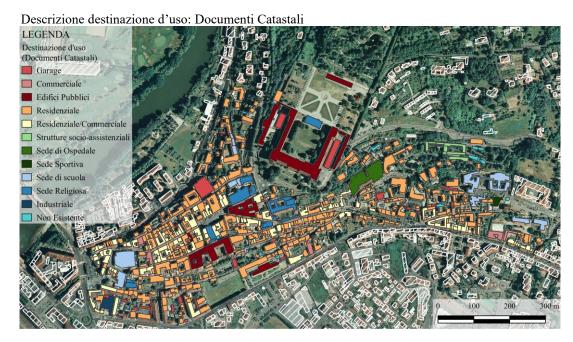


Figura 3-11- Classificazione degli edifici del centro storico di Moncalieri in base alla destinazione d'uso - Archivio cartaceo (Soprintendenza B.A.A.-Torino 2019).

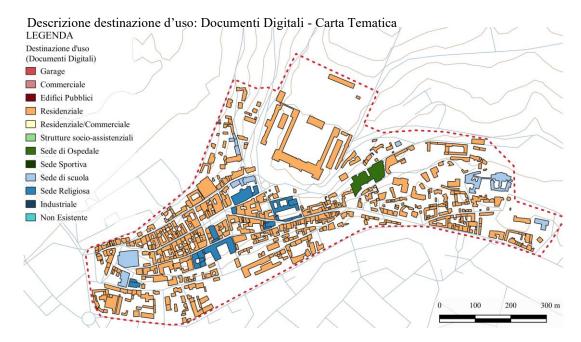


Figura 3-12 – Carta tematica, classificazione degli edifici del centro storico di Moncalieri in base alla destinazione d'uso - Archivio digitale (Regione Piemonte 2018).

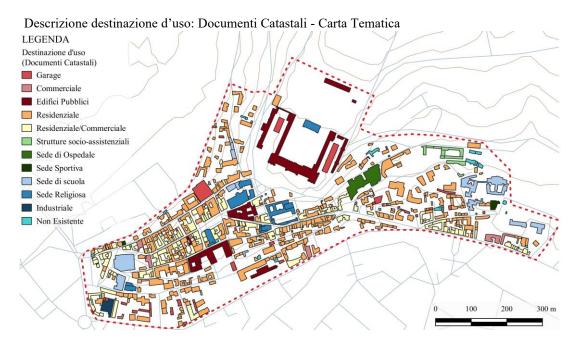


Figura 3-13 Classificazione degli edifici del centro storico di Moncalieri in base alla destinazione d'uso - Archivio cartaceo (Soprintendenza B.A.A.-Torino 2019).

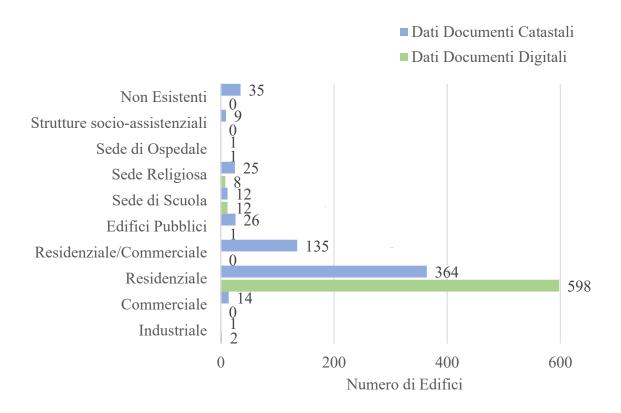


Figura 3-14 – Analisi comparativa tra i database in funzione della destinazione d'uso

Dall'analisi comparativa (Figura 3-14) della destinazione d'uso degli edifici presente nell'area oggetto di studio, si evince come sia presente una forte discrepanza di informazione tra i due database. Infatti, il database digitale classifica la maggior parte degli edifici come residenziali ad eccezione di alcuni edifici ecclesiastici e scolastici (Figura 3-10 e Figura 3-12), mentre nei dati catastali viene riportata una classificazione più dettagliata. In quest'ultimo caso, si evince una forte variazione delle destinazioni d'uso degli edifici (Figura 3-11 e Figura 3-13). Ai fini di un'analisi del rischio sismico i dati, nel caso della destinazione d'uso, definiti tramite documenti digitali risultano non attendibili in quanto la classificazione da essa effettuata spesso non corrisponde all'effettiva destinazione. Un esempio facilmente visibile è mostrato dal confronto delle Figura 3-10 e 3-11 in cui, nel primo caso (dati digitali) il castello di Moncalieri è classificato come residenziale, ma esso presenta ben differenti caratteristiche rispetto a tale assunzione, infatti nel secondo caso (analisi catastale) rientra negli edifici pubblici che spesso risultano essere edifici storici e/o vincolati che in un'analisi del rischio sismico risulta essere un'informazione incidente per la valutazione delle perdite economiche del bene.

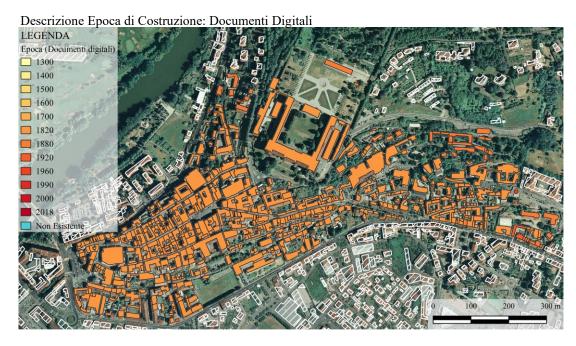


Figura 3-15 - Classificazione degli edifici del centro storico di Moncalieri in base all'epoca di costruzione - Archivio digitale (Regione Piemonte 2018).

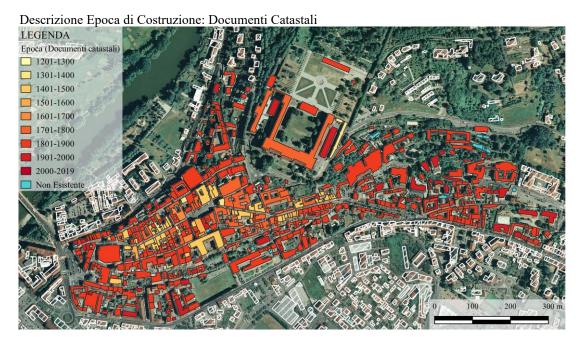


Figura 3-16 - Classificazione degli edifici del centro storico di Moncalieri in base all'epoca di costruzione- Archivio cartaceo (Soprintendenza B.A.A.-Torino 2019).

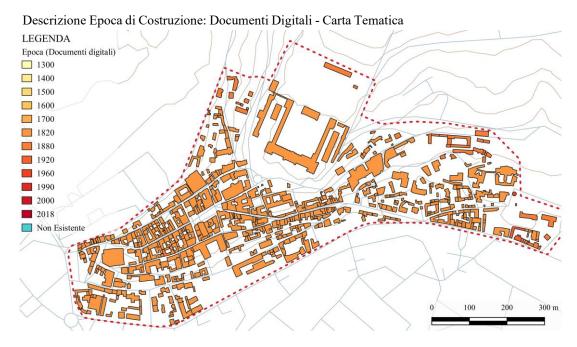


Figura 3-17- Carta tematica, classificazione degli edifici del centro storico di Moncalieri in base all'epoca di costruzione - Archivio digitale (Regione Piemonte 2018).

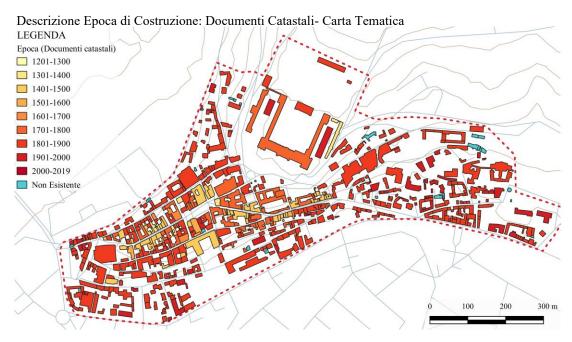


Figura 3-18 Carta tematica, classificazione degli edifici del centro storico di Moncalieri in base all'epoca di costruzione - Archivio cartaceo (Soprintendenza B.A.A.-Torino 2019).

63

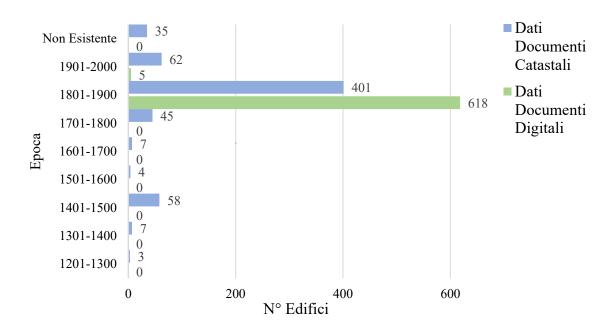


Figura 3-19 – Analisi comparativa tra i database in funzione dell'epoca di costruzione

Dall'analisi comparativa dei database in merito all'epoca di costruzione viene mostrata una classificazione uniforme nel caso di utilizzo di dati digitali, in quanto tutti gli edifici rientrano nel 1820, mentre forti variazioni sono presenti nel database catastale. In quest'ultimo caso, attraverso le schede tecniche descrittive, è possibile prendere visione dell'epoca di costruzione o di un intervento di retrofit il quale offre migliorie dal punto di vista strutturale agli edifici. Risulta importante conoscere la data di modifiche strutturali di un edificio in quanto essa è strettamente connesse alla vita nominale dello stesso. In questo caso sia l'analisi tramite dati catastali che quella con dati digitali non risultano affidabili, infatti la prima non fornisce una data di costruzione precisa ma una classificazione ogni 100 anni mentre il secondo appiattisce tutti gli edifici ante 1820, in un unico raggruppamento.

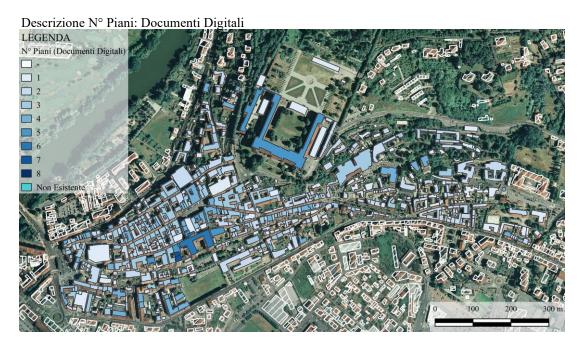


Figura 3-20- Classificazione degli edifici del centro storico di Moncalieri in base al numero di piani - Archivio digitale (Regione Piemonte 2018).

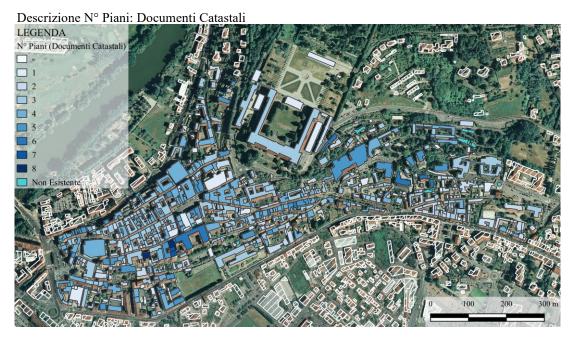


Figura 3-21- Classificazione degli edifici del centro storico di Moncalieri in base al numero di piani - Archivio cartaceo (Soprintendenza B.A.A.-Torino 2019).

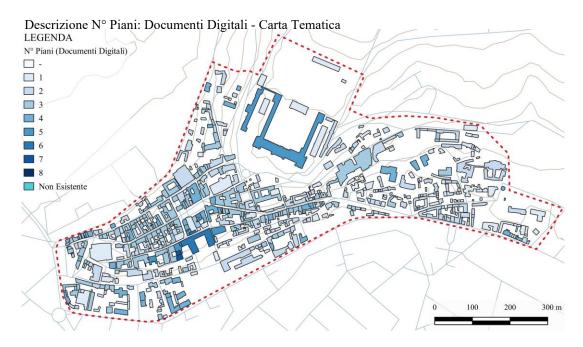


Figura 3-22- Carta tematica, classificazione degli edifici del centro storico di Moncalieri in base al numero di piani - Archivio digitale (Regione Piemonte 2018).

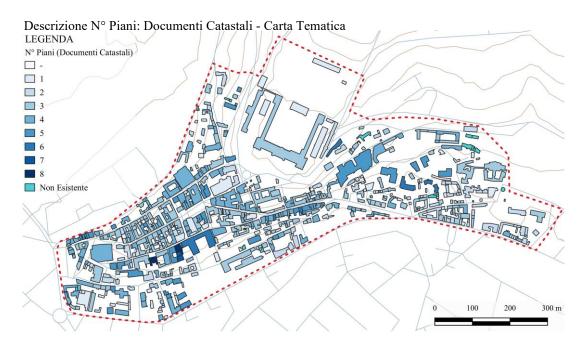


Figura 3-23- Carta tematica, classificazione degli edifici del centro storico di Moncalieri in base al numero di piani - Archivio cartaceo (Soprintendenza B.A.A.-Torino 2019).

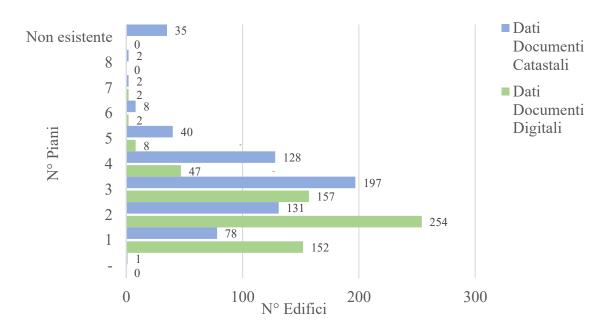


Figura 3-24 – Analisi comparativa tra i database in funzione del numero di piani

Le differenze legate al numero di piano mostrate in Figura 3-24 sono dovute alla metodologia utilizzata per la loro determinazione. Come definito precedentemente, il numero di piani nel caso di un database digitale è stato calcolato in modo speditivo tramite il rapporto tra l'altezza totale dell'edificio l'altezza di interpiano, differenziata in base all'epoca costruttiva. Invece, i dati presenti all'interno del database dettagliato sono stati valutati tramite l'ausilio del sistema Street Map fornito da Google ed hanno richiesto una valutazione sul singolo edificio. Quest'ultima metodologia derivante da un'analisi riferita al singolo elemento si ritiene più accurata.

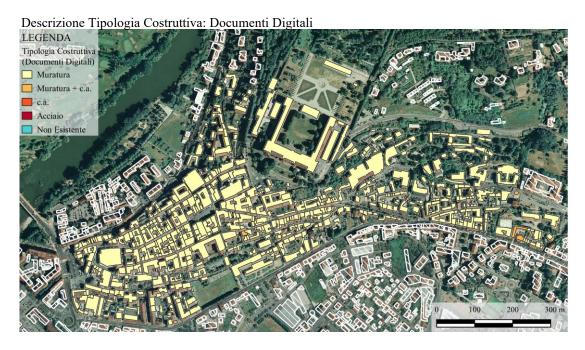


Figura 3-25 - Classificazione degli edifici del centro storico di Moncalieri in base alla tipologia costruttiva - Archivio digitale (Regione Piemonte 2018).

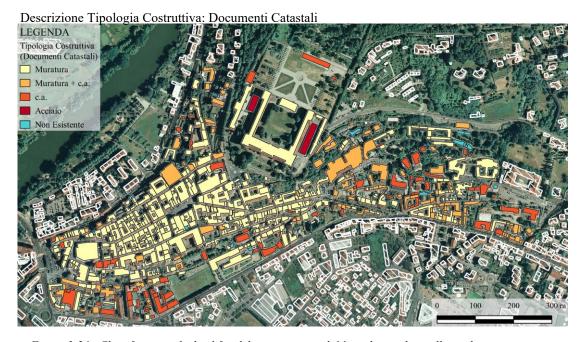


Figura 3-26 - Classificazione degli edifici del centro storico di Moncalieri in base alla tipologia costruttiva - Archivio cartaceo (Soprintendenza B.A.A.-Torino 2019).

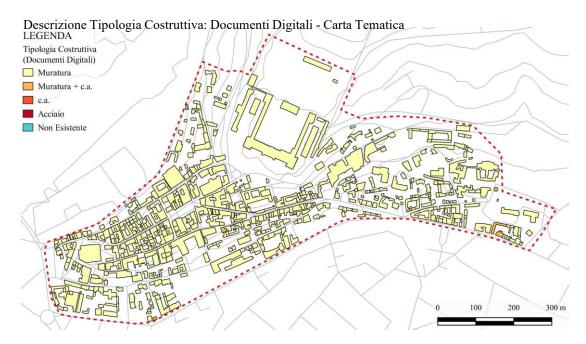


Figura 3-27 – Carta tematica, classificazione degli edifici del centro storico di Moncalieri in base alla tipologia costruttiva - Archivio digitale (Regione Piemonte 2018).

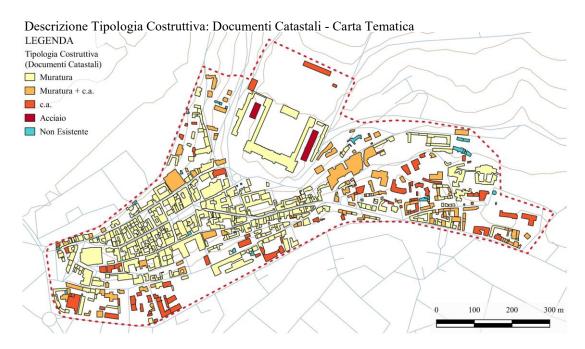


Figura 3-28 -Carta tematica, classificazione degli edifici del centro storico di Moncalieri in base alla tipologia costruttiva - Archivio cartaceo (Soprintendenza B.A.A.-Torino 2019).

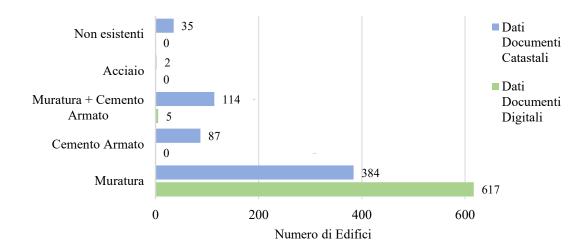


Figura 3-29 - Analisi comparativa tra i database in funzione dell'epoca di costruzione

Le mappe dell'epoca e della tipologia costruttiva, sono intellegibili, in quanto con il tempo le tecniche costruttive e i materiali utilizzati hanno subito un forte sviluppo. Il database digitale riporta una tipologia costruttiva omogenea poiché tutti gli edifici presentano la stessa epoca di costruzione, a differenza del database catastale dove si ha una forte variazione dell'epoca costruttiva e conseguentemente delle tecniche utilizzate.

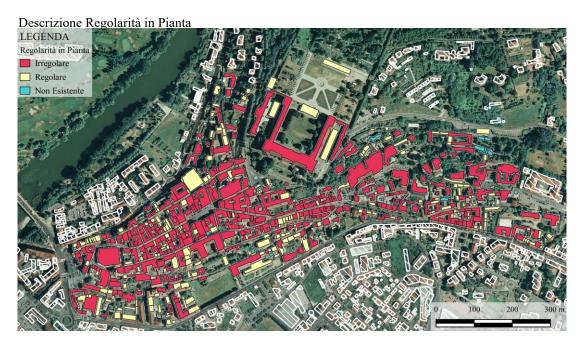


Figura 3-30 - Classificazione degli edifici del centro storico di Moncalieri in base alla regolarità in pianta (Street view).

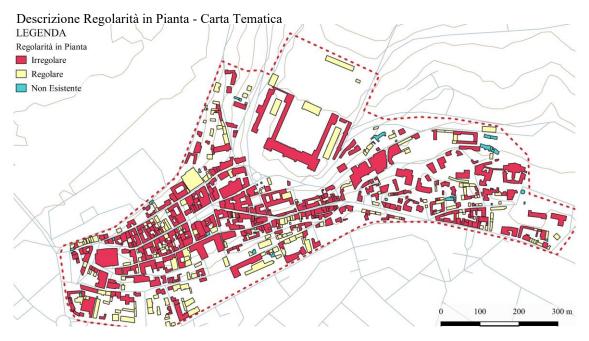


Figura 3-31 – Carta tematica, classificazione degli edifici del centro storico di Moncalieri in base alla regolarità in pianta (Street view).

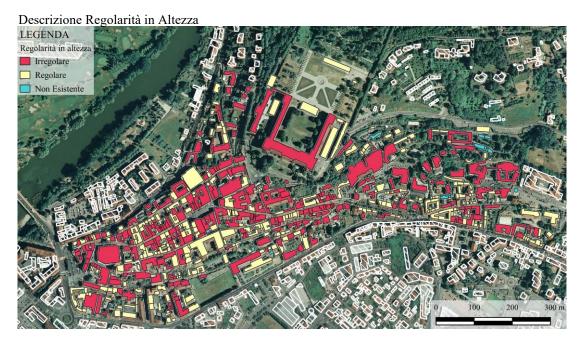


Figura 3-32 - Classificazione degli edifici del centro storico di Moncalieri in base alla regolarità in altezza (Street view).

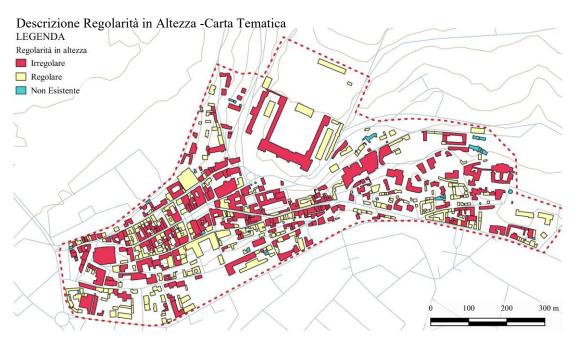


Figura 3-33- Carta tematica, classificazione degli edifici del centro storico di Moncalieri in base alla regolarità in altezza (Street view).

Come si evince dalla Figura 3-10, Figura 3-11, Figura 3-15, Figura 3-16, Figura 3-20, Figura 3-21, Figura 3-25, Figura 3-26, i dati rilevati con le diverse metodologie presentano delle discrepanze, pertanto si è ritenuto opportuno effettuare una duplice analisi in modo da evidenziare la metodologia di acquisizione dati opportuna per un'analisi del rischio sismico affidabile, valutando se l'utilizzo di dati differenti, in riferimento ad uno stesso elemento, comporta una forte variazione dei risultati. Tali analisi hanno l'obbiettivo di valutare delle strategie per ridurre il rischio sismico e preservare le città e il patrimonio monumentale, artistico e culturale che lo caratterizzano. Di conseguenza, sono stati individuati gli edifici vincolati presenti nell'area di interesse tramite il catalogo dei beni culturali del comune di Moncalieri (Assessorato alla Pianificazione Territoriale - Ufficio di Piano Territoriale di Coordinamento 2009) (Figura 3-34).

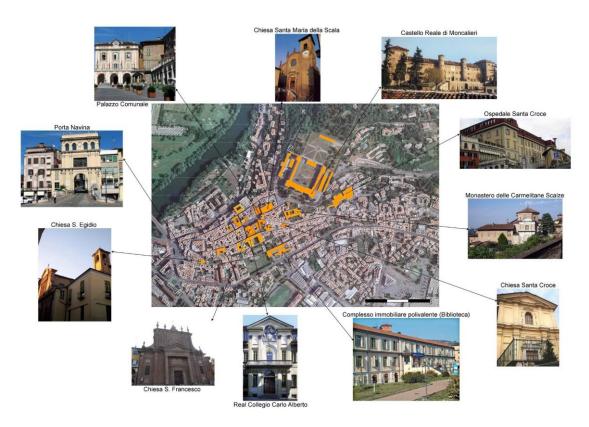


Figura 3-34 - Individuazione dei principali edifici vincolati nel centro storico di Moncalieri (Milandri 2019).

## 3.3 Tipologie di analisi effettuate

Lo studio effettuato comprende 622 edifici del centro storico di Moncalieri, comune della città metropolitana di Torino. Al fine di determinare il rischio sismico dell'area sono state realizzate, con l'ausilio del software OpenQuake tre diverse analisi:

- Stochastic event based probabilistic seismic risk analysis;
- Scenario damage assessment;
- Scenario risk assessment.

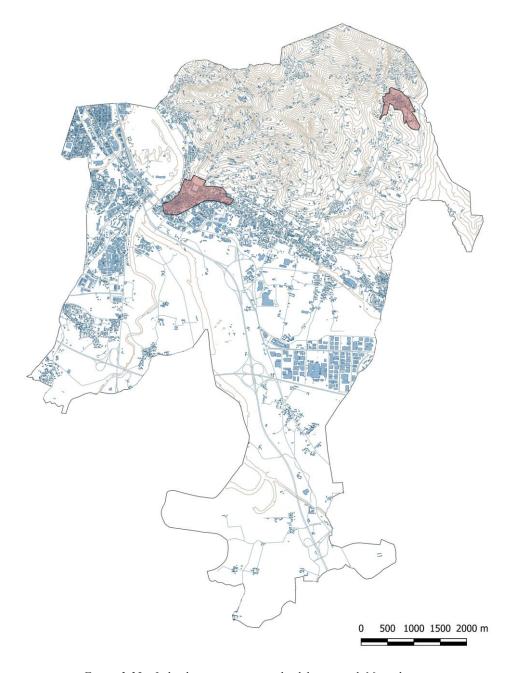


Figura 3-35 – Individuazione aree storiche del comune di Moncalieri.

Come definito al paragrafo 2.1.1 per poter ottenere dei file di output è necessario definire i modelli di input da introdurre all'interno del software. I modelli di input/output si differenziano a seconda del tipo di analisi.

L'analisi stocastica valuta in modo probabilistico il rischio sismico stimando le perdite economiche di ogni bene, e necessita, a monte, della determinazione di un modello di esposizione, di un modello di vulnerabilità e di un modello contenente un set di eventi stocastici rappresentativo della sismicità dell'aria. Tale analisi si basa sul metodo Monte-Carlo il quale permette di stimare il valore medio di una variabile attraverso un'indagine campionaria, riducendo il livello di incertezza tramite una serie di simulazioni di un numero elevato di possibili scenari. Gli output forniscono una valutazione probabilistica del rischio sismico espressa tramite delle mappe di pericolosità e delle curve che descrivono le perdite economiche degli edifici presenti nel modello di esposizione. La determinazione della pericolosità sismica utilizza un'analisi di tipo "Event-Based Probabilistic Seismic Hazard Analysis" (paragrafo 2.1.1), che permette di valutare una serie di eventi stocastici per ogni modello di rottura presente nel set di movimenti del terreno per diverse probabilità di occorrenza. Le incertezze associate alla scelta del modello della sorgente sismica e alla scelta dei movimenti del terreno vengono prese in considerazione tramite l'utilizzo del logic tree.

Invece, l'obbiettivo di un'analisi "Scenario damage assessment" è quello di fornire le mappe della distribuzione del danno per ogni singolo scenario sismico. L'osservazione e la classificazione dello stato di danno a cui può essere soggetto un edificio è il primo passo per lo studio di interventi preventivi e di gestione delle emergenze. Tale analisi necessita la determinazione di un singolo scenario di rottura per poter derivare un set di movimento del terreno. Ogni movimento del terreno è combinato con il modello di fragilità in modo da definire una frazione della probabilità di danneggiamento del patrimonio costruito per ogni stato di danno. Le frazioni sono calcolate basandosi sulla differenza della probabilità di eccedenza tra le curve di stato limite consecutive per un dato livello di intensità. Pertanto i file di input da determinare sono il modello di esposizione, il modello di fragilità e il modello di rottura di un singolo terremoto. Mentre, l'analisi "Scenario risk assessment" permette di valutare le perdite economiche di un set di edifici a seguito di un evento per un dato set di movimento del terreno. Tale tipologia di analisi prevede la definizione di un modello di rottura che descrivere lo scenario sismico, il modello di esposizione e il modello di vulnerabilità.

# 3.4 I file di Input per la valutazione della pericolosita sismica del centro storico

Per poter valutare il rischio sismico è necessario determinarne la pericolosità. La sua valutazione fornisce dei dati di input, relativi al movimento del terreno, che permettono la mitigazione del rischio sismico. Determinare la pericolosità sismica necessità l'analisi di una grande mole di dati difficilmente valutabili. Il progetto SHARE (Seismic Hazard Harmonization in Europe) mette a disposizione tali dati tramite il sito online <a href="http://www.efehr.org">http://www.efehr.org</a> o tramite il portale SHARE (<a href="www.share-eu.org">www.share-eu.org</a>). Il progetto Share, nasce nel 2009 con lo scopo di costruire un modello di pericolosità di riferimento per l'Europa e per la Turchia. I risultati ottenuti rappresentano la prima valutazione di pericolosità sismica completa per il territorio italiano a partire dal 2006, anno in cui è stato rilasciato il modello di pericolosità di riferimento nazionale (Meletti, et al. 2014). Il contributo di più di 250 esperti tra cui ricercatori, sismologi, geodetici, geologi, statistici, ingegneri sismici e altri ha permesso di realizzare e rendere disponibili:

- mappe di pericolosità sismica per diversi periodi di ritorno (da 72 a 5000 anni) per PGA e diverse ordinare spettrali;
- curve di pericolosità;
- spettri di pericolosità uniforme;
- disaggregazione della PSHA in termini di PGA e accelerazioni spettrali.

Il modello di pericolosità fornito dal progetto SHARE, chiamato ESHM13 (European Seismic Hazard Model 2013), è uno dei primi progetti che ha contribuito all'iniziativa GEM (Global Earthquake Model). Il progetto si basa sulla metodologia PSHA. La PSHA (Probabilistic seismic hazard assessment) è una delle procedure che permette di valutare la pericolosità sismica del territorio. È un metodo probabilistico che permette di stimare la probabilità che si verifichi un determinato scuotimento, in funzione del tempo, considerando tutti i possibili terremoti nell'area di interesse. La PSHA fornisce mappe che mostrano i valori di PGA con una probabilità di eccedenza del 10% e un periodo di ritorno di 50 anni, oltre a spettri di pericolosità uniforme (UHS, "Uniform Hazard Spectrum") per un range di periodo di ritorno e la disaggregazione dell'ordinata spettrale in funzione della magnitudo e della distanza al sito.

La PSHA assume un ruolo importante nelle applicazioni ingegneristiche e nell'analisi del rischio sismico, viene utilizzata per valutare la pericolosità di un sito specifico e può essere estesa a scala nazionale o continentale considerando diversi siti. I modelli nazionali o quelli che uniscono diversi paesi sono basati su procedure simili ma tuttavia diverse, non armonizzate tra loro e che possono condurre a dei risultati non propriamente corretti. Il progetto SHARE ha l'obbiettivo di superare le differenze tra i modelli precedenti e definire nuovi approcci nella modellazione dei terremoti in modo da arrivare alla generazione di modelli di attenuazione e di movimento del terreno. Qualunque analisi PSHA, ha bisogno di due componenti: il modello sulle sorgenti sismiche (terremoti), che caratterizzano la sismicità dell'aria di interesse, e il modello di movimento del terreno, che riguarda l'attenuazione delle ampiezze di tali movimenti attraverso

un set di equazioni. Ogni modello di terremoto combinato con il modello di scuotimento del terreno rappresenta una metodologia per poter definire uno schema di pericolosità sismica per le regioni Europee. Ogni modello si basa su diverse assunzioni, diverso utilizzo di dati e diversa valutazione delle incertezze. L'area studiata dal progetto SHARE comprende un'area che estende dalla dorsale medio atlantica fino all'est Europa e dalle zone di subduzione del mediterraneo e dalla faglia in Turchia fino alla zona baltica. Pertanto, risulta difficile la definizione dei modelli che permettono di valutare la pericolosità sismica in quanto le zone tettoniche presentano diverse caratteristiche, diverse modalità di propagazione delle onde e non sempre sono disponibili grandi quantità di dati.

### 3.4.1 Modellazione dei terremoti

Un punto chiave per l'analisi della pericolosità sismica è modellare le incertezze epistemiche attraverso l'utilizzo di un logic tree (*Figura 3-36*). Il modello ESHM13 si basa su tre livelli di ramificazione: il primo ramo è rappresentato dal modello di terremoto, il secondo dalla massima magnitudo e il terzo dal modello del terreno. La tipologia di placche tettoniche, rappresentato in grigio in *Figura 3-36*, non è un livello di ramificazione ma viene usato per definire il "GMPEs" (Global Earthquake Model) set che deve essere utilizzato. Il progetto SHARE, calcola l'attività sismica futura basandosi su informazioni sismologiche, geologiche, tettoniche e geodetiche, i modelli forniti sono l'AS (Area Source Model), SEIFA (Seismicity and accumulated Fault model) e FSBG (Fault Source and Back Ground model).

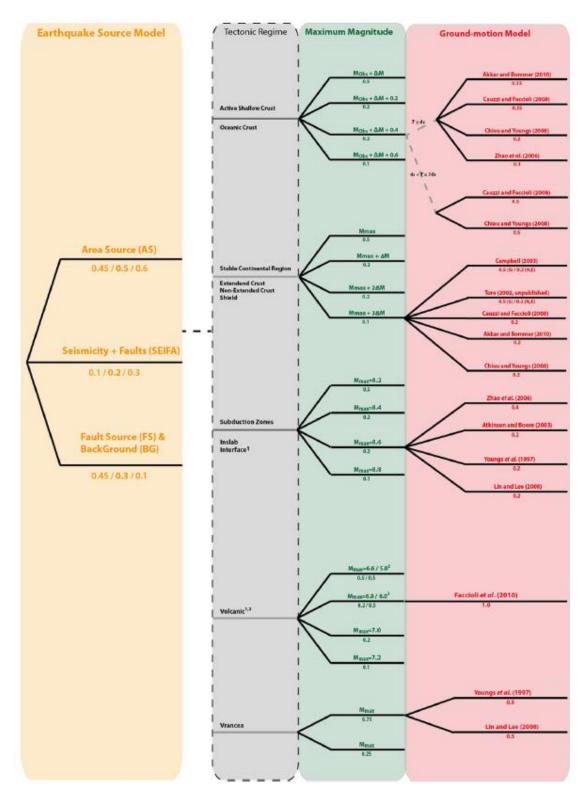


Figura 3-36- SHARE logic tree. I colori descrivono il livello di ramificazione rispetto al modello del terremoto (giallo), il modello di massima magnitudo (verde) e il modello del terreno (rosso). I valori sotto la linea nera indicano il "peso", mentre per il tipo di terremoto indicano gli schemi per diversi periodi di ritorno (Woessner, Laurentiu, et al. 2015).

#### AS model

Il modello "Area Source" è stato per molti anni la metodologia principale utilizzata per il calcolo della pericolosità sismica, sia in Europa che nel resto del mondo. Le zone del modello in esame sono studiate con l'ipotesi che un terremoto possa verificarsi ovunque in qualunque zona tettonica. Nel modello sono considerati, tramite studi di esperti, la sismicità, le zone tettoniche la geologia e la geodesia. La sismicità della crosta terreste è valutata fino ad una profondità di 40 km. Il modello finale consiste in 432 aree rappresentate in Figura 3-37 *Zone del modello AS* è stato frutto di un processo di armonizzazione con i modelli passati ed ha considerato diversi elementi tra cui la variabilità degli ambienti sismo tettonici, le diversità dei dati presenti all'interno dei documenti, le differenti filosofie adottate nei modelli precedenti. Inoltre, nell'ultimo passaggio di armonizzazione sono state rimosse i modelli di terremoti che sono risultati privi di sismicità.

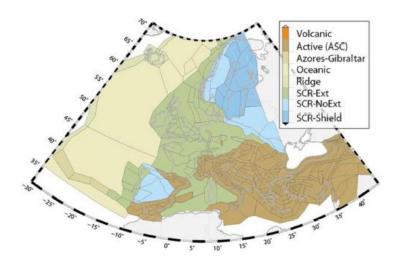


Figura 3-37 Zone del modello AS (Woessner, Laurentiu, et al. 2015)

Nella definizione del modello le differenze tra le varie zone tettoniche hanno portato ad una delineazione delle aree, ciò è dovuto soprattutto alla presenza di faglie attive presenti in Italia, Turchia, Grecia e nei Balcani, mentre per quanto riguarda la parte nord-europea non sono presenti grandi informazioni a causa della scarsa conoscenza delle faglie. Sono invece migliorate, durante il progetto SHARE, le conoscenze delle faglie presenti nel sud della Spagna. In definitiva, il catalogo generato contiene circa 8000 eventi, di cui molte aree contengono pochi dati. Dal modello si evince come lungo le faglie principali, quindi lungo la Turchia, le coste della Grecia e lungo l'Appennino italiano siano presenti alti valori di sismicità. (Woessner, Laurentiu, et al. 2015)

#### Modello seismicity and accumulated fault (SEIFA)

Tale modello si basa sulla produttività totale e sulla distribuzione di frequenza-magnitudo, presenti all'interno del catalogo SHEEC (SHARE European Earthquake Catalogue). Inizialmente è stato valutato il catalogo completo sui terremoti e successivamente, tramite una combinazione pesata di due funzioni, una di densità e una di probabilità spaziale, sono stati distribuiti spazialmente i tassi sui terremoti. Le due funzioni sono state stimate considerando sismicità passate, la quantità di energia accumulata e rilasciata dalle faglie, la loro geometria e il tipo di slittamento. I pesi delle due funzioni di densità spaziale dipendono dalla magnitudo del terremoto e sono stati valutati tramite degli esperimenti. Il modello è stato per la prima volta sviluppato per la California e poi utilizzato a scala Europea. Nel dettaglio, il modello è stato generato utilizzando terremoti con profondità inferiore a 40 km e faglie attive presenti nel database Europeo. La sismicità è stata modellata separatamente per le zone di subduzione, tramite una geometria tridimensionale, considerando il modello Calabrese, Ellenico e di Cipro. Nonostante le faglie attive e le zone di subduzione prevedano diversi modelli, esse sono state trattate allo stesso modo in quanto sono caratterizzate dalla stessa grandezza, geometria e tasso di slittamento e sono state convertite in energia rilasciata per unità di area. Il modello si basa su diverse assunzioni:

- la produttività e la distribuzione dei sismi è la migliore distribuzione di frequenzamagnitudo dei terremoti passati;
- i terremoti futuri si verifichino nelle vicinanze di quelli passati;
- i terremoti più intensi avvengano con più probabilità sulle faglie già individuate o su quelle con uno scorrimento più veloce rispetto a quelle con scorrimento lento.

Tali assunzioni vengono parametrizzate per stimare il tasso annuo di terremoti come una funzione dello spazio e della magnitudo.

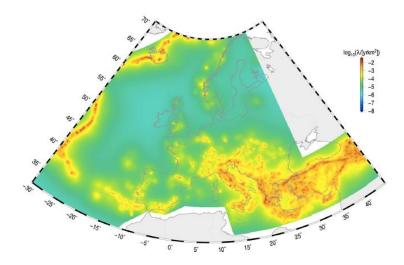


Figura 3-38 Distribuzione spaziale del tasso annuo dei terremoti previsti secondo il modello SEIFA (Woessner, Laurentiu, et al. 2015)

Dalla Figura 3-38 si evince come il tasso annuale riferito alla sismicità della superficie terreste sia più alto nelle regioni attualmente attive. Il modello prevede, per l'Europa e la Turchia, una magnitudo massima pari a 8.6. La pericolosità sismica viene concentrata nei luoghi in cui in passato si è già verificato un terremoto.

#### Modello Fault Sources and background (FSBG)

Nel modello FSGB, il tasso di attività delle faglie è determinato dai dati sulle deformazioni come si deduce dai metodi geodetici e geologici. Nel modello i tassi di attività dipendono principalmente dal tasso di scorrimento e dalla massima magnitudo della faglia sorgente. Vengono utilizzate le sorgenti comprese nel modello Area Source e modificate in termini dimensionali e di produttività rispetto alle sorgenti di background in quanto non si conoscono tutte le faglie crostali presenti all'interno dell'area coperta dal progetto SHARE. Si suppone che per le sorgenti di background siano conosciute tutte le faglie che possono generare un sisma di magnitudo superiore a 6.5. Eventi con magnitudo maggiore di 6.5 sono modellati con una geometria 3D delle faglie sorgenti, la loro posizione può variare in funzione della localizzazione dell'ipocentro, della magnitudo e dell'area. Invece, terremoti con magnitudo compresa tra 4.5 e 6.4 possono verificarsi attraverso una sorgente di background e risultano distribuiti in modo omogeneo. Il potenziale sismico di ogni faglia viene valutato convertendo il tasso di energia rilasciato a lungo-termine dalla placca tettonica nel tasso di attività sismica. Ci sono diverse metodologie che permettono di ricavare il tasso di attività sismica, tra cui quello proposto da Anderson e Luco (Anderson e Luco 1983), che definiscono tassi di attività confermi alla distribuzione di Gutenberg-Richter. Il modello FSGB è stato realizzato per zone di background che comprendono gli appennini settentrionali italiani, contiene otto faglie sorgenti e tutte contribuiscono alla produttività globale con il tasso massimo di scorrimento. Il tasso massimo di scorrimento viene utilizzato per stimare il tasso di attività delle faglie sorgenti che, come mostrato in Figura 3-39, spesso, definisce un limite superiore dell'attività rispetto ai dati osservati nel catalogo.

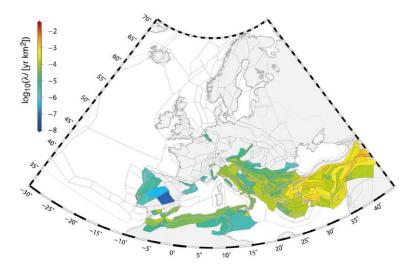


Figura 3-39 - Tasso annuale di terremoti secondo il modello FSGB per  $log10(\lambda(Mw \ge 4.5/km2))$ 

Il modello FSBG considera perlopiù l'Europa meridionale e la Turchia e prevede uno scuotimento del terreno più alto lungo le faglie a scorrimento veloce della Turchia mentre si stima una pericolosità bassa-moderata per le faglie a scorrimento lento dell'Europa sud-orientale e l'Italia. Tale differenziazione dipende da come vengono modellati i tassi, in particolare i tassi delle faglie a scorrimento veloce sono stati modellati in modo da superare la sismicità osservata di un fattore pari a dieci mentre i tassi relativi alle faglie a scorrimento lento sono, in generale, pari ai tassi osservati (Woessner, Laurentiu, et al. 2015).

#### 3.4.2 Modello di movimento del terreno

L'utilizzo di una procedura iterativa ha permesso di combinare le analisi di esperti europei con dati testati, il risultato ha portato alla realizzazione di "un logic tree" per GMPEs che definisce il possibile movimento del terreno futuro. I dati testati sono stati ricavati da un'analisi sulla regione tettonica dell'Europa e hanno portato alla formulazione di quattordici equazioni. Tali equazioni descrivono i movimenti del terreno futuri considerando tutte le magnitudo, profondità, le condizioni geologiche e range di distanze esistenti in Europa. I dati sono stati reperiti dal database compilato dal progetto SHARE, tale database si basa su 13.500 documenti di 2.268 eventi registrati da 3.708 stazioni. Inoltre, tramite un approccio gerarchico, sono state rimosse le doppie voci relative agli eventi, informazioni sulle stazioni e sulle forme d'onda. Le equazioni sono state selezionate seguendo sei passaggi fondamentali:

- Pre-selezionare equazioni adatte alle regioni tettoniche scelte;
- Valutare l'abilità di tali equazioni nel predire i movimenti del terreno dati da un sisma in ogni regione tettonica attraverso un set di regole predefinite;
- Verifica delle equazioni prescelte secondo i dati a disposizione seguendo la procedura descritta da Scherbaum et al. (Scherbaum, Delavaud e Riggelsen 2009);
- Combinazione dei risultati ottenuti dai due punti precedenti all'interno di uno schema pesato;
- Valutazione sensitiva dei pesi proposti per il logic tree per ogni regione tettonica e successiva revisione dei proposti pesi, se necessario.
- Definizione dei pesi finali, determinati da opinioni esperte e analisi sensitive.

Le equazioni finali da utilizzare nel logic tree sono state selezionate da esperti a seguito di diverse analisi e riflessioni. Sono state selezionate quattro equazioni per la crosta attiva superficiale ed oceanica, cinque per le regioni continentali stabili, quattro modelli per le zone di subduzione e uno per le aree vulcaniche (Woessner, Laurentiu, et al. 2015).

I risultati del progetto ESHM13 possono essere utilizzati come riferimento per aggiornare le norme sismiche a scala nazionale ed Europea o comunque come modello per diverse applicazioni. Infatti, grazie all'utilizzo di procedure rigorose e standardizzate per tutte le fasi del processo e 82

l'aiuto di esperti, il progetto fornisce un database che permette la valutazione della pericolosità sismica considerando le incertezze epistemiche sia per i componenti del modello sia per i risultati. Inoltre la documentazione, i dati ed i risultati sono facilmente accessibile a qualsiasi persona. I file sono stati modificati dalla GEM in modo da poter funzionare all'interno del software OpenQuake.

# 3.5 I file di Input per la valutazione del rischio sismico del centro storico di Moncalieri

Le analisi effettuate sul centro storico di Moncalieri, come descritto al paragrafo 3.3, prevedono la definizione di modelli di input. Tali modelli possono essere computati tramite la piattaforma di OpenQuake con l'ausilio dell'Input Preparation Toolkit che permette di trasformare in linguaggio NRML i dati necessari alla valutazione del rischio.

#### 3.5.1 Il modello di rottura

Il modello di rottura rappresenta un dato di input sia per l'analisi "Scenario Damage Assessment" che per l'analisi "Scenario Risk Assessment". La rottura viene modellata tramite la piattaforma OpenQuake inserendo le diverse informazioni che la caratterizzano (Figura 3-40). Tra cui:

- la magnitudo;
- il *rake*, che esprime la direzione, descritta in funzione dell'angolo nella quale il blocco sopra la faglia si muove durante una rottura, misurata in relazione allo strike sul piano di faglia;
- la profondità, la longitudine e la latitudine dell'ipocentro;
- il tipo di rottura, che nel caso di una faglia generica prevede la definizione dello *strike* e del *dip*. Lo strike rappresenta l'angolo, misurato in senso orario, formato dalla traccia della faglia con il nord geografico mentre il dip è l'angolo misurato nel piano verticale tra la linea di massima pendenza sul piano di faglia ed il piano orizzontale;

Nel caso studio in esame sono stati considerati diversi modelli di rottura, due in riferimento a terremoti realmente accaduti e altri simulati, con il fine di poter definire il danno e le perdite che si possono avere a seguito ad eventi con diverse caratteristiche. Uno degli eventi considerati che ha interessato il territorio piemontese è il sisma del 1808 con epicentro in Val Pellice (longitudine: 7.428, latitudine: 44.838), valle alpina della città metropolitana di Torino e distante circa 55 km da Moncalieri, ad una profondità di 25 km. Il terremoto di magnitudo 5.7 causò diversi danni al patrimonio edilizio. Non sono presenti in letteratura informazioni inerenti *rake, strike* e *dip*, tali valori sono stati ipotizzati e posti rispettivamente pari a 90°, considerando un tipo di faglia inversa, 0° e 90°. L'altro terremoto storico preso in esame è quello con epicentro a circa 7 km da Imperia, capoluogo della Liguria, distante circa 126 km da Moncalieri, e ad una profondità di 15 km, con una magnitudo di 6.3. Anche in questo caso non vengono forniti dati rispetto al rake,

strike e dip, pertanto sono state effettuate le stesse ipotesi del terremoto avvenuto a Val Pellice. Gli eventi sismici simulati presentano epicentro con longitudine e latitudine uguali ai terremoti storici e una profondità di 10 km, per i dati inerenti strike, rake e dip sono state effettuate le stesse assunzioni dei terremoti storici e per quanto riguarda la magnitudo è stata considerata pari a 4.5, 5.5, 6 e 6.5. In definitiva sono stati determinati dieci modelli di rottura.

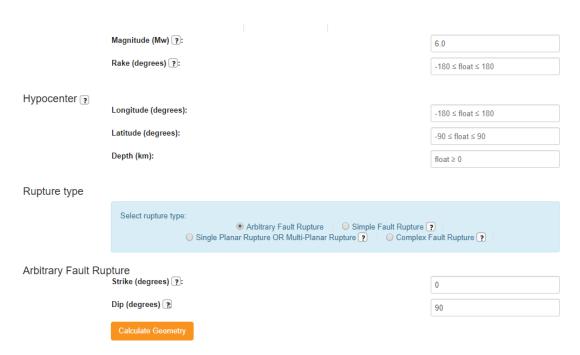


Figura 3-40 – Caratteristiche del modello di rottura (Input Preparation Toolkit, OpenQuake Platform)

## 3.5.2 Il modello di esposizione

Il modello di esposizione contiene le informazioni dei diversi parametri che caratterizzano gli edifici presenti nell'area di interesse. Il modello viene costruito definendo un id, la tassonomia, il valore di ricostruzione e le coordinate geografiche (Silva, Crowley, et al. 24 Febbraio 2013). Nel caso in esame è stato creato un modello di esposizione che comprende 589 edifici presenti nel centro storico di Moncalieri. Come identificativo, "id", viene utilizzato lo stesso valore presente nella "tabella attributi" fornita dal software QGis in cui ogni edificio dell'area di interesse viene identificato tramite un numero. Utilizzando lo stesso identificativo è possibile graficizzare i risultati ottenuti dalle analisi grazie all'interoperabilità tra i software. Il campo inerente alle coordinate geografiche viene determinato tramite il software QGis, in cui lo shape file permette di rappresentare i dati spazialmente, fornendo indicazioni sulla longitudine e latitudine degli edifici. Per quanto riguarda i costi di ricostruzione, sono stati considerati solo quelli strutturali che fanno riferimento al costo di ricostruzione/riparazione a seguito dell'evento sismico della struttura portante. Tali valori sono stati determinati considerando la tabella 6 dell'ordinanza n.19 del 7 aprile 2017, (Presidenza del Consiglio dei Ministri 2017) dove vengono riportate le misure per il ripristino e la ricostruzione di immobili gravemente danneggiati o distrutti dal sisma

verificatisi a far data dal 24 agosto 2016 nei territori dei Comuni delle Regioni di Abruzzo, Lazio, Marche e Umbria. Tali valori sono dei costi parametrici che si basano sul livello di danno reale che ha subito l'edificio in seguito all'evento sismico. Nel caso in esame, essendo Moncalieri una zona a bassa sismicità e non potendo valutare il livello di danno, si è ipotizzato un livello operativo L1 considerando una vulnerabilità degli edifici da bassa a significativa e un'area, per tutte le strutture, superiore a 220 m². Come riportato all'interno della direttiva il costo è stato incrementato del 40% per gli edifici parte del patrimonio culturale, mentre del 20% per tutti gli altri edifici facenti parte del centro storico. In definitiva per la determinazione della voce inerente ai costi è stato considerato un valore di 910 €/m² per gli edifici patrimoniali e di 780 €/m² per i restanti.

Costo parametrico	Livello operativo L0	Livello operativo L1	Livello operativo L2	Livello operativo L3	Livello operativo L4
Fino a 130 mq.	400	850	1100	1250	1450
Da 130 a 220 mq.	330	750	900	1100	1250
Oltre i 220 mq.	300	650	800	950	1100

Tabella 3-3 – Costi di riparazione/ricostruzione post-sisma (Presidenza del Consiglio dei Ministri 2017)

Infine, la tassonomia rappresenta un campo fondamentale che permette al software di correlare il modello di esposizione con il modello di fragilità e di vulnerabilità. La tassonomia descrive le caratteristiche principali di un edificio e permette di raggruppare le strutture che presentano stessi attributi. Il problema principale del raggruppamento degli edifici è rappresentato dalla definizione delle caratteristiche che li rendono simili. In letteratura sono presenti diverse metodologie di classificazione che hanno portato allo sviluppo di diversi sistemi di raggruppamento. La EMS-98, effettua una classificazione delle principali tipologie di edifici Europei basandosi in primo luogo sulla tipologia di materiale strutturale e per alcuni edifici definisce il sistema di resistenza ai carichi laterali (LLRS), il livello di rinforzo e/o il materiale del pavimento definendo 15 diverse classi. Un'ulteriore classificazione è fornita dal progetto HAZUS, il quale suddivide gli edifici considerando il sistema strutturale, l'altezza e i criteri di progettazione sismica identificando sedici diverse classi di edifici. Per l'analisi del rischio sismico risulta fondamentale la conoscenza delle caratteristiche di un edificio, ogni parametro incide con un peso differente sul comportamento complessivo della struttura. Uno studio dell'incidenza percentuale dei parametri è fornito dalla letteratura ed è rappresentato in (Figura 3-41).

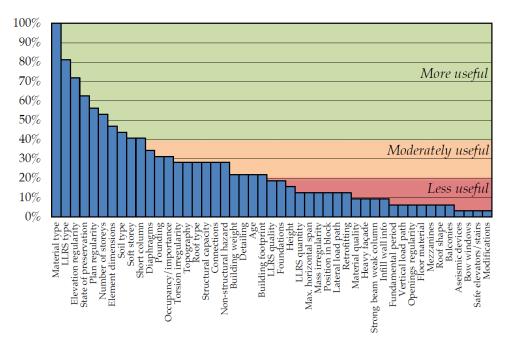


Figura 3-41 – Incidenza percentuale dei parametri degli edifici che possono influenzare il comportamento sismico

Sulla base della Figura 3-41, per il caso studio in esame sono stati considerati i parametri che risultano avere un'incidenza percentuale maggiore sull'analisi complessiva del rischio sismico. La tassonomia è stata costruita tramite la piattaforma di OpenQuake utilizzando lo strumento TaxtWEB fornito dalla GEM. La GEM ha costruito un sistema che utilizza quattro livelli per classificare set di dati di dettaglio diverso (Figura 3-42).

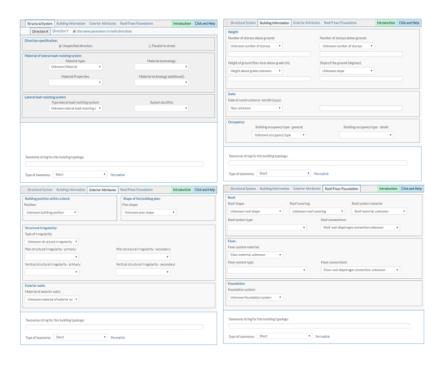


Figura 3-42 - Livelli per la costruzione della tassonomia (TaxTWEB).

All'interno dei quattro livelli è possibile inserire i parametri che classificano gli edifici, quali: il tipo di materiale, tipo di resistenza al carico laterale (LLRS), altezza, epoca di costruzione, occupazione, la forma, il tipo di fondazioni, di pavimento e di tetto. Gli edifici del comune di Moncalieri sono stati classificate in funzione delle diverse informazioni che differiscono a seconda del tipo di fonte. Infatti, sono state considerate due diverse tassonomie, una più semplice che comprende i dati digitali reperiti da sito dell'Arpa Piemonte che riporta informazioni riguardanti la tipologia costruttiva, il sistema resistete (LLRS), l'altezza, il numero di piani, l'anno di costruzione e la destinazione d'uso, determinando un totale di 240 tassonomie per un totale di 598 edifici. L'altra più dettagliata, ottenuta dall'analisi delle schede catastali fornite dalla soprintendenza della regione Piemonte, descrive gli edifici con gli stessi parametri della tassonomia semplice ma con i valori riportati all'interno delle schede, tali dati forniscono delle peculiarità difficilmente valutabili tramite un'analisi speditiva. In aggiunta, riporta informazioni sulla regolarità e l'irregolarità in pianta e in altezza degli edifici, indici, come si evince dalla Figura 3-41, incisivi per la determinazione del rischio sismico. Un ulteriore aspetto che viene valutato con un'analisi specifica è la vicinanza tra gli edifici, in modo da prendere in considerazione l'aspetto di interazione delle strutture durante un evento sismico. Entrambi i parametri aggiuntivi incidono in modo negativo sul comportamento sismico, essendo la maggior parte degli edifici irregolari e spesso non isolati. Il secondo modello presenta 511 tassonomie differenti su un totale di 598 edifici. L'unico elemento comune alle due tassonomie è rappresentato dall'altezza degli edifici. In Tabella 3-4, Tabella 3-5 sono riportati degli esempi di tassonomia costruite, nel primo caso, sulla base dei dati digitali, nel secondo sulla base dei dati catastali.

Analizzando nel dettaglio le diverse nomenclature presenti all'interno della tassonomia, si descrive il sistema strutturale con:

- CR "Concrete Reinforced", nel caso si analizzino strutture in cemento armato alle quali è associato un sistema resistente ai carichi laterali (LLRS) di tipo LFM (Moment Frame), rappresentativo delle strutture intelaiate;
- CR "Concrete Reinforced" in cui è stata aggiunta l'informazione inerente ai muri esterni EWMA (Masonry exterior walls), nel caso di strutture ibride in Muratura e cemento armato.
- M99 "Masonry unknown reinforcment", nel caso di strutture in Muratura alle quali è associato un sistema LLRS di tipo LWAL(Wall) in cui la resistenza ai carichi laterali è associata alle pareti in muratura.

Tali indici vengono inseriti sia nella tassonomia derivante da dati digitali che da dati catastali. L'altezza relativa agli edifici come precedentemente descritto si ritiene un'altezza approssimativa e viene inserita tramite la dicitura HFAPP (Approximate height of ground floor level above grade) a cui segue il dato riportato nei database.

Con la dicitura HEX (Exact number of storeys above ground) e con HBET (Range of number of storeys above ground) si descrive il numero di piani presente al di sopra del terreno, nel primo caso se si conosce il numero esatto mentre nel secondo se si hanno variazioni in altezza dell'edificio. La tassonomia inerente ai dati catastali contiene in aggiunta la dicitura HBEX (Exact number of storeys below ground) che rappresenta il numero di piani interrati, informazione presente all'interno delle schede tecniche-descrittive.

Le informazioni inerenti alle epoche di costruzione sono inserite con la nomenclatura YAPP (Approximate date of construction or retrofit) nella tassonomia con dati digitali, in quanto si ritiene che la data fornita sia una data approssimativa e non esatta, e con YBET (Upper and lower bound for the date of construction or retrofit) nella tassonomia con dati catastali, in quest'ultimo caso, infatti, le schede riportano il secolo di riferimento e non la data effettiva.

La sola tassonomia ottenuta da dati catastali contiene informazioni inerenti all'irregolarità in pianta e/o in elevato, e informazioni inerenti alla vicinanza o meno tra gli edifici. Nel primo caso i diversi si ha:

- Irregolarità in pianta, descritta con la dicitura "IRIR+IRPP:IRHO+IRPS:IRN";
- Irregolarità in altezza, descritta con la dicitura "IRIR+IRVP:IRVO+IRVS:IRN";
- Irregolarità sia in pianta che in altezza, descritta con la dicitura "IRIR+IRPP:IRHO+IRPS:IRN+IRVP:IRVO+IRVS:IRN";
- Struttura regolare, descritta con la dicitura "IRRE".

Nel secondo caso, si descrivono con:

- BPD (Detached building), gli edifici isolati;
- BP1 (Adjoining building(s) on one side) gli edifici collegati da un solo lato;
- BP2 (Adjoining building(s) on two side) gli edifici collegati da due lati;
- BP3 (Adjoining building(s) on three side) gli edifici collegati da tre lati.

	Tassonomia Dati Documenti Digitali
1	CR/LFM/HBET:1,2+HFAPP:5/YAPP:1820/RES
2	CR/LFM/HBET:1,3+HBAPP:1+HFAPP:8/YAPP:1820/MIX+MIX1
3	CR/LFM/HBET:1,3+HFAPP:13/YAPP:1820/RES
4	CR/LFM/HBET:1,4+HFAPP:7/YAPP:1820/RES
5	CR/LFM/HBET:2,3+HFAPP:4/YAPP:1820/RES
6	CR/LFM/HBET:2,5+HFAPP:16/YAPP:1820/RES
7	CR/LFM/HBET:3,4+HFAPP:11/YAPP:1820/RES
8	CR/LFM/HBET:3,6+HFAPP:8/YAPP:1820/RES
9	CR/LFM/HBET:4,5+HFAPP:12/YAPP:1820/RES
10	CR/LFM/HBET:4,5+HFAPP:14/YAPP:1820/RES
11	
	CR/LFM/HEX:1+HFAPP:3/YAPP:1820/IND
12	CR/LFM/HEX:1+HFAPP:3/YAPP:1820/RES
13	CR/LFM/HEX:1+HFAPP:4/YAPP:1820/RES
14	CR/LFM/HEX:1+HFAPP:4/YAPP:1880/RES
15	CR/LFM/HEX:1+HFAPP:5/YAPP:1820/RES
16	CR/LFM/HEX:1+HFAPP:5/YAPP:1880/RES
17	CR/LFM/HEX:1+HFAPP:6/YAPP:1820/IND
18	CR/LFM/HEX:1+HFAPP:6/YAPP:1820/RES
19	CR/LFM/HEX:1+HFAPP:7/YAPP:1820/RES
20	CR/LFM/HEX:1+HFAPP:8/YAPP:1820/RES
21	CR/LFM/HEX:2+HFAPP:4/YAPP:1820/RES
22	CR/LFM/HEX:2+HFAPP:5/YAPP:1820/RES
23	CR/LFM/HEX:2+HFAPP:6/YAPP:1820/RES
24	CR/LFM/HEX:2+HFAPP:6/YAPP:1880/EDU+EDU2
25	CR/LFM/HEX:2+HFAPP:7/YAPP:1820/RES
26	CR/LFM/HEX:3+HFAPP:6/YAPP:1880/EDU+EDU2
27	CR/LFM/HEX:4+HFAPP:14/YAPP:1820/RES
28	CR/LFM/HEX:4+HFAPP:15/YAPP:1820/RES
29	CR/LFM/HEX:4+HFAPP:16/YAPP:1820/RES
30	CR/LFM/HEX:4+HFAPP:17/YAPP:1820/RES
31	CR/LFM/HEX:5+HFAPP:14/YAPP:1820/RES
32	CR/LFM/HEX:5+HFAPP:15/YAPP:1820/RES
33	CR/LFM/HEX:5+HFAPP:16/YAPP:1820/RES
34	M99/HBET:2,3+HFAPP:10/YAPP:1820/RES
35	M99/HBET:2,3+HFAPP:12/YAPP:1820/RES
36	M99/HBET:2,3+HFAPP:13/YAPP:1820/RES
37	M99/HBET:2,3+HFAPP:6/YAPP:1820/RES
38	M99/HBET:2,3+HFAPP:7/YAPP:1820/RES
39	M99/HBET:2,3+HFAPP:8/YAPP:1820/RES
40	M99/HBET:2,3+HFAPP:9/YAPP:1820/RES
41	M99/LWAL/HBET:1,2+HFAPP:10/YAPP:1820/ASS+ASS1
42	M99/LWAL/HBET:1,2+HFAPP:17/YAPP:1820/RES
43	M99/LWAL/HBET:1,2+HFAPP:3/YAPP:1820/ASS+ASS1
44	M99/LWAL/HBET:1,2+HFAPP:3/YAPP:1820/RES
45	M99/LWAL/HBET:1,2+HFAPP:4/YAPP:1820/EDU+EDU2
46	M99/LWAL/HBET:1,2+HFAPP:4/YAPP:1820/RES
47	M99/LWAL/HBET:1,2+HFAPP:5/YAPP:1820/RES
48	M99/LWAL/HBET:1,2+HFAPP:6/YAPP:1820/MIX+MIX1
49	M99/LWAL/HBET:1,2+HFAPP:6/YAPP:1820/RES
50	M99/LWAL/HBET:1,2+HFAPP:7/YAPP:1820/RES
50	1417//LWAL/HDL1.1,2   HFAI1.// TAI1.1020/RES

Tabella 3-4 – 50/240 tassonomie definite tramite i Dati Digitali della Regione Piemonte

	Tassonomia Dati Documenti Catastali
1	M99/LWAL/HBET:1,3+HFAPP:5/YBET:1801,1900/RES/BP1/PLFP/IRIR+IRPP:IRHO+IRPS:I
	RN+IRVP:CHV+IRVS:IRN
2	M99/LWAL/HBET:1,3+HFAPP:6/YBET:1801,1900/EDU+EDU2/BPD/PLFP/IRIR+IRPP:IRH
	O+IRPS:IRN+IRVP:CHV+IRVS:IRN
3	M99/LWAL/HBET:1,3+HFAPP:7/YBET:1801,1900/COM+COM4/BP1/PLFP/IRIR+IRPP:IRH
	O+IRPS:IRN+IRVP:CHV+IRVS:IRN
4	M99/LWAL/HBET:1,3+HFAPP:8/YBET:1801,1900/EDU+EDU2/BPD/PLFP/IRIR+IRPP:IRH
	O+IRPS:IRN+IRVP:CHV+IRVS:IRN
5	M99/LWAL/HBET:1,4+HBBET:0,1+HFAPP:12/YBET:1801,1900/MIX+MIX1/BP1/PLFP/IRI
	R+IRPP:IRHO+IRPS:IRN+IRVP:CHV+IRVS:IRN
6	M99/LWAL/HBET:1,4+HFAPP:12/YBET:1801,1900/RES/BP1/PLFL/IRIR+IRPP:IRHO+IRPS
7	:IRN+IRVP:CHV+IRVS:IRN M99/LWAL/HBET:2,3+HBAPP:1+HFAPP:10/YBET:1901,2000/MIX+MIX1/BP2/PLFU/IRIR
/	+IRPP:IRHO+IRPS:IRN+IRVP:CHV+IRVS:IRN
8	M99/LWAL/HBET:2,3+HBAPP:1+HFAPP:11/YBET:1401,1500/MIX+MIX1/BP2/PLFP/IRIR+
0	IRPP:IRHO+IRPS:IRN
9	M99/LWAL/HBET:2,3+HBAPP:1+HFAPP:12/YBET:1401,1500/MIX+MIX1/BP3/PLFP/IRIR+
	IRPP:IRHO+IRPS:IRN+IRVP:CHV+IRVS:IRN
10	M99/LWAL/HBET:2,3+HBAPP:1+HFAPP:6/YBET:1801,1900/RES/BPD/PLFU/IRIR+IRPP:I
	RHO+IRPS:IRN+IRVP:CHV+IRVS:IRN
11	M99/LWAL/HBET:2,3+HBAPP:1+HFAPP:7/YBET:1401,1500/MIX+MIX1/BP2/PLFPO/IRIR
	+IRPP:IRHO+IRPS:IRN+IRVP:CHV+IRVS:IRN
12	M99/LWAL/HBET:2,3+HBAPP:1+HFAPP:7/YBET:1701,1800/EDU+EDU2/BP1/PLFP/IRIR+I
	RPP:IRHO+IRPS:IRN
13	M99/LWAL/HBET:2,3+HBAPP:1+HFAPP:8/YBET:1401,1500/MIX+MIX1/BP3/PLFP/IRIR+I
	RPP:IRHO+IRPS:IRN
14	M99/LWAL/HBET:2,3+HBAPP:1+HFAPP:8/YBET:1601,1700/RES/BP1/PLFR/IRRE
15	M99/LWAL/HBET:2,3+HBAPP:1+HFAPP:8/YBET:1701,1800/MIX+MIX1/BP1/PLFPO/IRIR
	+IRPP:IRHO+IRPS:IRN
16	M99/LWAL/HBET:2,3+HBAPP:1+HFAPP:8/YBET:1701,1800/MIX+MIX1/BP2/PLFP/IRIR+I
	RPP:IRHO+IRPS:IRN+IRVP:CHV+IRVS:IRN
17	M99/LWAL/HBET:2,3+HBAPP:1+HFAPP:8/YBET:1801,1900/MIX+MIX1/BP3/PLFR/IRIR+I
1.0	RVP:CHV+IRVS:IRN
18	M99/LWAL/HBET:2,3+HBAPP:1+HFAPP:9/YBET:1701,1800/RES/BP1/PLFU/IRIR+IRPP:IR
19	HO+IRPS:IRN+IRVP:CHV+IRVS:IRN M99/LWAL/HBET:2,3+HBAPP:1+HFAPP:9/YBET:1801,1900/RES/BP2/PLFL/IRIR+IRPP:IR
19	HO+IRPS:IRN+IRVP:CHV+IRVS:IRN
20	M99/LWAL/HBET:2,3+HBAPP:2+HFAPP:13/YBET:1801,1900/ASS+ASS1/BP3/PLFP/IRIR+I
20	RPP:IRHO+IRPS:IRN+IRVP:CHV+IRVS:IRN
21	M99/LWAL/HBET:2,3+HBBET:0,1+HFAPP:5/YBET:1801,1900/RES/BP1/PLFP/IRIR+IRPP:I
	RHO+IRPS:IRN+IRVP:CHV+IRVS:IRN
22	M99/LWAL/HBET:2,3+HBBET:0,1+HFAPP:9/YBET:1801,1900/COM+COM3/BP2/PLFR/IR
	RE
23	M99/LWAL/HBET:2,3+HBBET:0,1+HFAPP:9/YBET:1801,1900/EDU+EDU1/BP1/PLFP/IRIR
	+IRPP:IRHO+IRPS:IRN+IRVP:CHV+IRVS:IRN
24	M99/LWAL/HBET:2,3+HBBET:1,2+HFAPP:9/YBET:1801,1900/MIX+MIX1/BP1/PLFP/IRIR
	+IRPP:IRHO+IRPS:IRN+IRVP:CHV+IRVS:IRN
25	M99/LWAL/HBET:2,3+HFAPP:10/YBET:1801,1900/COM+COM3/BP1/PLFR/IRRE
26	M99/LWAL/HBET:2,3+HFAPP:10/YBET:1801,1900/COM+COM3/BPD/PLFR/IRRE
27	M99/LWAL/HBET:2,3+HFAPP:10/YBET:1801,1900/COM+COM4/BP2/PLFR/IRIR+IRVP:C
	HV+IRVS:IRN

Tabella 3-5 - 28/211 tassonomie definite tramite i Dati Catastali della Regione Piemonte.

## 3.5.3 Il modello di fragilità

Il modello di fragilità rappresenta un dato di input per la realizzazione dell'analisi "Scenario Damage Assessment", è possibile definire tale modello tramite l'ausilio dell'Input Preparation Toolkit della piattaforma OpenQuake. A monte è necessario valutare le curve di fragilità per ogni tassonomia presente all'interno del modello di esposizione, esse si differenziano a seconda della tipologia di edificio ed indicano la probabilità di superare diversi livelli di danno in funzione dell'intensità dello scuotimento sismico del terreno. Nel caso in esame sono state valutate curve di fragilità per edifici in muratura, in cemento armato, cemento armato e muratura e per gli edifici ecclesiastici. Nel dettaglio, le curve riferite agli edifici in muratura e in cemento armato sono state ricavate tramite lo strumento Fragility Functions Manager (FFM), del programma SYNER-G come riportato nel paragrafo 1.4.2. In particolare sono state utilizzate le curve calcolate con metodo analitico statico non lineare di (Borzi, Crowley e Pinho 2008) per gli edifici in muratura e le curve calcolate con metodo meccanico basato su analisi pushover di (Borzi, Pinho e Crowley, 2007) per gli edifici in cemento armato. Entrambe si differenziano a seconda del numero di piani. Le curve di fragilità degli edifici ibridi, in muratura e cemento armato sono le stesse previste per gli edifici in cemento armato in quanto presentano lo stesso sistema resistente ai carichi orizzontali (LLRS), mentre per le chiese sono state utilizzate quelle fornite da (Lagomarsino e Podestà, Seismic Vulnerability of Ancient Churches: II. Statistical Analysis of Surveyed Data and Methods for Risk Analysis 2004). Le curve di fragilità vengono inserite all'interno della piattaforma OpenQuake, per ogni tassonomia presente all'interno del modello di esposizione, come funzioni discrete, generando in questo modo il modello in formato NRML.

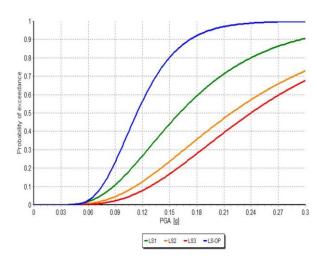


Figura 3-43 – Curve di Fragilità edifici in muratura fino a due piani (Borzi, Crowley e Pinho 2008)

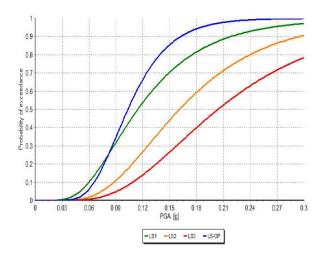


Figura 3-44 - Curve di Fragilità edifici in muratura fino a tre piani (Borzi, Crowley e Pinho 2008)

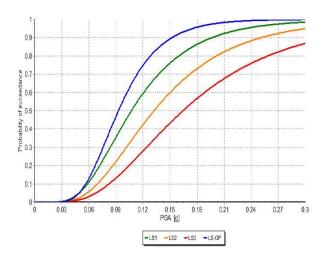


Figura 3-45 - Curve di Fragilità edifici in muratura fino a quattro piani (Borzi, Crowley e Pinho 2008)

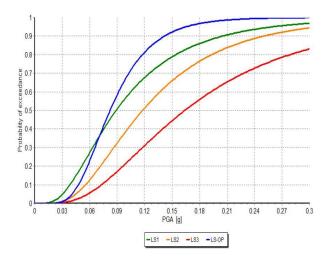


Figura 3-46 - Curve di Fragilità edifici in muratura fino a quattro piani (Borzi, Crowley e Pinho 2008)

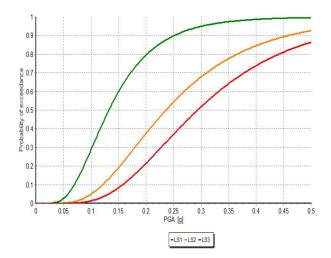


Figura 3-47 - Curve di Fragilità edifici in cemento armato fino a due piani (Borzi, Pinho e Crowley,2007)

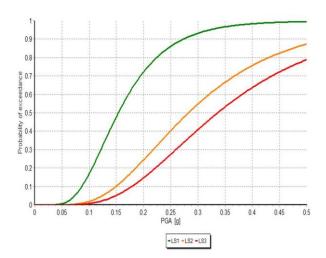


Figura 3-48 - Curve di Fragilità edifici in cemento armato fino a quattro piani (Borzi, Pinho e Crowley, 2007)

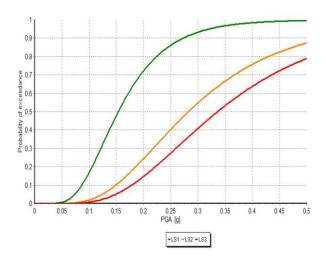


Figura 3-49 - Curve di Fragilità edifici in cemento armato fino a cinque piani (Borzi, Pinho e Crowley,2007)

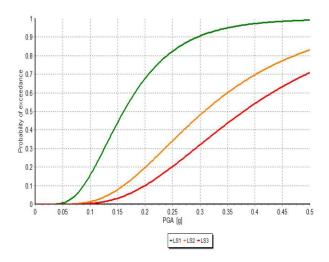


Figura 3-50 - Curve di Fragilità edifici in cemento armato fino a sei piani (Borzi, Pinho e Crowley, 2007)

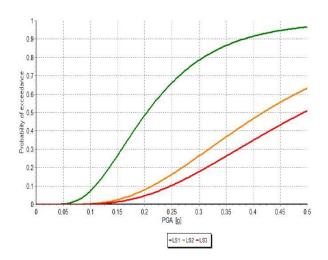


Figura 3-51 - Curve di Fragilità edifici in cemento armato fino a otto piani (Borzi, Pinho e Crowley,2007)

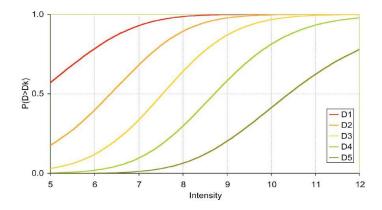


Figura 3-52 – Curve di Fragilità edifici patrimoniali (Chiese) (Lagomarsino e Podestà, Seismic Vulnerability of Ancient Churches: II. Statistical Analysis of Surveyed Data and Methods for Risk Analysis 2004)

#### 3.5.4 Il modello di vulnerabilità

Il modello di vulnerabilità rappresenta un dato di input per le analisi "Stochastic Event Based Probabilistic Seismic Risk Analysis" e "Scenario Risk Assessment". Tale modello viene definito tramite l'Input Preparation Toolkit disponibile sulla piattaforma OpenQuake. Il modello di vulnerabilità può essere definito per ogni tipo di perdita, nel caso in esame sono state analizzate le sole perdite strutturali. La definizione del modello di vulnerabilità prevede a monte la definizione di una funzione di vulnerabilità per ogni edificio presente nel modello di esposizione. Le curve di vulnerabilità sono state calcolate sulla base delle curve di fragilità, tramite la valutazione del della mean damage factor, utilizzando l'equazione 14 e della covarianza che rappresenta l'incertezza legata alla funzione di vulnerabilità e valutata come descritto da (Porter 2010), tale coefficiente generalmente decresce con il crescere del mean damage factor come mostrato in Figura 3-53.

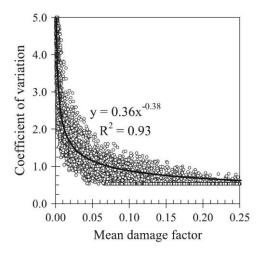


Figura 3-53 – Andamento della covarianza in funzione del mean damage factor (Porter 2010)

Correlando il mean damage factor e la covarianza con il valore dell'intensità sismica si ottengono le curve di vulnerabilità per gli edifici in muratura, cemento armato, misti e per le chiese. Per quanto concerne la definizione delle curve di vulnerabilità degli edifici monumentali sono state ricavate come descritto al paragrafo 1.4.2. In particolare utilizzando i diversi indici presenti nella Tabella 1-4 sono state valutate delle curve di vulnerabilità in base alla tipologia di bene. Nel dettaglio, analizzando il patrimonio storico presente nel centro storico di Moncalieri sono state ricavate curve per gli edifici a torre (utilizzate nel caso di campanili), per i palazzi, definita per il Castello di Moncalieri, per l'arco di trionfo, facendo riferimento a porta Navina e per il monastero/convento applicata al convento delle carmelitane scalze.

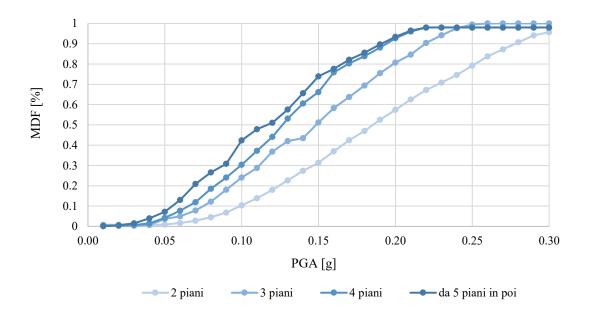


Figura 3-54 – Curve di vulnerabilità per gli edifici in muratura

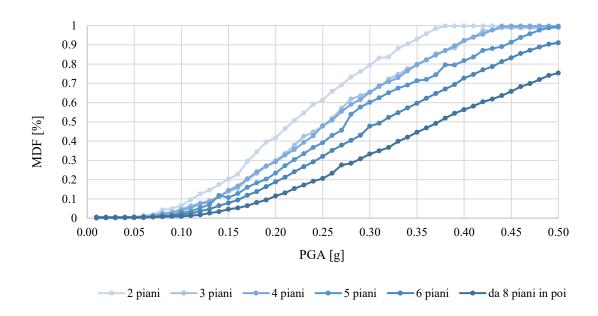


Figura 3-55 - Curve di vulnerabilità per gli edifici in cemento armato

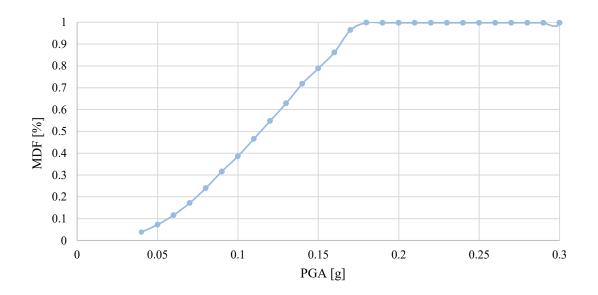


Figura 3-56 - Curve di vulnerabilità delle chiese

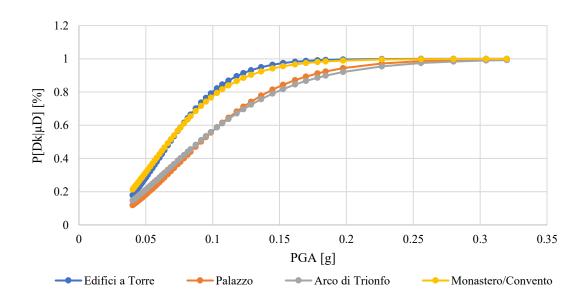


Figura 3-57 – Curva di Vulnerabilità degli edifici a torre, Palazzi, Arco di Trionfo e Monastero/Convento.

### 3.6 File di Configurazione

Determinati tutti i modelli di input esposti nei paragrafi precedenti, tramite l'Input Preparation Toolkit della piattaforma OpenQuake è possibile generare i file di configurazione per poter realizzare le analisi definite al paragrafo 3.3. La finestra "Configuration file" permette di generare un file zip contente i diversi modelli di input, in formato NRML, in base alla tipologia di analisi da effettuare. In particolare per l'analisi "Stochastic event based probabilistic seismic risk analysis", viene inserito il modello di esposizione, il modello di vulnerabilità e il modello per la valutazione della pericolosità definiti, rispettivamente, al paragrafo 3.5.2, 3.5.4,3.4.2. Oltre tali modelli è necessario definire i parametri relativi al sito e alla pericolosità dell'area in esame. La pericolosità sismica dell'area viene descritta tramite la velocità delle onde sismiche di taglio Vs.30, che sono funzione della topografia del luogo. Nel caso di Moncalieri si considera un valore delle onde di taglio pari ad 800 m/s, velocità riferita ad una categoria di sottosuolo di tipo B, in riferimento alla tabella normativa descritta all'interno delle norme tecniche per le costruzioni (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 2018) e riportata in *Tabella 3-6* nel seguente testo. Oltre alla velocità delle onde di taglio il sito viene descritto in base alla profondità minima in cui le onde di taglio hanno una velocità maggiore di 2.5 km/s e maggiore di 1 km/s, tali valori sono stati definiti rispettivamente pari a 5km e 100 km.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde
	di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteri-
	stiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
В	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consi-
	stenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da
	valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
С	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consi-
	stenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento del-
	le proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra
	180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consi-
	stenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento del-
	le proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra
	100 e 180 m/s.
Е	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le catego-
	rie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Tabella 3-6 – Categorie di Sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato per la determinazione della velocità delle onde di taglio (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 2018)

Tra i parametri che caratterizzano la pericolosità è necessario fissare:

- il tipo di intensità da utilizzare per descrivere il movimento del suolo;
- la massima distanza tra il sito e la sorgente;
- il livello di troncamento della distribuzione gaussiana;
- il periodo di indagine a cui deve far riferimento l'analisi della pericolosità;
- il set di eventi stocastici che devono essere generati dall'albero logico.

Ogni set di evento stocastico rappresenta una potenziale realizzazione della sismicità durante il tempo di indagine. Sono stati definiti rispettivamente la PGA per il tipo di intensità, 200 km come massima distanza sito-sorgente, 3 come troncamento della distribuzione gaussiana, 100 anni come periodo di indagine, 5 come set di eventi stocastici. Per il calcolo del movimento del terreno in questo tipo di analisi non si prevede nessuna legge di correlazione spaziale. L'impostazione del file di configurazione nel caso di analisi di Scenario damage assessment, prevede in input il modello di fragilità (paragrafo 3.5.3) mentre nel caso di analisi Scenario risk assessment, il modello di vulnerabilità (paragrafo 3.5.4). Inoltre per entrambe le analisi sono stati introdotti il modello di rottura, per ogni scenario sismico da analizzare, definito al paragrafo 3.5.1, il modello di esposizione (paragrafo 3.5.2) e la descrizione delle caratteristiche del sito in esame che risultano essere le stesse utilizzate nell'analisi "sthochastic event based probabilistic seismic risk". Le informazioni relative al calcolo del movimento del terreno sono state introdotte considerando la legge di attenuazione GMPE (Ground Motion Prediction Equations) definita da Bindi (2011), essa permette di considerare, nel calcolo dell'intensità sismica degli scenari, la dispersione dei dati e la loro incertezza valutando la variazione dell'intensità al variare della distanza epicentrale. La legge ottenuta per via statistica consente di correlerare i parametri sismici che descrivono sinteticamente un evento, paramteri geometrici che descrivono la posizione del sito rispetto alla sorgente e i parametri relativi le caratteristiche del suolo da un punto di vista geologico. Inoltre è stata considerata, per ogni singolo scenario, una correlazione spaziale definita da Jayaram e Baker (JB2009) che cosidera la possibilità di movimenti del terreno in siti diversi conoscendo la correlazione tra i due elementi (Jayaram e Baker 2009).

## 3.7 Analisi comparativa dei risultati

Le analisi hanno come obbiettivo principale la valutazione del rischio sismico di un'area caratterizzata da complessi strutturali con peculiarità differenti. Come definito nel paragrafo 3.2, i database contenenti le diverse informazioni degli edifici vengono definiti in diversi modi. Nel caso studio in esame sono state utilizzate due metodologie di acquisizione dei dati che hanno portato alla realizzazione di due database distinti e di conseguenza a risultati differenti. Infatti, le analisi descritte al paragrafo 3.3 sono state eseguite sia per il database ottenuto dall'analisi di documenti digitali, analisi di tipo speditiva, che per l'analisi dei documenti catastali che invece studia il singolo edificio dell'area in esame. L'obiettivo di una duplice analisi è quello di definire quali sono gli indici, caratterizzanti gli edifici, che maggiormente incidono sulla valutazione del rischio sismico e valutare la metodologia che fornisca un'analisi affidabile.

## 3.7.1 Stochastic event based probabilistic seismic risk analysis

L'analisi probabilistica è il criterio su cui si basa la valutazione della pericolosità sismica di un'area e consente di determinare le accelerazioni al suolo attese per un tempo di ritorno prefissato. I risultati ottenuti tramite questo tipo di analisi vengono sintetizzati nelle mappe di

pericolosità sismica. Il territorio piemontese è caratterizzato da un basso livello di pericolosità sismica, secondo i dati forniti dalla rete sismica regionale, ogni anno si verificano alcune centinaia di eventi sismici con magnitudo superiore a 1, con epicentro in Piemonte o nei territori limitrofi, di cui circa uno all'anno con magnitudo maggiore o uguale a 4 e nell'ordine della decina con magnitudo superiore a 3. L'istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia fornisce delle mappe di pericolosità sismica della regione Piemonte con diverse probabilità di eccedenza per un fissato periodo di ritorno (Figura 3-58, Figura 3-59, Figura 3-60, Figura 3-61, Figura 3-62). Il software OpenQuake-engine con l'analisi "Stochastic event based probabilistic seismic risk analysis" ha fornito in output le mappe di pericolosità sismica del centro storico del comune di Moncalieri (Figura 3-63, Figura 3-64, Figura 3-65, Figura 3-66, Figura 3-67, Figura 3-68). Dall'analisi delle varie mappe di pericolosità si evince un aumento della sismicità nella zona del Pinerolese e delle Alpi Marittime. Inoltre, con l'aumentare della probabilità di eccedenza si ha una diminuzione della pericolosità. Analizzando l'area del centro storico di Moncalieri si evince un'accelerazione massima al suolo pari a 0.14 corrispondente ad una probabilità di eccedenza del 1%, con il crescere della probabilità di superamento si ha una riduzione dell'accelerazione massima, si raggiungono infatti valori massimi di 0.05 per una probabilità di eccedenza pari al 50%. Essendo le mappe di pericolosità sismica dei modelli probabilistici dello scuotimento del suolo atteso in un sito a seguito di un evento, risultano essere funzione delle sole caratteristiche fisiche e geologiche di un territorio e, quindi, non dipendono dalle caratteristiche degli edifici. Quest'ultime, infatti, vanno integrate con le analisi della pericolosità al fine di poter valutare il rischio sismico dell'area in termini di perdite economiche e danni sulle strutture.

### Mappa Pericolosità Sismica del Piemonte

Mappa pericolosità sismica del Piemonte, considerando una probabilità di eccedenza del 2% in 50 anni, corrispondente ad un periodo di ritorno di 2475 anni.

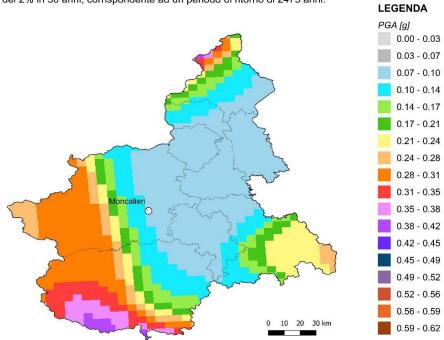


Figura 3-58 - Mappa di pericolosità sismica del Piemonte calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 2% in 50 anni

### Mappa Pericolosità Sismica del Piemonte

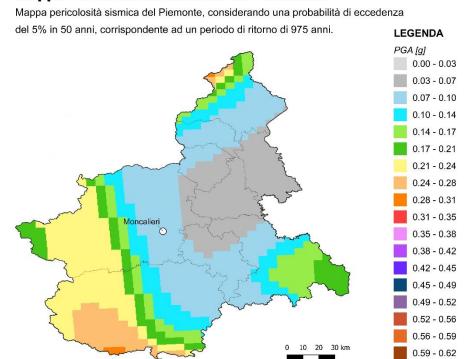


Figura 3-59 - Mappa di pericolosità sismica del Piemonte calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 5% in 50 anni

### Mappa Pericolosità Sismica del Piemonte

Mappa pericolosità sismica del Piemonte, considerando una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, corrispondente ad un periodo di ritorno di 475 anni.

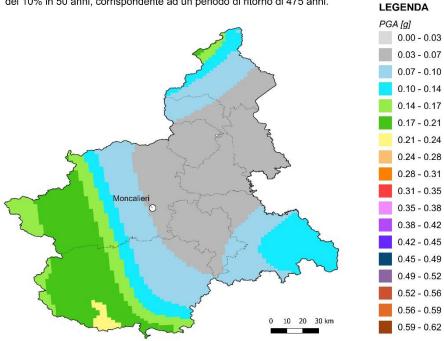


Figura 3-60 - Mappa di pericolosità sismica del Piemonte calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni

### Mappa Pericolosità Sismica del Piemonte

Mappa pericolosità sismica del Piemonte, considerando una probabilità di eccedenza del 39% in 50 anni, corrispondente ad un periodo di ritorno di 101 anni.

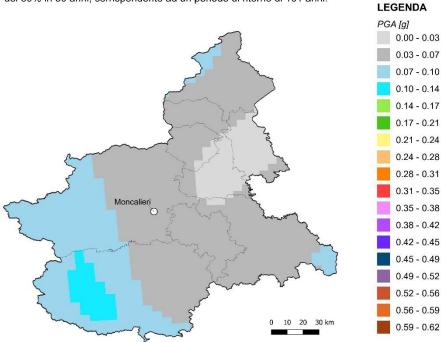


Figura 3-61 - Mappa di pericolosità sismica del Piemonte calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 39% in 50 anni

## Mappa Pericolosità Sismica del Piemonte

Mappa pericolosità sismica del Piemonte, considerando una probabilità di eccedenza del 50% in 50 anni, corrispondente ad un periodo di ritorno di 72 anni.

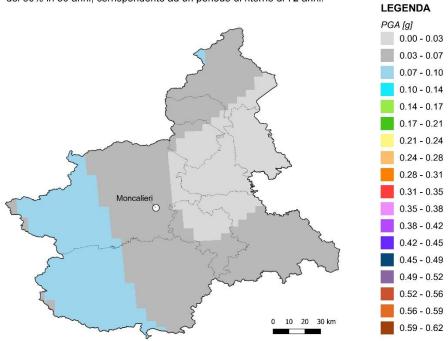


Figura 3-62 - Mappa di pericolosità sismica del Piemonte calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 50% in 50 anni

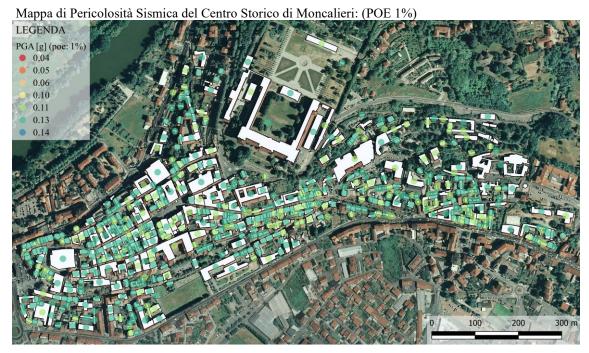


Figura 3-63 – Mappa di pericolosità sismica del centro storico di Moncalieri calcolata considerando una probabilità di eccedenza dell'1% e un periodo di ritorno di 100 anni

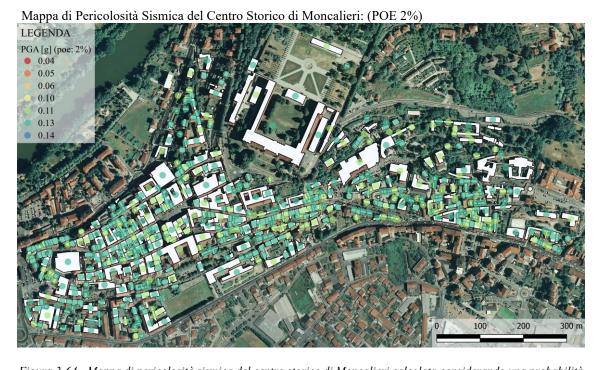


Figura 3-64 - Mappa di pericolosità sismica del centro storico di Moncalieri calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 2% e un periodo di ritorno di 100 anni

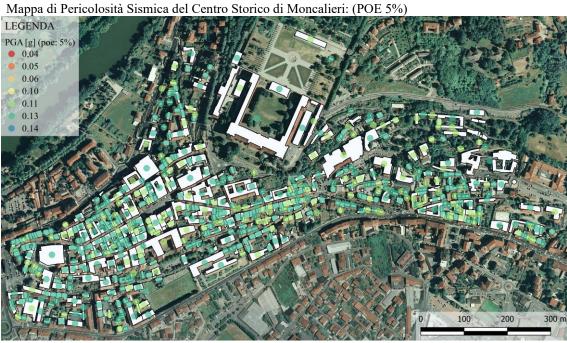


Figura 3-65 - Mappa di pericolosità sismica del centro storico di Moncalieri calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 5% e un periodo di ritorno di 100 anni



Figura 3-66 - Mappa di pericolosità sismica del centro storico di Moncalieri calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 10% e un periodo di ritorno di 100 anni



Figura 3-67 - Mappa di pericolosità sismica del centro storico di Moncalieri calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 39% e un periodo di ritorno di 100 anni



Figura 3-68 - Mappa di pericolosità sismica del centro storico di Moncalieri calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 50% e un periodo di ritorno di 100 anni

Sulla base dei risultati ottenuti dalle mappe di pericolosità sismica del territorio, il software OpenQuake, considerando un set di eventi stocastici rappresentativi della sismicità dell'area, permette di effettuare un ulteriore analisi che fornisce in output la distribuzione delle perdite economiche per ogni singolo bene. Il valore di perdita definito rappresenta un valor medio di probabilità di eccedenza per un periodo di indagine di 100 anni. L'analisi è stata effettuata per entrambi i database definiti al paragrafo 3.5.2 e risultati sono stati rappresentati graficamente con l'ausilio del software QGis (Figura 3-70, Figura 3-69). Dall'analisi dei risultati si evince una stima di perdite complessive, per il centro storico, nel caso di dati digitali pari a 20.736.713,7 €, mentre nel caso dei dati catastali pari a 34.592.053,97 €. La comparazione definisce un aumento delle perdite percentuale del 66,8% che in valore assoluto è pari a 13.855.340,31 €. Le perdite strutturali maggiori sono associate ai beni monumentali, essi caratterizzano un ingente aliquota delle perdite totali, nel caso dei dati digitali si ha una perdita pari a 6.809.821,79 €, che rappresenta il 32.83% delle perdite complessive, mentre nel caso dei dati catastali si ha una perdita pari al 15.619.774,8 €, che rappresenta il 45.15% del totale. Ciò è additabile all'utilizzo di un costo di riparazione/ricostruzione parametrico (€/m2) incrementato, come descritto al paragrafo 3.5.2. Anche analizzando le curve delle perdite per un periodo di ritorno esteso (Figura 3-69), si evince una delineata differenza tra i risultati forniti da i due database. Le curve della massima perdita probabile definiscono la relazione tra i diversi livelli di perdita e il periodo di ritorno atteso per un set di edifici. Inoltre rappresentano uno strumento per la determinazione delle misure di riduzione del rischio e sono utili per pianificare piani di emergenza post-sisma. (Calderon e Silva 2018).

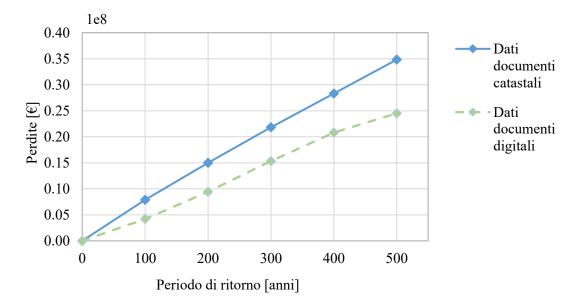


Figura 3-69 – Curve di perdita per il centro storico di Moncalieri.

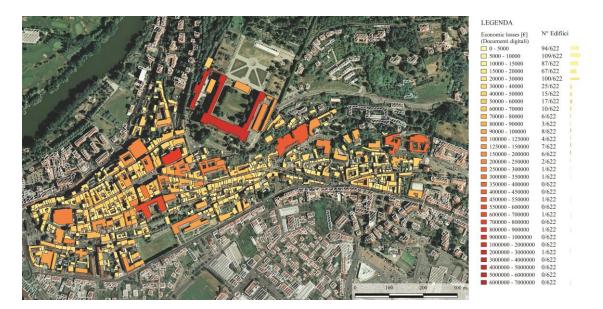


Figura 3-70 - Perdite economiche del centro storico di Moncalieri per una probabilità di eccedenza media ed un periodo di indagine di 100 anni, analisi dati Digitali.

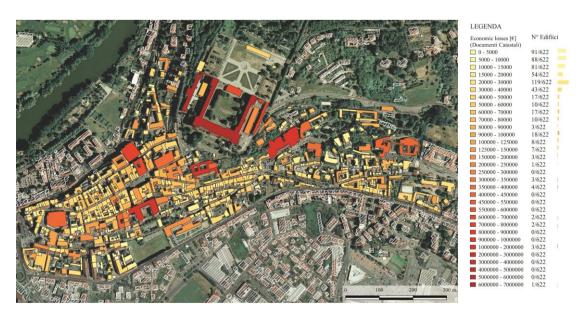


Figura 3-71 – Perdite economiche del centro storico di Moncalieri per una probabilità di eccedenza media ed un periodo di indagine di 100 anni, analisi dati Catastali.

# 3.7.2 Scenario damage assessment e scenario risk assessment analysis

Come definito al paragrafo 3.3, gli output generati dal software OpenQuake forniscono la stima della distribuzione di ogni livello di danno e delle perdite economiche per ogni edificio presente nel modello di analisi. In particolare l'analisi Scenario damage assessment permette di definire il numero di edifici che arrivano al collasso per un dato evento sismico mentre tramite l'analisi Scenario risk assessment è possibile valutare le perdite economiche connesse ad un determinato evento sismico. Le due analisi risultano correlate in quanto forniscono informazioni differenti per uno stesso scenario. Per ogni scenario sismico sono state realizzate doppie analisi per poter analizzare i risultati ottenuti sia dal modello definito tramite i dati catastali, analisi dettagliata, che dal modello definito tramite dati digitali, analisi speditiva. Per poter comprendere i risultati è importante ricordare che nel caso di una valutazione dettagliata 35 edifici risultano non presenti sull'area pertanto tale valutazione comprende solo gli edifici realmente presenti sul territorio. Nel caso di un'analisi speditiva l'analisi è stata condotta per tutti gli edifici forniti dalla regione e quindi comprende anche 35 edifici che ad oggi (2019) non sono più presenti, probabilmente a causa di un loro abbattimento. L'analisi comparativa valuta solamente i 587 edifici realmente esistenti.

Gli scenari analizzati sono quelli riportati al paragrafo 3.5.1 e si basano su due terremoti storici avvenuti nella zona del Pinerolese e in Liguria. Il terremoto avvenuto in Val Pellice, nel Pinerolese, nel 1808, ha riportato danneggiamenti nei paesi delle valli dei torrenti Pellice e Chisone e nel circondario di Pinerolo ("Catalogo dei Forti Terremoti in Italia") (Guidoboni, et al. 2008). Danni ingenti con diversi crolli, totali e parziali avvennero nei paesi di Bibiana, Bricherasio, Luserna, Perosa Argentina, San Germano Chisone e Torre Pellice, inoltre il sisma provocò leggeri danni nella città di Torino pertanto si ipotizza che anche Moncalieri abbia risentito degli effetti dell'evento. Il terremoto avvenuto in Liguria, a 7 km da Imperia nel 1887 è stato scelto in quanto la scossa fu avvertita in un'area molto vasta estesa per 568.000 kmq. Tale evento ha causato diversi danni nella costa ligure e nella regione montuosa tra la catena appenninica e le alpi marittime, inoltre le scosse vennero sentite anche nel comune di Moncalieri.

Nelle analisi di seguito riportate sono stati analizzati i danni che potrebbe provocare dei terremoti con le stesse caratteristiche di quelli storici, ma senza effettuare una valutazione delle perdite economiche in quanto tali terremoti sono avvenuti in epoche in cui la moneta presentava differente valore rispetto ai gironi nostri, e i danni e le perdite di alcuni terremoti simulati di diversa intensità ma con stesse caratteristiche di quelli storici. Tabelle riassuntivi dei dati dei terremoti e delle diverse magnitudo utilizzate nell'analisi sono riportate in Figura 3-72.

Dati Terremoto Val Pellice (Piemonte) - Storico	
Coordinate epicentro	Latitudine: 44.84
	Longitudine: 7.25
Data Evento	2 aprile 1808
Profondità	25 km
Distanza dall'epicentro	55 km
Magnitudo	5.7

Dati Terremoto Imperia (Liguria) - Storico	
Coordinate epicentro	Latitudine: 43.89
	Longitudine: 7.99
Data Evento	23 febbraio 1887
Profondità dell'ipocentro	15 km
Distanza da Moncalieri	126 km
Magnitudo	6.5

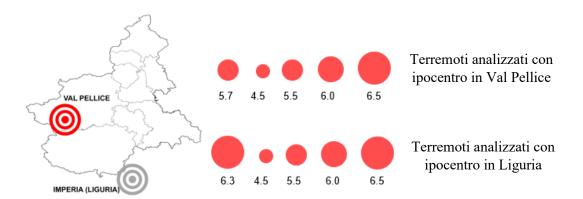


Figura 3-72 – Schema riassuntivo degli scenari sismici analizzati

## Analisi terremoto storico (1808), Val Pellice.

Il terremoto storico avvenuto in Val Pellice nel 1808 presenta una magnitudo pari a 5.7, epicentro posto a circa 55 km da Moncalieri ed ipocentro ad una profondità di 25 km. Di seguito sono riportate le analisi che descrivono la distribuzione del danno in funzione di analisi derivanti da dati digitali e dati catastali.

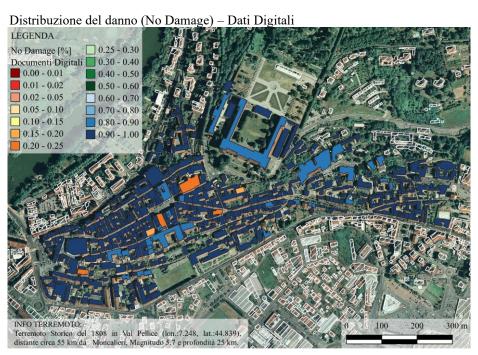


Figura 3-73 – Distribuzione del danno considerando il terremoto storico del 1808 con epicentro in Val Pellice e i dati digitali (No Damage).

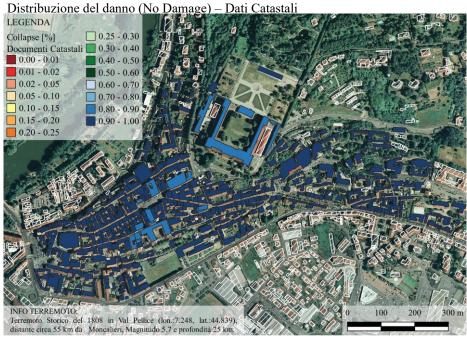


Figura 3-74 - Distribuzione del danno considerando il terremoto storico del 1808 con epicentro in Val Pellice e i dati catastali (No Damage)

L'analisi del terremoto storico ha l'obiettivo di evidenziare gli edifici del centro storico di Moncalieri maggiormente soggetti a danneggiamento qualora si presentasse un terremoto uguale a quello avvenuto nel 1808 con epicentro in Val Pellice. Considerando una analisi speditiva (dati digitali), la maggior parte degli edifici presentano una probabilità compresa tra il 90% ed il 100% di non essere danneggiati, una parte minore una percentuale compresa tra l'80% ed il 90% mentre si ha una percentuale bassa, compresa tra il 20% ed il 25%, per alcuni edifici ecclesiastici (elementi in arancione in Figura 3-73). Una leggera differenza presentano invece i risultati condotti con delle valutazioni dettagliate, in questo caso gli edifici presentano una probabilità di non essere danneggiati compresa tra l'80 ed il 90% (Figura 3-74).

Al fine di avere una stima del numero di edifici che rientrano nelle diverse classi percentuali di danno si riporta di seguito (Figura 3-75) un istogramma che sottolinea le differenze, da un punto di vista quantitativo, tra le due metodologie di raccolta dati utilizzate. In questo caso le differenze a seguito delle analisi dovute ai due database non comportano un divario significativo.

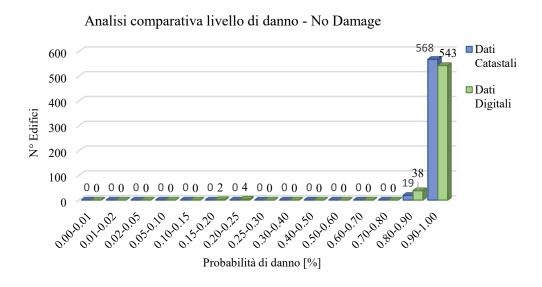


Figura 3-75 - Analisi comparativa del terremoto storico in Val Pellice (1808), in base al livello di danno No Damage

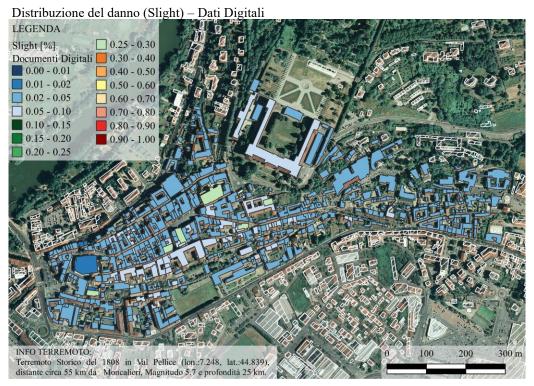


Figura 3-76 - Distribuzione del danno considerando il terremoto storico del 1808 con epicentro in Val Pellice e i dati digitali (Slight).

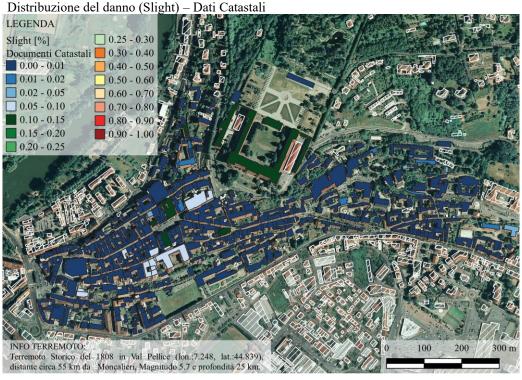


Figura 3-77 - Distribuzione del danno considerando il terremoto storico del 1808 con epicentro in Val Pellice e i dati catastali (Slight).

In Figura 3-76 è mostrata la possibilità che si verifichi un danno lieve con un'analisi derivante da dati digitali. Dalla figura si evince una probabilità molto bassa di danneggiamento, compresa tra l'1% ed il 10%, sempre nel caso di edifici ecclesiastici la percentuale aumenta assumendo dei valori compresi tra il 25% ed il 30%. In Figura 3-77 vengono mostrati i risultati derivanti dai dati catastali, in particolare, si analizza la probabilità di avere un lieve danno, la quale risulta maggiore per alcuni edifici vincolati (compresa tra il 5 ed il 15%) mentre per la restante parte si ha una probabilità di subire un danno lieve quasi nulla (valore massimo pari al'1%).

Un'analisi quantitativa e comparativa dei risultati è mostrata in Figura 3-78. Anche in questo caso le differenze a seguito delle analisi dovute ai due database non comportano un divario significativo.

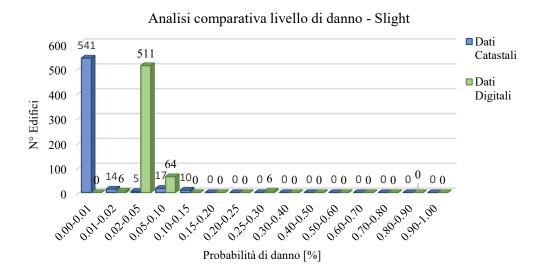


Figura 3-78 - Analisi comparativa del terremoto storico in Val Pellice (1808), in base al livello di danno Slight.

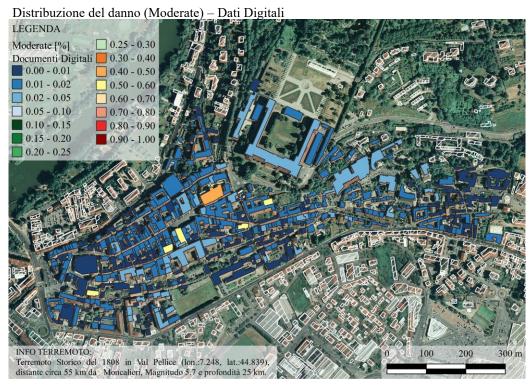


Figura 3-79 - Distribuzione del danno considerando il terremoto storico del 1808 con epicentro in Val Pellice e i dati digitali (Moderate).

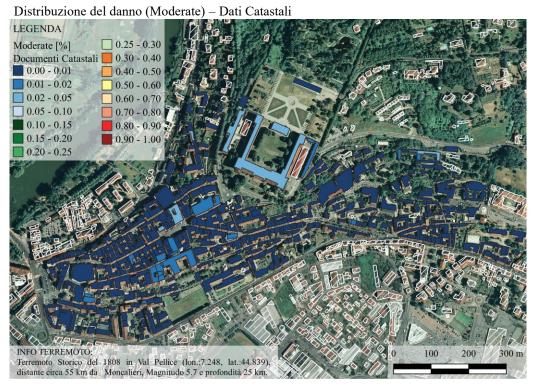


Figura 3-80 - Distribuzione del danno considerando il terremoto storico del 1808 con epicentro in Val Pellice e i dati catastali (Moderate).

Analizzando, invece, la probabilità che si verifichino danni moderati, per un'analisi speditiva Figura 3-79 e per un'analisi dettagliata, Figura 3-80, si evince nel primo caso una probabilità che si verifichino danni moderati, compresa tra il 40% ed il 60% per gli edifici ecclesiastici mentre per i restanti edifici si ha una probabilità compresa tra lo 0% ed il 5%. Nel secondo caso, la percentuale di danno moderato risulta compresa tra lo 0% ed il 2% per la maggior parte degli edifici, a differenza di alcuni edifici vincolati come il castello di Moncalieri che presenta una probabilità di danno moderato massimo pari al 5%.

Dall'analisi comparativa e quantitativa mostrata in Figura 3-81 non si hanno difformità rilevanti ai fini di una valutazione del rischio sismico.

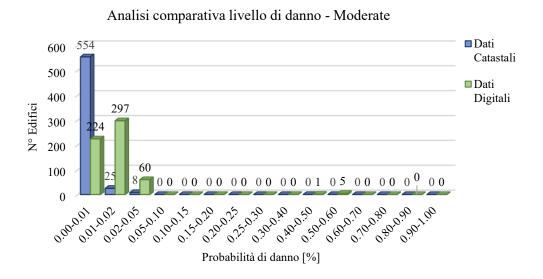


Figura 3-81 - Analisi comparativa del terremoto storico in Val Pellice (1808), in base al livello di danno Moderate

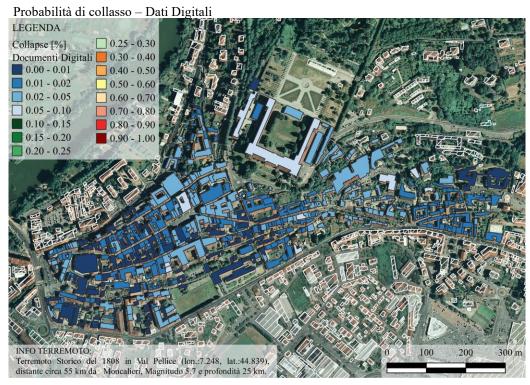


Figura 3-82 – Probabilità di collasso considerando il terremoto storico del 1808 con epicentro in Val Pellice e i dati digitali (Collapse).

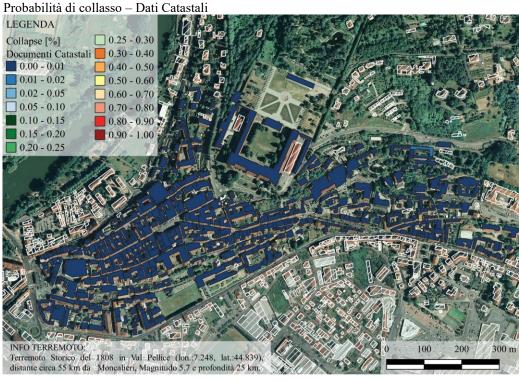


Figura 3-83 – Probabilità di collasso considerando il terremoto storico del 1808 con epicentro in Val Pellice e i dati catastali (Collapse).

In Figura 3-82 viene definita la probabilità di un possibile collasso tramite un'analisi speditiva. Si evince che per tutti gli edifici essa risulta molto bassa, compresa tra lo 0% e il 10%. Mentre con l'utilizzo di dati catastali (Figura 3-83) il valore massimo della probabilità di collasso per tutti gli edifici è pari a massimo l'1%.

In questo caso si ha una discordanza maggiore tra i risultati delle due analisi. Tale differenza emerge in modo più accurato da un'analisi quantitativa, mostrata in Figura 3-84, in cui nell'analisi dettagliata tutte le strutture presenti sul territorio presentano una probabilità nulla di collasso mentre con l'utilizzo dei dati digitali si ha una probabilità di collasso massima pari al 10%.

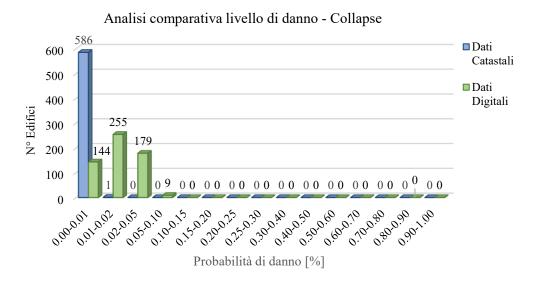


Figura 3-84 - Analisi comparativa del terremoto storico in Val Pellice (1808), in base al livello di danno Collapse

## Simulazione di un Terremoto con epicentro in Val Pellice, magnitudo 4.5

Le analisi che seguono hanno l'obbiettivo di evidenziare le differenze che l'utilizzo di diversi database causano sulla determinazione dei danni e delle perdite economiche dovute ad un terremoto con epicentro in Val Pellice, profondità 10 km e magnitudo pari a 4.5.

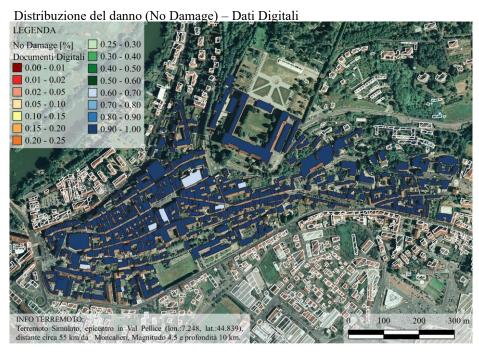


Figura 3-85 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 4.5 con l'utilizzo di dati digitali (No Damage).

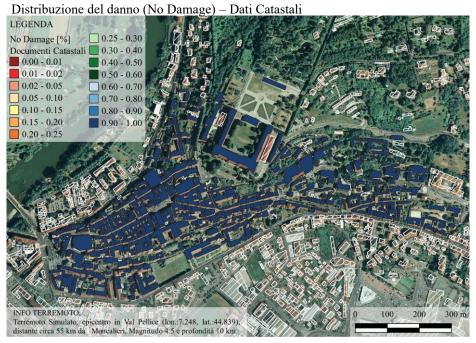


Figura 3-86 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 4.5 con l'utilizzo di dati catastali (No Damage).

Un terremoto di magnitudo 4.5 non produce ingenti danni sul territorio di Moncalieri, come si evince dalla Figura 3-85 e dalla Figura 3-86 la probabilità che non si verifichi un danno è molto alta (compresa tra il 90% ed il 100%),sia utilizzando i dati digitali che quelli catastali, l'unica differenza è che nel caso di un'analisi con dati catastali alcuni edifici ecclesiastici presentano una probabilità che non si verifichi un danno più bassa ( tra il 60% e il 70%), questo perché nelle chiese anche con un'intensità bassa la probabilità che si inneschi un meccanismo di collasso è più alta. La differenza si nota con maggiore risalto da un'analisi quantitativa e comparativa in Figura 3-87.

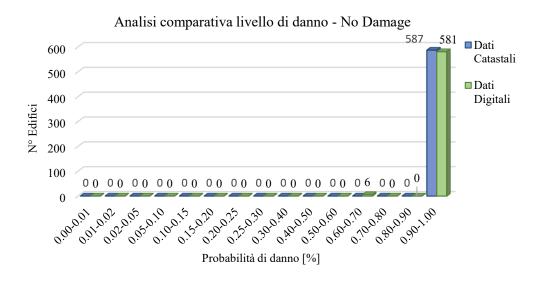


Figura 3-87 - Analisi comparativa di un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice e magnitudo 4.5, in base al livello di danno No Damage.

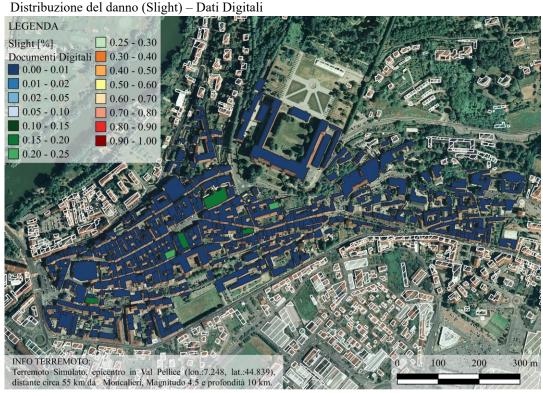


Figura 3-88 -- Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 4.5 con l'utilizzo di dati digitali (Slight).

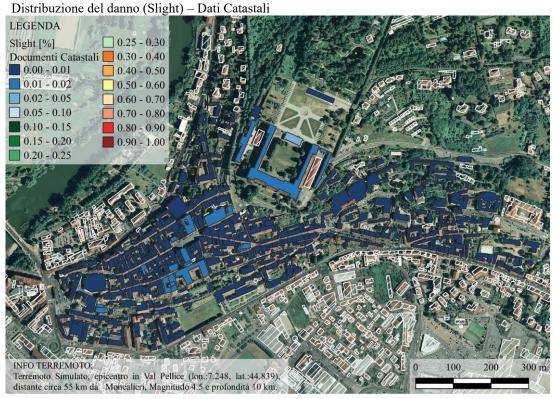


Figura 3-89 - - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 4.5 con l'utilizzo di dati catastali (Slight).

In Figura 3-88 e Figura 3-89 sono definite le distribuzioni del danno in riferimento ad una probabilità di danno lieve nel caso di analisi tramite dati digitale e di dati catastali. La probabilità che si verifichi un danno lieve, nel caso di dati catastali è compresa tra lo 0% ed il 5%, mentre nel caso di dati digitali la probabilità di un danno lieve è pari al massimo l'1% ad eccezione degli edifici ecclesiastici dove si ha un valore compreso tra il 15% ed il 20%.

Dall'analisi quantitativa e comparativa mostrata in Figura 3-90 non si evince nessuna differenza significativa, i risultati a seguito di un terremoto con le caratteristiche definite precedentemente non risulta efficiente per valutare una differenza di risultati tramite l'analisi con diversi database.

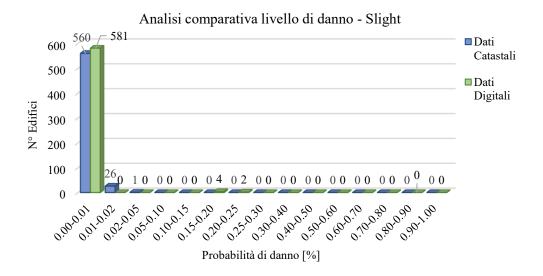


Figura 3-90 - Analisi comparativa di un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice e magnitudo 4.5, in base al livello di danno Slight.

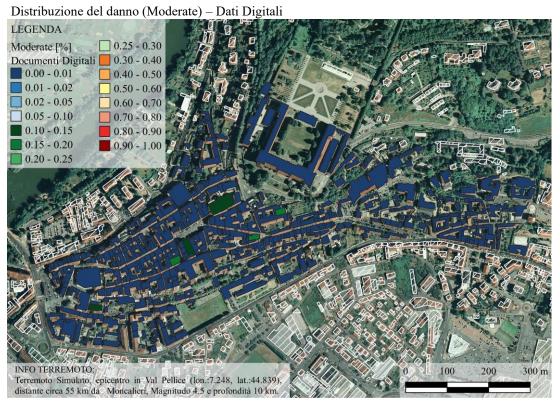


Figura 3-91 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 4.5 con l'utilizzo di dati digitali (Moderate).

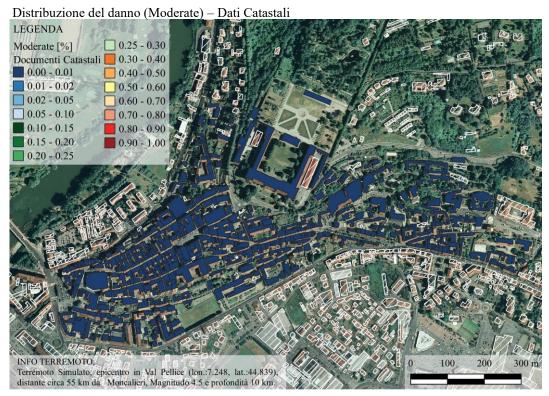


Figura 3-92 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 4.5 con l'utilizzo di dati catastali (Moderate).

Il verificarsi di un danno moderato Figura 3-91 e Figura 3-92 presenta probabilità di accadimento pari al massimo l'1% sia nel caso di utilizzo di dati digitali che di dati catastali. L'unica eccezione è rappresentata da alcuni edifici ecclesiastici, nel caso di analisi condotta tramite dati digitali, in cui si presenta una probabilità di danno moderato compresa tra il 10% ed il 20%. Tale differenziazione si nota dall'analisi qualitativa in Figura 3-93.

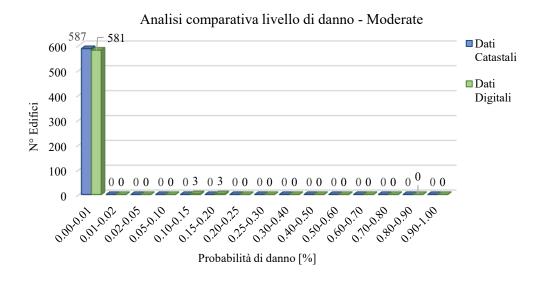


Figura 3-93 - Analisi comparativa di un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice e magnitudo 4.5, in base al livello di danno Moderate.

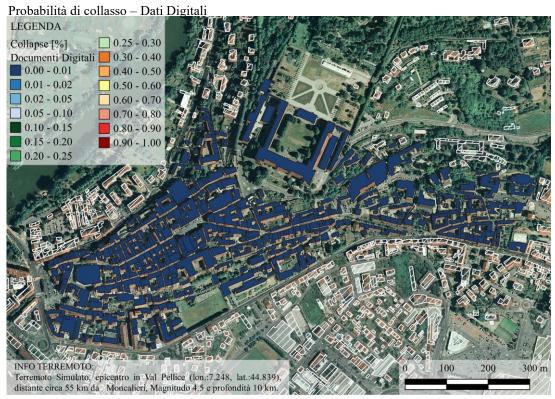


Figura 3-94 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 4.5 con l'utilizzo di dati digitali (Collapse).

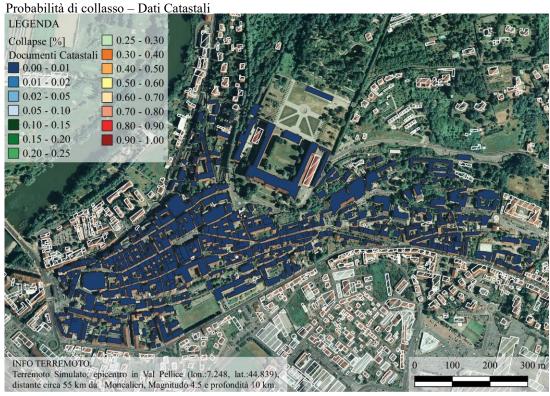


Figura 3-95 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 4.5 con l'utilizzo di dati catastali (Collapse).

Analizzando, invece, la probabilità di un collasso totale si ha una probabilità di accadimento pari al massimo l'1%, sia nel caso di utilizzo di dati digitali Figura 3-94 che di dati catastali Figura 3-95. Le due analisi, in questo caso, generano gli stessi risultati come è visibile in Figura 3-96, dove viene effettuata una comparazione dei risultati ottenuti dalle due analisi tramite una valutazione quantitativa.

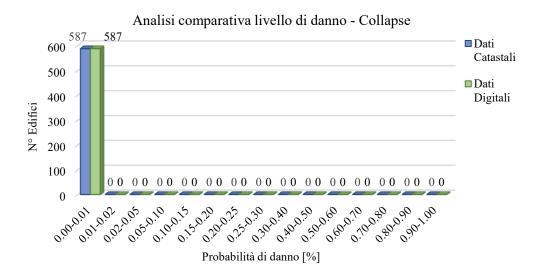


Figura 3-96 - Analisi comparativa di un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice e magnitudo 4.5, in base al livello di danno Collapse.

In Figura 3-97 e Figura 3-98 sono riportate le valutazioni delle perdite economiche, le analisi effettuate con entrambe le metodologie risultano coincidenti, le perdite attese per un terremoto di magnitudo 4.5 e con epicentro a Val Pellice non comportano nessuna perdita di tipo strutturale sull'area oggetto di studio. In questo caso un'analisi speditiva risulta sufficiente.

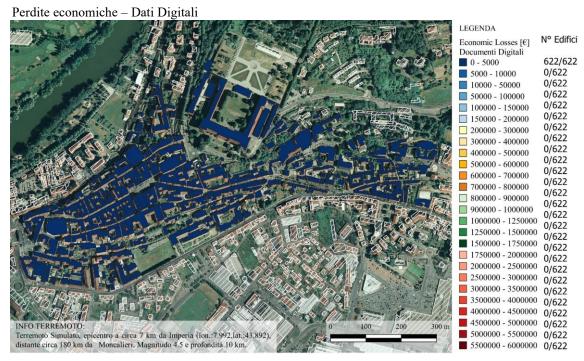


Figura 3-97 – Perdite economiche considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 4.5, con l'utilizzo di dati digitali.

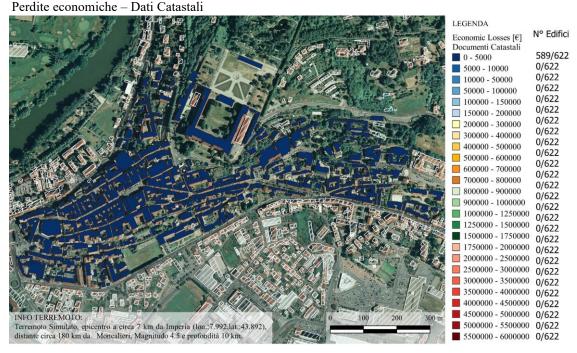


Figura 3-98 - Perdite economiche considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 4.5, con l'utilizzo di dati catastali

## Simulazione di un terremoto con epicentro in Val Pellice, magnitudo 5.5

Le analisi che seguono hanno l'obbiettivo di evidenziare le differenze che l'utilizzo di diversi database causano sulla determinazione dei danni e delle perdite economiche a seguito di un terremoto con epicentro in Val Pellice, profondità 10 km e magnitudo pari a 5.5.

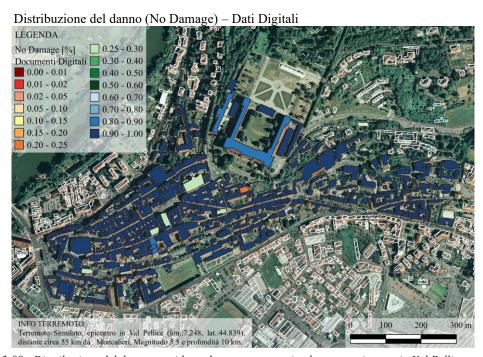


Figura 3-99 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 5.5 con l'utilizzo di dati digitali (No Damage).

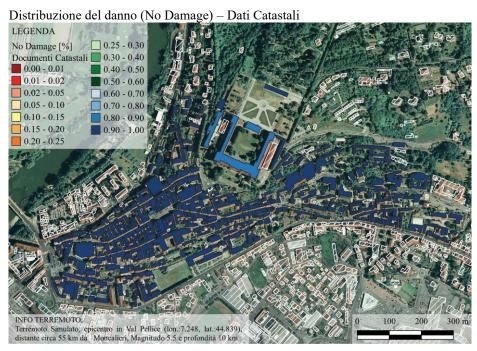


Figura 3-100-Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 5.5 con l'utilizzo di dati catastali (No Damage).

Le Figura 3-99 e la Figura 3-100 mostrano la distribuzione del danno considerando rispettivamente un'analisi speditiva e un'analisi sul singolo edificio. In entrambi i casi la possibilità che non si verifichi nessun danno risulta molto elevata, compresa tra l'80% ed il 100%, ad eccezione di alcuni edifici ecclesiastici, dove nel caso in cui non si ha una conoscenza accurata della struttura si ha una probabilità che non si verifichi un danno più bassa, compresa tra il 25% ed il 30%. Le differenze vengono sottolineate con maggior risalto tramite la Figura 3-101 in cui si definisce il numero di edifici facenti parte dei diversi range percentuali in base al loro livello di danneggiamento.

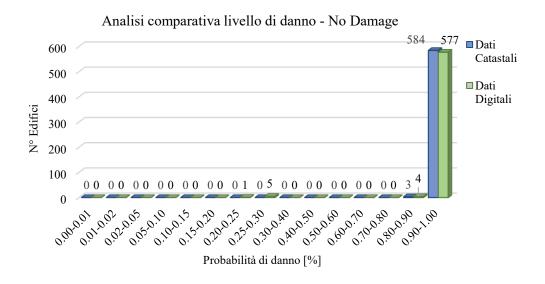


Figura 3-101 - Analisi comparativa di un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice e magnitudo 5.5, in base al livello di danno No Damage.

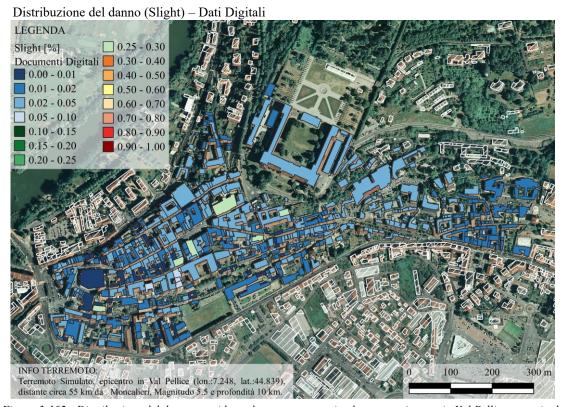


Figura 3-102 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 5.5 con l'utilizzo di dati digitali (Slight).

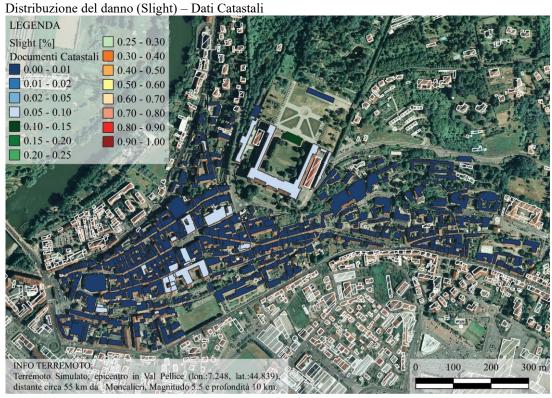


Figura 3-103 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 5.5 con l'utilizzo di dati catastali (Slight).

Valutando la possibilità che si verifichi un danno lieve, si ha una maggiore differenza tra le due tipologie di dati (Figura 3-104), in ogni caso la probabilità di danno lieve si ritiene bassa in quanto presenta valore massimo del 10% per la maggior parte degli edifici presenti sull'area di studio. Studiando la Figura 3-102 e la Figura 3-103 si evince che nel caso si utilizzino dati catastali la maggior parte degli edifici presenta una probabilità di subire un danno lieve pari al valore massimo dell'1% ad eccezione di alcuni edifici vincolati come il castello di Moncalieri, il convento delle Carmelitane scalze o la chiesa di Santa Maria della Scala in cui si evince una probabilità di danno lieve compresa tra il 5% ed il 10%. La valutazione di un possibile danno lieve tramite l'analisi che utilizza dati digitali definisce dei valori compresi tra lo 0% ed il 10% per la maggior parte degli edifici mentre per quanto riguarda gli edifici ecclesiastici si ha una probabilità compresa tra il 25% ed il 30%.

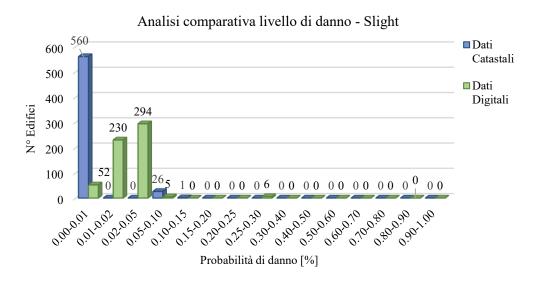


Figura 3-104 - Analisi comparativa di un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice e magnitudo 5.5, in base al livello di danno Slight.

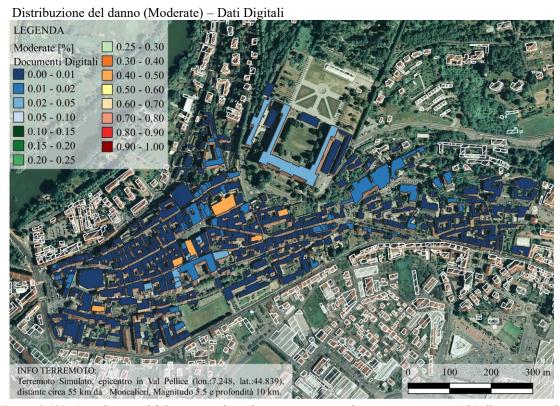


Figura 3-105 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 5.5 con l'utilizzo di dati digitali (Moderate).

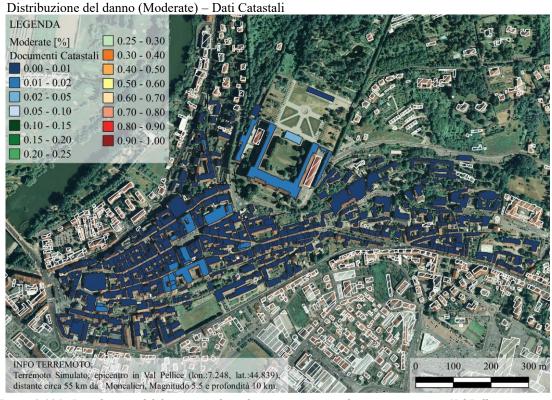


Figura 3-106 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 5.5 con l'utilizzo di dati catastali (Moderate).

Valutando un danno moderato entrambe le analisi, effettuate con le diverse tipologie di database, presentano valore massimo pari al 5%. Delle variazioni vengono evidenziate in Figura 3-105 in cui gli edifici ecclesiastici presentano una probabilità di danno moderato compreso tra il 40% ed il 50%. Dall'analisi quantitativa e comparativa mostrata in Figura 3-107 non si evince nessuna differenza significativa, se non quella pocanzi descritta, pertanto i risultati a seguito di un terremoto con le caratteristiche definite precedentemente non risulta efficiente per valutare una differenza, inerenti a un danno moderato, che comportano le analisi effettuate con l'utilizzo di diversi database.

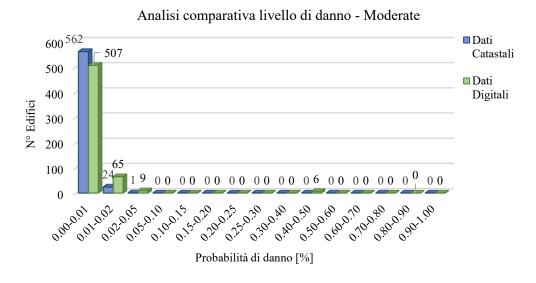


Figura 3-107 - Analisi comparativa di un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice e magnitudo 5.5, in base al livello di danno Moderate.

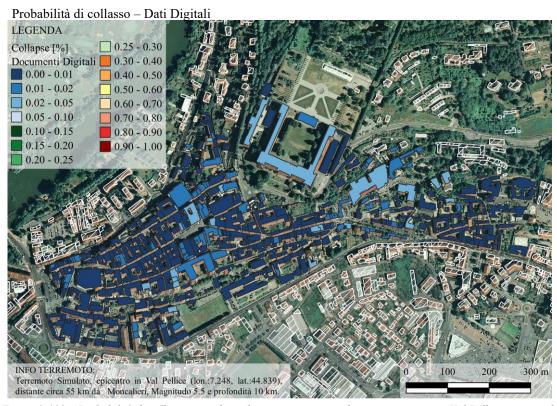


Figura 3-108 – Probabilità di collasso considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 5.5 con l'utilizzo di dati digitali (Collapse).

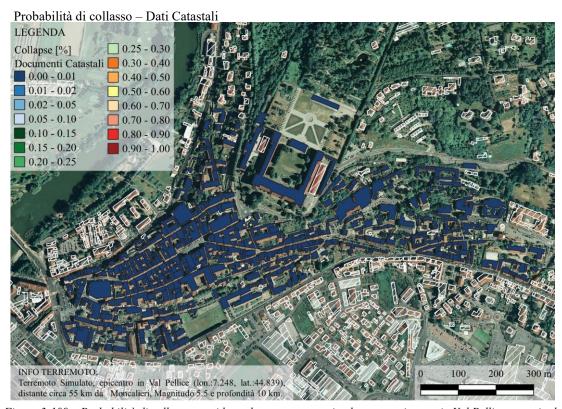


Figura 3-109 – Probabilità di collasso considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 5.5 con l'utilizzo di dati catastali (Collapse).

Le Figura 3-108 e Figura 3-109 mostrano la probabilità di collasso a seguito di un terremoto simulato di magnitudo 5.5, ipocentro in Val Pellice e profondità 10 km. Dall'analisi comparativa (Figura 3-110), a seguito della duplice analisi, non emerge una differenza significativa dall'utilizzo dei diversi dati in quanto la probabilità di collasso è relativamente bassa, il valore massimo è pari al 5%. Nel caso di dati catastali tutti gli edifici rientrano in una probabilità di collasso compresa tra lo 0% e l'1% (Figura 3-109), mentre da un'analisi tramite dati digitali si un range tra lo 0% ed il 5% (Figura 3-108).

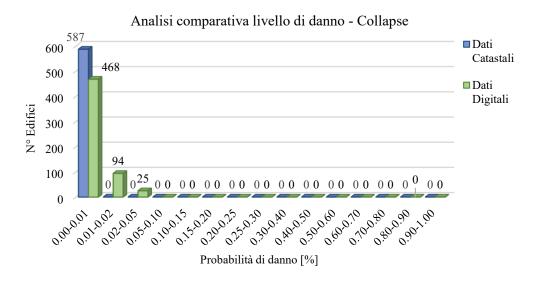


Figura 3-110 - Analisi comparativa di un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice e magnitudo 5.5, in base al livello di danno Collapse.

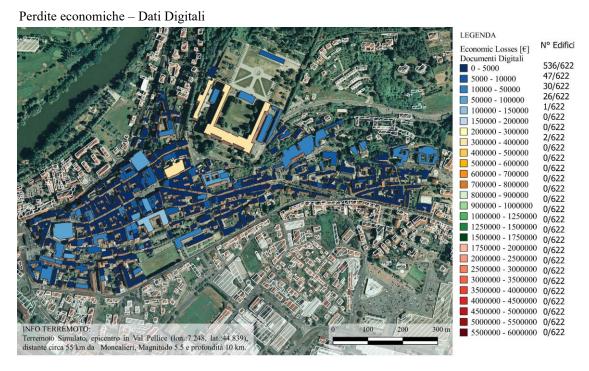


Figura 3-111 - Perdite economiche considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 5.5, con l'utilizzo di dati digitali.

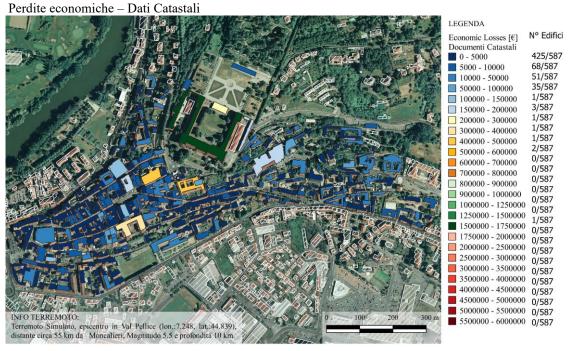


Figura 3-112 - Perdite economiche considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 5.5, con l'utilizzo di dati catastali.

L'analisi comparativa e quantitativa risulta particolarmente rilevante nella valutazione delle perdite economiche e mostra delle differenze consistenti come si evince da un confronto tra le Figura 3-112 e Figura 3-113. In particolare, nel caso di una valutazione speditiva si hanno delle perdite complessive pari a  $2.627.766,96 \in \text{mentre}$  nel caso di un'analisi dettagliata le perdite ammontano a  $5.897.381,09 \in \mathbb{C}$ . Tra le due analisi si ha un aumento delle perdite percentuale del 124.42% che in valore assoluto è pari a  $3.269.614 \in \mathbb{C}$ . Le maggiori perdite sono associate ai beni monumentali e vincolati, dalla figura 3.111 si evidenziano le perdite effettive degli edifici vincolati presenti sull'area oggetto di studio ed emergono nel caso dell'analisi dettagliata delle perdite pari a  $4.086.138 \in \mathbb{C}$  corrispondenti al 69 % delle perdite totali mentre nel caso dell'analisi semplificata delle perdite che ammontano a  $61.218.780 \in \mathbb{C}$ , corrispondenti al 69% delle perdite totali. Nel caso dei beni vincolati la differenza tra le due metodologie di database è caratterizzata da un aumento percentuale del 235.26% che in valore assoluto corrisponde ad un valore pari a  $2.867.358 \in \mathbb{C}$ .

### Analisi comparativa perdite economiche beni vincolati

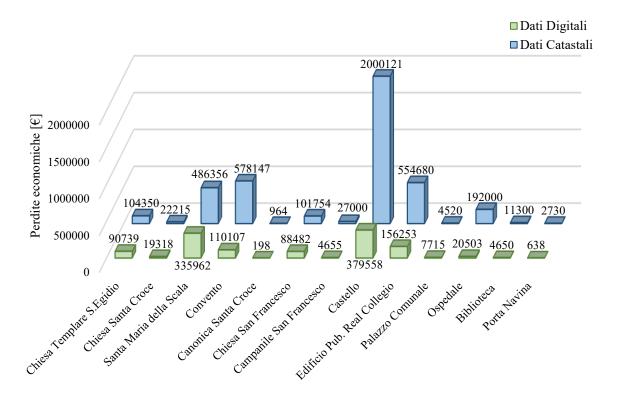


Figura 3-113 - Analisi comparativa delle perdite dei beni vincolati, considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice e magnitudo 5.5.

# Simulazione di un terremoto con epicentro in Val Pellice, magnitudo 6.

Le analisi che seguono hanno l'obbiettivo di evidenziare le differenze che l'utilizzo di diversi database causano sulla determinazione dei danni e delle perdite economiche a seguito di un terremoto con epicentro in Val Pellice, profondità 10 km e magnitudo pari a 6.

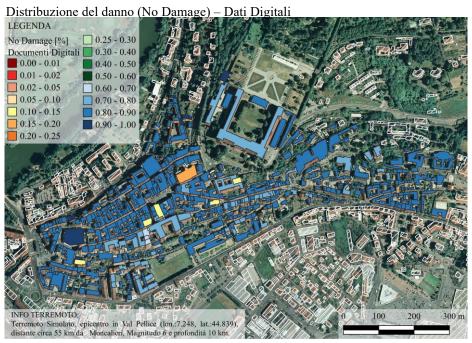


Figura 3-114 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 6 con l'utilizzo di dati digitali (No Damage).

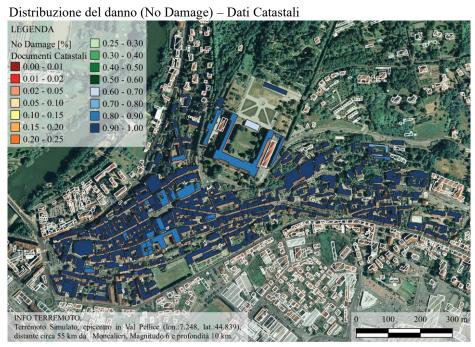


Figura 3-115 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 6 con l'utilizzo di dati catastali (No Damage).

Con l'incremento della magnitudo (pari a 6), si riscontrano maggiori variazioni dai risultati derivanti dall'utilizzo di diversi livelli di conoscenza. Nel dettaglio con una valutazione approfondita tutti gli edifici presenti sul territorio mostrano una probabilità, compresa tra l'80 % ed il 100% che non si verifichi alcun tipo di danno (Figura 3-115), mentre nel caso di un'analisi speditiva (Figura 3-114) la probabilità che non si verifichi alcun tipo di danno è compresa tra il 70% e l'80%, ad eccezione di alcuni edifici ecclesiastici che presentano una probabilità di non danneggiarsi compresa tra il 15% ed il 20%. Dall'analisi quantitativa e comparativa mostrata in Figura 3-116 non si evince nessuna differenza significativa.

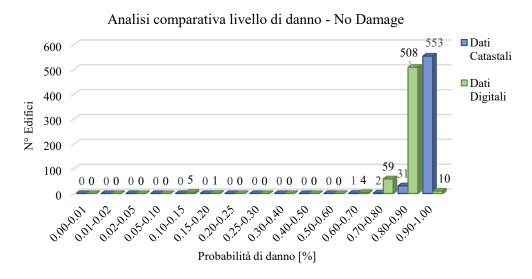


Figura 3-116 - Analisi comparativa di un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice e magnitudo 6, in base al livello di danno No Damage.

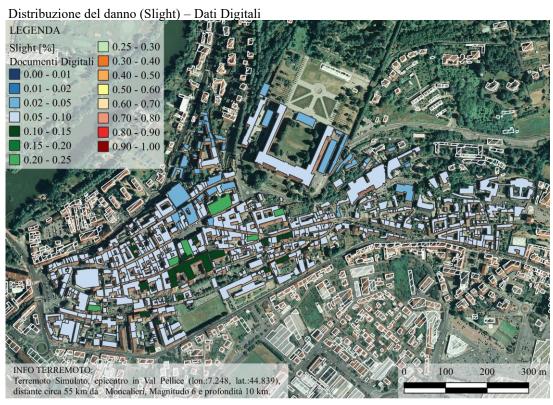


Figura 3-117 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 6 con l'utilizzo di dati digitali (Slight).

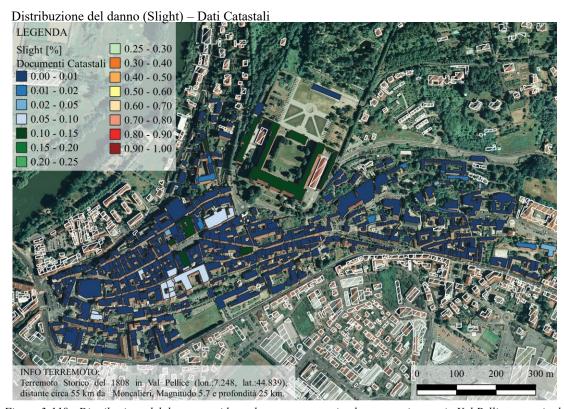


Figura 3-118 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 6 con l'utilizzo di dati catastali (Slight).

Nel caso della valutazione di un probabile danno lieve, la maggior parte degli edifici nell'analisi semplificata (Figura 3-117) presenta la probabilità compresa tra il 2% ed il 10 % di subire danno lieve ad eccezione di alcuni edifici ecclesiastici che presentano una probabilità più alta, compresa tra il 10% ed il 25%. Nel caso dell'analisi dettagliata (Figura 3-118) tutti gli edifici presentano valori compresi tra l'1% ed il 2%, ad eccezione del castello di Moncalieri e di alcuni edifici vincolati i cui valori sono compresi tra il 15% ed il 25%.

Dall'analisi comparativa riportata in Figura 3-119 si evidenzia maggiormente la leggera differenza dei range all'interno del quale ricadono gli edifici. Nonostante tale differenza, la probabilità che gli edifici subiscano un lieve danno si ritiene bassa, in quanto il valore massimo è pari al 25%.

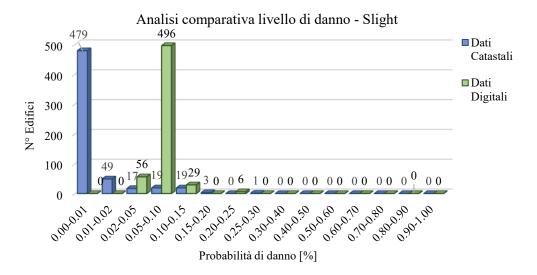


Figura 3-119 - Analisi comparativa di un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice e magnitudo 6, in base al livello di danno Slight.

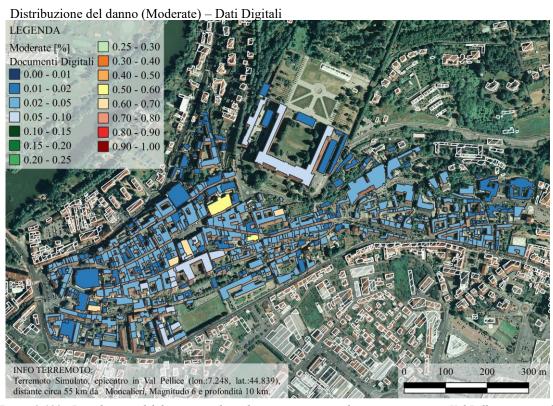


Figura 3-120 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 6 con l'utilizzo di dati digitali (Moderate).

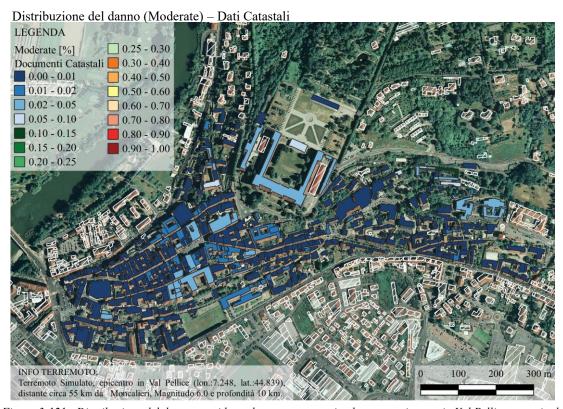


Figura 3-121 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 6 con l'utilizzo di dati catastali (Moderate).

Per quanto concerne la valutazione di un danno moderato, l'analisi semplificata evidenzia una probabilità compresa tra il 2% ed il 10%, per la maggior parte degli edifici, di subire danno moderato, mentre per alcuni edifici ecclesiastici si ha una probabilità compresa tra il 50 e il 60% (Figura 3-120); l'analisi dettagliata mostra invece una situazione più omogenea definendo una probabilità compresa tra lo 0% ed il 5% di presentare un danno moderato (Figura 3-121). I valori ottenuti in entrambi i casi si ritengono relativamente bassi pertanto l'utilizzo di un'analisi speditiva fornisce comunque risultati attendibili. Dal confronto in Figura 3-122 si evidenzia un valore massimo pari al 10% in entrambi i casi, fatta eccezione per alcuni edifici come sopra esposto.

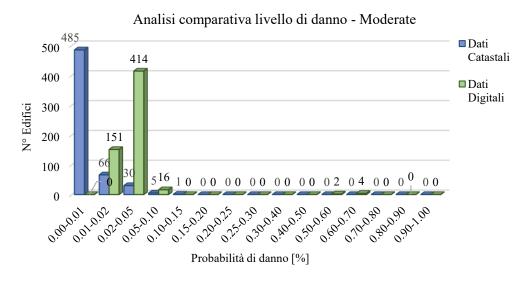


Figura 3-122 - Analisi comparativa di un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice e magnitudo 6, in base al livello di danno Moderate.

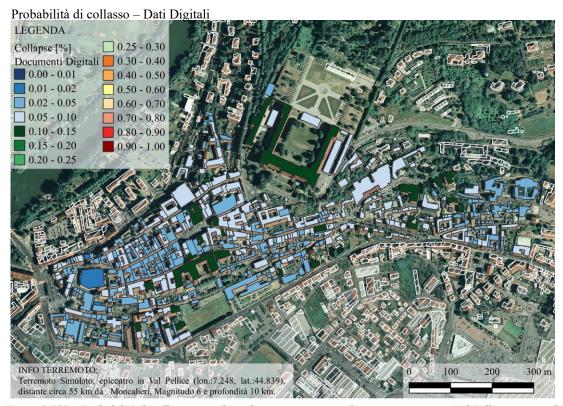


Figura 3-123 – Probabilità di collasso considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 6 con l'utilizzo di dati digitali (Collapse).

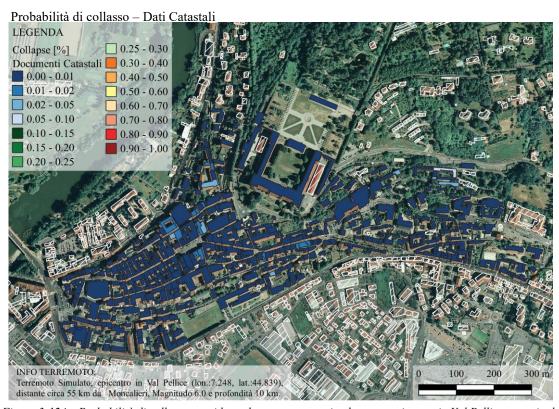


Figura 3-124 – Probabilità di collasso considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 6 con l'utilizzo di dati catastali (Collapse).

L'analisi del collasso nel caso dei dati catastali (Figura 3-124) mostra le stesse probabilità che si hanno nell'analisi di danni moderati, mentre analizzando i risultati prodotti dai dati digitali si ha una probabilità di collasso compresa tra il 5% ed il 15% (Figura 3-123). In questo caso si ha una discordanza maggiore tra i risultati delle due analisi. Tale differenza emerge in modo più accurato da un'analisi quantitativa, mostrata in Figura 3-125, in cui nell'analisi dettagliata tutte le strutture presenti sul territorio presentano una probabilità nulla di collasso mentre con l'utilizzo dei dati digitali si ha una probabilità di collasso massima pari al 15%.

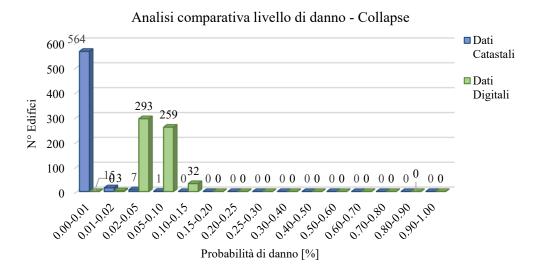


Figura 3-125 - Analisi comparativa di un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice e magnitudo 6, in base al livello di danno Collapse.

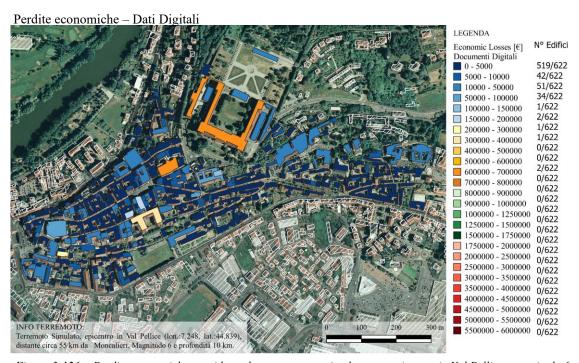


Figura 3-126 - Perdite economiche considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 6, con l'utilizzo di dati digitali.

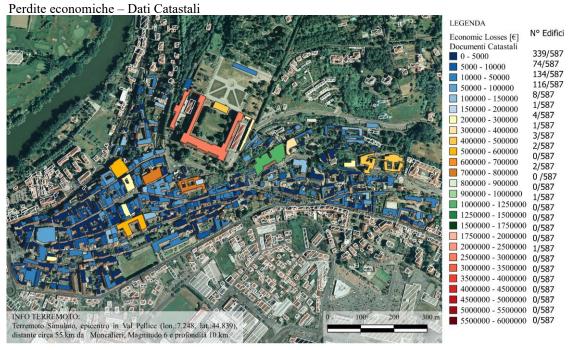


Figura 3-127 - Perdite economiche considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 6, con l'utilizzo di dati catastali.

L'analisi relative alle perdite economiche sono mostrate in Figura 3-126 e Figura 3-127 sono state definite rispettivamente da un'analisi basata su dati digitale e su dati catastali. In questo caso risulta importante valutare le perdite economiche che possono subire gli edifici, infatti per l'analisi derivante dai dati digitali si ha una perdita complessiva pari a 4.463.978,85 € di cui il 58% è relativo alle perdite dei beni vincolati (2.592.425 €), dall'analisi dei dati catastali si ha una perdita complessiva pari a 14.634.173,39 € di cui il 53% rappresenta perdite relative ai beni vincolati (7.813.191 €). Dall'analisi comparativa si ha un incremento percentuale delle perdite complessive pari al 201% che in valore assoluto corrisponde a 5.220.765,63 €. In Figura 3-128 è graficizzata la comparazione inerente alle perdite dei beni vincolati da cui si evincono delle perdite ingenti è una notevole differenza dovuta all'utilizzo di differenti database.

# Analisi comparativa perdite economiche beni vincolati

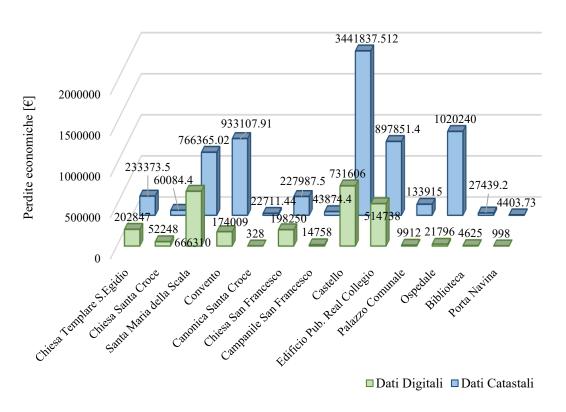


Figura 3-128 - Analisi comparativa delle perdite dei beni vincolati, considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice e magnitudo 6.

# Simulazione di un terremoto con epicentro in Val Pellice, magnitudo 6.5.

Le analisi che seguono hanno l'obbiettivo di evidenziare le differenze che l'utilizzo di diversi database causano sulla determinazione dei danni e delle perdite economiche a seguito di un terremoto con epicentro in Val Pellice, profondità 10 km e magnitudo pari a 6.5.

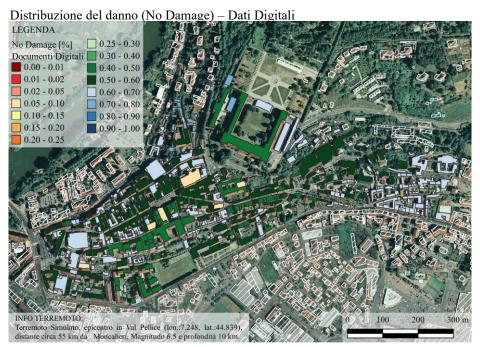


Figura 3-129 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 6.5 con l'utilizzo di dati digitali (No Damage).

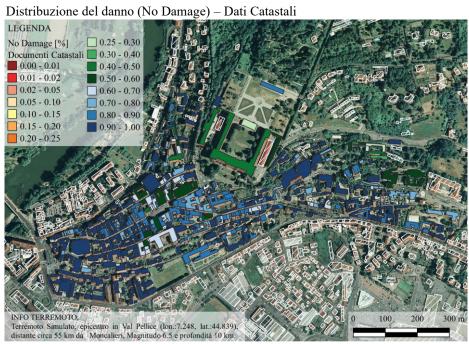


Figura 3-130 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 6.5 con l'utilizzo di dati catastali (No Damage)

La valutazione della distribuzione del danno inerente alla classe No Damage mostra, nel caso di un'analisi tramite dati digitali (Figura 3-129), una probabilità di non subire danno compresa tra il 40% e il 60%, ad eccezione di alcuni edifici ecclesiastici che presentano una probabilità compresa tra il 5% ed il 10% di non essere danneggiate., nel caso di una valutazione dettagliata (Figura 3-130) la maggior parte degli edifici presentano una probabilità tra l'80% ed il 100% di non essere danneggiata, fatta eccezione per alcuni edifici vincolati e per quelli che presentano un'area maggiore rispetto ad altri dove si evince una probabilità compresa tra il 50% ed il 70%. Queste variazioni vengono spiegate a causa del costo di riparazione/ricostruzione parametrico utilizzato, il quale, ricordiamo, si basa su un valore economico al m² ed inoltre per gli edifici vincolati esso subisce un incremento.

L'analisi comparativa per un terremoto, con le caratteristiche definite precedentemente, mostra una maggiore variazione tra i risultati delle analisi effettuate con diversi data set, come si evince dalla Figura 3-131. In questo caso un'analisi con un database digitale poiché contenente informazioni più precise si ritiene più accurata.

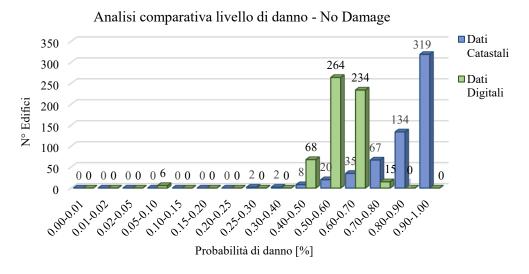


Figura 3-131 - Analisi comparativa di un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice e magnitudo 6.5, in base al livello di danno No Damage.

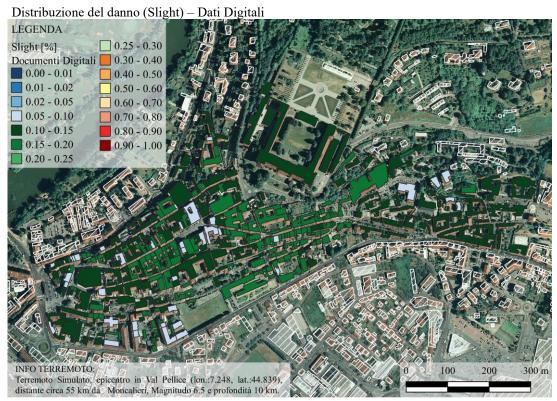


Figura 3-132 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 6.5 con l'utilizzo di dati digitali (Slight).

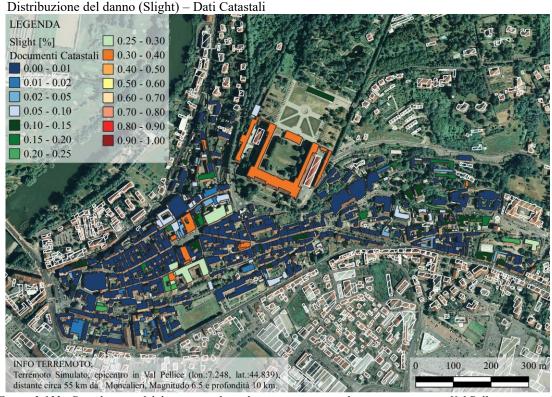


Figura 3-133 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 6.5 con l'utilizzo di dati catastali (Slight)

La probabilità di subire un danno lieve associata agli edifici è compresa tra il 5% ed il 20% nel caso di un'analisi semplificata (Figura 3-132), mentre tra lo 0% ed il 5% nel caso di analisi dettagliata (Figura 3-133), in quest'ultimo caso fanno eccezione gli edifici vincolati che mostrano una probabilità compresa tra il 25% e il 40%. Le differenze tra le due analisi effettuate vengono sottolineate tramite la Figura 3-134 in cui si definisce il numero di edifici facenti parte dei diversi range percentuali in base al loro livello di danneggiamento.

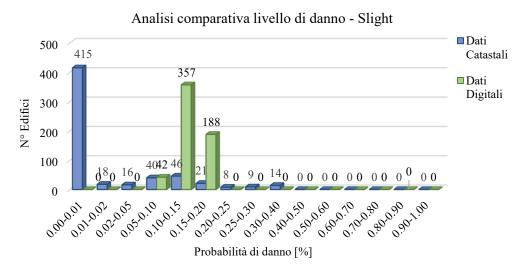


Figura 3-134 - Analisi comparativa di un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice e magnitudo 6.5, in base al livello di danno Slight.

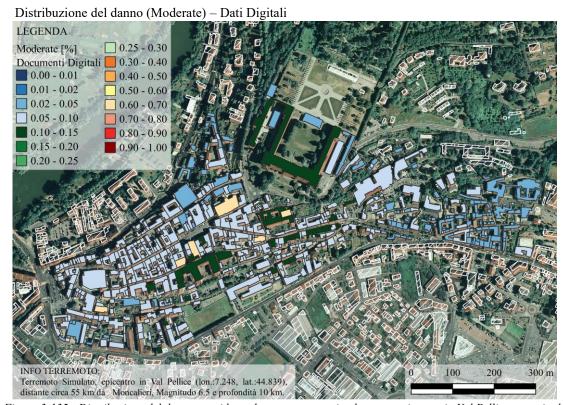


Figura 3-135 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 6.5 con l'utilizzo di dati digitali (Moderate).

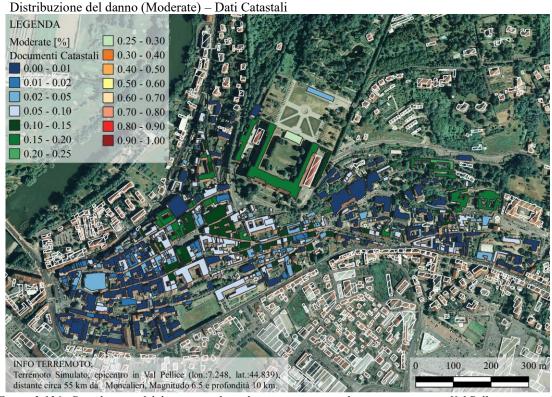


Figura 3-136 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 6.5 con l'utilizzo di dati catastali (Moderate)

Il verificarsi di un danno moderato presenta probabilità compresa tra il 2% ed il 15%, ad eccezione degli edifici ecclesiastici in cui si evince una probabilità tra il 60% ed il 70%, nel caso di analisi tramite dati digitali (Figura 3-135), mentre tale probabilità varia dallo 0% fino ad un valore massimo del 10% per un'analisi tramite dati catastali (Figura 3-136). Le differenze sono riportate in Figura 3-137 dove viene effettua un'analisi comparativa e quantitativa dei risultati derivante dall'utilizzo dei diversi database. In questo caso si presentano valori poco variabili in quanto i risultati sono compresi in un range che va dallo 0% al 20%, l'unica eccezione è rappresentata dagli edifici ecclesiastici nel caso di analisi speditiva che, come definito pocanzi, presentano probabilità tra il 60% ed il 70% di subire danno moderato.

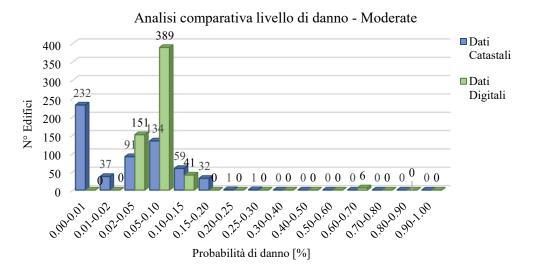


Figura 3-137 - Analisi comparativa di un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice e magnitudo 6.5, in base al livello di danno Moderate.

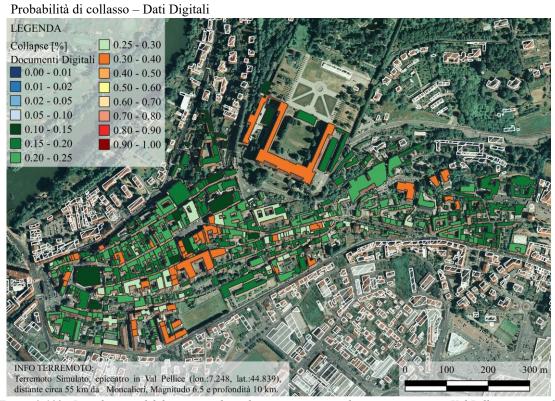


Figura 3-138 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 6.5 con l'utilizzo di dati digitali (Collapse).

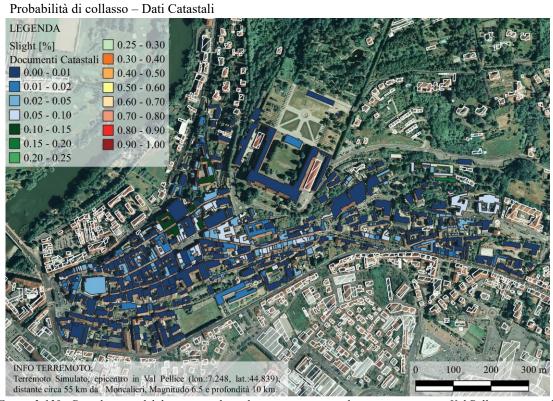


Figura 3-139 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 6.5 con l'utilizzo di dati catastali (Collapse)

L'analisi del possibile collasso degli edifici presenta notevole discrepanza in base al tipo di dati utilizzati, come mostrato in Figura 3-140, dove i range all'interno del quale sono definite le probabilità di collasso risultano completamente differenti a seconda della tipologia di dati che si utilizza, in particolare con l'utilizzo di dati digitali gli edifici presentano una probabilità di collasso compresa tra il 15% ed il 40% come definito anche in Figura 3-138, mentre con l'utilizzo di dati catastali la maggior parte presenta una probabilità di collasso massima pari all'1% ed una minoranza di edifici valori che oscillano tra l'1% ed il 15% (Figura 3-139).

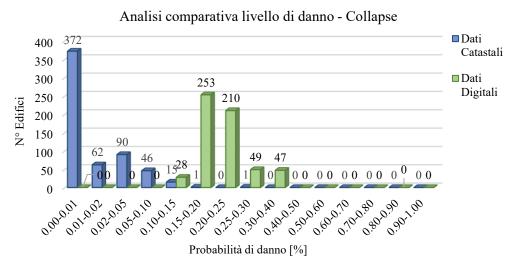


Figura 3-140 - Analisi comparativa di un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice e magnitudo 6.5, in base al livello di danno Collapse.

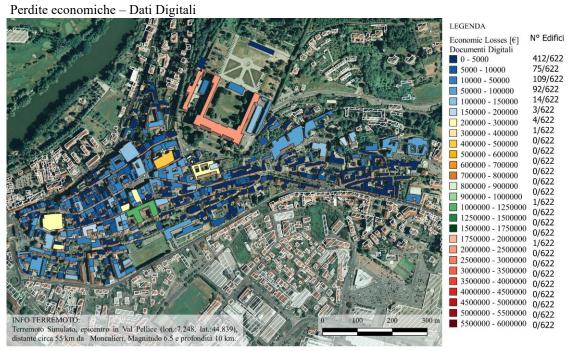


Figura 3-141 - Perdite economiche considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 6.5, con l'utilizzo di dati digitali.

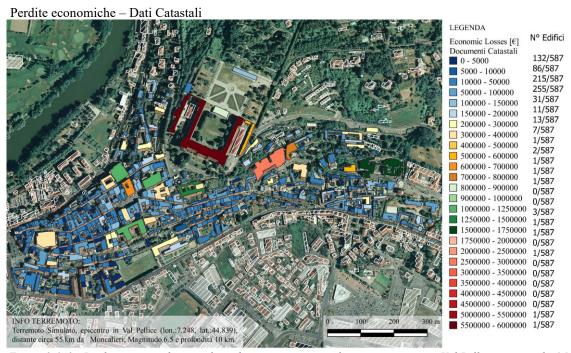


Figura 3-142 - Perdite economiche considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice, magnitudo 6.5, con l'utilizzo di dati catastali.

Con un sisma di magnitudo 6.5 le perdite economiche risultano ingenti, nel caso di un'analisi semplificata (Figura 3-141) ammontano a 13.654.574,77 € mentre da un'analisi dettagliata (Figura 3-142) si ha un valore complessivo di perdite pari a 40.825.722,92 €. L'aumento delle perdite percentuali risulta pari al 198% che in valore assoluto corrisponde a 27.171.148,15 €. I beni vincolati presentano un'aliquota percentuale del 42% sulle perdite totali nel caso di utilizzo di dati digitali, e sono pari a 5.754.324 €, mentre nel caso di utilizzo di dati catastali le perdite dei beni vincolati rappresentano il 39% delle perdite totali, il cui valore ammonta a 16.182.019 €. Dalla Figura 3-143 è possibile notare le perdite strutturali dei beni vincolati presenti sull'area di studio e come esse siano consistenti infatti il solo castello nel caso di analisi dettagliata presenta perdite che ammontano a 7.542.294 € nel caso di analisi tramite dati dettagliati mentre si hanno perdite pari a 2.432.200 € valutando i risultati di un'analisi speditiva. Quest'ultima analisi fornisce un valore di circa tre volte più basso rispetto ad un'analisi dettagliata il che dimostra l'importanza di valutare in modo approfondito le informazioni inerenti agli edifici soprattutto quando essi presentano un particolare valore artistico/culturale/storico.

### Analisi comparativa perdite economiche beni vincolati

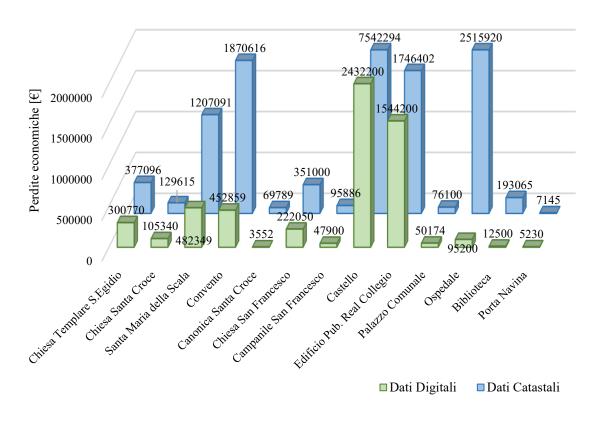


Figura 3-143 - Analisi comparativa delle perdite dei beni vincolati, considerando un terremoto simulato con epicentro in Val Pellice e magnitudo 6.5.

# Analisi terremoto storico (1887), Liguria, epicentro a 7 km da Imperia.

Il terremoto del 1887 avvenuto in Liguria, a circa 7 km da Imperia è distante da Moncalieri circa 180 km, presenta una magnitudo pari a 6.3 ed ipocentro posto ad una profondità di 15 km. Di seguito sono riportate le analisi che descrivono la distribuzione del danno in funzione di analisi derivanti da dati digitali e dati catastali.

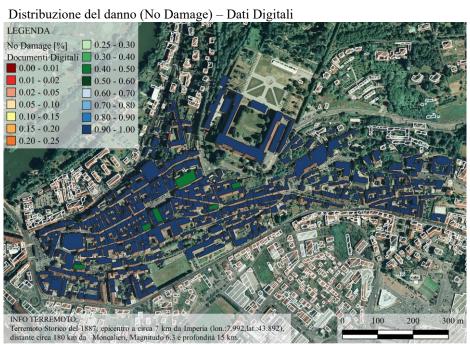


Figura 3-144 - Distribuzione del danno considerando il terremoto storico del 1887 con epicentro a 7 km da Imperia e i dati digitali (No Damage).

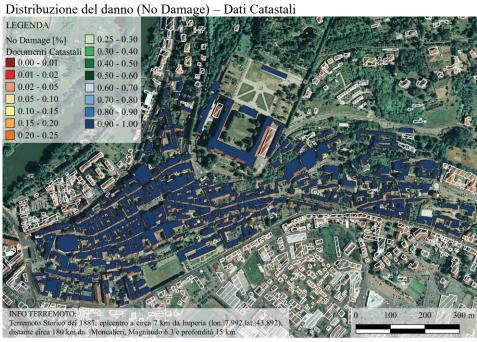


Figura 3-145 – Distribuzione del danno considerando il terremoto storico del 1887 con epicentro a 7 km da Imperia e i dati catastali (No Damage).

L'analisi comparativa (Figura 3-146) del terremoto storico non fornisce risultati utili per evidenziare le differenze che si hanno con l'utilizzo di due tipologie di dati. Infatti nell'analisi della valutazione di un danno probabile si evince che, per entrambe le metodologie, gli edifici ricadono in una probabilità compresa tra il 90% ed il 100% di non essere danneggiate (Figura 3-144 e Figura 3-145) solo nel caso di alcuni edifici ecclesiastici e nel caso di analisi speditiva si ha una probabilità compresa tra il 40% ed il 50% di non subire danni (edifici verdi in Figura 3-144).

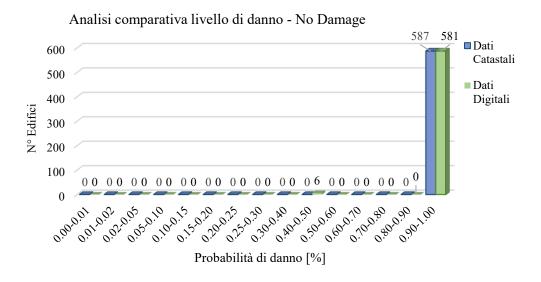


Figura 3-146 - Analisi comparativa del terremoto storico (1887), con epicentro a 7 km da Imperia, in base al livello di danno No Damage.

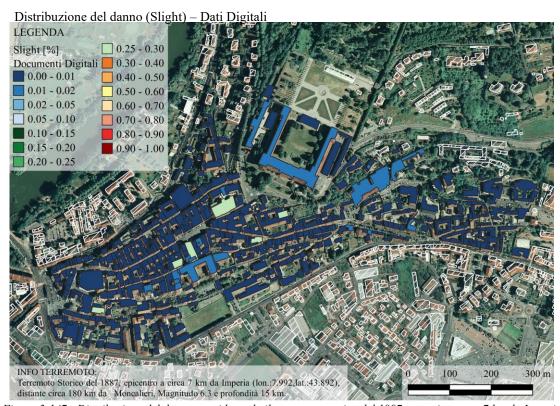


Figura 3-147 - Distribuzione del danno considerando il terremoto storico del 1887 con epicentro a 7 km da Imperia e i dati digitali (Slight).

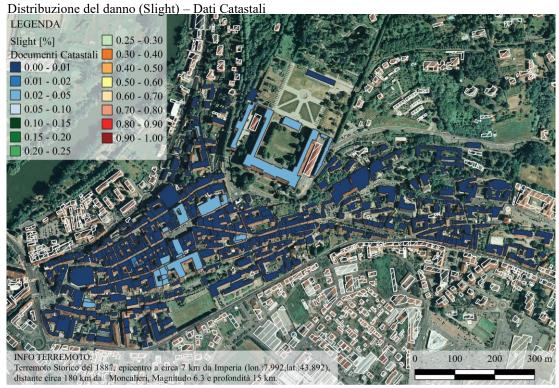


Figura 3-148 – Distribuzione del danno considerando il terremoto storico del 1887 con epicentro a 7 km da Imperia e i dati catastali (Slight).

La possibilità che si verifichi un danno lieve presenta valori compresi tra lo 0% ed il 2% per entrambe le tipologie di analisi, raggiunge valori massimi pari al 30% solo nel caso di edifici ecclesiastici e per un'analisi con dati digitali (Figura 3-147). Da un'analisi comparativa e quantitativa definita in Figura 3-149 non emergono differenze significative pertanto i risultati si ritengono attendibili anche con un'analisi speditiva.

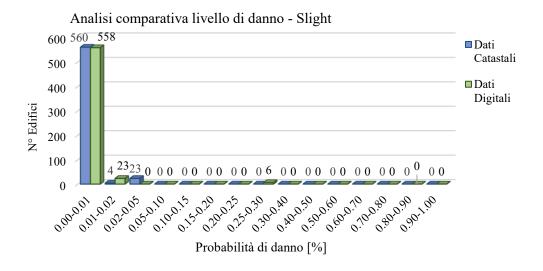


Figura 3-149- Analisi comparativa del terremoto storico (1887) con epicentro a 7 km da Imperia, in base al livello di danno Slight.

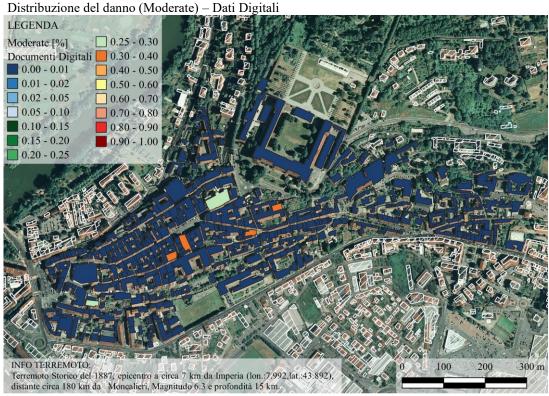


Figura 3-150- Distribuzione del danno considerando il terremoto storico del 1887 con epicentro a 7 km da Imperia e i dati digitali (Moderate).

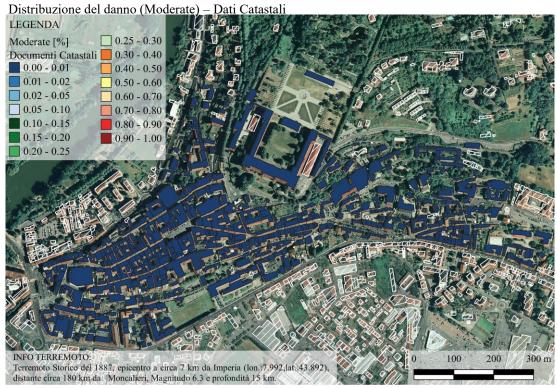


Figura 3-151 - Distribuzione del danno considerando il terremoto storico del 1887 con epicentro a 7 km da Imperia e i dati catastali (Moderate).

Lo stesso discorso effettuato nel caso di danno lieve vale per il verificarsi di un danno moderato, l'analisi comparativa in Figura 3-152 non evidenzia particolari differenze di risultati. Infatti sia nel caso di analisi tramite dati digitali (Figura 3-150) che nel caso di analisi con dati catastali (Figura 3-151) gli edifici presentano una probabilità di danno moderato compresa tra lo 0% e l'1%. L'unica eccezione è rappresentata dalle chiese nel caso di analisi speditiva dove la probabilità di danno moderato aumenta e corrisponde ad un valore compreso tra il 25% ed il 40%.

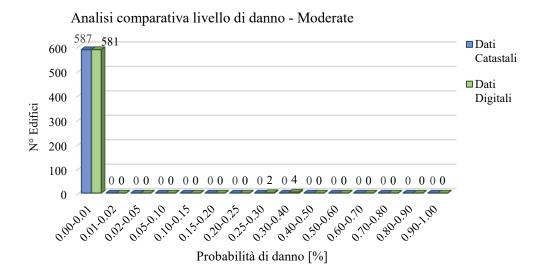


Figura 3-152- Analisi comparativa del terremoto storico (1887), con epicentro a 7 km da Imperia, in base al livello di danno Moderate.

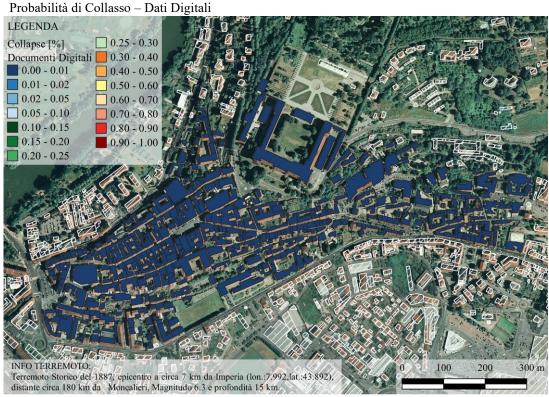


Figura 3-153- Distribuzione del danno considerando il terremoto storico del 1887 con epicentro a 7 km da Imperia e i dati digitali (Collapse).

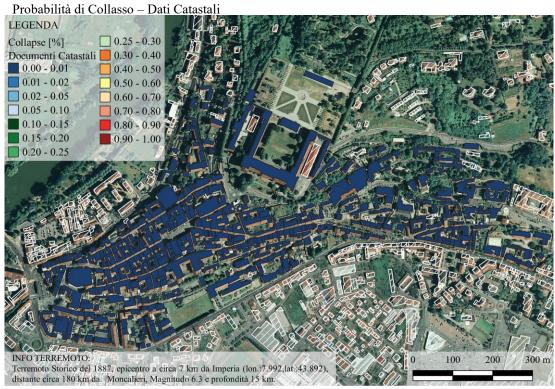


Figura 3-154 – Distribuzione del danno considerando il terremoto storico del 1887 con epicentro a 7 km da Imperia e i dati catastali (Collapse).

La valutazione dei risultati inerenti alla probabilità di collasso degli edifici risulta essere la stessa sia nel caso di un'analisi tramite dati digitali che tramite dati catastali come emerge dalla Figura 3-155, in particolare si ha una probabilità massima dell'1% per entrambe le metodologie (Figura 3-153 e Figura 3-154).

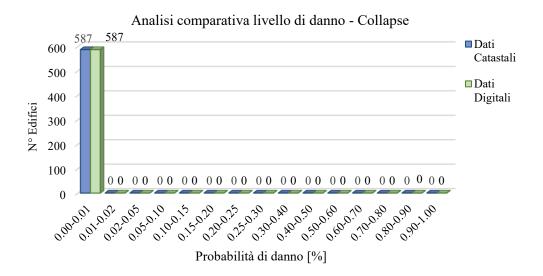
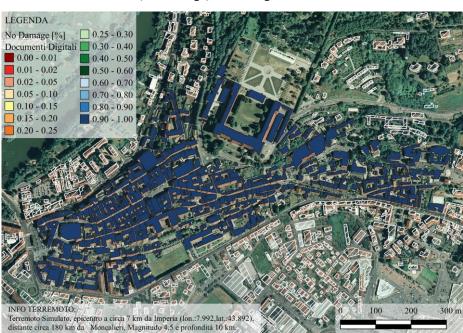


Figura 3-155- Analisi comparativa del terremoto storico (1887) con epicentro a 7 km da Imperia, in base al livello di danno Collapse.

In conclusione l'analisi del danno a seguito del terremoto storico non ha condotto risultati significativi per una valutazione comparativa dei database.

# Simulazione di un terremoto con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 4.5.

Le analisi che seguono hanno l'obbiettivo di evidenziare le differenze che l'utilizzo di diversi database causano sulla determinazione dei danni e delle perdite economiche a seguito di un terremoto con ipocentro posto a 7 km da Imperia, profondità 10 km e magnitudo pari a 4.5.



Distribuzione del danno (No Damage) - Dati Digitali

Figura 3-156 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 4.5 con l'utilizzo di dati digitali (No Damage).

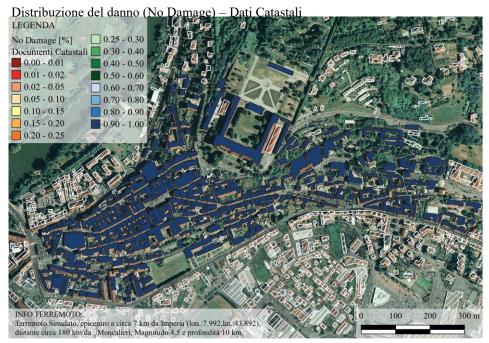


Figura 3-157- Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 4.5 con l'utilizzo di dati catastali (No Damage).

Analizzando una possibilità di danno il grafico in Figura 3-158 mostra come tutti gli edifici presentano una probabilità compresa tra il 90% ed il 100% di non essere danneggiati sia nel caso di un'analisi dettagliata (Figura 3-157) che speditiva (Figura 3-156).

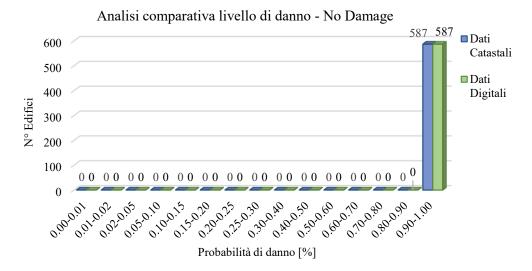


Figura 3-158 - Analisi comparativa un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia e magnitudo 4.5, in base al livello di danno No Damage.

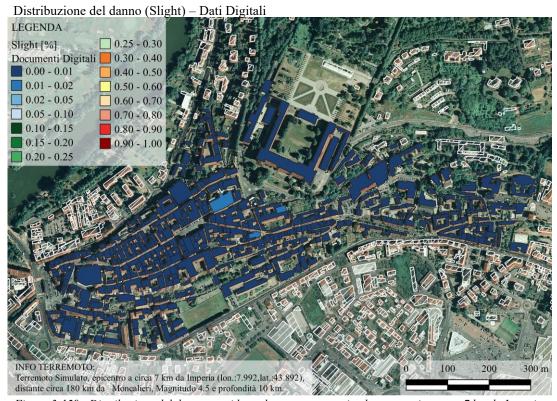


Figura 3-159 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 4.5 con l'utilizzo di dati digitali (Slight).

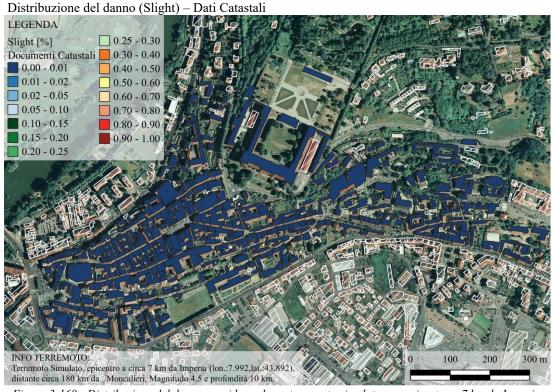


Figura 3-160 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 4.5 con l'utilizzo di dati catastali (Slight).

Le analisi relative alla possibilità di un danno lieve sono mostrate in Figura 3-159 nel caso di un'analisi che utilizza dati digitali e in Figura 3-160 nel caso di analisi tramite dati catastali, in entrambi i casi mostrano una probabilità di danno lieve compresa tra lo 0% e l'1%. Edifici come la chiesa di Santa Maria della scala e chiese minori raggiungono nel caso di un'analisi speditiva valori maggiori ma comunque bassi, compresi tra l'1% ed il 2%. In questo caso l'analisi quantitativa in Figura 3-161 non fornisce informazioni rilevanti ricadendo i risultati tramite le due analisi in uno stesso range di valori.

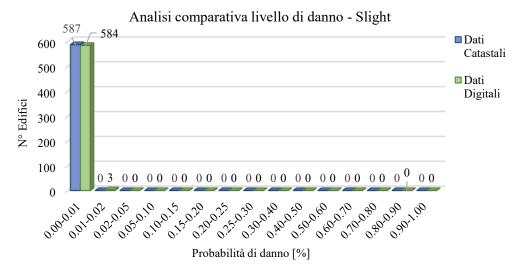


Figura 3-161 - Analisi comparativa un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia e magnitudo 4.5, in base al livello di danno Slight.

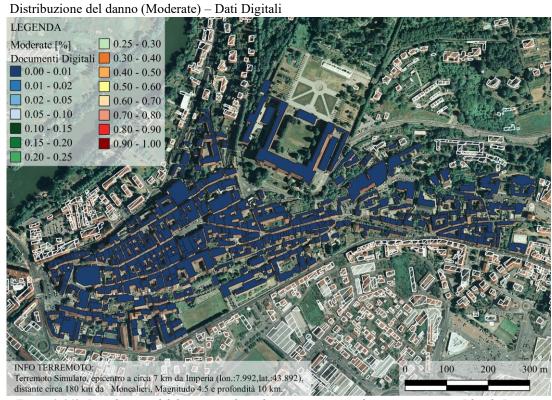


Figura 3-162- Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 4.5 con l'utilizzo di dati digitali (Moderate).

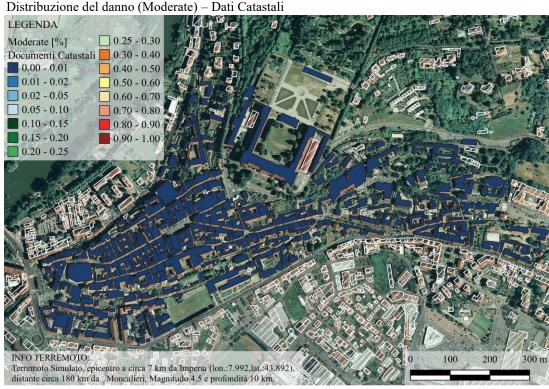


Figura 3-163- Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 4.5 con l'utilizzo di dati catastali (Moderate).

La Figura 3-162 e la Figura 3-163 mostrano rispettivamente la possibilità che si verifichi un danno moderato nel caso di analisi speditiva e nel caso di analisi dettagliata sul singolo edifico. Nonostante la differenza di informazioni i risultati presentano gli stessi valori come si evince dalla Figura 3-164. In entrambi i casi la probabilità che si verifichi un danno moderato è compresa tra lo 0% e l'1%.

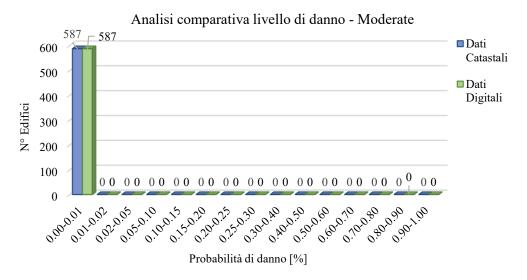


Figura 3-164 - Analisi comparativa un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia e magnitudo 4.5, in base al livello di danno Moderate.

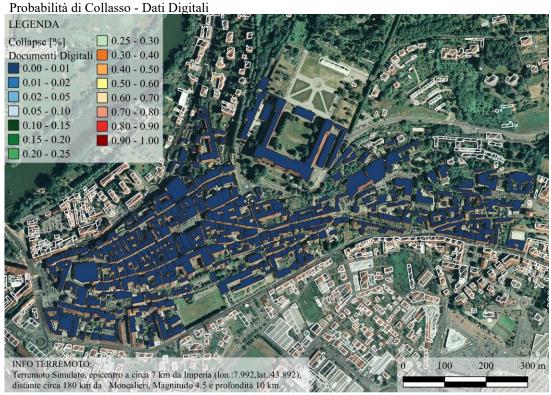


Figura 3-165- Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 4.5 con l'utilizzo di dati digitali (Collapse).

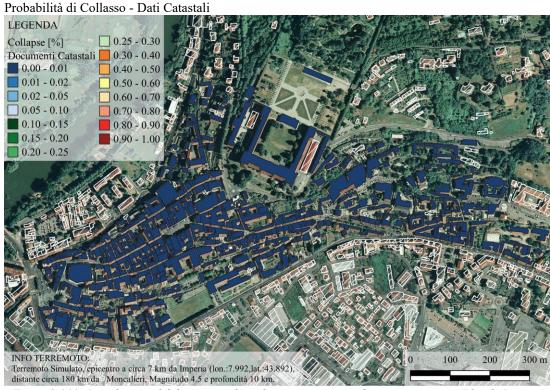


Figura 3-166 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 4.5 con l'utilizzo di dati catastali (Collapse).

Analizzando la probabilità di collasso degli edifici, sia nel caso di un'analisi dettagliata (Figura 3-166) che nel caso di un'analisi tramite dati digitali (Figura 3-165) i risultati sono compresi tra lo 0% e l'1%. Non si evince alcuna differenza dalla comparazione dei risultati (Figura 3-167).

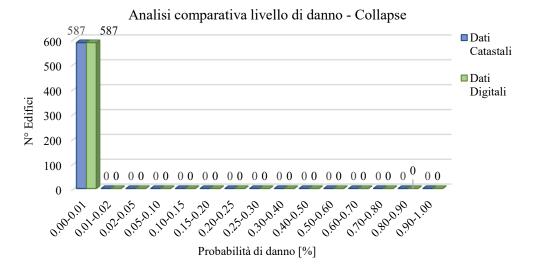


Figura 3-167- Analisi comparativa un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia e magnitudo 4.5, in base al livello di danno Collapse.

Anche l'analisi prodotta simulando tale terremoto non fornisce indicazioni utili al fine di un'analisi comparativa. Tale evento sismico presenta delle caratteristiche tali per cui la possibilità che l'area risenta dell'evento è nulla. Ciò si evince soprattutto da un'analisi delle perdite economiche la quale fornisce dei valori di perdita nulli.

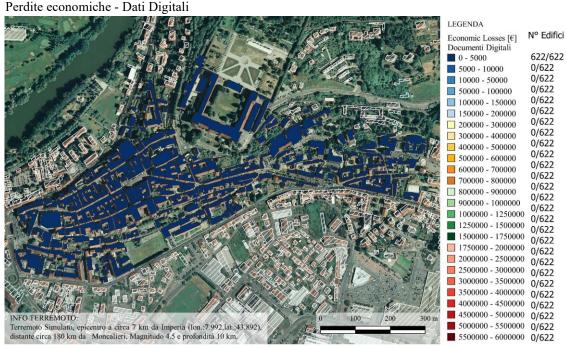


Figura 3-168 - Perdite economiche considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 4.5, con l'utilizzo di dati digitali.

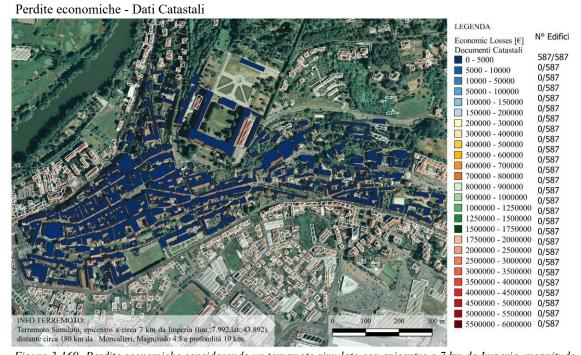


Figura 3-169- Perdite economiche considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 4.5, con l'utilizzo di dati catastali.

## Simulazione di un terremoto con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 5.5.

Le analisi che seguono hanno l'obbiettivo di evidenziare le differenze che l'utilizzo di diversi database causano sulla determinazione dei danni e delle perdite economiche dovute ad un terremoto con ipocentro posto a 7 km da Imperia, profondità 10 km e magnitudo pari a 5.5.

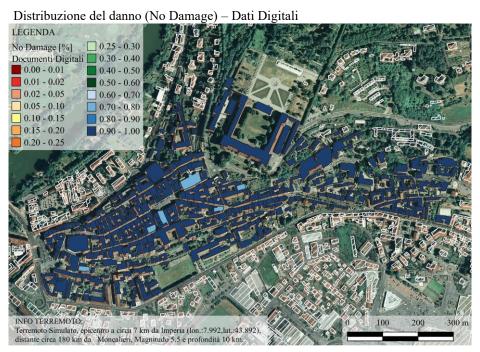


Figura 3-170 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 5.5 con l'utilizzo di dati digitali (No Damage).

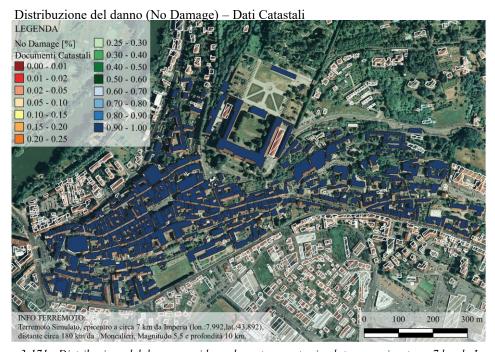


Figura 3-171 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 5.5 con l'utilizzo di dati catastali (No Damage).

Analizzando la Figura 3-170, la Figura 3-171 e il grafico di confronto in Figura 3-172 si evince una probabilità compresa tra il 90% ed il 100% di non subire alcun danno in entrambe le metodologie di analisi, fatta eccezione per alcuni edifici ecclesiastici che presentano una probabilità compresa tra il 70% e l'80% di non danneggiarsi, nel caso di un'analisi semplificata (Figura 3-170).

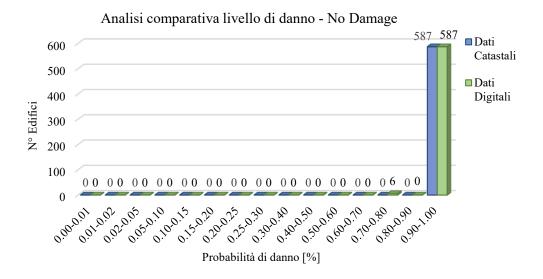


Figura 3-172 - Analisi comparativa un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia e magnitudo 5.5, in base al livello di danno No Damage.

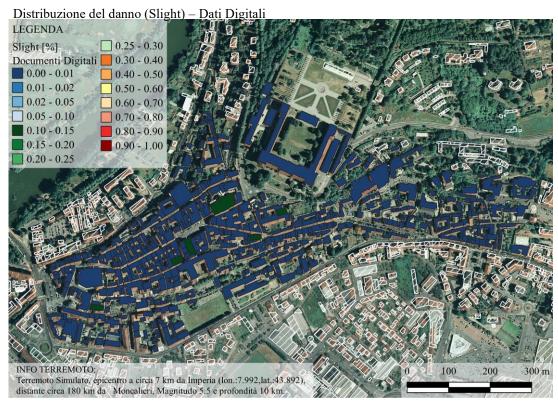


Figura 3-173 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 5.5 con l'utilizzo di dati digitali (Slight).

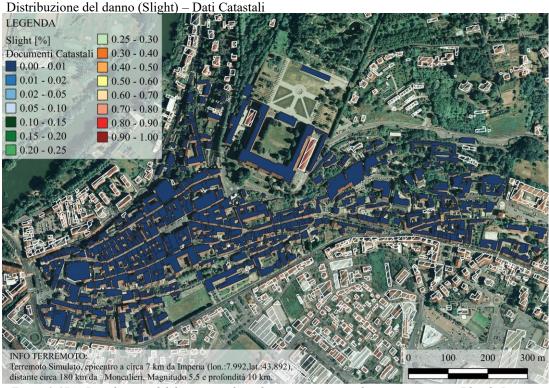


Figura 3-174 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 5.5 con l'utilizzo di dati catastali (Slight).

La probabilità che si verifichi un danno lieve per entrambe le metodologie presenta valore massimo dell'1%, con una variazione per gli edifici ecclesiastici con valori che oscillano dal 15% al 20% nel caso di valutazioni tramite dati digitali (Figura 3-173). Dall'analisi comparativa e quantitativa in Figura 3-175 si nota come l'analisi effettuata con diverse metodologie non definisca dei risultati con differenze notevoli.

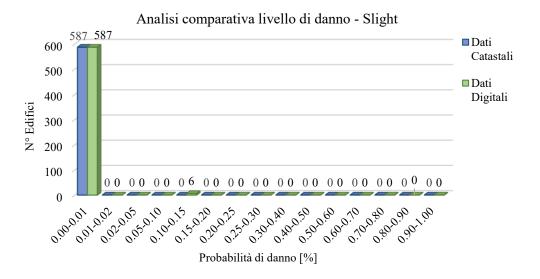


Figura 3-175- Analisi comparativa un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia e magnitudo 5.5, in base al livello di danno Slight.

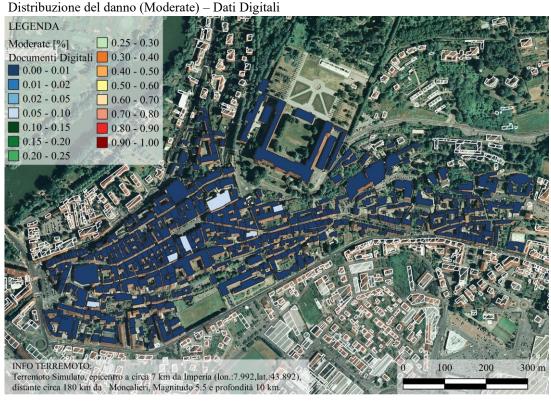


Figura 3-176- Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 5.5 con l'utilizzo di dati digitali (Moderate).

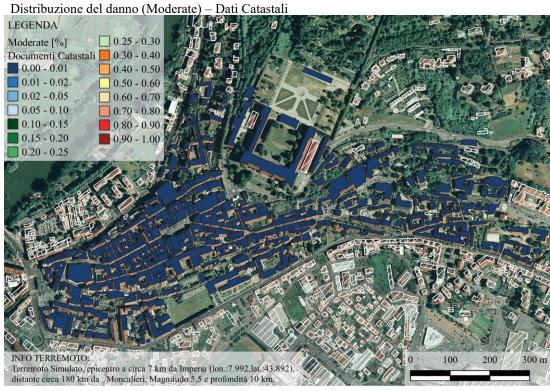


Figura 3-177 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 5.5 con l'utilizzo di dati catastali (Moderate).

Valori massimi dell'1% corrispondo alla possibilità che si verifichi un danno moderato sia nel caso di analisi tramite dati digitali (Figura 3-176) che con un'analisi derivante da dati catastali (Figura 3-177). Un'eccezione è caratterizzata dalle chiese nel caso di analisi speditiva dove si ha una probabilità di danno moderato compreso tra il 5% ed il 10%. Tale eccezione è mostrata in Figura 3-178 che definisce il numero di edifici che appartengono ad una determinata fascia percentuale rispetto la probabilità di danno moderato

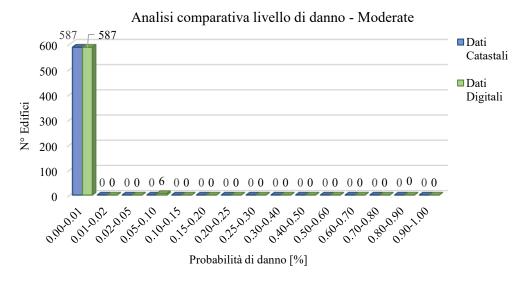


Figura 3-178- Analisi comparativa un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia e magnitudo 5.5, in base al livello di danno Moderate.

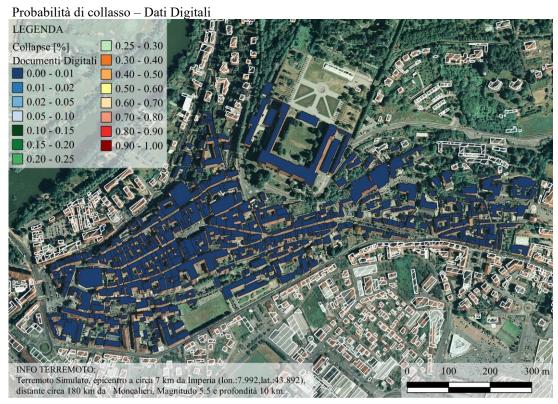


Figura 3-179 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 5.5 con l'utilizzo di dati digitali (Collapse).

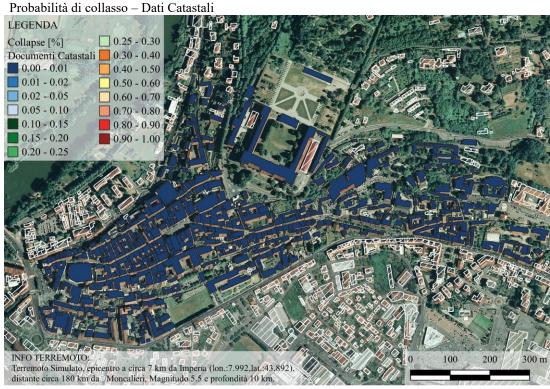


Figura 3-180 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 5.5 con l'utilizzo di dati catastali (Collapse).

Le Figura 3-179 e Figura 3-180 mostrano rispettivamente la possibilità che si verifichi collasso nel caso di analisi speditiva e nel caso di analisi dettagliata. Nonostante la differenza di informazioni i risultati presentano gli stessi valori come si evince dalla Figura 3-181. In entrambi i casi la probabilità che si verifichi un danno moderato è compresa tra lo 0% e l'1%.

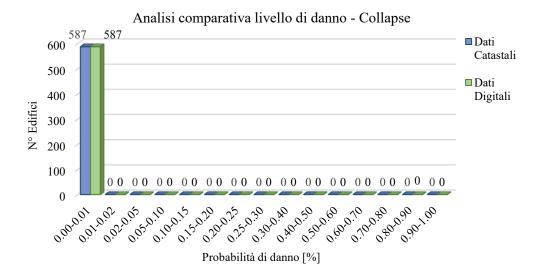


Figura 3-181- Analisi comparativa un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia e magnitudo 5.5, in base al livello di danno Collapse.

Nel caso in cui si verificasse un terremoto di magnitudo 5.5 con epicentro in Liguria, a 7 km da Imperia i danni sulle strutture non risultano ingenti. Anche in questo caso l'evento, come definito dalla simulazione di un terremoto di magnitudo 4.5, presenta delle caratteristiche tali per cui la possibilità che l'area risenta dell'evento è nulla. Ciò si evince soprattutto da un'analisi delle perdite economiche la quale fornisce dei valori di perdita nulli (Figura 3-182 e Figura 3-183).

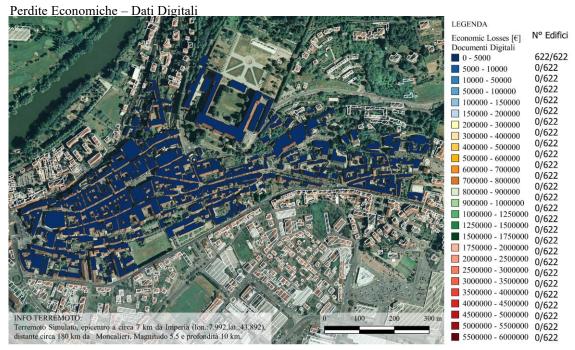


Figura 3-182 - Perdite economiche considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 5.5, con l'utilizzo di dati digitali.

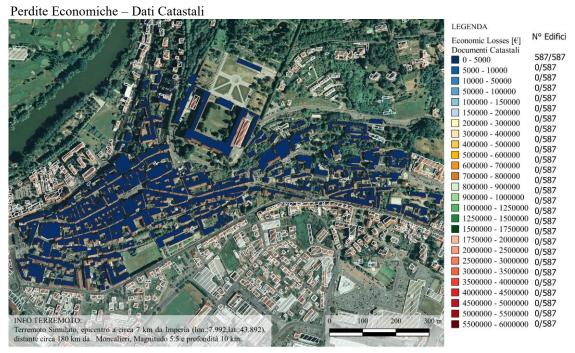


Figura 3-183 - Perdite economiche considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 5.5, con l'utilizzo di dati catastali.

## Simulazione di un terremoto con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 6.

Le analisi che seguono hanno l'obbiettivo di evidenziare le differenze che l'utilizzo di diversi database causano sulla determinazione dei danni e delle perdite economiche a seguito di un terremoto con ipocentro posto a 7 km da Imperia, profondità 10 km e magnitudo pari a 6.

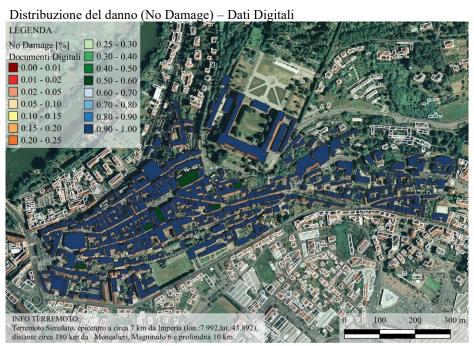


Figura 3-184- Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 6 con l'utilizzo di dati digitali (No Damage).

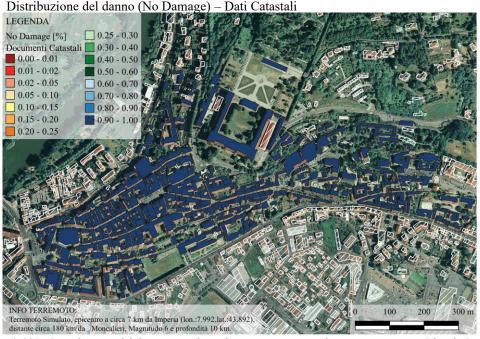


Figura 3-185 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 6 con l'utilizzo di dati catastali (No Damage).

Nel dettaglio il livello di danno corrispondente al No Damage presenta per entrambe le metodologie di analisi valori compresi tra il 90% ed il 100%, ad eccezione degli edifici ecclesiastici dove si hanno valori tra il 50% e il 60% solo nel caso di analisi semplificata (Figura 3-184). Tale differenza è visibile in Figura 3-186 dove viene riportato un confronto tra le due metodologie di analisi.

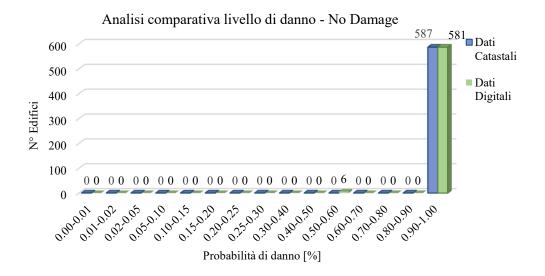


Figura 3-186 - Analisi comparativa un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia e magnitudo 6, in base al livello di danno No Damage.

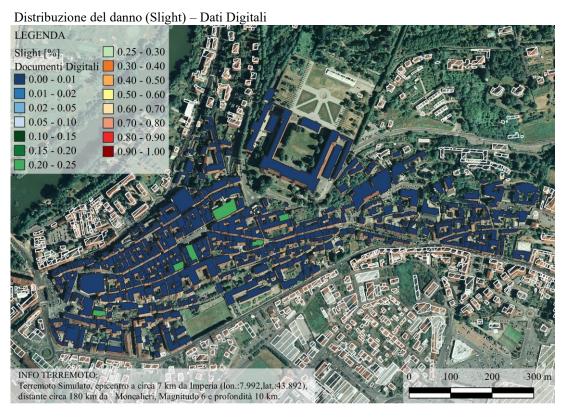


Figura 3-187- Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 6 con l'utilizzo di dati digitali (Slight).

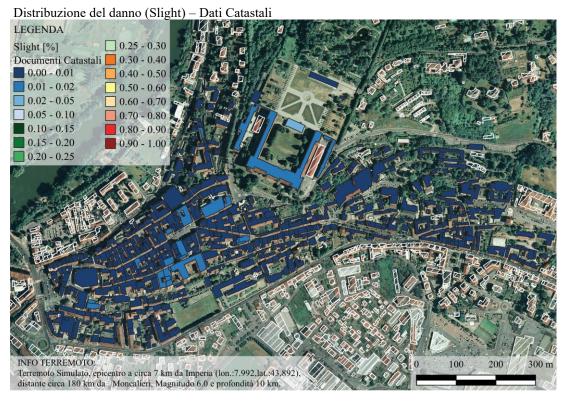


Figura 3-188 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 6 con l'utilizzo di dati catastali (Slight).

Nel caso di un danno lieve, il valore massimo risulta relativamente basso (2%), una variazione è definita per le chiese in cui si ha la probabilità di un danno lieve tra il 20% ed il 25% solo per i risultati ottenuti da un'analisi speditiva come si evince dalla Figura 3-187. In generale le due analisi non presentano molte differenze come si nota dalla Figura 3-189, di conseguenza sia un'analisi speditiva che una dettagliata producendo risultati simili risultano affidabili.

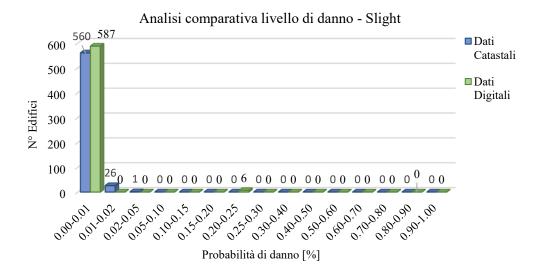


Figura 3-189 - Analisi comparativa un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia e magnitudo 6, in base al livello di danno Slight.

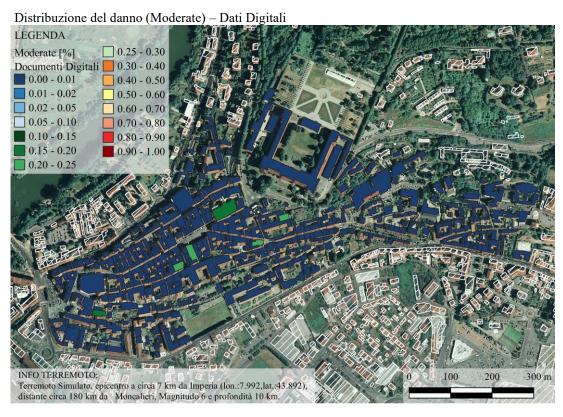


Figura 3-190 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 6 con l'utilizzo di dati digitali (Moderate).

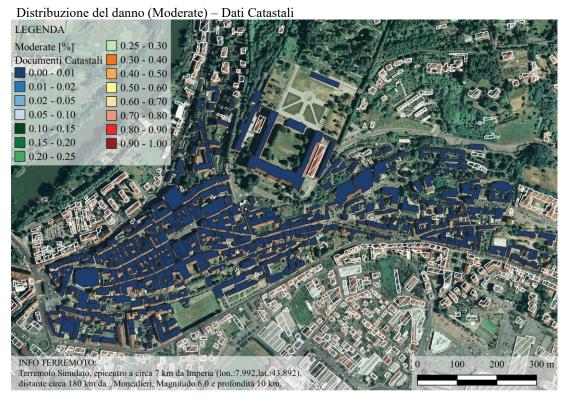


Figura 3-191 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 6 con l'utilizzo di dati catastali (Moderate).

La Figura 3-190 e la Figura 3-191 mostrano rispettivamente i risultati derivanti da un'analisi speditiva e da un'analisi dettagliata. Le differenze quantitative vengono mostrate in Figura 3-192. In particolare la maggior parte degli edifici in entrambi i casi prevede un danno moderato compreso tra lo 0% e l'1%. Le chiese da una valutazione tramite dati digitali presentano una probabilità di subire un danno lieve compresa tra il 15% ed il 25%.

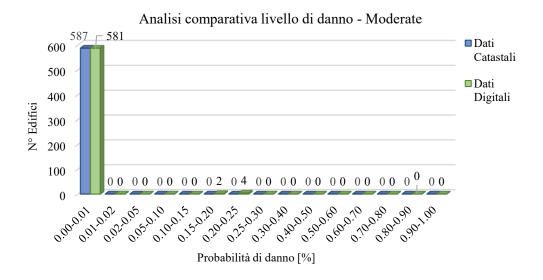


Figura 3-192 - Analisi comparativa un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia e magnitudo 6, in base al livello di danno Moderate.

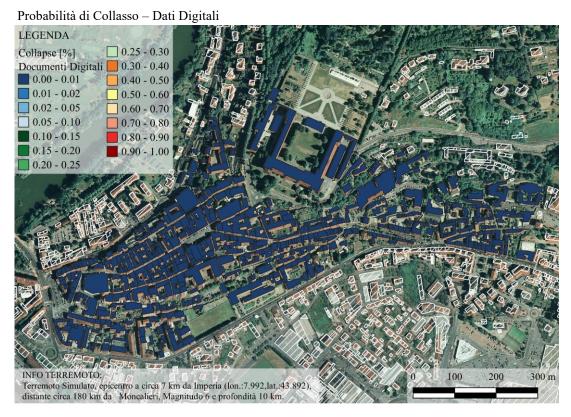


Figura 3-193- Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 6 con l'utilizzo di dati digitali (Collapse).

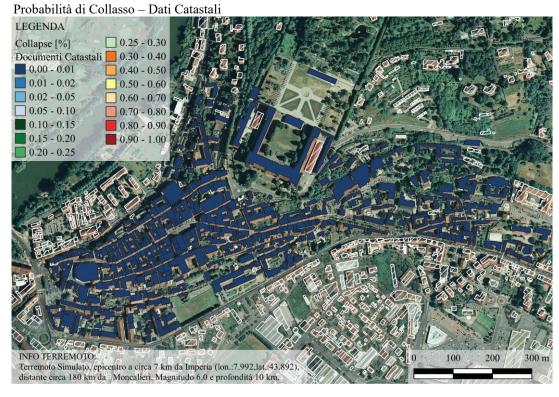


Figura 3-194 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 6 con l'utilizzo di dati catastali (Collapse).

Nel caso in cui si analizzi un possibile collasso degli edifici, la differenza di informazioni contenute all'interno dei database non fornisce una differenza di risultati come si evince dalla Figura 3-195. Infatti sia nel caso di utilizzo di dati digitali (Figura 3-193) che nel caso di dati catastali (Figura 3-194 e Figura 3-196) gli edifici presentano una probabilità di collasso compresa tra lo 0% e l'1%.

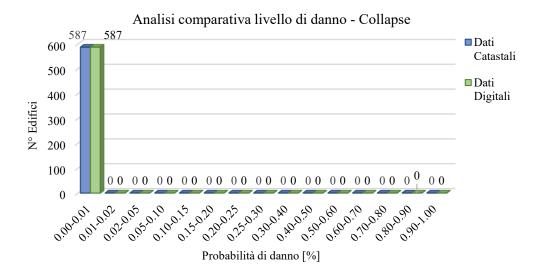


Figura 3-195 - Analisi comparativa un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia e magnitudo 6, in base al livello di danno Collapse.

Effettuando un incremento della magnitudo non si nota nessuna variazione significativa dei risultati. Anche in questo caso l'evento simulato non genera nessun dato utile per un'analisi comparativa come si evince dalla valutazione del probabile livello di danneggiamento e dai risultati delle perdite economiche, che risultano essere nulle.

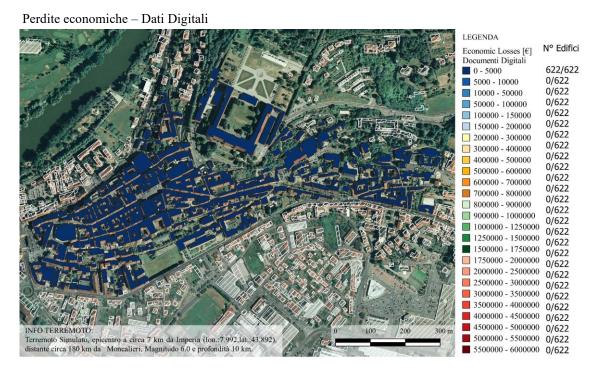


Figura 3-196 - Perdite economiche considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 6, con l'utilizzo di dati digitali.

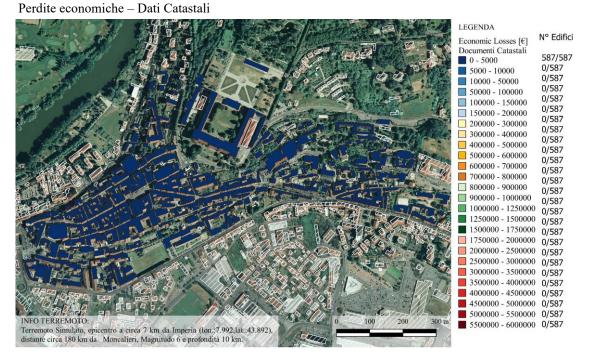


Figura 3-197 - Perdite economiche considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 6, con l'utilizzo di dati catastali.

## Simulazione di un terremoto con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 6.5.

Le analisi che seguono hanno l'obbiettivo di evidenziare le differenze che l'utilizzo di diversi database causano sulla determinazione dei danni e delle perdite economiche a seguito di un terremoto con ipocentro posto a 7 km da Imperia, profondità 10 km e magnitudo pari a 6.5.

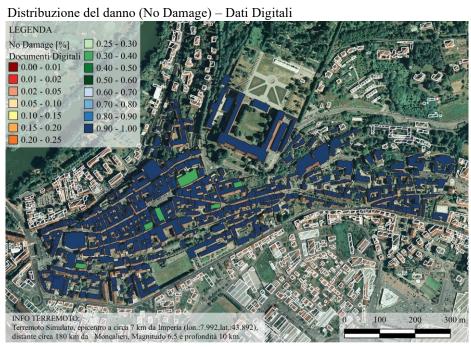


Figura 3-198 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 6.5 con l'utilizzo di dati digitali (No Damage).

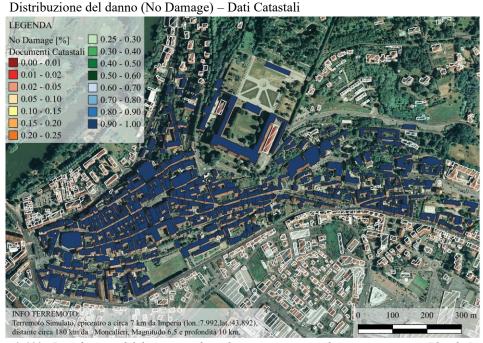


Figura 3-199 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 6.5 con l'utilizzo di dati catastali (No Damage).

Tramite un'analisi che utilizza dati digitali (Figura 3-198) si evince una probabilità di non subire danno compresa tra il 30% ed il 40% negli edifici monumentali mentre la restante parte degli edifici e la totalità, nel caso di analisi con dati catastali (Figura 3-199), presentano possibilità di non subire danno compresa tra il 90% ed il 100%. Dalla valutazione dello scenario del danno relativo al No Damage non emergono differenze significative (Figura 3-200).

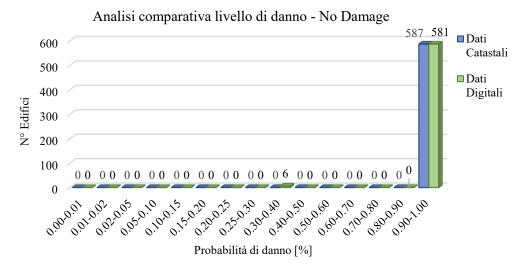


Figura 3-200 - Analisi comparativa un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia e magnitudo 6.5, in base al livello di danno No Damage.

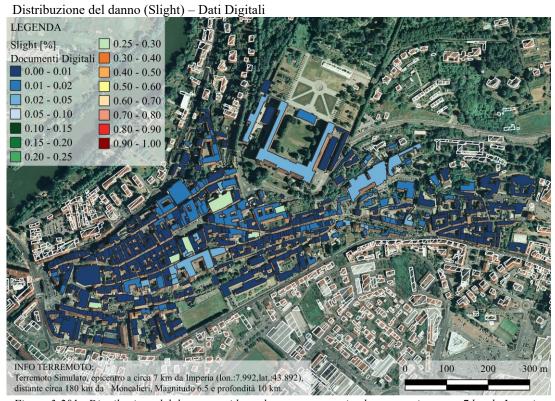


Figura 3-201 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 6.5 con l'utilizzo di dati digitali (Slight).

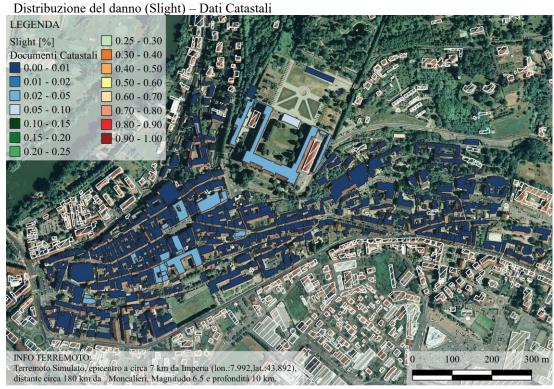


Figura 3-202 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 6.5 con l'utilizzo di dati catastali (Slight).

Nel caso della valutazione di un probabile danno lieve, la maggior parte degli edifici nell'analisi semplificata (Figura 3-201) presenta la probabilità compresa tra lo 0% ed il 5 % ad eccezione di alcuni edifici ecclesiastici che presentano una probabilità più alta, compresa tra il 25% ed il 30%, nel caso dell'analisi dettagliata (Figura 3-202) tutti gli edifici presentano valori compresi tra lo 0% e l'1%, ad eccezione del castello di Moncalieri e di alcuni edifici vincolati i cui valori sono compresi tra il 2% ed il 5% . Dall'analisi comparativa riportata in figura 3.201 si evidenzia maggiormente la leggera differenza dei range all'interno del quale ricadono gli edifici. Nonostante tale differenza, la probabilità che gli edifici subiscano un lieve danno si ritiene bassa.

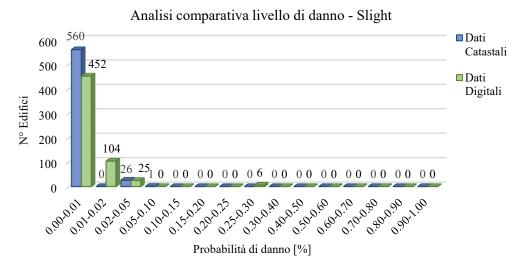


Figura 3-203 - Analisi comparativa un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia e magnitudo 6.5, in base al livello di danno Slight.

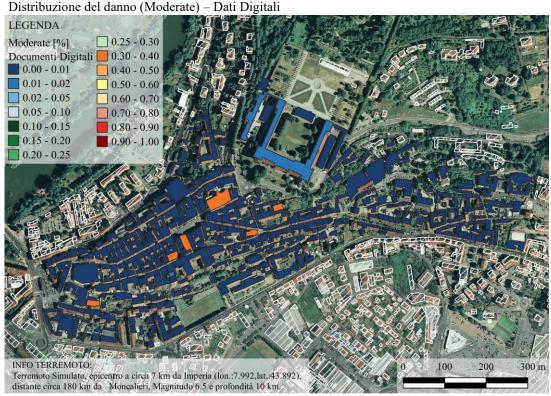


Figura 3-204- Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 6.5 con l'utilizzo di dati digitali (Moderate).

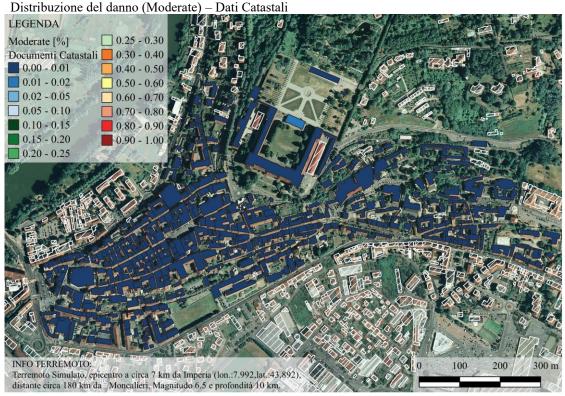


Figura 3-205 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 6.5 con l'utilizzo di dati catastali (Moderate).

Analizzando, invece, la probabilità che si verifichino danni moderati, per un'analisi speditiva Figura 3-204 e per un'analisi dettagliata, Figura 3-205, si evince nel primo caso una probabilità che si verifichino danni moderati, compresa tra il 40 ed il 50% per gli edifici ecclesiastici mentre per i restanti edifici si ha una probabilità compresa tra lo 0% ed il 2%. Nel secondo caso la percentuale di danno moderato risulta compresa tra lo 0% ed l'1% per tutti gli edifici presenti sull'area di studio.

Dall'analisi comparativa e quantitativa mostrata in Figura 3-206 non si hanno difformità rilevanti ai fini di una valutazione del rischio sismico.

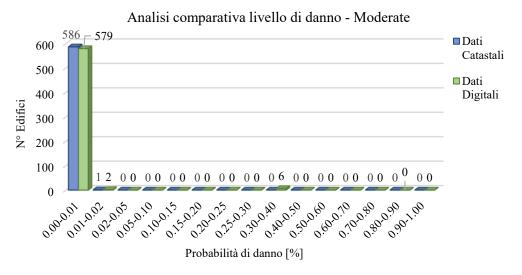


Figura 3-206 - Analisi comparativa un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia e magnitudo 6.5, in base al livello di danno Moderate.

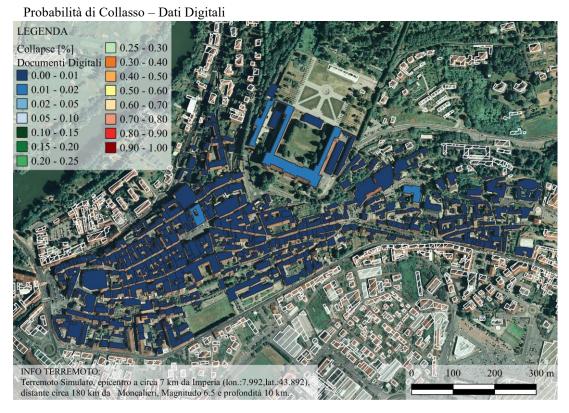


Figura 3-207 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 6.5 con l'utilizzo di dati digitali (Collapse).

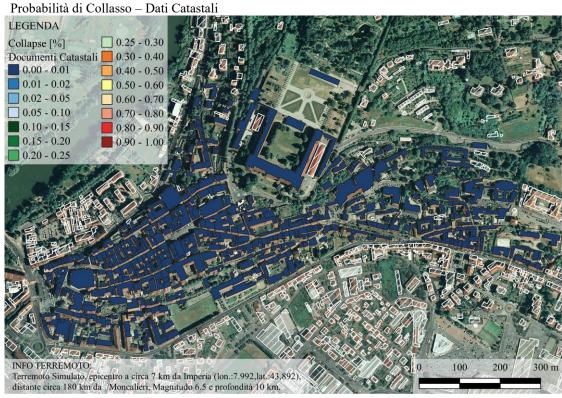


Figura 3-208 - Distribuzione del danno considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 6.5 con l'utilizzo di dati catastali (Collapse).

Le Figura 3-207 e Figura 3-208 mostrano la probabilità di collasso a seguito dell'evento sismico precedentemente descritto. Dall'analisi comparativa (Figura 3-209), a seguito della duplice analisi, non emerge una differenza significativa dall'utilizzo dei diversi dati in quanto la probabilità di collasso è relativamente bassa, il valore massimo è pari al 5%. Nel caso di dati catastali tutti gli edifici rientrano in una probabilità di collasso compresa tra lo 0% e l'1% (Figura 3-208), mentre da un'analisi tramite dati digitali si un range tra lo 0% ed il 2% (Figura 3-207).

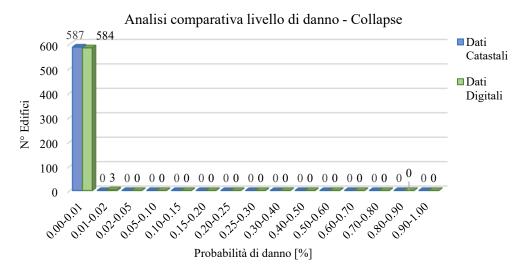


Figura 3-209- Analisi comparativa un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia e magnitudo 6.5, in base al livello di danno Collapse.

Terremoto Simulato, epicentro a circa 7 km da Imperia (lon.:7.992.lat.;43.892), distante circa 180 km da Moncalieri, Magnitudo 6.5 e profondità 10 km.

#### Perdite economiche – Dati Digitali Nº Edifici Economic Losses [€] Documenti Digitali 536/622 0 - 5000 33/622 **5000 - 10000** 24/622 10000 - 50000 50000 - 100000 18/622 0/622 100000 - 150000 0/622 150000 - 200000 0/622 200000 - 300000 1/622 300000 - 400000 0/622 400000 - 500000 0/622 500000 - 600000 0/622 600000 - 700000 0/622 700000 - 800000 0/622 800000 - 900000 0/622 900000 - 1000000 0/622 1000000 - 1250000 0/622 1250000 - 1500000 0/622 1500000 - 1750000 0/622 **1750000 - 2000000** 0/622 2000000 - 2500000 0/622 2500000 - 3000000 0/622 3000000 - 3500000 0/622 3500000 - 4000000 0/622 4000000 - 4500000 0/622 **4500000 - 5000000** 0/622 **5000000 - 5500000 0/622** NEO TERREMOTO

Figura 3-210 - Perdite economiche considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 6.5, con l'utilizzo di dati digitali.

**5500000 - 6000000 0/622** 

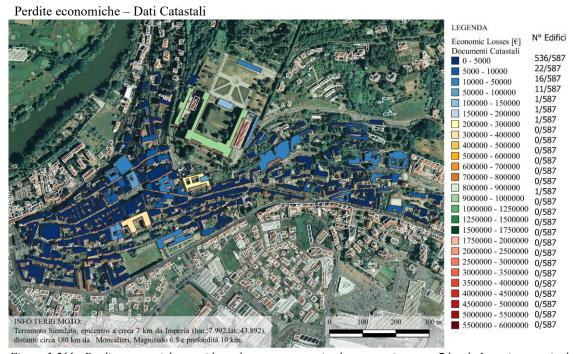


Figura 3-211 - Perdite economiche considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia, magnitudo 6.5, con l'utilizzo di dati catastali.

La simulazione del terremoto di magnitudo 6.5 presenta, inoltre, delle perdite economiche che ammontano per l'analisi tramite dati digitali a 1.273.775,96 € mentre nel caso di dati catastali a 2.334.590,66 €. La differenza percentuale tra le due è pari all'83% che in valore assoluto vale 1.060.814,70 €. I beni che presentano maggiore perdita sono i beni vincolati, si definisce infatti una perdita di 819.055 € da un'analisi speditiva, che rappresenta il 64% del totale, mentre un ammontare di 1.112.906 € da un'analisi specifica che rappresenta il 47% sul totale.

# Analisi comparativa perdite economiche beni vincolati

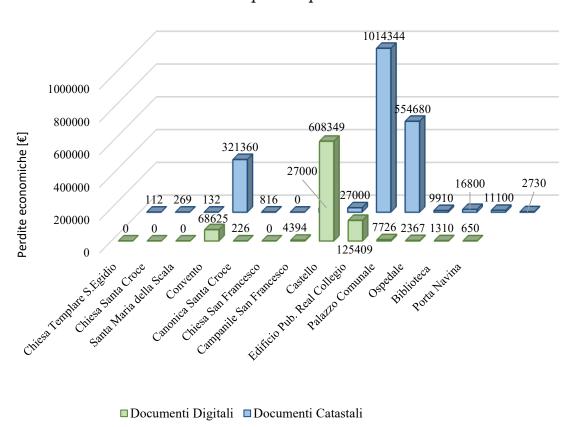


Figura 3-212 - Analisi comparativa delle perdite dei beni vincolati, considerando un terremoto simulato con epicentro a 7 km da Imperia e magnitudo 6.5.

In conclusione, a seguito delle analisi precedentemente esposte, da un'analisi dei diversi livelli di danno non emergono differenze significative tra i risultati ottenuti dai diversi database utilizzati, soprattutto per quanta concerne le valutazioni derivanti dall'analisi dei terremoti con ipocentro in Liguria. Quest'ultimo, a differenza del terremoto avvenuto in Val Pellice, presenta ipocentro ad una distanza di 126 km da Moncalieri, in questo caso sia l'evento storico che gli eventi simulati non generano nessun dato utile per un'analisi comparativa, infatti come mostrato dalle valutazioni quantitativa si hanno nella maggior parte dei casi gli stessi risultati. Maggiori discrepanze emergono dai risultati derivanti dal terremoto storico e dai terremoti simulati di magnitudo 6 e 6.5 con ipocentro in Val Pellice.

La prima differenza che emerge è la differenza dei livelli di danno che presentano beni di particolare interesse, determinati edifici come ad esempio le chiese risultano molto più vulnerabili, in quanto anche con un'intensità bassa la probabilità che si inneschi un meccanismo di collasso è più alta. L'informazione sulla destinazione d'uso risulta di fondamentale importanza, in base ad essa variano le curve di vulnerabilità e fragilità da associare all'edificio. Pertanto, la principale differenza tra i due database è associata alle diverse destinazioni d'uso descritte, si nota infatti come nel caso di database digitali le sole eccezioni siano rappresentate dalle chiese, unici elementi patrimoniali presenti nella classificazione della destinazione d'uso, mentre dai risultati delle analisi catastali emergono delle piccole variazioni nei risultati per gli edifici monumentali come ad esempio il castello di Moncalieri.

In generale, da un'analisi critica dei risultati emerge che un livello di conoscenza accurato comporta probabilità di danno minori rispetto ad un'analisi speditiva. Pertanto, informazioni dettagliate possono fornire informazioni più attendibili, i risultati pressoché similari sono attribuibili alla bassa sismicità dell'area oggetto di studio.

L'analisi comparativa e quantitativa risulta particolarmente rilevante nella valutazione delle perdite economiche e mostra delle differenze consistenti come si evince dal confronto dei diversi risultati mostrati precedentemente. In questo caso un'analisi del rischio sismico con delle informazioni dettagliate risulta particolarmente rilevante in quanto i dati digitali comportano una sottostima dei risultati, la differenza percentuale tra le perdite complessiva risulta pari a circa il 200% nei casi in cui si analizzano terremoti con intensità maggiore e del 100% con intensità minore. Le perdite maggiori sono associate ai beni vincolati, questo è principalmente dovuto ad un costo di ricostruzione parametrico utilizzato (€/mq) e all'incremento che si attua per gli edifici vincolati.

# 4 Analisi del rischio sismico del sistema viario dei centri storici

Focalizzando l'attenzione sul sistema viario, la valutazione dell'interazione tra gli edifici esistenti e la rete stradale dopo un terremoto rappresenta un elemento fondamentale per la gestione delle emergenze, soprattutto per quanto concerne i centri storici, che sono caratterizzati da un alto tasso di urbanizzazione (Zanini, Faleschini, et al. 2017). Durante un evento sismico può accadere che la rete stradale venga interrotta in alcuni tratti a causa del crollo anche solo parziale di edifici. I centri storici hanno una conformazione viaria caratterizzata molto spesso da strade strette e tortuose. Ciò è dovuto alle ovvie superfetazioni dei sistemi viari che si sono susseguite nei secoli. La complessità del sistema urbano dei centri storici, ha ovviamente delle ricadute sull'accessibilità di alcune aree in caso di evento sismico: infatti i crolli potrebbero ritardare o impedire il sopraggiungere dei soccorsi. Noto il rischio sismico di un'area, è possibile studiare strategie di intervento per prevenire quanto descritto. Per poter determinare il livello di danno di una rete stradale è possibile utilizzare dei concetti probabilistici e una logica fuzzy. Il presente capitolo studia la logica fuzzy applicata al centro storico di Moncalieri con il fine di evidenziare gli edifici il cui crollo, a seguito di un evento sismico, potrebbe causare una perdita di funzionalità del sistema urbano.

# 4.1 Determinazione dell'occupazione stradale a seguito di un crollo

Il livello di funzionalità di una strada a seguito di un terremoto può essere valutato tramite la valutazione della presenza dei detriti dovuti al crollo degli edifici, definendo il possibile livello di occupazione stradale. Essendo la determinazione dello spazio occupato dai detriti un fenomeno difficilmente stimabile è possibile ricorrere alla logica fuzzy. Nel caso in esame, in riferimento al centro storico di Moncalieri, il sistema di inferenza fuzzy è stato costruito tramite l'ausilio della toolbox fornita da Matlab. Tramite tale strumento, come descritto al paragrafo 2.3, vengono definiti i diversi input e forniti in output delle funzioni di appartenenza che andranno "defuzzificate".

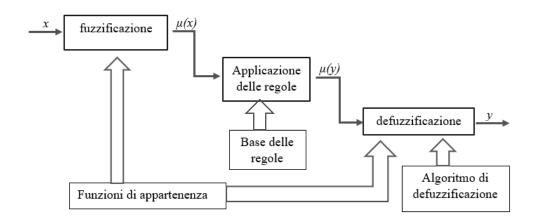


Figura 4-1 – Schema di funzionamento logica fuzzy.

Gli ingressi e le uscite del sistema sono rappresentati da variabili linguistiche e vengono rappresentati tramite un insieme di termini. Nel caso in esame sono state utilizzate come variabili di input:

- Altezza degli edifici, classificati tramite le variabili linguistiche [basso, medio, alto];
- Larghezza della strada, [stretta, media, larga];
- *Il valore di PGA*, [bassa, alta].

La variabile di output è rappresentata dalla percentuale di occupazione stradale ed utilizza variabili linguistiche [molto bassa, bassa, media, alta, molto alta].

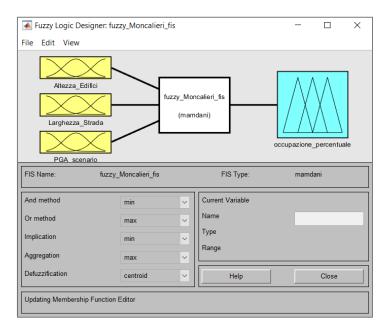


Figura 4-2 – Variabili di Input/Output del sistema di inferenza fuzzy.

Nel dettaglio, al fine di rappresentare le variabili linguistiche sopra citate, l'altezza dell'edificio è stata descritta tramite tre funzioni di appartenenza (membership functions) di forma trapezoidale, definite nell'intervallo [0,20] e con unità di misura il metro.

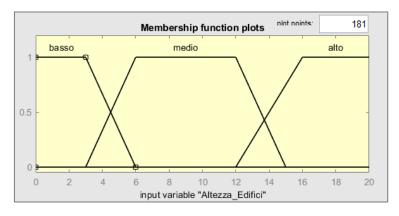


Figura 4-3 – Membership functions della variabile di input "Altezza Edifici"

Per la descrizione matematica della variabile inerente alla larghezza della strada sono state utilizzate le stesse funzioni di appartenenza ricavate per l'altezza degli edifici, differenziando l'intervallo tra [0,25] ed utilizzando come unità di misura il metro.

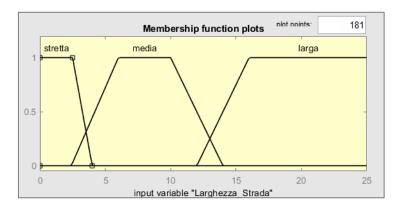


Figura 4-4 - Membership functions della variabile di input "Larghezza strada".

Il valore di input riferito alla PGA è descritto tramite due funzioni di appartenenza trapezoidali definite nell'intervallo [0,1]. I valori di PGA utilizzati sono quelli risultati dall'analisi "Stochastic event based probabilistic seismic risk analysis" descritte al paragrafo 3.7.1.

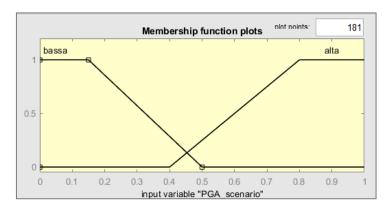


Figura 4-5 - Membership functions della variabile di input "PGA".

La variabile di output è descritta tramite cinque funzioni di appartenenza, di forma triangolare, per poter garantire uno spettro più ampio di possibilità su cui ricadere. L'intervallo in cui viene definito è [0,1].

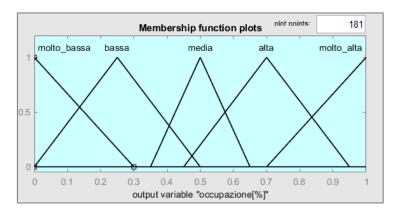


Figura 4-6 - Membership functions della variabile di output "occupazione %".

Definite le variabili di input vengono definite le regole per permettere al software di operare le decisioni sulla base dei sistemi "sfocati" (fuzzy). Nel caso in esame il processo di decisone si basa sull'uso e l'aggregazione delle regole di inferenza *If-Then* e sulle osservazioni effettuate da (Zanini, F., et al. 2016) in merito al collasso di edifici avvenuti durante recenti terremoti. Le regole definite per il caso sono in esame sono 35 e sono riportate in Figura 4-7 ed in formato grafico in Figura 4-8.

```
    If (Altezza_Edifici is basso) and (Larghezza_Strada is stretta) and (PGA_scenario is bassa) then (occupazione[%] is bassa) (1)

2. If (Altezza_Edifici is basso) and (Larghezza_Strada is stretta) and (PGA_scenario is alta) then (occupazione[%] is media) (
3. If (Altezza_Edifici is basso) and (Larghezza_Strada is stretta) and (PGA_scenario is bassa) then (occupazione[%] is media) (1)
4. If (Altezza_Edifici is basso) and (Larghezza_Strada is stretta) and (PGA_scenario is alta) then (occupazione[%] is alta) (1)

    If (Altezza_Edifici is basso) and (Larghezza_Strada is media) and (PGA_scenario is bassa) then (occupazione[%] is media) (1)

6. If (Altezza_Edifici is basso) and (Larghezza_Strada is media) and (PGA_scenario is alta) then (occupazione[%] is alta) (1)
7. If (Altezza_Edifici is basso) and (Larghezza_Strada is media) and (PGA_scenario is bassa) then (occupazione[%] is bassa) (1) 8. If (Altezza_Edifici is basso) and (Larghezza_Strada is media) and (PGA_scenario is alta) then (occupazione[%] is media) (1)
9. If (Altezza_Edifici is basso) and (Larghezza_Strada is larga) and (PGA_scenario is bassa) then (occupazione[%] is bassa) (1) 10. If (Altezza_Edifici is basso) and (Larghezza_Strada is larga) and (PGA_scenario is alta) then (occupazione[%] is bassa) (1)
11. If (Altezza_Edifici is basso) and (Larghezza_Strada is larga) and (PGA_scenario is bassa) then (occupazione[%] is molto_bassa) (1) 12. If (Altezza_Edifici is basso) and (Larghezza_Strada is larga) and (PGA_scenario is alta) then (occupazione[%] is molto_bassa) (1)
13. If (Altezza_Edifici is medio) and (Larghezza_Strada is stretta) and (PGA_scenario is bassa) then (occupazione[%] is alta) (1)
14. If (Altezza_Edifici is medio) and (Larghezza_Strada is stretta) and (PGA_scenario is alta) then (occupazione[%] is molto_alta) (1)
 15. If (Altezza Edifici is medio) and (Larghezza Strada is stretta) and (PGA scenario is bassa) then (occupazione[%] is alta) (1)
16. If (Altezza_Edifici is medio) and (Larghezza_Strada is stretta) and (PGA_scenario is alta) then (occupazione[%] is molto_alta) (1)
 17. If (Altezza_Edifici is medio) and (Larghezza_Strada is media) and (PGA_scenario is bassa) then (occupazione[%] is media) (1)
18. If (Altezza Edifici is medio) and (Larghezza Strada is media) and (PGA scenario is alta) then (occupazione[%] is alta) (1)
19. If (Altezza_Edifici is medio) and (Larghezza_Strada is media) and (PGA_scenario is bassa) then (occupazione[%] is bassa) (
20. If (Altezza Edifici is medio) and (Larghezza Strada is media) and (PGA scenario is alta) then (occupazione[%] is media) (1)
21. If (Altezza Edifici is medio) and (Larghezza Strada is media) and (PGA scenario is bassa) then (occupazione[%] is bassa) (1)
22. If (Altezza Edifici is medio) and (Larghezza Strada is media) and (PGA scenario is alta) then (occupazione[%] is bassa) (1)
23. If (Altezza_Edifici is medio) and (Larghezza_Strada is media) and (PGA_scenario is bassa) then (occupazione[%] is molto_bassa) (1)
24. If (Altezza Edifici is medio) and (Larghezza Strada is media) and (PGA scenario is alta) then (occupazione[%] is molto bassa) (1)
25. If (Altezza Edifici is alto) and (Larghezza Strada is stretta) and (PGA scenario is bassa) then (occupazione[%] is alta) (1)
26. If (Altezza Edifici is alto) and (Larghezza Strada is stretta) and (PGA scenario is alta) then (occupazione[%] is molto alta) (1)
27. If (Altezza_Edifici is alto) and (Larghezza_Strada is stretta) and (PGA_scenario is bassa) then (occupazione[%] is alta) (1)
28. If (Altezza Edifici is alto) and (Larghezza Strada is stretta) and (PGA scenario is alta) then (occupazione[%] is molto_alta) (1)
29. If (Altezza_Edifici is alto) and (Larghezza_Strada is media) and (PGA_scenario is bassa) then (occupazione[%] is bassa) (1)
30. If (Altezza_Edifici is alto) and (Larghezza_Strada is media) and (PGA_scenario is alta) then (occupazione[%] is alta) (1)
31. If (Altezza_Edifici is alto) and (Larghezza_Strada is media) and (PGA_scenario is bassa) then (occupazione[%] is media) (
32. If (Altezza Edifici is alto) and (Larghezza Strada is media) and (PGA scenario is alta) then (occupazione[%] is alta) (1)
33. If (Altezza_Edifici is alto) and (Larghezza_Strada is larga) and (PGA_scenario is bassa) then (occupazione[%] is media) (1)
34. If (Altezza_Edifici is alto) and (Larghezza_Strada is larga) and (PGA_scenario is alta) then (occupazione[%] is media) (1)
35. If (Altezza_Edifici is alto) and (Larghezza_Strada is larga) and (PGA_scenario is bassa) then (occupazione[%] is bassa) (1)
```

Figura 4-7 – Regole del sistema di inferenza fuzzy per la determinazione dell'occupazione stradale.

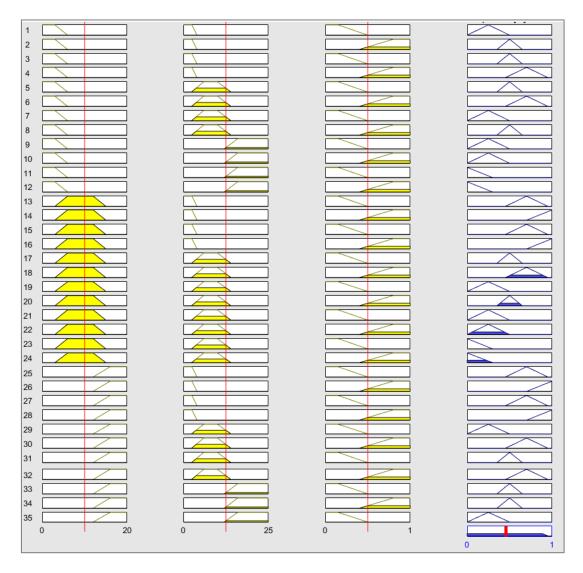
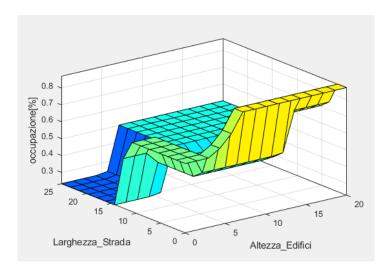


Figura 4-8 -Formato grafico delle regole del sistema di inferenza fuzzy per la determinazione dell'occupazione stradale.

Per ottenere dei valori crisp di output è necessario effettuare un'operazione di defuzzificazione, la quale può essere effettuata tramite diverse metodologie, quella più utilizzata è il metodo del centroide che definisce un valore crisp tramite la media pesata di tutti i valori che compaiono all'interno delle funzioni di appartenenza. Il risultato del sistema di inferenza fuzzy viene plottato in Figura 4-8 Figura 4-9 e Figura 4-10.



Figura~4-9-Plot~occupazione~stradale~in~funzione~dell'altezza~degli~edifici~e~della~larghezza~della~strada

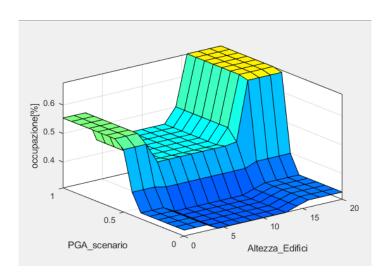


Figura 4-10– Plot occupazione stradale in funzione dell'altezza degli edifici e del valore di PGA.

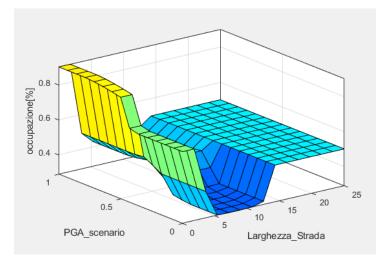


Figura 4-11 - Plot occupazione stradale in funzione della larghezza della strada e del valore di PGA.

La compilazione delle variabili utilizzate per l'analisi all'interno della toolbox permette la generazione di un codice Matlab (Figura 4-12) che implementato con il database delle informazioni inerenti alle variabili di input, genera in output la % di occupazione in merito alle diverse strade analizzate. Per quanto concerne la valutazione delle variabili di input inserite all'interno delle analisi si utilizzano per l'altezza degli edifici i valori presenti all'interno della tabella attributi dello shapefile fornito dalla Regione Piemonte, per il valore di PGA i valori forniti dall'analisi risultati dall'analisi "Stochastic event based probabilistic seismic risk analysis" descritte al paragrafo 3.7.1. Mentre, per la larghezza delle strade il Geoportale della Regione Piemonte fornisce uno shapefile poligonale, che permette di prendere visione dell'assetto stradale, e la cui suddivisione in geometrie semplici, ha permesso, tramite l'utilizzo del calcolatore di campi presente in QGis, la valutazione delle due dimensioni tra cui la larghezza.

```
[System]
                                           [Rules]
Name='fuzzy_Moncalieri_fis'
                                           1 1 1, 2 (1) : 1
                                           1 1 2, 3 (1) : 1
Type='mamdani'
                                           1 1 1, 3 (1) : 1
Version=2.0
                                           1 1 2, 4 (1) : 1
NumInputs=3
                                           1 2 1, 3 (1) : 1
NumOutputs=1
                                          1 2 2, 4 (1) : 1
NumRules=35
                                           1 2 1, 2 (1) : 1
AndMethod='min'
                                          1 2 2, 3 (1) : 1
OrMethod='max'
                                          1 3 1, 2 (1) : 1
ImpMethod='min'
                                           1 3 2, 2 (1) : 1
AggMethod='max'
                                           1 3 1, 1 (1) : 1
DefuzzMethod='centroid'
                                          1 3 2, 1 (1) : 1
                                           2 1 1, 4 (1) : 1
[Input1]
                                           2 1 2, 5 (1) : 1
Name='Altezza_Edifici'
                                          2 1 1, 4 (1) : 1
Range=[0 20]
                                           2 1 2, 5 (1) : 1
NumMEs=3
                                           2 2 1, 3 (1) : 1
MF1='basso':'trapmf',[0 0 3 6]
MF2='medio':'trapmf',[3 6 12 15]
MF3='alto':'trapmf',[12 16 20 22]
                                          2 2 2, 4 (1) : 1
                                           2 2 1, 2 (1) : 1
                                           2 2 2, 3 (1) : 1
                                           2 2 1, 2 (1) : 1
                                           2 2 2, 2 (1) : 1
[Input2]
                                           2 2 1, 1 (1) : 1
Name='Larghezza_Strada'
                                           2 2 2, 1 (1) : 1
Range=[0 25]
                                           3 1 1, 4 (1) : 1
NumMEs=3
                                           3 1 2, 5 (1) : 1
MF1='stretta':'trapmf',[0 0 2.5 4]
                                           3 1 1, 4 (1) : 1
MF2='media':'trapmf',[2.4 6 10 14]
                                           3 1 2, 5 (1) : 1
MF3='larga':'trapmf',[12 16 25 25]
                                           3 2 1, 2 (1) : 1
                                           3 2 2, 4 (1) : 1
[Input3]
                                           3 2 1, 3 (1) : 1
Name='PGA_scenario'
                                           3 2 2, 4 (1) : 1
Range=[0 1]
                                           3 3 1, 3 (1) : 1
NumMFs=2
                                           3 3 2, 3 (1) : 1
MF1='bassa':'trapmf',[0 0 0.15 0.5]
                                           3 3 1, 2 (1) : 1
MF2='alta':'trapmf',[0.4 0.8 1 1]
                                           %Variabili Input_Moncalieri
                                           fis=readfis('fuzzy_Moncalieri_fis.fis');
[Output1]
                                           matr=xlsread('DATI_ANALISI.xlsx');
Name='occupazione_percentuale'
                                           PGA=matr(:,2);
Range=[0 1]
                                           PGA2=PGA';
NumMFs=5
                                           ALT=matr(:,3);
MF1='molto_bassa':'trimf',[0 0 0.3]
                                           ALT2=ALT';
MF2='bassa':'trimf',[0 0.25 0.5]
MF3='media':'trimf',[0.35 0.5 0.65]
                                           LARG=matr(:,4);
                                           LARG2=LARG';
MF4='alta':'trimf',[0.45 0.7 0.95]
                                           inputs=[ALT2;LARG2;PGA2];
MF5='molto_alta':'trimf',[0.7 1 1]
                                           evalfis(fis,inputs);
```

Figura 4-12 - Codice Matlab per la definizione dell'occupazione stradale in seguito ad un crollo

I risultati ottenuti tramite il software Matlab sono stati successivamente implementati tramite l'utilizzo di QGis al fine di permettere una visualizzazione grafica delle strade occupate dai detriti in seguito al crollo degli edifici. L'analisi condotta considera le strade principali del centro storico, le quali consentono la connessione con le diverse aree. Il centro storico presenta un'elevata urbanizzazione, gli edifici spesso si presentano in aggregati edilizi a causa della contiguità strutturale con gli edifici adiacenti, inoltre le strutture sono prospicienti la strada e di conseguenza la probabilità che i detriti occupino parte di essa, bloccando il passaggio agli enti di soccorso, risulta alta rispetto alle aree limitrofe in cui gli edifici risultano più isolati e retrostanti le carreggiate. Analizzando la Figura 4-14, si evince un blocco compreso tra il 50% ed il 70% di Via Cristoforo Colombo, Via Baretti, Via Torquato Tasso, Via Real Collegio e Via Santa Croce. Tali strade risultano molto strette e anche un'occupazione del 50% potrebbe causare gravi danni per la gestione delle emergenze e ritardare l'arrivo dei soccorsi su alcune aree del centro. Strade più esterne, come Via Alfieri, Via Bogino, Strada Torino e la Strada Regionale risultano molto più larghe e presentano una percentuale di occupazione tra il 20% ed il 40%.

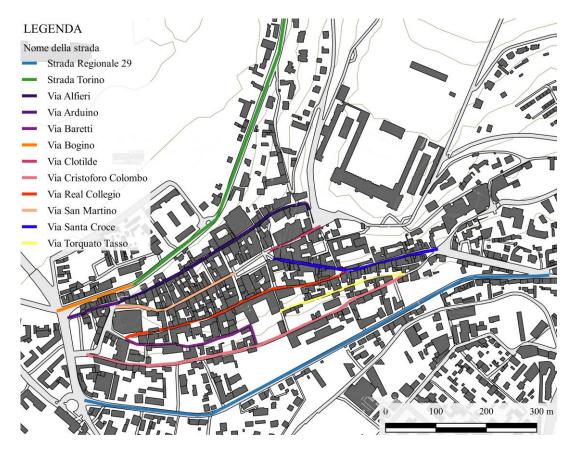


Figura 4-13 – Identificazione strade principali del centro storico di Moncalieri.

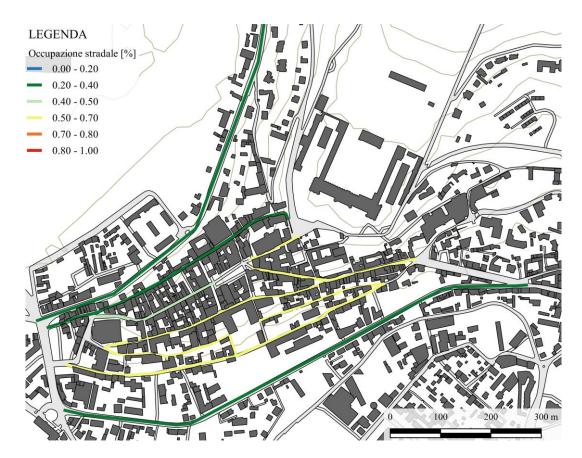


Figura 4-14 – Occupazione percentuale della strada a seguito del crollo degli edifici.

L'analisi condotto considera poche variabili, quali, ricordiamo, altezza degli edifici, larghezza della strada e valore di PGA, il parametro riferito alla larghezza della strada è molto più incidente rispetto agli altri infatti strade più strette prevedono occupazioni maggiori a parità di altezza e del valore di PGA degli edifici. L'analisi potrebbe essere implementata introducendo ulteriori parametri come la qualità della muratura o i diversi meccanismi di collasso degli edifici in modo da avere una stima più affidabile della percentuale di strada occupata dai detriti.

La conoscenza della perdita di funzionalità del sistema viario a seguito di un terremoto rappresenta un'informazione utile alle istituzioni e alle organizzazioni come la protezione civile per poter intervenire sulle aree colpite ed inoltre fornisce elementi utili per l'individuazione di interventi di mitigazione per la riduzione del rischio sismico, soprattutto nei centri storici.

4. Analisi del rischio sismico del sistema viario dei centri storici

## 5 Conclusioni

L'analisi a scala territoriale richiede strumenti di analisi molto più snelli rispetto allo studio del singolo manufatto in quanto permette di sintetizzare i parametri di interesse in maniera speditiva e tramite software come OpenQuake è possibile effettuare una loro elaborazione in tempi brevi. Inoltre, uno studio a scala territoriale consente di indirizzare la gestione delle risorse e degli interventi sul territorio rappresentando uno strumento di pianificazione. Le analisi condotte sul comune di Moncalieri hanno permesso di ottenere informazioni relative alla distribuzione del danno e la valutazione di perdite economiche in riferimento a specifici scenari sismici, oltre a mappe di pericolosità sismica del territorio considerando un set di eventi stocastici rappresentativi della sismicità dell'area, la cui elaborazione ha permesso di definire la distribuzione delle perdite economiche per ogni singolo bene.

L'obbiettivo principale della ricerca è quello di creare un quadro decisionale per supportare l'importanza di adottare misure per la riduzione del rischio sismico, interventi di ripresa a seguito dell'evento e progettare la risposta delle emergenze. La determinazione dei risultati ha previsto la realizzazione di diversi modelli di dati, costruiti sulla base di informazioni relative agli edifici presenti sull'area di interesse. Generalmente le analisi necessitano di essere supportate da una base dati consistente ed omogenea, che di fatto è spesso assente, o va costruita da tecnici esperti.

Come si evince dalla lettura del documento la reperibilità delle informazioni per realizzare le analisi non sempre risulta facile, a causa dei diversi database presenti sul territorio che forniscono informazioni discordanti nonostante siano relativi ad uno stesso elemento. Alcune caratteristiche infatti sono state valutate in maniera immediata utilizzando dati digitali presenti in rete, il che ha permesso un'analisi speditiva del rischio. Ulteriori dati, essendo presenti in forma cartacea, hanno richiesto un'elaborazione più accurata che ha comportato tempi più lunghi e la realizzazione di un secondo database basato sui dati catastali della regione Piemonte. Per ogni scenario sismico sono state realizzate doppie analisi per poter analizzare i risultati ottenuti sia dal modello definito tramite i dati catastali, analisi dettagliata, che dal modello definito tramite dati digitali, analisi speditiva. Il primo come si evince dai risultati fornisce informazioni più accurate ma elimina gli aspetti positivi di un'analisi a scala territoriale necessitando di una tempistica maggiore di elaborazione, data la grande quantità di documenti da consultare. I risultati ottenuti tramite il database digitale mostrano risultati concreti, ma non troppo affidabili in quanto la modifica di alcuni parametri e l'aggiunta di maggiori informazioni comporta, soprattutto da un punto di vista di perdite economiche, delle notevoli differenze rispetto al database proveniente dai dati cartacei, generando una sottostima dei risultati. Dalla comparazione dei risultati dei diversi database emerge l'importanza di definire un sistema informativo omogeneo e digitale sui monumenti e sugli edifici storici in quanto esso rappresenta il punto di partenza per una corretta analisi del rischio sismico: infatti l'utilizzo di un database errato può comportare una sottostima o una sovrastima dei risultati finali.

Dato il grande progresso della tecnologia e grazie alla nascita di progetti di ricerca, si possono attuare procedure tali per cui i database cartacei vengano inglobati in quelli digitali garantendo un'omogeneità dell'informazione e una loro facile reperibilità, con l'obiettivo che enti privati regionali ed enti di ricerca possano interagire tra loro e creare piattaforme open-source di facile accesso con un database consistente ed omogeneo. Attuare tali procedure consentirebbe quindi una facile acquisizione dei dati ed un'analisi speditiva che garantisca risultati attendibili per la valutazione del rischio sismico.

La determinazione della percentuale di occupazione stradale condotta al capitolo 4 mostra l'importanza di un'analisi preventiva del rischio in quanto essa fornisce un'informazione utile alle istituzioni e alle organizzazioni come la protezione civile per poter intervenire sulle aree colpite, per pianificare piani di emergenza post-sisma o piani di prevenzione prima di un evento.

In conclusione, a seguito degli studi realizzati nella presente tesi si può affermare che per una corretta analisi del rischio è necessario l'uso di tecnologie informatiche integrate che consentono di fornire ma soprattutto condividere in rete informazioni inerenti i beni di un'area, inoltre è necessario implementare e aggiornare i dati all'interno di un sistema informativo geografico per rendere possibile la fruizione delle informazioni riguardanti edifici residenziali e non; la lettura critica a larga scala permette di apprezzare la visione d'insieme del problema prima ancora di scendere nei dettagli della scala edilizia o limitando l'analisi al singolo edifico; conoscere i danni strutturali che possono verificarsi sugli edifici permette di studiare gli interventi di miglioramento prima che avvenga un evento con conseguenze disastrose; infine si ritiene opportuno analizzare edifici di particolare interesse, quali edifici monumentali, con tecniche di maggior dettaglio, essendo essi elementi particolarmente vulnerabili, qualora da un'analisi a scala territoriale emergono delle forti criticità. Tali procedure consentono una determinazione preventiva del rischio sismico garantendo la trasformazione del sistema urbano complesso in un sistema resiliente con ridotte probabilità di collasso, ridotte conseguenze dovute al collasso in termini di vite umane, perdite economiche e disagi sociali e ridotto tempo di recupero permettendo il ripristino alle condizioni di normale funzionamento del sistema qualora dovesse presentarsi un terremoto.

I campi di applicazione e di sviluppo al seguente progetto sono molteplici tra i principali si individuano:

- L'elaborazione di un'analisi integrata, considerando le informazioni più attendibili fornite dai due diversi database analizzati;
- La valutazione delle perdite non strutturali, delle perdite relative ai contenuti (applicabile soprattutto ad edifici monumentale di particolare interesse artistico/culturale) e le perdite dovute all'interruzione di un'attività (applicabile soprattutto agli edifici commerciali/industriali);
- La definizione degli interventi di miglioramento per la riduzione del rischio sismico su edifici risultati particolarmente vulnerabili a seguito dell'analisi a larga scala;

- L'attuazione di analisi sofisticate e numeriche per la definizione degli interventi di consolidamento e rinforzo negli edifici con rilevanza artistica/storica (come gli edifici ecclesiastici che sono considerati tra i più vulnerabili);
- Lo studio del comportamento degli edifici in aggregato, i quali sono caratterizzati da un'ampia varietà strutturale, frutto di un complesso processo di evoluzione storica e temporale, la cui risposta ad un evento sismico può risultare differente rispetto all'analisi del singolo edificio;
- L'implementazione dei dati in merito alla definizione dell'occupazione stradale in seguito ad un crollo;
- La determinazione di una procedura generale per una visione globale della risposta sismica delle infrastrutture e dei sistemi a rete come i ponti, la rete elettrica e la rete idrica in modo da rendere efficiente la gestione dell'emergenza sismica.

## 5. Conclusioni

## 6 Bibliografia

- Acanfora, M., G. Fabbrocino, e G. Vultaggio. «La diagnostica strutturale a supporto della prevenzione sismica: l'intervento dimostratore del progetto RESIS.» 2005.
- Adami, A., S. Chiarini, S. Cremonesi, L. Fregonese, L. Tuffarelli, e M.V. Valente. «The survey of cultural heritage after earthquake:tha case of Emilia-Lombardia in 2012.» 2016.
- Anderson, JG., e JE. Luco. «Consequences of slip rate constraints on earthquake occurance relations.» 1983.
- Assessorato alla Pianificazione Territoriale Ufficio di Piano Territoriale di Coordinamento. «Osservatorio dei Beni Culturali della Provincia di Torino Comune di Moncalieri.» *Torino: CSI Piemonte,*. 2009. http://www.provincia.torino.gov.it/gitac/filestorage/download/pdf/beni culturali/1283.pdf (consultato il giorno Settembre 2019).
- Athmani, A., T.M. Ferreira, e R. Vicente. «Seismic risk assessment of the historical urban area of Annaba city, Algeria, International Journal of Architectural Heritage.» 2017.
- Bernardini, A., e S. Lagomarsino. «The seismic vulnerability of architectural heritage.» 2008.
- Bertolotto, C. «Moncalieri medievale: una forma urbana sui percorsi della strada di Francia.» In *Luoghi di strada nel medioevo. Fra il Po, il mare e le Alpi Occidentali.*, di G. Sergi, 247-261. Torino: Scriptorium, 1996.
- Bonarini, A. «Sistemi fuzzy.» 2003. www. mondodigitale. net (consultato il giorno Ottobre 2019).
- Borzi, B., H. Crowley, e R. Pinho. «Simplified Pushover-Based Earthquakes Loss Assessment (SP-BELA) Method for Masonry Building.» 2008.
- Borzi, B., R. Pinho, e H. Crowley. «Metodo meccanico per la definizone della vulnerabilità basato su analisi pushover semplificate.» *ANIDIS*, 2007.
- Bozzoni, F., e C.G. Lai. «Seismic risk assessment of italian seaports using GIS twchonology: the ports of the Calabria Region.» *15th World Conference on Earthquake*. Lisbona, 2012.
- Bruneau, M., et al. «A framework to quantitatively asses and enhance the seismic resilience of communities.» *The Professional Journal of the Earthquake Engineering Research Institute*, 2004.
- Calderon, A., e A. Silva. «Probabilistic seismic vulnerabiliy and loss assessment of the residential building stock in Costa Rica.» *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2018.
- Camera dei deuputati XV Legislatura. 2019. http://leg15.camera.it/cartellecomuni/leg14/RapportoAttivitaCommissioni/testi/08/08\_c ap15 sch01.htm (consultato il giorno Settembre 2019).
- Casapulla, C. «La valutazione della sicurezza sismica delle chiese a scala territoriale.» 2016.
- Castellano, G. « Università degli studi di Bari, Aldo Moro, Tecniche fuzzy per l'elaborazione di immagini,.» https://www.uniba.it/ricerca/dipartimenti/informatica. 12 Novembre 2010. http://www.di.uniba.it/~ig/lezioni-10-11/1-teoria-insiemi-fuzzy.pdf (consultato il giorno Ottobre 2019).
- Chen, Y., Q. Chen, e L. Chen. «Vulnerabilitu Analysis in Earthquake Loss Estimate.» 2001.

- Cutter, S. L., et al. «Community And Regional Resilience: Perspectives From Hazards, Disasters, and Emergency Management.» *CARRI Research Report*, 2008.
- D'Agostino, G., et al. «Earthquake simulation on ruban area improving contingency plans by damage assessment.» 2019.
- Di Alessandro, C., Y. Bozorgnia, N.A. Abrahamson, S. Akkar, e M. Erdik. «GEM-PEER Global Ground Motion Prediction Equations Projects: An Overview.» 2012.
- Dirani, D. *Il Sole 24 ore*, 2012. https://st.ilsole24ore.com/art/notizie/2012-05-21/modena-torreterremoto-182954.shtml?uuid=AbA5hDgF (consultato il giorno Ottobre 2019).
- Direttiva Presidente del Consiglio dei Ministri. «Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008.» 9 febbraio 2011.
- Fasan, M., C. Amadio, F. Romanelli, S. Noè, e C Rossi. «Perche una probabilità di superamento del 10% in 50 anni? Un nuovo approccio alla progettazione sismica.» *ANIDIS*, 2017.
- Ferreira, T.M.,. *How to manage and mitigate disaster risk in urban areas?* 14 Novembre 2018. https://blog.msc-sahc.org/how-to-manage-and-mitigate-disaster-risk-in-urban-areas/ (consultato il giorno Ottobre 2019).
- Field, H.E., T.H. Jordan, e Cornell C.A. «OpenSHA: ADeveloping Community-modeling Environment for Seismic Hazar Analysis.» 2003.
- GEM. The OpenQuake-engine User Manual. Global Earthquake Model (GEM) OpenQuake Manual for Engine version 3.3.2. 2019.
- Giovinazzi, S.,. «The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic risk analysis.» Firenze, 2005.
- Gueguen, P. Seismic Vulnerability of Structures. London: iste, 2013.
- Guidoboni, E., et al. «CFTI5Med, Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.-1997) e nell'area Mediterranea (760 a.C.-1500). Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV).» http://storing.ingv.it/cfti/cfti5/. Aprile 2008. (consultato il giorno Ottobre 2019).
- Ientile, R., e M. Naretto. patrimonio architettonico e rischio sismico, un percorso tra conoscenza e obiettivi di conservazione. Torino: CELID, 2013.
- Il Sole 24 ore. *Il Sole 24 ore*. Maggio 2016. https://st.ilsole24ore.com/art/notizie/2016-05-11/terremoto-cassazione-conferma-condanne-la-casa-studente-dell-aquila-213900.shtml?uuid=AD9GzrF (consultato il giorno Ottobre 2019).
- INGV, Istituo Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. «https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/.» *CPTI15, Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani 2015.* 2015. (consultato il giorno Ottobre 2019).
- Jayaram, N., e W. Baker. «Correlation model for spatially distributed grund-motion intensities.» 2009.
- La Rocca, C. Da Testona a Moncalieri. Vicende del popolamento sulla collina torinese nel medioevo. Torino: Palazzo Carignano, 1986.

- Lagomarsino, S., e S. Giovinazzi. «Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings.» 2006.
- Lagomarsino, S., e S. Podestà. «Seismic Vulnerability of Ancient Churches: II. Statistical Analysis of Surveyed Data and Methods for Risk Analysis.» *Earthquake Spectra*, 2004.
- Lagormarsino, S. «On the vulnerability assessment of monumental buildings.» *Bull Earthquake Eng*, 2006: 445-463.
- Lovon, H., N. Tarque, V. Silva, e C. Yespes-Estrada. «Development of Fragility Curves for Confined Masonry Building in Lima, Peru.» *Earthquake Spectra*, 2018.
- Maletti, C., D. Slejko, e F. Vaccari. «Confronto tra le stime di pericolosità sismica del territorio nazionale realizzate in ambito GNDT.» 2000.
- Mamdani, E.H., e A., Sedrak. «An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller.» *International journal of man-macine studies*, 1975.
- Mamì, A. «Resilienza e sicurezza nei centri urbani a forte connotazione storica.» TRIA- Territorio della Ricerca su Insediamenti e Ambienti, Rivista internazionale di cultura urbanistica, 2015.
- Margiotta, F., e G. Puglisi. «Caratterizzazione del parco edilizio nazionale, determinazione dell'edificio tipo per uso ufficio.» *Ministero dello sviluppo Economico*, 2009.
- MathWorks. *Fuzzy Logic Toolbox*. 2019. https://it.mathworks.com/products/fuzzy-logic.html (consultato il giorno Ottobre 2019).
- Meletti, C., A. Rovida, V. D'Amico, e M. Stucchi. «Modelli di pericolosità sismica per l'area italiana: "MPS04-S1" e "SHARE".» 2014.
- Milandri, Martina. «Tesi di laurea Magistrale.» La valutazione del rischio sismico dei centri storici: il caso studio di Moncalieri. 2019.
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. «Aggiornamento delle <<Norme tecniche per le costruzioni>>.» Decreto 17 gennaio 2018. Roma, 20 Febbraio 2018.
- NEXTIE, Innovation in Engineering. *Progettazione interventi per il recupero e conservazione del castello delle rocche*. 2018. http://www.nextie.it/portfolio\_page/progettazione-interventi-per-il-recupero-e-conservazione-del-castello-delle-rocche/ (consultato il giorno Ottobre 2019).
- Oliveto, G., L. Liberatore, e L.D. Decanini. Evoluzione storica della normativa sismica italiana alla luce degli effetti causati dal terremoto dell'Aquila del 2009. 2011.
- Ordinanza Presidente del consiglio dei Ministri 3519. «Pericolosità sismica di riferimento per il territorio nazionele.» 28 Aprile 2006.
- Pagani, M., et al. «OpenQuake Engine: An Open Hazard (and Risk) Software for the Global Earthquake Model.» 2014.
- Pagani, M., G. Weatherill, V. Silva, H. Crowley, e D. Monelli. «The hazard component of OpenQuake: the calculation engine of the Global Earthquake Model.» 2012.
- Pica, V. «Beyond the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction: Vulnerability Reduction as a Challenge Involving Historical and Traditional Buildings.» 2018.

- Pitilakis, K., H. Crowley, e A.M. Kaynia. SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements ar Seismic Risk. Springer, 2014.
- Porter, K. «Cracking an Open Safe:Uncertainity in HAZUS-Based Seismic Vulnerability Functions.» 2010.
- Presidente del Consiglio dei Ministri. «Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone.» 11 05 2006.
- Presidenza del Consiglio dei Ministri. «Misure per il ripristino con miglioramento sismico e la ricostruzione di immobili ad uso abitativo gravemente danneggiati o distrutti dagli eventi sismici verificatisi a fa data dal 24 agosto 2016.» *Ordinanza n.19.* 7 aprile 2017.
- Rapone, D., G. Brando, E. Spacone, e G. De Matteis. «Seismic vulnerability assessment of historic centers: description of a predictive method and application to the case study of Scanno (Abruzzi, Italy).» *International Journal of Architectural Heritage*, 2018.
- Regione Piemonte. BDTRE 2018 Database Geotopografico (Dataset vettoriale). 2018. http://www.geoportale.piemonte.it/geocatalogorp/ (consultato il giorno Settembre 2019).
- Rizzo, F. «Tesi di laurea magistrale.» Sviluppo di un sistema esperto basato sulla logica "fuzzy" per l'identificazione di incidenti in prossimità di rampe autostradali. 2015.
- Rossi, P. «Tesi di laurea magistrale .» Gestione dell'emergenza sismica in sistemi a rete. 2014.
- Scherbaum, F., E. Delavaud, e C. Riggelsen. «Model Selection in Seismic Hazard Analysis: An Information-Theoretic Perspective.» 2009.
- Silva, V., e N. Horspool. «Combining USGS ShakeMaps and the OpenQuake-engine for damage and loss assessment;.» 2019.
- Silva, V., H. Crowley, M. Pagani, D. Monelli, e R. Pinho. «Development of the OpenQuake engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment.» 24 Febbraio 2013.
- Sito del Dipartimento della Protezione Civile Presidenza del Consiglio dei Ministri. 2019. http://www.protezionecivile.gov.it (consultato il giorno settembre 2019).
- Soprintendenza B.A.A.-Torino. «Ministero per i beni culturali e ambientali ufficio centrale per i beni A.A.A.A.S.-I.C.C.D.» Piemonte, 2019.
- Stone, H. «Exposure and vulnerability for seismic risk evaluations.» 2017.
- Studio di Ingegneria DAR. 2019. https://www.studioingegneriadar.it/vulnerabilita-sismica/ (consultato il giorno Ottobre 2019).
- Themistocleous, K.,. «The use of UAVs to monitor archeological sites: the case study of Choirokoitia within the PROTHEGO project.» Fifth International Conferenze on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment. 2017.
- Tsionis, G., M.L. Sousa, V. Palermo, e R. Maio. «Framework for resilience analysis of EU buildings.» 2017.
- Tyagunov, S., G. Grunthal, R. Walhstrom, L. Stempniewski, e J. Zschau. «Seismic risk mapping for Germany.» 2006.
- UNESCO. UNESCO. 2019. http://www.unesco.it/ (consultato il giorno Ottobre 2019).

- Vargo, J., e E. Seville. «Resilience to Earthquake Disaster.» 2014.
- Vona, M., P. Harabaglia, e B. Murgante. «Thinking abaout resilient cities: studying Italian earthquakes.» *ICE publishing: Institution of Civil Engineers*, 2015.
- Woessner, J., et al. «The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results.» *Bull Earthquake Eng*, 2015.
- Woessner, J., et al. «The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results.» 2015.
- Yepes-Estrada, C., V. Silva, e H. Crowley. «Gem Vulnerability Database for the OpenQuake Platform.» 2014.
- Zanini, M.A., et al. «Interaztion between building collapse and road serviceability during seismic emergency operations in urban centers.» 2016.
- Zanini, M.A., et al. «Post-quake urban road network funztionality assessment for seismic emergency managment in historical centers.» *Structure and Infrastructure Engineerin*, 2017.