

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Edile

**Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Edile**

Tesi di Laurea Magistrale

**La valutazione del rischio sismico dei centri  
storici: il caso studio di Moncalieri**



**Relatore**

Prof. Ing. Rosario Ceravolo

**Correlatore**

Arch. Erica Lenticchia

**Candidato**

Martina Milandri

Aprile 2019







# Sommario

Introduzione .....	1
1 Stato dell'arte .....	3
1.1 Resilienza .....	6
1.1.1 Resilienza nel patrimonio culturale.....	7
1.2 Il rischio sismico .....	10
1.3 Il GIS: strumento per la rappresentazione e simulazione del rischio sismico .....	11
1.4 Creazione di database utili per la realizzazione di strumenti di pianificazione.....	12
2 OpenQuake software per il calcolo della pericolosità e del rischio sismico .....	15
2.1 Analisi per la valutazione della pericolosità sismica.....	16
2.2 Analisi per la valutazione del rischio sismico .....	16
2.3 Creazione dei modelli per la valutazione della pericolosità sismica .....	17
2.3.1 Seismic Source Model.....	17
2.3.2 Logic Tree Model.....	17
2.3.3 Equazioni di previsione del movimento del terreno.....	19
2.4 Creazione dei modelli per la valutazione del rischio sismico .....	20
2.4.1 Exposure model.....	20
2.4.2 Fragility model .....	21
2.4.3 Vulnerability model.....	22
3 Analisi della vulnerabilità sismica nei centri storici .....	23
3.1 Vulnerabilità.....	24
3.2 Fragilità .....	29
4 Valutazione della pericolosità e del rischio sismico della città di Moncalieri .....	33
4.1 Cenni storici .....	33
4.2 Costruzione del database.....	35
4.3 Analisi sviluppate sul centro storico di Moncalieri.....	57
4.4 Valutazione della pericolosità sismica del centro storico di Moncalieri: definizione dei file di input.....	61
4.4.1 ESHM13 – La modellazione dei terremoti.....	63
4.4.2 ESHM13 – Il movimento del terreno .....	66
4.5 Valutazione del rischio sismico del centro storico di Moncalieri: definizione dei file di input .....	68

4.5.1	Modello di rottura.....	68
4.5.2	Il modello di esposizione.....	70
4.5.3	Modello di fragilità.....	75
4.5.4	Il modello di vulnerabilità.....	78
4.6	Definizione dei file di configurazione.....	80
4.7	Elaborazione dati: risultati ottenuti .....	82
4.7.1	Stochastic event based probabilistic seismic risk analysis output.....	82
4.7.2	Scenario damage assessment e scenario risk assessment analysis output .....	94
4.8	Discussione dei risultati .....	130
5	Conclusioni .....	139
6	Bibliografia .....	143
7	Indice delle figure.....	147

# Introduzione

Gli eventi catastrofici, quali terremoti, tsunami, alluvioni, incendi e uragani colpiscono generalmente aree molto vaste di territorio, provocando enormi danni ed ingenti perdite ad aree anche densamente urbanizzate. Alcuni di questi fenomeni si verificano con sempre maggior frequenza a causa del cambiamento climatico, a volte colpendo regioni che in passato non erano interessate dai fenomeni precedentemente citati (uragani, tornado o alluvioni) il che rende la popolazione e il sistema urbano ancora più impreparato a rispondere ad emergenze che non è mai stato chiamato ad affrontare, causando danni ancora maggiori. Tali perdite possono essere sia umane, sia economiche, dirette e/o indirette (queste ultime causate, per esempio, dalla diminuzione del turismo nella zona colpita), ma anche ambientali e infrastrutturali.

Dal punto di vista più strettamente sociale, la perdita può anche colpire la sfera identitaria di una società; questo avviene nel caso in cui si dovesse verificare la rovina di un elemento, sia esso paesaggistico o materiale, che sia portatore di valori storico culturali significativi per la realtà colpita. Come esempi di fenomeni che hanno compromesso l'identità del luogo possiamo citare il terremoto del 2015 in Nepal, che ha distrutto e danneggiato la maggior parte dei templi religiosi, oltre a diversi edifici Patrimonio Mondiale UNESCO; o il terremoto del 2016 in Italia che ha danneggiato, anche gravemente, i borghi medievali nelle Marche, in Abruzzo, nel Lazio e in Umbria, con ricadute negative su attività locali fortemente identitarie. È il caso di Castelluccio di Norcia, e della coltura di lenticchie nel Pian Grande e nelle valli di Castelluccio, o di Amatrice. Nel 2004, invece, in Indonesia lo tsunami ha devastato e raso al suolo intere comunità mentre l'uragano Katrina, che si è abbattuto nella costa del Golfo degli Stati Uniti ha causato enormi perdite economiche ed umane. Questi eventi hanno evidenziato la sempre maggiore vulnerabilità umana, legata anche alle condizioni di povertà del luogo e alla mancanza di organizzazione nei casi di emergenza.

In questa tesi verrà affrontato il tema della valutazione del rischio sismico a scala urbana, in particolare dei centri storici. I centri storici, e in generale il patrimonio architettonico, si sono spesso dimostrati molto vulnerabili agli eventi sismici: i recenti avvenimenti che hanno colpito il territorio italiano ne sono stati una dolorosa dimostrazione. Questo perché tali edifici sono stati costruiti in epoche in cui la pericolosità o la vulnerabilità sismica non erano un requisito da tenere in considerazione in fase di costruzione.

Oltre agli edifici, i terremoti provocano danni anche alle infrastrutture, quali per esempio le reti stradali, rallentando o impedendo completamente le attività di soccorso post-sisma.

Inoltre, la ripresa dell'intero sistema urbano, sia dal punto di vista della ricostruzione e/o ristrutturazione sia dal punto di vista di ripresa della società alla vita di tutti i giorni è molto lenta in quanto sono necessarie ingenti somme di denaro, inoltre, non abbiamo dei piani utili a gestire tali catastrofi. Nel nostro paese infatti sono presenti normative che gestiscono la prevenzione del singolo edificio a tali eventi senza però considerare la prevenzione a scala territoriale.

Da qui nasce la necessità di pianificare e gestire questi aspetti per lungo tempo trascurati. Infatti, non ci si è quasi mai preoccupati di quello che potrebbe accadere nel caso in cui si verificasse un

evento importante ma si è sempre considerato il problema a fenomeno avvenuto, scemando poi negli anni a venire, nell'attesa di un nuovo terremoto.

Negli ultimi anni però il concetto di città resiliente si è inserito sempre più prepotentemente nella società, di conseguenza gli stati hanno deciso di promuovere ed attuare dei piani in grado di ridurre e gestire le perdite e preparare la popolazione agli eventi catastrofici attraverso analisi preventive che forniscano una valutazione dei rischi in modo da stimare gli effetti prodotti da un sisma. Tutto ciò non è di semplice attuazione, in quanto non si tratta più di indagare il singolo edificio, ma di contestualizzarlo con l'ambiente circostante in una scala molto più ampia, considerando l'intero territorio con le complesse relazioni che lo caratterizzano.

Nei capitoli successivi viene portata avanti una procedura in grado di valutare il rischio sismico, in termini di perdite economiche, che possa essere un punto di inizio per successive migliorie e che possa fornire spunti utili per proporre piani in grado di gestire e ridurre i danni causati da fenomeni sismici.

Ci si pone inoltre lo scopo di adottare una metodologia speditiva per stimare le caratteristiche degli edifici, necessarie per valutarne il comportamento sismico, in modo da utilizzare poche grandezze ma facilmente reperibili attraverso portali e siti internet, così da limitare all'operatore i costi legati ai sopralluoghi.

La metodologia elaborata è stata applicata al centro storico di Moncalieri, Comune situato in Piemonte, a sud-ovest del capoluogo. Inoltre, per rendere di facile lettura i risultati ottenuti, anche a utenti e persone non specializzate, si è deciso di implementarli in uno strumento GIS (Geografic Information System), spazializzandone la rappresentazione.

L'obiettivo che ci si pone è quello di creare uno strumento semplice, utile a valutare il rischio sismico attraverso una metodologia di raccolta dati speditiva utile per valutazioni future su piani di gestione e mitigazione degli eventi.

Ci si è resi conto infatti, che l'unico modo per ridurre gli effetti catastrofici è quello di definire piani di protezione della città attraverso delle strategie specifiche, grazie anche all'utilizzo delle nuove tecnologie. La città dovrebbe quindi integrare la resilienza in tutti gli aspetti della pianificazione urbana, in modo da ridurre i potenziali danni e creare un luogo sicuro in cui vivere.

# 1 Stato dell'arte

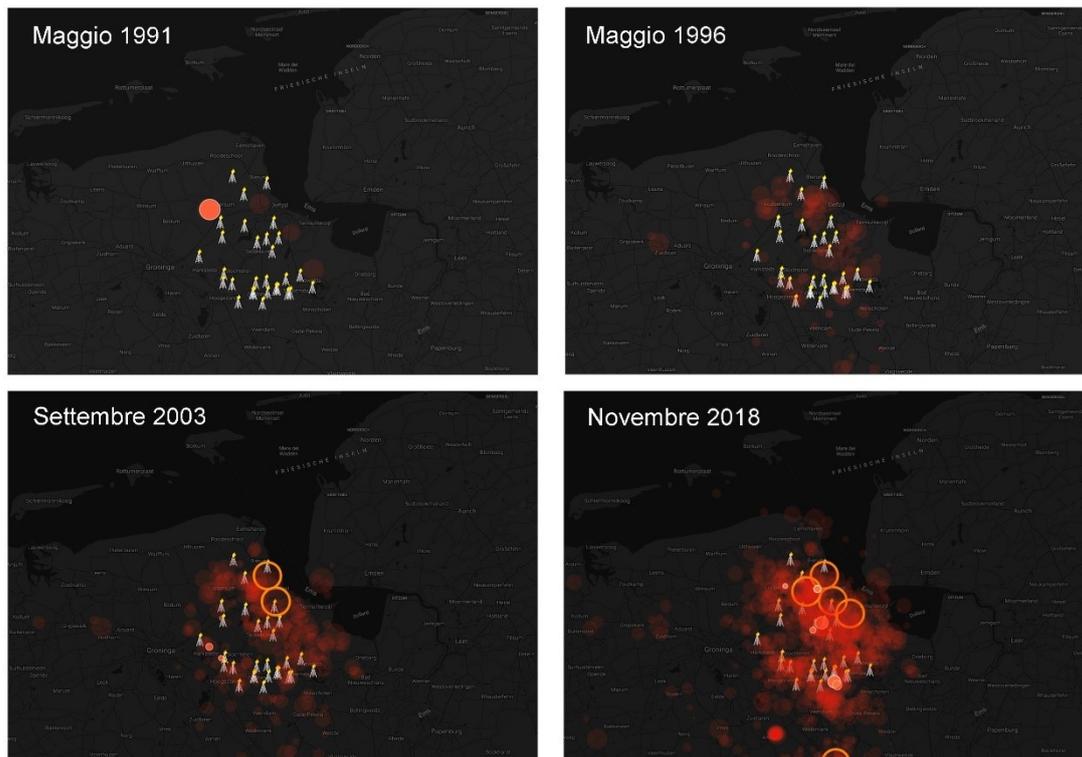
Negli ultimi decenni il cambiamento climatico ed il continuo intervento dell'uomo sull'ambiente hanno provocato l'aumento di disastri naturali, quali, per esempio, alluvioni, terremoti o uragani. Tali disastri hanno causato perdite alle nazioni colpite. Oltre alle perdite umane ed economiche vi sono anche quelle dovute al danneggiamento sull'ambiente costruito, in quanto edifici più vulnerabili sono stati deteriorati o, in alcuni casi, distrutti da tali fenomeni.

Tra i principali effetti del cambiamento climatico vi è la variazione delle precipitazioni, caratterizzate da un enorme variabilità spazio-temporale, in cui lunghi periodi piovosi si alternano a lunghi periodi di secca causando danni al territorio e aumentandone la fragilità. La variabilità delle precipitazioni può causare alluvioni e frane che possono recare danni al sito in oggetto.

Negli ultimi anni si è investito molto nella ricerca sul cambiamento climatico. Per esempio, il Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC, <https://www.cmcc.it/it/>) è un ente di ricerca no-profit fondato nel 2005 con lo scopo di realizzare studi e modelli del nostro sistema climatico e delle sue interazioni con la società e con l'ambiente.

Anche i terremoti causano enormi danni all'ambiente in quanto il sottosuolo è sempre in continuo movimento e sulla Terra si registrano quotidianamente sismi di varie intensità. Tuttavia, non tutte le scosse che si registrano sono causate dal naturale movimento del terreno o da fenomeni naturali che possono indurre il sisma, quali, per esempio, l'attività attiva di vulcani (terremoto del 9 gennaio 2019 in Sicilia causato dall'eruzione dell'Etna), ma possono anche essere generati dall'uomo. Tali eventi vengono definiti "sismi indotti" o eventi di "sismicità indotta" e sono causati da interventi tecnici effettuati nel sottosuolo, quali, per esempio, le iniezioni di CO<sub>2</sub> o di acque di scarico, l'estrazione del petrolio o del gas naturale, oppure possono essere indotti dalle attività dell'industria mineraria, dalla costruzione di tunnel, oppure da cambiamenti operati dall'uomo sulla superficie terrestre, quali per esempio scavi a cielo aperto o laghi artificiali. In Svizzera, per esempio, i terremoti causati dall'uomo sono noti principalmente per il loro legame con i progetti geotermici: nel 2006 l'acqua iniettata ad alta pressione nel sottosuolo ha causato a Basilea un sisma di magnitudo 3.4 mentre nel 2013 si è verificato un terremoto di magnitudo 3.5 nei pressi di San Gallo (ETH Zurich s.d.).

L'Olanda è un altro significativo esempio di terremoti indotti. Nell'area di Groningen è situato il più grande giacimento di gas naturale d'Europa e uno dei più grandi di tutto il mondo. L'estrazione del gas, intrappolato nei pori degli strati rocciosi, porta i massi a ricompattarsi ed assestarsi, provocando movimenti del terreno sempre più frequenti in una zona in cui i terremoti erano pressoché assenti o di magnitudo tale da non essere percepiti dall'uomo. I sismi hanno origine superficiale, più o meno alla profondità del giacimento, a circa 3.5 chilometri sottoterra. Per tale motivo, le scosse hanno provocato molti danni, nonostante la massima magnitudo registrata è stata di 3.6. Inoltre, le strutture non sono state costruite seguendo criteri antisismici in quanto è sempre stata considerata una zona a bassissima sismicità. A causa di questi terremoti invece, le abitazioni da ristrutturare sono 152'000 per un danno di circa 30 miliardi di euro (Figura 1-1) (DeSanctis 2015) (I terremoti di Groningen 2017).

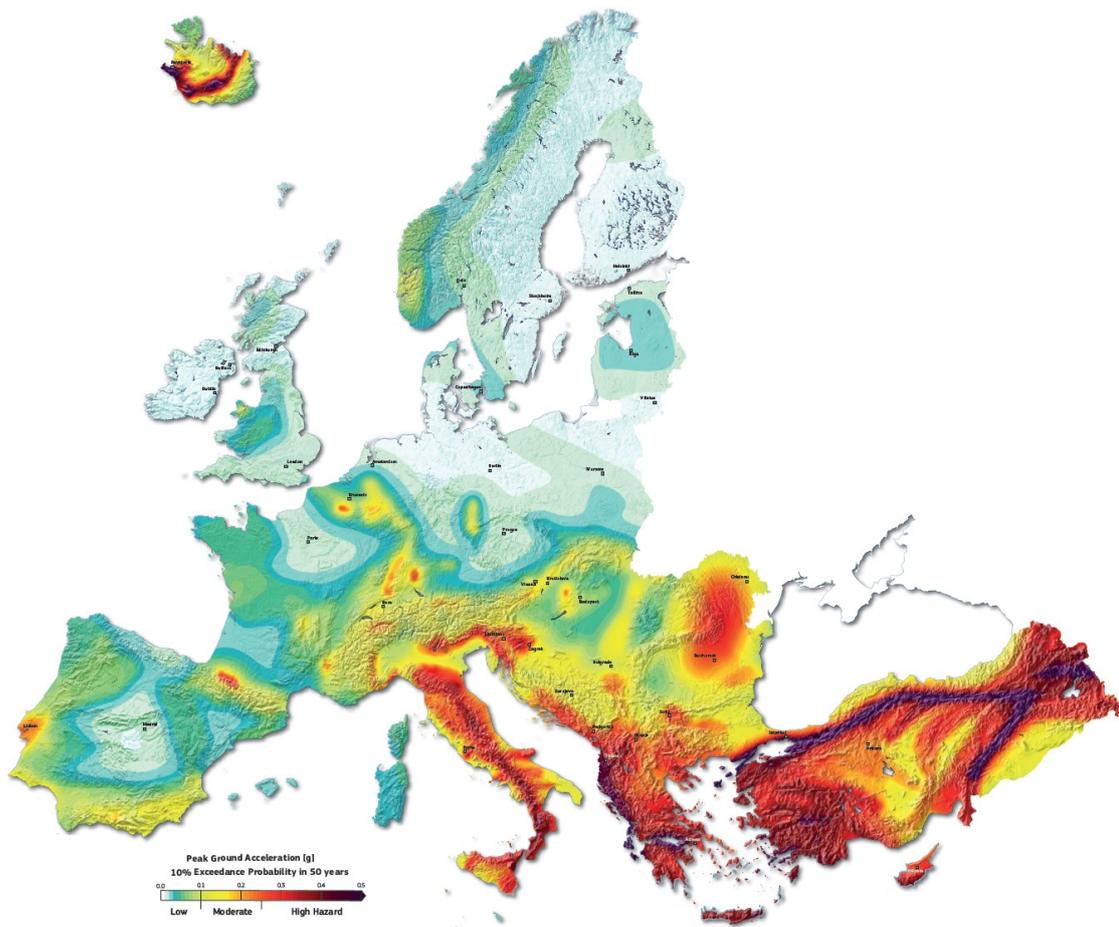


**Figura 1-1: Incremento dei sismi indotti registrati in Olanda (<https://dwarshuis.com/earthquakes-groningen-gas-field/visualisation/>)**

L'estesa devastazione, sia umana sia economica, che tali fenomeni causano ha portato molti ricercatori a concentrarsi sullo studio del rischio attraverso un approccio multi-criteriale, definendo la resilienza come un fenomeno complesso che si sposta da un metodo tradizionale ad un'analisi territoriale a differenti scale e livelli (Brunetta, 2019 (in corso di pubblicazione)), interrogandosi su come le devastazioni provocate da questi fenomeni possano essere ridotte.

L'Europa è una zona altamente sismica ed in particolare l'Italia è attraversata dal confine tra la placca Euro-Asiatica, che percorre la penisola dalla Sicilia all'arco delle Alpi, passando per la dorsale appenninica.

A causa dell'alta sismicità della nostra penisola, fin dai tempi antichi si sono registrati i primi terremoti. Grazie alla documentazione presente in Italia è stato possibile avere informazioni su molti eventi sismici. Per citarne alcuni il terremoto del 1908 che ha distrutto Messina e Reggio Calabria, il terremoto del 1976 del Friuli, quello del 1980 che devastò l'Irpinia; questi sono soltanto pochi tra i più devastanti terremoti che hanno interessato l'Italia, in quanto, dalla seconda guerra mondiale ad oggi, sono stati spesi più di 110'000'000'000 € per la ricostruzione post-sisma (Zanini, et al. 2017).



**Figura 1-2: Mappa della pericolosità sismica Europea**

In tempi più lontani, le leggi nazionali in materia sismica del nostro paese non sono mai state emanate come prevenzione a tali eventi ma scaturiscono sempre dopo l'avvenimento di terremoti catastrofici, per ricostruire in maniera repentina le zone distrutte. Le leggi sono sempre state basate sull'osservazione dei danni provocati dall'evento, evidenziando tecniche costruttive da adottare oppure da evitare in base alle esperienze maturate. Ad oggi sono disponibili normative che puntano alla prevenzione dell'edificio come oggetto unitario, utili a ridurre la vulnerabilità intrinseca della singola struttura. Ultimamente però, le politiche di prevenzione stanno spostando l'attenzione al sistema urbano nel suo complesso e non più sul singolo edificio. Le strutture infatti vengono considerate inserite nel tessuto urbano considerando una scala territoriale.

A causa dei continui danni provocati dai fenomeni naturali e dalle ingenti somme impiegate per la ricostruzione, nel 2015 viene adottato dagli stati dell'Unione Europea il "*Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030*" che definisce strategie globali su come ridurre il rischio e gestire e mitigare i disastri prima del 2030; tale obiettivo è così diventato uno delle maggiori priorità politiche attuali (UNSDR 2015) e la principale sfida della società moderna.

## 1.1 Resilienza

Le sempre più frequenti catastrofi naturali provocano una discontinuità e un'instabilità nel sistema. È quindi necessario formulare strategie per mitigare e gestire il rischio utili a riportare l'organismo disturbato in equilibrio. Tutto ciò si inserisce in un concetto molto più ampio, quello della resilienza.

Il termine *resiliere* ha origine latina e significa rimbalzare, saltare indietro; esso viene adottato in una grande quantità di campi e fonda le proprie radici nella fisica e nella matematica, dove il termine viene utilizzato per indicare la capacità di un sistema di ritornare in equilibrio dopo essere stato sottoposto ad uno spostamento (Rus, Kilar e Koren 2018).

Opposta alla resilienza vi è la fragilità, definita come la risposta di un materiale ad una forza applicata. La resilienza è quindi considerata come una "resistenza" alle sollecitazioni impulsive, brutali e rapide e si contrappone alla resistenza vera e propria che viene definita come l'applicazione a lungo termine di forze che generano obsolescenza o stress.

Nel campo specifico dell'ingegneria sismica troviamo due definizioni parallele di resilienza. La prima è la duttilità, ossia la capacità di un materiale o di una struttura di deformarsi senza particolari sollecitazioni di plasticizzazione. Questa definizione fonda le radici nel concetto di energia di dissipazione; la migliore strategia anti-sismica non è quindi la resistenza ma bensì la duttilità, ossia la capacità di un materiale di dissipare energia. Vale la pena ricordare che la duttilità va oltre la capacità di resistere per lungo tempo alle sollecitazioni in quanto la plasticizzazione è una deformazione permanente, che porta il materiale ad un altro stato aumentandone la capacità di adattamento e dissipazione di energia. L'abilità di adattamento è tuttavia abbastanza limitata, un esempio di questo limite è rappresentato dalla prospettiva socio-psicologica, dove il carattere di una comunità viene definito in base alla capacità di reagire agli shocks o persistere in maniera positiva sotto fattori avversi. Questo concetto di resilienza supera quello meccanico, in quanto le conseguenze dei danni hanno quasi sempre un effetto irreversibile che costringe la comunità ad un cambiamento. In questo senso la resilienza è definita come un adattamento a nuove condizioni e il processo di plasticizzazione introduce un nuovo concetto di resilienza basato sulla stabilità di un determinato sistema. L'equilibrio dinamico del sistema sotto perturbazioni può essere stabile, instabile o indifferente, inoltre la stabilità è spesso connessa al mantenimento delle caratteristiche fondamentali come le funzioni, la struttura o l'identità; è quindi possibile definire la resilienza di una persona, del sistema insediativo, dell'economia, dell'ambiente naturale e della comunità in generale.

Negli ultimi decenni, a causa dei cambiamenti climatici, il mutamento si è esteso allo studio dei sistemi socio-ecologici. In particolare, l'innovazione riguarda gli strumenti di pianificazione territoriale che introducono nuovi elementi, quali la capacità di valutare e proteggere servizi ecosistemici.

La sfida difficile è quella di trasformare i sistemi urbani in qualcosa di resistente agli shock, aumentandone la capacità di coevoluzione che contraddistingue i sistemi non fragili e migliorando la prontezza della comunità nell'affrontare scenari imprevedibili che generano cambiamenti e nuove condizioni (Brunetta, et al. 2019 (in corso di pubblicazione)).

Come già introdotto precedentemente, il termine resilienza ha un gran numero di interpretazioni che possono variare in base al tipo di disciplina che si considera e in base ai processi o ai risultati che si vogliono considerare (Vargo e Seville 2015).

Di seguito vengono elencati i campi che sintetizzano la resilienza territoriale (Brunetta, et al. 2019 (in corso di pubblicazione)):

- **Ecologia:** misura la persistenza dei sistemi e la loro capacità di assorbire il cambiamento mantenendo le stesse relazioni tra popolazioni e variabili di stato;
- **Sistema urbano:** l'abilità di un sistema di mantenere o tornare rapidamente alle funzioni desiderate, adattandosi al cambiamento e trasformando rapidamente i sistemi che limitano la capacità adattiva attuale o futura;
- **Logistica:** l'abilità di un sistema di tornare nel suo stato originale o muoversi, dopo un disturbo, in uno stato più soddisfacente;
- **Riduzione del disastro:** l'abilità di un sistema, di una comunità o di una società esposta ad un pericolo di resistere, assorbire, adattarsi e riprendersi da un pericolo in modo tempestivo ed efficiente, anche attraverso la conservazione e il ripristino delle sue strutture e funzioni basilari essenziali;
- **Ingegneria sismica:** 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.

Mettendo insieme tutte queste definizioni, la resilienza territoriale viene definita come la capacità di un sistema territoriale e di tutti i suoi componenti di trasformarsi, adattarsi ed evolversi mantenendo le stesse condizioni se soggetta ad un pericolo.

In un sistema territoriale, il miglioramento della resilienza è basato sulla riduzione della vulnerabilità, sul perseguimento della capacità di apprendimento sociale e istituzionale e sul raggiungimento di una migliore gestione territoriale che porta ad un adattamento ed alla riduzione della vulnerabilità.

### ***1.1.1 Resilienza nel patrimonio culturale***

Focalizzando la nostra attenzione sugli eventi sismici, troviamo che i reportage sui terremoti descrivono fin dall'antichità un danno importante alle strutture del patrimonio culturale e agli insediamenti; per citarne alcuni, il terremoto del 227 BC nell'isola del Dedocaneso, oggi Rodi, distrusse la statua del faro del Colosso di Rodi; più recentemente, invece dopo il terremoto del 2015 in Nepal, il mondo è stato testimone della distruzione di diversi siti culturali, quali per esempio il monastero di Swoyambhunath, la torre di Dharahara e la piazza di Bhaktapur Durbar. L'impatto che i terremoti, o qualsiasi altro disastro naturale, possono causare al patrimonio culturale va ben oltre le perdite economiche dirette o indirette. La distruzione di un edificio o

centro culturale può cancellare l'individualità di quel luogo, inoltre, la storia e la cultura associata ai siti del patrimonio è invalutabile e la loro devastazione può compromettere informazioni sulle società passate e rovinare elementi culturali iconici.

Il primo step fondamentale per ridurre i disastri è aumentare l'immediatezza di risposta da parte della comunità dopo l'evento e conoscere, in maniera più approfondita, il rischio esistente (Despotaki, et al. 2018).

Alcuni documenti prodotti da organizzazioni internazionali evidenziano come il rischio di danneggiamento che grava sulle proprietà storiche, sui siti del patrimonio culturale, sull'ambiente e sui monumenti storici è, ad oggi, una concreta minaccia. È ancora attualmente aperto il dibattito sulla relazione esistente tra patrimonio culturale e resilienza, però è necessario pianificare la gestione del rischio che consenta di includere aspetti sulla resilienza dei beni culturali in modo da (Brunetta, et al. 2019 (in corso di pubblicazione)):

- Aumentare la conoscenza del patrimonio culturale, utilizzandola per sviluppare comunità resilienti;
- Ridurre gli effetti dei disastri naturali che possono affliggere il patrimonio culturale;
- Migliorare la relazione tra siti protetti e resilienza;
- Includere il patrimonio culturale nei progetti di riduzione del disastro, focalizzandosi principalmente sulla prevenzione piuttosto che sulla reazione al disastro.

Il valore di resilienza del patrimonio culturale non è intrinseco nella materia ma nella società che oggi lo riconosce come tale. La protezione del patrimonio culturale può rafforzare la resilienza di una comunità riducendo l'impatto dei disastri. La relazione che si può avere tra patrimonio culturale e resilienza è un ambito in cui sviluppare i risultati ottenuti della ricerca applicando il concetto di resilienza ai sistemi territoriali (Bellini, et al. 2016).

Quando si parla di patrimonio culturale sorgono spontanee alcune domande quali, per esempio, identificare il soggetto che decide quali strutture fanno parte del patrimonio culturale e quali invece no, oppure se esistono metodi comuni di valutazione culturale e storica oppure se variano sulla base del contesto culturale politico e religioso.

Ogni elemento del patrimonio culturale è il risultato di selezioni, identificazioni e processi di catalogazione che richiedono un ruolo attivo dei soggetti che controllano il patrimonio; nonostante gli oggetti possano avere un valore intrinseco, se la comunità non lo riconosce, questi non possono essere considerati parte del patrimonio del sito (Brunetta, et al. 2019 (in corso di pubblicazione)).

Non è possibile assumere una visione statica se si considerano le ricchezze culturali di ogni sito e il suo reagire ai disastri ambientali ma è necessario esaminarle in maniera il più processuale possibile. La conservazione è applicata attraverso un processo dinamico volto a definire nuovi valori che consentono alle persone di riconoscere gli oggetti come patrimonio. In questa prospettiva, il patrimonio meglio conservato è quello che incorpora -in una prospettiva storica- la resistenza funzionale e strutturale (qui intesa nella sua dimensione culturale). Il valore ideologico

del patrimonio si riflette nelle politiche di prevenzione adottate che possono garantire o meno livelli soddisfacenti di protezione dai disastri (Brunetta, et al. 2019 (in corso di pubblicazione)). Una società colpita dalle calamità inaspettate si sviluppa sia attraverso le esperienze passate, sia attraverso le decisioni casuali delle comunità colpite. La ricostruzione dopo un disastro è un momento cruciale perché le comunità locali e le autorità istituzionali decidono quali elementi del patrimonio culturale devono essere preservati, ricostruiti o abbandonati, a volte tramite impulsi emotivi o valutazioni incomplete precedenti.

Un approccio resiliente ai danni conduce a diversi scenari, influenzati in base a come viene considerato il patrimonio. Una comunità resiliente è in grado di accettare la perdita del patrimonio e allo stesso tempo di costruirne uno nuovo, conservando la memoria di eventi tragici (Brunetta, et al. 2019 (in corso di pubblicazione)).

La necessità di proteggere e preservare i siti culturali dai disastri naturali ha già portato alla creazione di diversi progetti di ricerca, quali, per esempio, PROTHEGO (PROTECTION of European Cultural Heritage from GeO-hazards; 2016-in corso), European RISK-UE (2001-2004) progetto che ha sviluppato diversi scenari di rischio sismico in varie città d'Europa, considerando molti centri storici ed infine, nel 2010, PERPETUATE (Performance Based Approach to Earthquake protection of Cultural Heritage in European and Mediterranean Countries; 2010-2013) progetto che ha prodotto una guida europea per la valutazione e la mitigazione del rischio sismico sui beni relativi al patrimonio culturale (Despotaki, et al. 2018). Oltre oceano sono stati sviluppati modelli per quantificare il rischio sismico per la zona del Nord e Centro America, quali Hazus e Capra; questi tengono conto del multi rischio, includendo terremoti, tornado, cicloni, alluvioni, tsunami, etc. Tutti questi programmi di ricerca sono basati sullo studio delle funzioni di fragilità e sull'uso di strumenti GIS in modo da ottenere come risultato finale delle mappe tematiche e dinamiche, utili all'analisi e alla pianificazione (Rus, Kilar e Koren 2018).

Il progetto "Risk-UE" ha dato un importante contributo alla ricerca gettando le basi per gli studi successivi sul rischio sismico nella parte Europea. Lo studio si è focalizzato principalmente sui componenti urbani, quali edifici ed infrastrutture, adottando la seguente metodologia: creazione di una matrice contenente 23 differenti tipologie di edifici; valutazione della pericolosità sismica; analisi del sistema urbano, in modo da evidenziare gli edifici e i servizi più critici attraverso la creazione di mappe con strumenti GIS; valutazione della vulnerabilità degli edifici partendo dalle curve di fragilità, del centro storico e di monumenti storici; realizzazione di scenari di rischio valutando il danno (Rus, Kilar e Koren 2018).

Questi programmi di ricerca gettano le basi per sviluppare strumenti resilienti utili alla comunità. Solitamente, i centri storici sono stati costruiti prima dell'avvento delle normative antisismiche, per tale motivo sono tra le parti più vulnerabili di un complesso urbano. È quindi utile adottare strumenti di valutazione del rischio per cercare di mitigarlo e di preservare il più possibile questi edifici.

L'Italia, in particolare, ha il più alto numero di centri storici inseriti all'interno dell'UNESCO e, al tempo stesso, è una zona altamente sismica: dal 1968 ad oggi sono stati spesi 120 miliardi di Euro per le ricostruzioni post sisma (Basaglia, et al. 2018).

## 1.2 Il rischio sismico

Come già precedentemente accennato, negli ultimi decenni si è iniziato a parlare sempre più insistentemente di valutazione del rischio sismico, definito come la probabilità che un livello di perdita sia superato in un certo intervallo di tempo e in una certa area. Il rischio sismico  $R$  è quindi definito come funzione di tre componenti principali:

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

dove  $P$  è la pericolosità sismica e definisce la probabilità che nella zona considerata si verifichi un certo terremoto definito da una certa intensità e da una frequenza riferita ad un determinato periodo,  $V$  è la vulnerabilità sismica che rappresenta la propensione di una struttura a subire un danno a fronte di un evento sismico di data intensità ed  $E$  è l'esposizione, ossia il valore economico del sito esposto all'evento (Rossi 2014). Si può notare immediatamente come la pericolosità dipenda dal luogo in cui il sito si trova e non è quindi possibile intervenire per ridurla, le zone sismicamente più attive del pianeta sono note e dipendono dalla conformazione geologica del territorio, quali, per esempio, il tipo di terreno e la disposizione di faglia. Anche l'esposizione è una componente su cui non è possibile intervenire in quanto vi sono zone industriali particolarmente ricche o produttive oppure centri storici aventi un grande patrimonio artistico e culturale o zone molto popolate che hanno, per esempio, una maggiore esposizione rispetto a zone meno abitate. L'unico fattore su cui è possibile intervenire è la vulnerabilità, in quanto un intervento di miglioramento o adeguamento sismico può essere decisivo nella determinazione della vulnerabilità della struttura (Hofer, Zanini e Pellegrino 2015). Si può notare come tali analisi possono essere svolte sia sul singolo edificio sia su uno studio regionale o addirittura nazionale. Le ultime ricerche, però, stanno ponendo l'attenzione sulla valutazione del rischio sismico a livello urbano, regionale e nazionale, di potenziali impatti di futuri terremoti in modo da identificare le zone più vulnerabili, spesso associate al centro storico, in modo da studiarne la capacità di risposta e recupero in base all'evento sismico (Ferreira 2018). Le valutazioni a scala urbana tengono conto di un gran numero di edifici geometricamente, morfologicamente e strutturalmente complessi, di conseguenza sono state adottate analisi semplificate per definire la vulnerabilità sismica degli aggregati (Pelà 2018). Si dovrà però tenere in considerazione che la definizione della pericolosità di un sito e della vulnerabilità degli edifici sono affette da incertezza e che quindi tali risultati devono essere analizzati da un punto di vista probabilistico (Ferreira 2018).

Combinando la valutazione della vulnerabilità ad ampia scala con il modello di pericolosità sismica è possibile valutare la probabilità di danno e di collasso degli edifici. Oltre al danno sul patrimonio, altri risultati di primaria importanza sono l'impatto sulla popolazione e le perdite economiche subite dopo il terremoto: risultati essenziali per pianificare efficientemente l'emergenza e valutare il rischio sismico della zona considerata (Pelà 2018). Per valutare la perdita economica di un sito servono una serie di informazioni quali: le indicazioni sul movimento del terreno nel sito considerato (pericolosità o "hazard"); l'esposizione dell'edificio

all'accelerazione del suolo (esposizione) e la vulnerabilità degli edifici soggetti al sisma (Stone 2017).

### **1.3 Il GIS: strumento per la rappresentazione e simulazione del rischio sismico**

Un gran numero di dati dovranno essere immagazzinati ed elaborati per studiare il rischio sismico a scala urbana; tale elaborazione viene eseguita attraverso uno strumento generale di pianificazione, il GIS (*Geographic Information System*). È uno strumento informatico che consente di archiviare, analizzare, rappresentare ed interrogare i dati geografici. Per tutte queste sue caratteristiche il GIS è lo strumento ideale per sviluppare analisi multidisciplinari, quale quella di rischio sismico, che richiede un'analisi integrata tra valutazioni di pericolosità, definizione dell'esposizione e valutazione della vulnerabilità delle costruzioni.

Nella valutazione del rischio sismico lo scopo fondamentale del GIS è quello di acquisire dati di conoscenza del territorio, dati sulle strutture esistenti, dati sulle attività sismiche possibili e valutare e rappresentare scenari conseguenti a eventi sismici. In sintesi il GIS deve essere in grado di gestire un'emergenza post-terremoto, ossia, nel momento in cui sono disponibili le caratteristiche di un'evento sismico, il GIS deve essere in grado di generare mappe relative al danneggiamento previsto per le strutture e le infrastrutture in modo da definire una stima dei tempi di ripristino, dei percorsi critici e delle eventuali alternative, dei possibili effetti indotti sull'ambiente e sulla popolazione ed elaborare piani di mitigazione (Perazzolo Gallo 2012).

I sistemi GIS hanno mostrato di essere utili per sviluppare politiche efficaci in termini di costi e tempo per la gestione su vasta scala di azioni di adeguamento sismico su edifici urbani in modo da aumentare la capacità di recupero della città (Cara, et al. 2018).

Per la valutazione del rischio sismico attraverso il GIS è necessaria l'acquisizione dei seguenti dati (Perazzolo Gallo 2012):

- Dati di conoscenza del territorio oggetto di studio, attraverso cartografie in formato vettoriale o raster fornite dai vari enti regionali;
- Definizione delle orme degli edifici e quindi della densità strutturale, inoltre, in base al tipo di analisi che si vuole eseguire, si possono trovare informazioni anche sulla rete viaria in formato vettoriale ed informazioni su infrastrutture o linee elettriche;
- Magnitudo e coordinate di un fenomeno sismico;
- Mappa di pericolosità sismica a scala nazionale.

Lo scopo di valutare la vulnerabilità ambientale e socio-economica e il rischio sismico di un determinato territorio è quello di fornire modelli resilienti e soluzioni di riduzione del pericolo ed adattamento alle nuove condizioni.

## 1.4 Creazione di database utili per la realizzazione di strumenti di pianificazione

Le valutazioni a scala territoriale richiedono l'utilizzo e l'elaborazione di un'enorme quantità di dati non sempre facilmente reperibili. Negli ultimi anni iniziative Europee hanno cercato di raccogliere i dati all'interno di specifici database con lo scopo di essere utilizzati in vari ambiti di ricerca, in particolare quelli sulla trasformazione delle città in città resilienti.

Tra i dati necessari per eseguire tali valutazioni sugli edifici vi sono il tipo di materiale da costruzione, il sistema strutturale e l'altezza totale delle strutture.

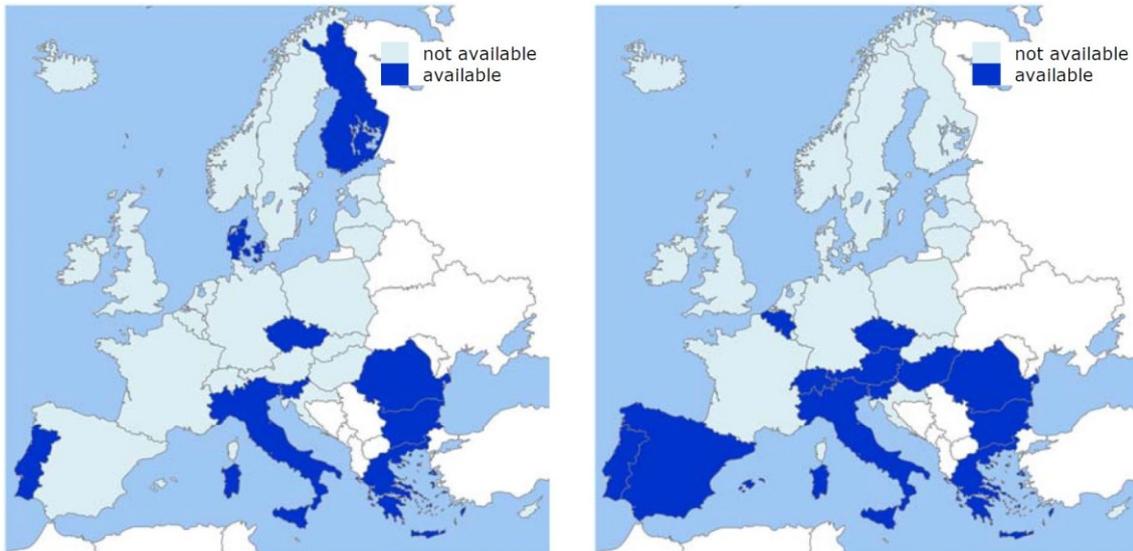
PAGER (2010-in corso, <https://earthquake.usgs.gov/data/pager/>) (Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response), progetto dell'USGS Americana, ha compilato un database contenente i principali dati degli edifici, cercando di armonizzarli con le varie fonti. Un simile obiettivo è stato seguito a livello europeo dal progetto NERA (2010-2014, <https://cordis.europa.eu/project/rcn/96282/reporting/en>), basandosi sul censimento dei dati nei paesi Europei; anche la GEM (2006-in corso, <https://www.globalquakemodel.org/>) ha iniziato a sviluppare banche dati utili a queste analisi. In Italia invece, l'INGV (<http://istituto.ingv.it/it/archivi-e-banche-dati>) ha iniziato a sviluppare ed integrare banche dati a livello nazionale.

I dati che si cerca di raccogliere in un unico catalogo sono spesso presi da progetti precedenti, da statistiche ufficiali o basati sulle stime di esperti. Di solito, però, le ricerche forniscono informazioni su vaste aree, comprendendo un numero limitato di paesi europei.

In assenza di tali dati all'interno di questi database, è possibile alternativamente reperirli nelle banche dati nazionali, quali, per esempio, l'Arpa o i Geoportali nel caso dell'Italia, che censiscono, ad intervalli regolari, informazioni sugli edifici, senza però armonizzarli completamente con il resto del mondo. Ogni nazione infatti ha delle proprie regole per la scelta o meno dei dati raccolti, basta pensare che in Italia i dati relativi alla Regione Emilia-Romagna sono più consistenti rispetto a quelli della Regione Piemonte.

Difficilmente questi dati, sia quelli oggetto di ricerche sia quelli nazionali, sono omogenei tra di loro, infatti l'utilizzo di differenti database ha portato a divergenze ed incongruenze dei risultati sulla valutazione del rischio: sono stati utilizzati i dati forniti dai database di PAGER e NERA per eseguire un calcolo semplificato del danno atteso in diverse città Europee e i risultati ottenuti hanno mostrato notevoli differenze.

Nei paesi dell'Unione Europea il censimento della popolazione e delle abitazioni viene svolto ogni 10 anni e, come mostrato in Figura 1-3, i dati sui materiali da costruzione degli edifici ed il numero di piani sono stati registrati nella maggior parte delle aree europee ad alta sismicità, vale a dire i paesi del Mediterraneo e dei Balcani e molti paesi del centro e centro-est Europa (Tsonis, et al. 2017).



**Figura 1-3: Paesi in cui sono stati catalogati i materiali da costruzione (sinistra) e il numero di piani (destra) nel censimento del 2011 (Tsonis, et al. 2017)**

Spesso, come già accennato, i database Europei non contengono i dati relativi agli edifici delle città minori, per questo motivo vanno ricercati nelle banche dati nazionali o regionali che contengono dati inseriti all'interno di un database elettronico accessibile a tutti.

Le ultime ricerche stanno puntando non solo sulla creazione di database omogenei e di facile accesso, ma stanno cercando di rendere tali dati, che ora sono catalogati in maniera statica, sempre più dinamici, elaborandoli tra di loro per creare mappe utili alla comunità.

Questo è l'obiettivo di progetti come il *100 resilient cities* (<https://www.100resilientcities.org/blog/>) che sta cercando di sviluppare dei database per predisporre le città che vi aderiscono a sviluppare piani d'azione resilienti.

L'obiettivo finale è quindi quello di definire un database generale contenente tutti i dati ora accessibili e quelli non ancora accessibili, basti pensare all'enorme quantità di informazioni registrate dal nostro cellulare o computer, per poterli elaborare attraverso analisi e valutazioni e per creare, conseguentemente, degli strumenti utili alla popolazione.



## 2 OpenQuake software per il calcolo della pericolosità e del rischio sismico

Il software utilizzato per la valutazione della pericolosità e del rischio sismico è OpenQuake, un programma in continuo sviluppo, creato dalla GEM (Global Earthquake Model), una cooperazione globale pubblica-privata, nata nel 2006, che riunisce scienziati e organizzazioni regionali, nazionali ed internazionali con lo scopo di stabilire standard uniformi per il calcolo del rischio sismico in tutto il mondo (Silva, Crowley e Pagani, et al. 2013). Lo scopo di questa organizzazione è quello di diffondere e migliorare la conoscenza sui terremoti, sul rischio e sulla sua gestione e mitigazione (Schwartz 2015).

OpenQuake è un software open-source basato sul linguaggio python, composto da tre componenti principali: OQ-Engine, la console in cui vengono eseguiti i calcoli; OQ-Platform, una piattaforma web in cui vengono condivisi e recuperati i dati relativi alla pericolosità e al rischio sismico e OQ-Tools, un insieme di codici e strumenti utili a preparare i modelli di input necessari per il calcolo (Risk Input Preparation Toolkit) e la visualizzazione dei risultati.

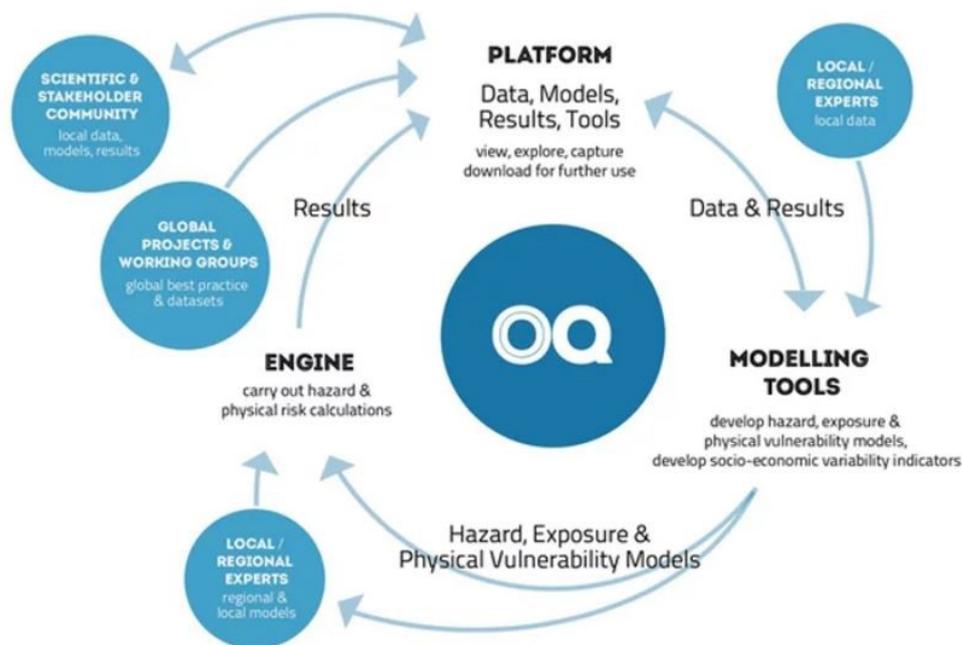


Figura 2-1: Principali componenti di OpenQuake: OQ-Engine, OQ-Platform e OQ-Tools (Schwartz 2015)

Per il calcolo della pericolosità e del rischio sismico la GEM ha sviluppato un linguaggio semplice in modo da trasferire i diversi tipi di informazione dall'interno all'esterno del software OpenQuake. Il linguaggio utilizzato viene chiamato NRML (Natural Hazards Risk Markup Language), basato su un codice XML e influenzato sia dall'esperienza di GEM1 sia dagli standard

già esistenti quali, per esempio, GML (Geography Markup Language) (Silva, Crowley e Pagani, et al. 2013).

## 2.1 Analisi per la valutazione della pericolosità sismica

Le analisi supportate da Openquake per il calcolo della pericolosità sono di vario tipo. Per eseguire tali valutazioni è necessario creare un file di configurazione in cui viene specificato il tipo di analisi che si vuole eseguire e i parametri che devono essere calcolati. Attualmente il programma OpenQuake permette tre tipi di analisi (Pagani, Silva, et al. 2018):

- *Classical Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)*, calcola le mappe e le curve di pericolosità attraverso la classica procedura di integrazione formulata da Field et al.;
- *Event-Based Probabilistic Seismic Hazard Analysis*, consente di calcolare i movimenti del suolo considerando una serie di eventi stocastici;
- *Scenario Based Seismic Hazard Analysis (SSHA)*, permette il calcolo del movimento del suolo per un singolo scenario di rottura, tenendo in considerazione le variabili aleatorie riferite al movimento del terreno.

## 2.2 Analisi per la valutazione del rischio sismico

Dopo aver calcolato la pericolosità sismica del sito in esame si può passare alla valutazione del rischio sismico. Anche in questo caso è necessario generare un file di configurazione in cui vengono inseriti il tipo di analisi che si vuole eseguire, i file necessari all'esecuzione e i risultati che si vogliono ottenere. Inoltre, affinché il calcolo avvenga con successo, deve essere inserito il file relativo ai movimenti del terreno, calcolato precedentemente nell'analisi di pericolosità. Anche per quanto riguarda la valutazione del rischio, OpenQuake supporta varie analisi (Pagani, Silva, et al. 2018):

- *Scenario Damage Assessment*, stima la distribuzione del danno dei beni causata da un singolo scenario di rottura, tenendo in considerazione le variabili aleatorie ed epistemiche attorno al movimento del suolo; tale calcolo può essere utilizzato per pianificare la gestione delle emergenze o per valutare gli elementi più vulnerabili;
- *Scenario Risk Assessment*, valuta statisticamente le perdite economiche su un set di beni causate da un singolo scenario sismico, tenendo sempre in considerazione le variabili aleatorie ed epistemiche dei movimenti del terreno. Tale analisi è utile, per esempio, per la pianificazione e la gestione delle emergenze e per sensibilizzare la società sul tema del rischio sismico;
- *Classical Probabilistic Seismic Damage Analysis*, calcola la probabilità che si verifichi un certo stato di danno in un periodo di tempo specificato, fornendo le mappe riferite alla probabilità di collasso, partendo dalle curve di pericolosità calcolate attraverso le classiche procedure di integrazione;

- *Classical Probabilistic Seismic Risk Analysis*, calcola la perdita economica partendo dalle curve di pericolosità calcolate seguendo la classica procedura di integrazione;
- *Stochastic Event Based Probabilistic Seismic Risk Analysis*, calcola le perdite economiche di ogni bene partendo da una serie di eventi sismici stocastici;
- *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.

## 2.3 Creazione dei modelli per la valutazione della pericolosità sismica

Prima di valutare il rischio sismico è fondamentale calcolare la pericolosità sismica e i movimenti del terreno della zona oggetto di studio.

I disastri relativi ai terremoti si verificano a causa dei movimenti del terreno che provocano il collasso delle strutture. La via più efficace per ridurre i disastri causati dal terremoto è quindi quello di stimare la pericolosità sismica e utilizzare queste informazioni per apportare migliorie agli edifici.

La pericolosità sismica in ingegneria viene definita come una previsione dell'accelerazione del terreno che verrebbe superata con una probabilità del 10% a causa del verificarsi di un terremoto in qualsiasi parte della regione nei prossimi 50 anni (Chaulagain, et al. 2015).

### 2.3.1 *Seismic Source Model*

Il modello *Seismic Source* fornisce informazioni circa il luogo, la geometria e l'attività degli eventi sismici considerati, descritti attraverso le distribuzioni di frequenza di magnitudo. Tale modello è definito attraverso una sequenza di eventi sismici che possono essere descritti attraverso vari metodi. Se si deve modellare una distribuzione di sismicità in una regione geografica che non considera strutture di faglia l'evento sismico può essere definito come punto o area; il primo definisce gli eventi sismici in una singola superficie mentre il secondo li definisce considerando una regione geografica più ampia.

Per modellare l'attività sismica relativa ad eventi di faglia, ovvero quell'attività che si verifica in una zona di faglia ben identificata e caratterizzata, OpenQuake offre due modelli principali: a faglia semplice o complessa. Questi modelli distribuiscono la sismicità uniformemente lungo la superficie di faglia, con l'unico vincolo che la rottura non può estendersi al di fuori della superficie definita. Le due tipologie differiscono solo per la complessità geometrica con cui vengono modellate (Pagani, Monelli, et al. 2014).

### 2.3.2 *Logic Tree Model*

*Seismic Source Logic Tree* è un file di input fondamentale per la determinazione della pericolosità sismica, dove vengono trattate le incertezze epistemiche associate al modello *seismic source*.

Le incertezze epistemiche derivano da una mancanza di conoscenza e possono essere ridotte con l'acquisizione di maggiori informazioni. I parametri descritti da questo tipo di incertezza possono essere per esempio la zonazione, il modello del movimento del terreno, ecc. (Schwartz 2015)

Attualmente il *Logic Tree* è strutturato come una sequenza di livelli di ramificazione e, ogni livello, contiene uno o più set di rami. Un set di rami definisce il tipo di incertezza (per esempio incertezze relative alla massima magnitudo Gutenberg-Richter) e descrive il grado di probabilità (attraverso un peso) con cui queste incertezze si possono realizzare (Silva, Crowley e Pagani, et al. 2013).

I principali componenti del *Logic Tree* sono (Pagani, Silva, et al. 2018):

- Rami o *Branch*: è il componente più semplice della struttura e rappresenta la possibile interpretazione dei valori assegnati per uno specifico tipo di incertezza, descritto da un parametro o un peso;
- Set di Ramificazioni o *Branching set*: è un componente chiave della struttura ad albero. Raggruppa un insieme di rami e fornisce un'interpretazione alternativa di un parametro o di un modello. Ogni set di rami è definito attraverso un ID e un tipo di incertezza. Questo set di incertezze può essere applicato all'intero modello *seismic source* o solo ad un sottoinsieme. La somma dei pesi assegnati ad ogni set di rami deve sempre corrispondere ad uno;
- Livello di Rami o *Branching level*: è il contenitore più ampio, non viene utilizzato per modellare le incertezze ma è utilizzato per mantenere una logica e un ordine nella struttura ad albero.

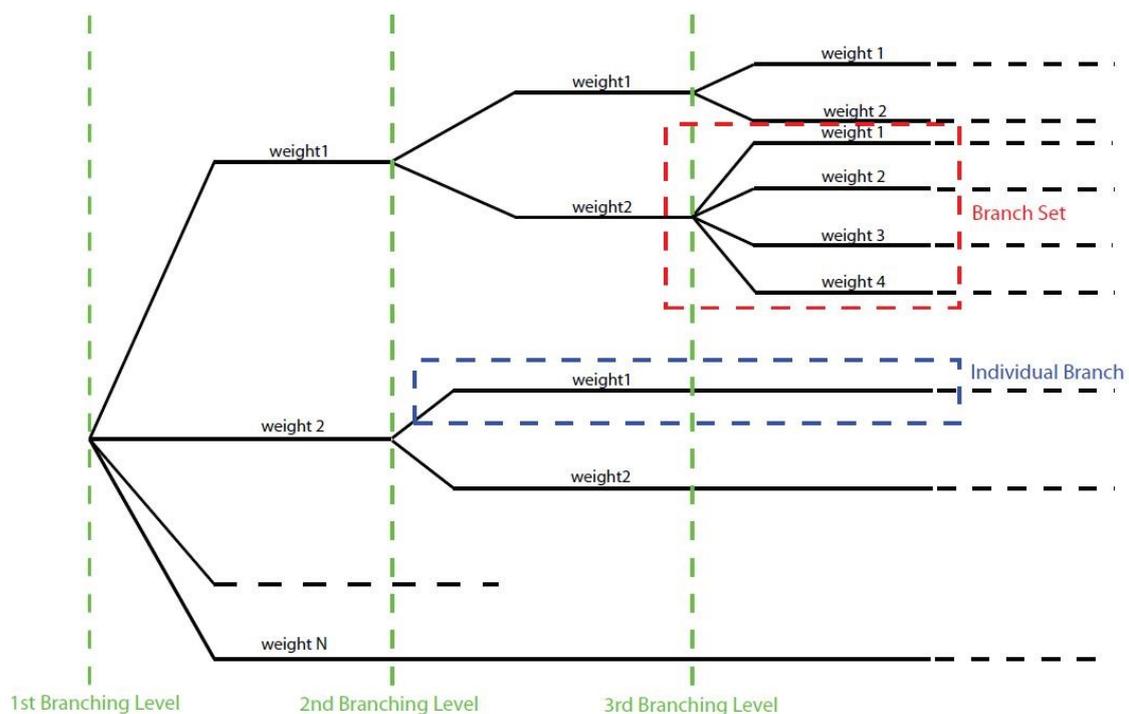


Figura 2-2: Esempio della struttura del *logic tree* (Pagani, Silva, et al. 2018)

I modelli *Logic Tree* da definire come input per il calcolo della pericolosità sismica sono (Pagani, Monelli, et al. 2014):

- *Seismic Source Logic Tree*, struttura che gestisce le incertezze epistemiche relative alla definizione delle geometrie, sulla posizione e proprietà di eventi sismici in grado di generare un movimento del terreno di rilevanza ingegneristica nel sito investigato. Come impostazione predefinita il primo livello di ramificazione viene utilizzato per definire l'inizio del modello o dei modelli *Seismic source*;
- *Ground Motion Logic Tree*, descrive i modelli e le possibili incertezze epistemiche relative ai movimenti del terreno. È formato da una lista di equazioni che prevedono il movimento del terreno per ogni regione tettonica, utilizzate per caratterizzare le fonti nel modello di input di pericolosità sismica.

### **2.3.3 Equazioni di previsione del movimento del terreno**

I parametri relativi al movimento del terreno vengono definiti attraverso dei modelli che si basano su equazioni empiriche, comunemente chiamate GMPEs, *Ground Motion Predict Equations*.

Il modello del movimento del terreno è fondamentale per determinare la pericolosità sismica e viene definito da equazioni empiriche che, dato un set di parametri, calcolano un valore rappresentativo riferito all'intensità del terremoto. Essendo equazioni di natura prettamente empirica, il grado con cui questi termini effettivamente rappresentano il fenomeno in oggetto dipende dalla qualità dei dati utilizzati per la generazione delle equazioni.

Molte di queste equazioni sono state sviluppate negli ultimi anni e presentano caratteristiche molto differenti tra di loro; vi sono equazioni che si differenziano in base alla localizzazione geografica del sito oggetto di studio, per esempio alcune funzioni sono utilizzabili su scala europea (es. Ambraseys et al) mentre altre sono ricavate specificatamente per zone ristrette (es. Bragato) (Caretta 2013).

Il motore Openquake calcola la pericolosità sismica utilizzando il modello *seismic source* che individua gli elementi appartenenti a diverse regioni tettoniche, specificando quella di appartenenza. Il motore OQ-engine seleziona automaticamente dal modello *ground motion* l'equazione associata a quella particolare regione tettonica.

Nel caso invece in cui vengano eseguite analisi che considerano un preciso scenario sismico è necessario definire una serie di variabili fondamentali che possono essere raggruppate all'interno di tre categorie principali: variabili che descrivono le proprietà di rottura, variabili che descrivono il collegamento tra il punto di rottura e il sito interessato e variabili che descrivono il sito oggetto di studio (Pagani, Monelli, et al. 2014).

## 2.4 Creazione dei modelli per la valutazione del rischio sismico

Di seguito vengono descritti i file di input richiesti per il calcolo del rischio sismico, che includono l'*exposure model* o modello di esposizione, il *fragility model* o modello di fragilità e il *vulnerability model* o modello di vulnerabilità, in base al tipo di analisi che si vuole eseguire. Inoltre, per eseguire il calcolo del rischio sismico è necessario inserire tra i file di input anche i file di output calcolati per la pericolosità sismica.

### 2.4.1 Exposure model

Il modello di esposizione contiene le informazioni che riguardano i beni oggetto di studio presenti nella regione di interesse. Vengono richiesti vari parametri per definire le caratteristiche di ogni struttura, tra cui: la tassonomia, che permette al motore OpeQuake di relazionare ogni edificio con l'appropriata funzione di fragilità o vulnerabilità, il costo in euro del bene e le coordinate geografiche, che permettono al calcolatore di associare ad ogni punto la rispettiva pericolosità sismica.

I costi possono essere di vario tipo: strutturali e non strutturali, costi relativi ai contenuti e costi di *business interruption*. I costi strutturali e non strutturali rappresentano i costi di riparazione e/o ricostruzione degli elementi strutturali o non strutturali dell'edificio, i costi sui contenuti definiscono i costi relativi alle perdite sugli oggetti presenti all'interno di ogni bene e i costi di *business interruption* vengono utilizzati per definire le perdite relative al periodo di inattività della struttura a causa dall'evento catastrofico. Il costo può essere definito per aggregati di beni, per singolo edificio o per unità di area.

Il set di attributi, obbligatori ed opzionali, che devono essere inseriti all'interno del modello di esposizione sono definiti di seguito (Pagani, Silva, et al. 2018):

- *Id*: parola chiave utilizzata per identificare il bene;
- *Taxonomy*: specifica le caratteristiche di ogni edificio;
- *Number*: definisce il numero di unità strutturali all'interno di un dato bene;
- *Area*: definisce l'area di un determinato bene, tale dato è obbligatorio solo se il costo è definito per unità di area;
- *Location*: definisce la latitudine e la longitudine di un determinato bene, espressa in gradi decimali;
- *Costs*: ipotesi di costo sulla struttura dopo l'evento catastrofico;
- *Occupancies*, obbligatorio solo nel caso dell'analisi probabilistica o per uno scenario di rischio e definisce il numero di persone che potrebbero essere all'interno della struttura durante i periodi della giornata.

### 2.4.2 Fragility model

Le funzioni di fragilità descrivono la probabilità di eccedenza per prefissati livelli di intensità per un set di stati limite. È quindi necessario definire una funzione di fragilità per ogni tipologia di edificio presente nell'*exposure model*. Le curve di fragilità possono essere definite attraverso funzioni di fragilità discrete o continue. Per le funzioni di fragilità discrete è definita, per ogni stato limite, una lista di probabilità di eccedenza per ogni livello di intensità (Figura 2-3) mentre le funzioni di fragilità continue vengono modellate attraverso una distribuzione cumulativa lognormale (Figura 2-4) (Pagani, Silva, et al. 2018).

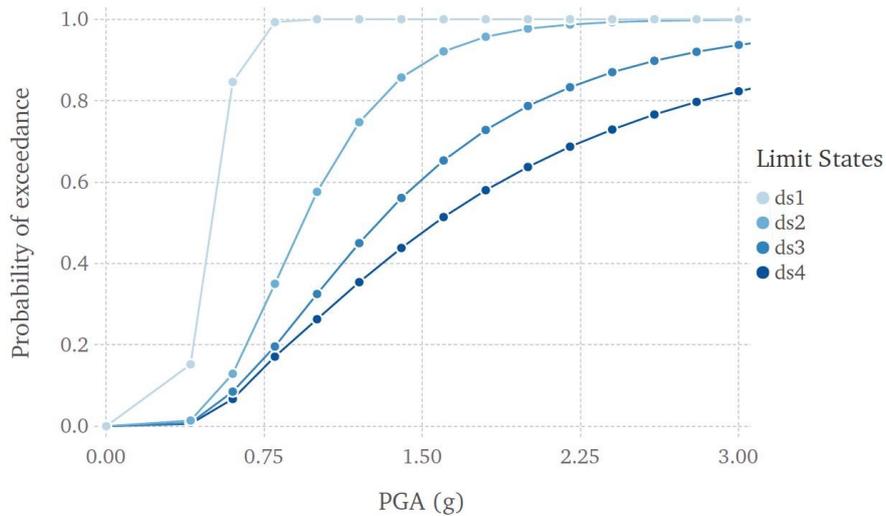


Figura 2-3: Esempio di funzione di fragilità discreta (Pagani, Silva, et al. 2018)

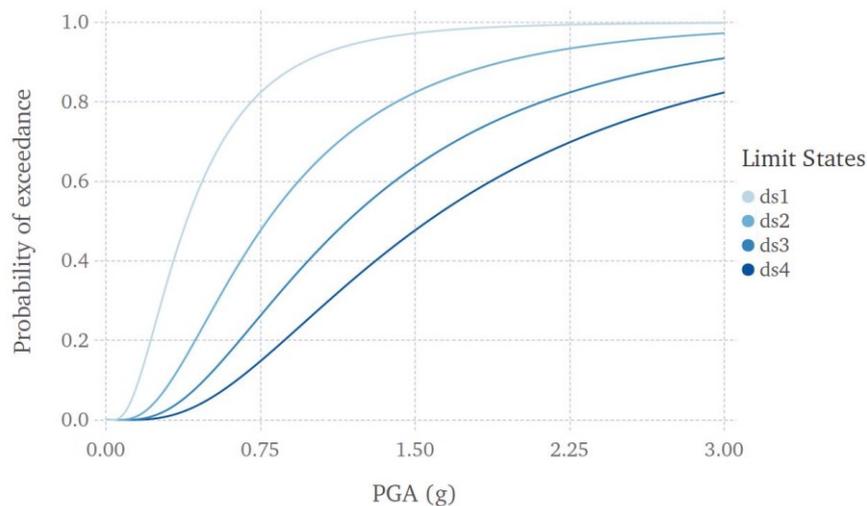


Figura 2-4: Esempio di funzione di fragilità continua (Pagani, Silva, et al. 2018)

### **2.4.3 *Vulnerability model***

Per eseguire analisi di tipo probabilistico o valutare scenari di rischio sismico è necessario definire le funzioni di vulnerabilità per ogni tassonomia definita all'interno dell'*exposure model*. La curva di vulnerabilità è definita come la stima della perdita economica per un dato livello di intensità. Solitamente le funzioni di vulnerabilità vengono modellate come funzioni discrete, attraverso la descrizione delle perdite economiche dopo un sisma; tale valore viene definito come il rapporto tra i costi di riparazione e i costi di sostituzione per una data tipologia di edificio. Le incertezze per ogni rapporto di perdita vanno considerate nel file di input attraverso un coefficiente di variazione. Tale incertezza può essere modellata con una distribuzione lognormale o di tipo beta (Pagani, Silva, et al. 2018).

### 3 Analisi della vulnerabilità sismica nei centri storici

Gli eventi sismici, hanno da sempre rappresentato la principale causa di danno e perdita del patrimonio culturale. Gli edifici antichi in muratura, in particolare, sono stati costruiti seguendo le precedenti esperienze che possono essere differenti da zona a zona. Nelle zone ad alta sismicità, gli edifici sono costruiti con dettagli e rinforzi specifici utili a proteggere le strutture dalle azioni sismiche. Invece, nelle aree dove la sismicità è modesta si possono trovare soluzioni antisismiche negli edifici costruiti immediatamente dopo una serie di sciame sismici, scemando poi nelle strutture create dopo due o tre generazioni.

In Italia, i recenti terremoti hanno mostrato un alto livello di vulnerabilità sismica nelle aree dei centri storici: il terremoto dell'Aquila del 2009 ne è uno dei principali esempi, dove diversi centri culturali, quali per esempio Onna, Castelnuovo e Villa Sant'Angelo, furono gravemente danneggiati, con danni estesi all'intera area e dove il collasso delle strutture è avvenuto nella quasi totalità. Per tale motivo negli ultimi anni si è puntato molto sullo studio di analisi di vulnerabilità e rischio sismico, dal punto di vista della sicurezza sia economica, sia umana, sia culturale.

La vulnerabilità viene definita come la predisposizione di un edificio a danneggiarsi se sottoposto a sollecitazioni importanti. Il principale scopo di tale analisi, effettuato su scala territoriale, è quello di conoscere l'impatto che un terremoto può provocare in una determinata area, in modo da formulare piani preventivi per mitigare il rischio sismico e sviluppare piani per la gestione delle emergenze dopo l'avvenimento di un terremoto.

I principali passaggi utilizzati per eseguire analisi di vulnerabilità possono essere sintetizzati come segue:

- Acquisizione dei dati disponibili sull'area di interesse, identificazione delle classi degli edifici e definizione del modello di vulnerabilità;
- Per ciascuna classe di edifici è necessario definire i parametri su cui si baseranno i modelli di vulnerabilità e, sulla base dei dati disponibili, si potranno definire singoli parametri o differenziarli per micro-aree;
- Suddivisione del territorio in un certo numero di zone, ciascuna delle quali caratterizzata da una pericolosità uniforme;
- Per ogni classe di edifici e micro-area è necessario valutare il performance point, le curve di fragilità e la probabilità di danno, tenendo in considerazione le incertezze coinvolte.

Il modello di vulnerabilità, fondamentale nella valutazione del rischio sismico, stabilisce la correlazione tra la pericolosità sismica di quell'area e il danno strutturale. La pericolosità viene rappresentata in termini di intensità macrosismica, di PGA (*peak ground acceleration*) o di spettro di risposta. Il danno strutturale è di solito classificato in vari livelli che dipendono dalla gravità e dall'estensione della rottura negli edifici. I livelli prestazionali dell'edificio possono essere associati a determinati livelli di danno, in base alle conseguenze post-terremoto, al rischio per la

sicurezza della vita o all'abilità delle strutture di riprendere la loro normale funzionalità dopo un evento sismico.

Le perdite economiche e le conseguenze che si possono avere sugli edifici e sulla popolazione, possono essere valutate dopo aver determinato il danno strutturale. Per tale motivo sono stati compiuti parecchi studi sulla traduzione del danno strutturale in percentuale di perdita (Lagormarsino e Cattari, *Seismic Vulnerability of Existing Buildings: Observational and Mechanical Approaches for Application in Urban Areas* 2013).

Inoltre, negli ultimi anni sono state fatte parecchie ricerche sullo studio della vulnerabilità a scala territoriale attraverso l'utilizzo della metodologia GIS, come documentano molti studi eseguiti sul centro storico di Lisbona, che permette di identificare in maniera rapida e veloce gli edifici più vulnerabili (Catulo, et al. 2018).

### 3.1 Vulnerabilità

Negli ultimi anni, l'interesse sempre crescente per le analisi sul rischio sismico e, di conseguenza, per la definizione dei modelli di vulnerabilità, ha portato allo sviluppo di diverse metodologie atte a studiare la vulnerabilità di una struttura. In base a come vengono eseguite tali analisi è possibile distinguere tre filoni di approcci principali (Giovinazzi 2005):

- Metodi empirici o statistici, basati sulla elaborazione di dati registrati sui danni provocati alle strutture da terremoti passati;
- Metodi analitici, basati sulla riposta meccanica della struttura;
- Metodi basati sul giudizio di esperti.

Tra i modelli più utilizzati possiamo citare il metodo macrosismico, basato sulla raccolta dei dati riguardanti il danno sulle strutture dopo l'avvento di un terremoto. Considerando un set di edifici con comportamento omogeneo, il danno è descritto attraverso la matrice di probabilità del danno (DPM). La mancanza di informazioni relative ai gradi di danno per ogni livello di intensità di un edificio situato in un'area geografica specifica può portare alla realizzazione di matrici incomplete.

Tale modello misura la vulnerabilità attraverso l'indice di vulnerabilità  $V$  e l'indice di duttilità  $Q$ , entrambi valutati considerando il tipo di edificio e le sue caratteristiche costruttive; la pericolosità viene descritta in termini di intensità macrosismica, in accordo con l'EMS-98 (scala macrosismica Europea). La correlazione tra l'input sismico e il danno atteso come valutazione della funzione di vulnerabilità è espressa in termini di curva di fragilità, descritta attraverso la seguente formula:

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

L'Equazione 1 permette di stimare il *mean damage value*,  $\mu_D$ , della distribuzione del danno atteso:

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

La valutazione probabilistica, in termini sia di distribuzione del danno sia di curve di fragilità, per il *mean damage value*, valutato secondo l'Equazione 1, è determinato assumendo una distribuzione binomiale. Tuttavia, la probabilità di avere un certo grado di danno per un certo  $\mu_D$  è valutata secondo la funzione di probabilità di massa:

$$P_k = \frac{5!}{k!(5-k)!} \cdot \left(\frac{\mu_D}{5}\right)^k \cdot \left(1 - \frac{\mu_D}{5}\right)^{5-k} \quad \text{Equazione 3}$$

Tra i modelli analitici possiamo citare quelli meccanici, che descrivono la risposta strutturale attraverso curve di forza-spostamento, chiamate curve di capacità, che rappresentano un sistema equivalente ad un solo grado di libertà. Queste curve forniscono informazioni essenziali in termini di rigidità, forza complessiva e capacità di spostamento finale. Nel caso della valutazione di vulnerabilità ad ampia scala, questa curva ha lo scopo di idealizzare la risposta di un intero gruppo di strutture con comportamento omogeneo. Essa tende ad idealizzare la risposta che potrebbe essere ottenuta sottoponendo la struttura ad un modello di carico orizzontale statico di ampiezza crescente, che ha lo scopo di descrivere la forza sismica equivalente, stabilendo così una relazione tra la domanda e la capacità strutturale. Ogni punto di questa curva è associato ad un esatto andamento e livello di danno. La valutazione del danno atteso è fornita comparando la curva di capacità con la domanda sismica, sotto forma di spettro di risposta, derivante da riferimenti letterari o da più sofisticate analisi di pericolosità. Tale approccio è in linea con la tendenza attuale di utilizzare procedure statiche non lineari per valutare le prestazioni sismiche degli edifici in muratura (capacity spectrum method, CSM o metodo N2). Infine, definendo adeguati livelli di danno sulla curva di capacità (corrispondenti a valori di spostamento predefiniti), è possibile valutare la distribuzione dei livelli di danno e, di conseguenza, un indice di danno medio (Lagormarsino e Cattari, *Seismic Vulnerability of Existing Buildings: Observational and Mechanical Approaches for Application in Urban Areas* 2013).

In molti casi però, soprattutto quelli legati alla valutazione del rischio sismico, è utile valutare la funzione di vulnerabilità in termini di relazione tra l'intensità sismica e le perdite medie previste per uno specifico tipo di edificio, misurando tali perdite in termini di costi di riparazione del danno o MDF, *Mean Damage Factor*.

Il *Mean Damage Factor*, che misura il danno provocato dal sisma in termini economici, viene definito come il rapporto tra i costi di riparazione ed i costi di sostituzione riferiti agli edifici danneggiati (Giovinazzi 2005):

$$\text{Damage Factor (DF)} = \text{MDF} = \frac{\text{Repair Cost}}{\text{Replacement Cost}} \quad \text{Equazione 4}$$

Spesso stimare i costi necessari al calcolo del *damage factor* non è sempre semplice ed immediato, per tale motivo si tende a determinare l'MDF considerando la probabilità che un particolare stato di danno  $DG_i$ ,  $i=1 \dots 5$ , possa verificarsi ad una data intensità  $I$ ,  $P < DG_i | I >$ . Per ogni *damage grade*

viene definito il *Central Damage Factor* (CDF; Figura 3-1) che esprime la percentuale di danno (Yong, Qi-Fu e Ling 2001) (Srewil 2008).

$$\mathbf{MDF}_1 = \sum_{i=1}^5 \mathbf{P} < \mathbf{DG}_i | \mathbf{I} > \cdot \mathbf{CDF}_{\mathbf{DG}_i} \quad \text{Equazione 5}$$

DG<sub>i</sub>: Damage Grade;

CDF: Central Damage Factor (Figura 3-1);

I: Earthquake intensity.

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

Figura 3-1: Classificazione del *Central Damage Factor* secondo l'EMS-98 (Tyagunov, et al. 2006)

Una analisi differente viene realizzata se l'oggetto di studio sono edifici monumentali, quali le chiese, strutture molto vulnerabili se comparate con gli altri edifici del centro storico. Il nostro territorio ha un numero di chiese molto elevato e si è osservato che sono l'unico tipo di struttura che sistematicamente è soggetto a danneggiamenti anche nel caso di terremoti di bassa intensità, (Reggio Emilia e Modena 1987; Reggio Emilia 1995; Piemonte 2000,2003): infatti, di fronte a danni trascurabili sugli edifici ordinari, sia antichi che recenti, si è notato un danneggiamento consistente e molto variabile degli edifici ecclesiastici. Si pensi che nel caso del terremoto dell'Umbria e delle Marche del 1997 più di 2000 chiese hanno subito danni significativi.

Le chiese sono strutture caratterizzate da una vasta eterogeneità dei materiali, da una elevata complessità geometrica e da singoli particolari costruttivi di importanza rilevante nel determinarne il comportamento sismico. Durante gli ultimi 20 anni, si sono cercati di valutare i vari livelli di rischio, concentrando gli studi sull'individuazione delle carenze tipiche e sulla definizione di indicazioni meta-progettuali, cercando di interpretare il danno da un punto di vista strutturale.

Le chiese hanno mostrato un comportamento ricorrente sotto l'azione sismica, con danni e meccanismi di collasso di differenti parti architettoniche, quali le facciate, le navate, l'arco trionfale, la cupola, l'abside e il campanile.

Lo studio sul comportamento sismico degli edifici ecclesiastici iniziò con Doglioni (Doglioni, Moretti e Petrini 1994) che eseguì un'attenta analisi dei danni subiti dalle chiese in occasione dei terremoti del 1976 in Friuli. La ricerca è iniziata nel 1989, più di dieci anni dopo gli eventi sismici del Friuli, quando si era già provveduto alla riparazione ed al restauro di gran parte delle chiese. Per tale motivo, per valutare e studiare le varie tipologie di danno, si sono dovute utilizzare delle documentazioni fotografiche. Per completezza di informazioni, sono state individuate 45 chiese oggetto di studio tra le circa 350 che erano state selezionate inizialmente. La ricerca ha portato

alla nascita di una “scheda chiesa” che aveva l’intento di raccogliere i dati geometrici, strutturali e di dissesto che potevano essere utili al fine di valutare la vulnerabilità ed il danno delle chiese, con lo scopo, successivamente, di organizzare delle banche dati. La scheda, creata per il censimento delle chiese friulane, ha avuto una prima sperimentazione operativa in seguito agli eventi sismici dell’aprile-maggio 1987 nel progetto avviato dalla Regione Emilia-Romagna, che aveva come scopo quello di indagare la vulnerabilità e stimare gli interventi di consolidamento. Già in questo primo studio si è notata una certa ripetitività dei meccanismi di rottura, potendo così definire la prima serie di macro-elementi, tra cui la facciata, le pareti laterali, l’arco trionfale, l’abside, la torre campanaria e la cella campanaria.

Successivamente, tale studio è stato portato avanti ed approfondito da Lagomarsino (1998), in particolare dopo il terremoto di Umbria e Marche del 1997, che ha provocato il danno di oltre 2000 chiese. In questo studio sono stati aggiunti nuovi macro-elementi, definendo così 18 indicatori, ognuno dei quali rappresentava un possibile meccanismo di collasso. Tra i 18 indicatori troviamo: 1) Ribaltamento della facciata; 2) Ribaltamento del timpano; 3) Meccanismi nel piano della facciata; 4) Risposta trasversale dell’aula o del transetto; 5) Risposta longitudinale della navata centrale; 6) volte della navata centrale; 7) volte delle navate laterali e del transetto; 8) cinematisimo dell’arco trionfale; 9) Collasso della cupola e del tiburio; 10) Ribaltamento delle pareti (facciata del transetto, cappelle); 11) Meccanismi di taglio delle pareti; 12) Martellamento e danneggiamento della copertura; 13) Interazione con strutture adiacenti; 14) Collasso globale della torre campanaria; 15) Meccanismi nella cella campanaria; 16) Ribaltamento di elementi svettanti.

Le schede che rilevano il livello di danno subito dopo l’evento sismico, significative per l’analisi della vulnerabilità, sono state modificate ed implementate rispetto alle precedenti, in modo tale da riconoscere il meccanismo di danno attivato dal terremoto in modo da definire un indice di danno e di vulnerabilità.

In Figura 3-2 è riportata la curva di vulnerabilità di una chiesa comparata con quella di un palazzo; tali curve mostrano come le chiese, anche nel caso di eventi sismici molto bassi ( $M < 4.0$ ), presentano il più alto livello di danno, successivamente, nel caso di più alte intensità sismiche, l’alta duttilità delle chiese porta ad avere un comportamento sismico simile a quello dei palazzi (Lagomarsino, *On the vulnerability assessment of monumental buildings* 2006).

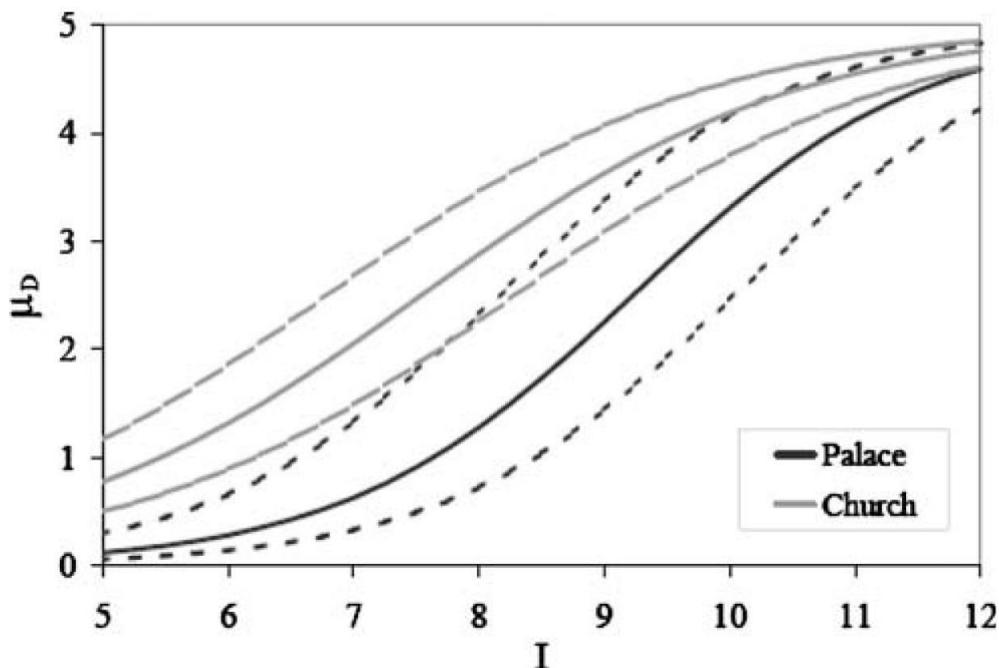


Figura 3-2: Comparazione delle curve di vulnerabilità di chiese e palazzi (possibile range del *mean value*) (Lagormarsino, *On the vulnerability assessment of monumental buildings* 2006)

Nel corso degli anni questo argomento è stato oggetto di una ricerca sempre più approfondita che ha portato alla pubblicazione della Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 9 febbraio 2011 intitolata “Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14/01/2008”, che ha introdotto 10 meccanismi di danno in più, per un totale di 28 (Figura 3-3). Nella valutazione della vulnerabilità delle chiese è quindi necessario definire quei particolari che hanno un ruolo fondamentale nella risposta sismica del manufatto. L’indice di vulnerabilità viene poi definito come media pesata del comportamento dei 28 meccanismi:

$$i_v = \frac{1}{6} \cdot \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k \cdot (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2} \quad \text{Equazione 6}$$

Con:  $v_{ki}$  e  $v_{kp}$  i punti positivi e negativi e  $\rho_k$  il peso del macroelemento.

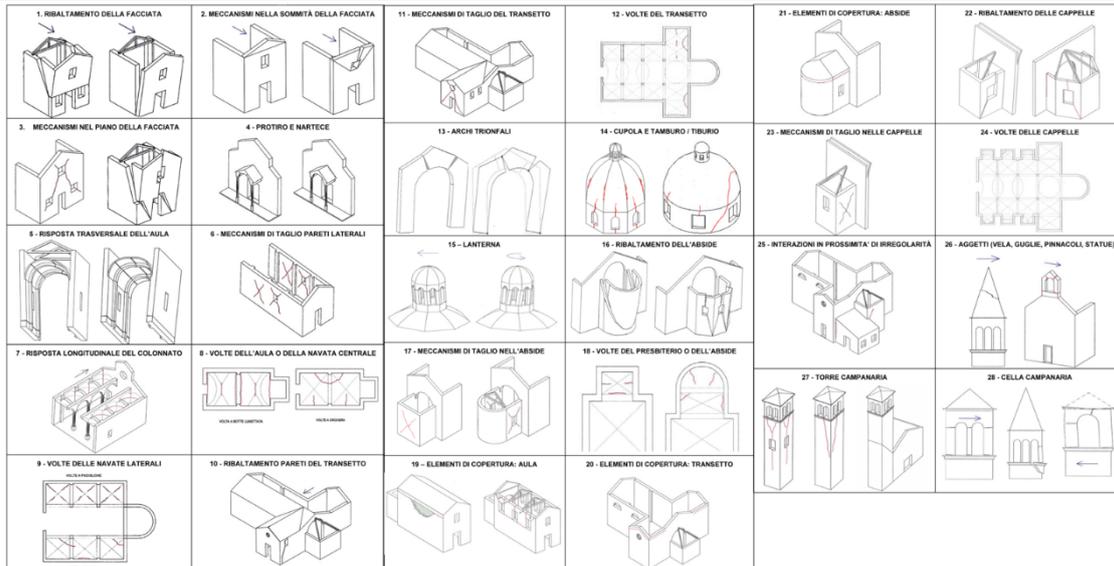


Figura 3-3: I 28 meccanismi di collasso delle chiese per valutarne la vulnerabilità (Ministri 2011)

### 3.2 Fragilità

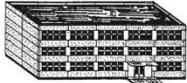
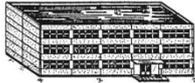
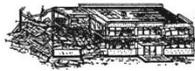
Le funzioni di fragilità definiscono la probabilità di eccedenza per ogni stato di danno ( $D_1$ -Slight;  $D_2$ -Moderate;  $D_3$ -Heavy;  $D_4$ -Very Heavy;  $D_5$ -Destruction; Figura 3-4) ad ogni intensità sismica. Tali curve sono un importante strumento per valutare la distribuzione del danno sismico, in quanto forniscono un collegamento tra la pericolosità sismica in un determinato sito e l'effetto che un presunto movimento del terreno può avere su una struttura. Per tale motivo, ad oggi, sono stati fatti vari studi e ricerche sul campo della fragilità e sono state proposte moltissime funzioni per varie tipologie di edifici e paesi.

Per conoscere come i vari elementi delle strutture rispondono alle sollecitazioni sismiche vengono adottate le funzioni di fragilità e sono definite per specifiche e ben vincolate classi di beni (es. particolari tipi di edifici o infrastrutture). Queste esprimono la relazione tra la probabilità che una classe di beni può raggiungere o eccedere un predefinito stato di danno, considerando un range di intensità. Matematicamente può essere espressa come segue (Rossetto, et al. 2014):

$$P(DS \geq ds_i | IM) \text{ per } IM_{\min} \leq IM \leq IM_{\max}$$

dove:

- $DS$  è lo stato di danno del bene;
- $ds_i$  è un particolare stato di danno predefinito;
- $IM$  è il parametro utilizzato per definire il movimento del terreno.

Damage Degree	Description of Damages (examples)	
	Masonry	Reinforced Concrete
0	Absence of damage	
1	<p>Hair-line cracks in very few walls. Fall of small pieces of plaster only. Fall of loose stones from upper parts of buildings in very few cases.</p> 	<p>Fine cracks in plaster over frame members or in walls at the base. Fine cracks in partitions and infills.</p> 
2	<p>Cracks in many walls. Fall of fairly large pieces of plaster. Partial collapse of chimneys.</p> 	<p>Cracks in columns and beams of frames and in structural walls. Cracks in partition and infill walls; fall of brittle cladding and plaster. Falling mortar from the joints of wall panels.</p> 
3	<p>Large and extensive cracks in most walls. Roof tiles detach. Chimneys fracture at the roof line; failure of individual nonstructural elements (partitions, gable walls).</p> 	<p>Cracks in columns and beam columns, joints of frames at the base and at joints of coupled walls. Chipping of concrete cover, buckling of reinforced rods. Large cracks in partition and infill walls, failure of individual infill panels.</p> 
4	<p>Serious failure of walls; partial structural failure of roofs and floors.</p> 	<p>Large cracks in structural elements with compression, failure of concrete and fracture of rebars; bond failure of beam reinforced bars; tilting of columns. Collapse of a few columns or of a single upper floor.</p> 
5	<p>Total or near total collapse.</p> 	<p>Collapse of ground floor or parts (e.g. wings) of buildings.</p> 

**Figura 3-4: Descrizione della scala del danno secondo L'EMS-98 per edifici in muratura ed in cemento armato (Redweik, et al. 2017)**

Vi sono quattro metodologie principali utilizzate per definire le curve di fragilità, basate su come viene statisticamente definito lo stato di danno (Rossetto, et al. 2014):

- Curve di fragilità empiriche, definite dalle indagini sui terremoti passati;
- Curve di fragilità definite da esperti;
- Curve di fragilità analitiche, definite attraverso la simulazione di terremoti su determinate classi di beni;
- Curve di fragilità ibride, definite attraverso la combinazione dei tre metodi precedentemente definiti.

Il nostro interesse si focalizza sul definire curve di fragilità per gli edifici in muratura, difficili da valutare in quanto sono caratterizzate da differenti tipologie murarie e sistemi strutturali che variano in base al periodo storico e all'area geografica considerata. Le proprietà meccaniche di questo tipo di strutture non dipendono unicamente dai blocchi e dalla malta, ma anche dalla

dimensione e dalla forma dei massi e dalle connessioni trasversali. Per quanto riguarda invece i sistemi strutturali, gli edifici antichi hanno un comportamento differente rispetto agli edifici in muratura confinata o rinforzata.

Come nel caso della valutazione della vulnerabilità, anche qui è importante distinguere tra gli edifici ordinari e gli edifici monumentali. Quest'ultima categoria comprende vari edifici quali le chiese, le moschee, le fortezze, ecc. che possiedono uno specifico comportamento sismico (Lagomarsino e Cattari, *Fragility functions of masonry buildings* 2014).

Negli ultimi 40 anni sono state formulate e pubblicate un gran numero di curve di fragilità per varie classi di edifici utilizzando le metodologie precedentemente citate. Tali curve, negli ultimi anni, sono state raggruppate e raccolte in database in modo da poter essere consultate velocemente nel caso di valutazioni sul rischio sismico. Il progetto SYNER-G ha raggruppato un set di 415 curve di fragilità per l'Europa, principalmente per edifici in muratura ed in cemento armato; anche la GEM ha recentemente raccolto, all'interno della sua piattaforma, un numero elevato di curve di fragilità per edifici in muratura, cemento armato e legno situati in tutto il mondo (Silva, Crowley e Colombi, *Fragility Function Manager Tool* 2014)

Il progetto SYNER-G ha sviluppato il Fragility Function Manager (FFM), uno strumento che permette di visualizzare e gestire facilmente funzioni di fragilità standardizzate che forniscono tutti i parametri richiesti per il calcolo del rischio sismico. All'interno di tale database sono inserite molte delle funzioni di fragilità sviluppate in letteratura negli ultimi anni. Nel database per ogni funzione di fragilità vengono definiti (Silva, Crowley e Colombi, *Fragility Function Manager Tool* 2014):

- La classificazione tipologica di ogni componente;
- Lo stato di danno;
- La misura dell'intensità;
- I parametri che descrivono la curva di fragilità, per ogni stato di danno e tipologia.

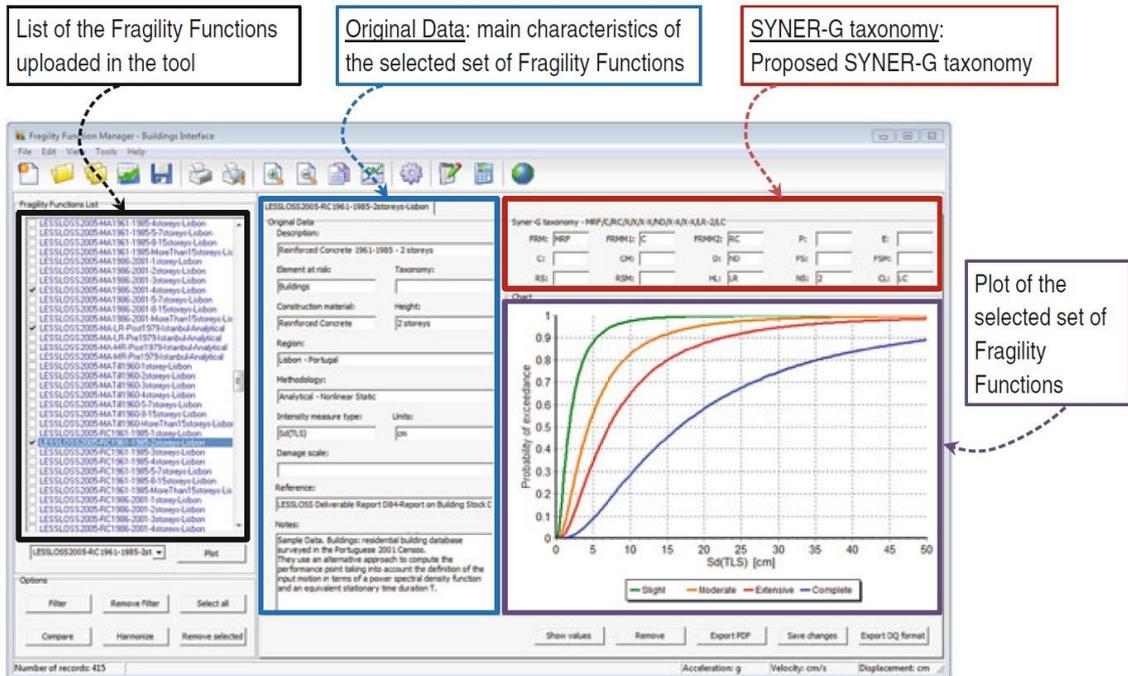


Figura 3-5: Principali finestre dello strumento Fragility Function Manager (FFM) (Silva, Crowley e Colombi, Fragility Function Manager Tool 2014)

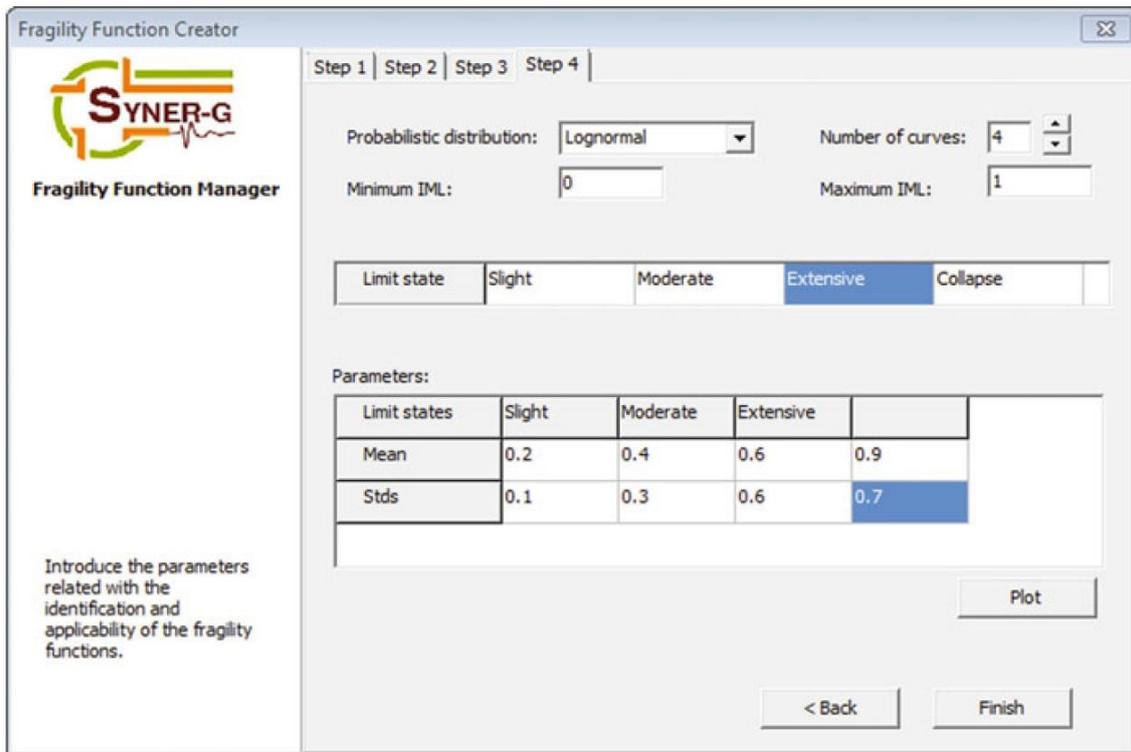


Figura 3-6: Finestra per la visualizzazione dei parametri che descrivono la curva di fragilità (Silva, Crowley e Colombi, Fragility Function Manager Tool 2014)

## 4 Valutazione della pericolosità e del rischio sismico della città di Moncalieri

### 4.1 Cenni storici

Quasi tutte le città italiane, aventi sia origine medievale sia più antica, modificano nel corso dei secoli successivi il loro assetto, assumendo quella forma compatta che i centri storici ancora oggi documentano: Moncalieri ne è un esempio. Fino all'Ottocento la trasformazione della città avviene solo dal punto di vista dell'edilizia mentre i tracciati viari urbani rimangono pressoché inalterati; possono essere modificate le dimensioni delle strade e delle piazze, ma non le principali direttrici, orientate verso i luoghi simbolo della città: chiesa, comune, mercato.

Le notizie sulla storia di Moncalieri sono in gran parte relative allo sviluppo del centro storico, mentre poco si sa sulla città cresciuta sui resti delle mura abbattute.

Le trasformazioni radicali avvenute nei secoli XIX e XX la mostrano disomogenea, come un ammasso di città diverse, in cui la città moderna è più estesa rispetto a quella antica.

La crescita, avvenuta ai margini del centro storico, non è stata sempre lineare e pianificata. L'accrescimento della popolazione ha prodotto una maggiore richiesta di abitazioni che ha portato ad una ridistribuzione dei cittadini all'interno della città ed al passaggio da un'economia agricola ad una di tipo industriale. L'aumento della richiesta di alloggi ha portato al frazionamento degli antichi palazzi nobiliari ed alla costruzione di appartamenti: la città trasforma quindi completamente la propria morfologia, in cui le direttrici del traffico cambiano, formando un nuovo orientamento, dalla periferia fino al capoluogo.

Moncalieri nasce nel Medioevo, l'insediamento più antico di cui si hanno notizie è Testona, dove, fin dal 1037, i sacerdoti di Santa Maria della Scala di Testona hanno edificato una cappella di culto dedicata alla Vergine; nel 1196 i frati francescani edificano una cappella e nel 1203, ai piedi della collina dei Templari, sempre i sacerdoti di Testona costruiscono la chiesa di Sant'Egidio con annesso ospedale. Nel 1230 viene fondato il borgo di Moncalieri dai testonesi, sfuggiti ai massacri della guerra tra Asti e Chieri: gli studi più recenti però hanno accertato che la nascita di Moncalieri non fu un fatto traumatico quale la distruzione di Testona, ma il confluire di tali abitanti in un luogo meglio difendibile e da cui era possibile controllare il ponte sul Po (Bertolotto s.d.).

L'assetto urbano della città è condizionato dalle preesistenze religiose e dalla posizione geografica: la sede del comune viene costruita accanto alla chiesa di Santa Maria, nella piazza in cui si affaccia anche il convento di San Francesco, alle spalle di tale piazza, luogo in cui convivono potere religioso, politico e mercantile, domina una roccaforte, a difesa dell'abitato chiuso da mura. Un simile assetto viene ritrovato in altre città piemontesi (Cassio e Pistoì 1997), mentre se si vuole confrontare l'iconografia urbana di Moncalieri con quella delle città toscane, troviamo che queste ultime sono spesso rimaste immutate mentre gli edifici di Moncalieri hanno assunto forme geometriche, barocche ed infine ottocentesche (Cassio e Pistoì 1997).

L'assetto urbano rimane pressoché inalterato fino al Seicento, quando il castello viene trasformato in un'elegante dimora per gli svaghi della dinastia sabauda dall'architetto di corte Amedeo di Castellamonte. L'architetto Giovan Battista Revelli sistema quella che è l'attuale via Santa Croce, un tempo via delle Torrette, vengono riplasmati gli edifici e abbellite le facciate anche lungo le vie San Martino e Real Collegio mentre i frati francescani riedificano, nel 1755, il loro convento situato nella piazza maggiore. Così facendo prende forma l'immagine odierna della città, che ancora oggi mostra, tra le aperture regolari delle finestre e degli androni della riplasmazione settecentesca, ogive e cornici medievali sulle facciate. Nel 1789, appena terminato il rifacimento della chiesa di San Francesco ad opera di Filippo Castelli, allievo di Juvarra, l'invasione francese blocca l'ammodernamento edilizio. Le truppe napoleoniche infatti impongono radicali trasformazioni e, la cinquecentesca chiesa di Santo Spirito con il suo convento viene abbattuta e, al suo posto, resta lo spazio inedito dell'attuale piazza Umberto I (Cassio e Pistoì 1997).

Nel 1880 la città viene rivitalizzata grazie alla costruzione di una serie di nuove arterie di comunicazione: la ferrovia, la stazione e la costruzione del ponte sul Po. Nel corso dell'Ottocento quindi Moncalieri è diventata una città moderna, con scuole elementari, un ospedale, una stazione, un cimitero, fabbriche e campi da coltivare (Cassio e Pistoì 1997).

Nel nostro secolo si impone il gusto liberty, con elementi urbani più decorativi, mentre nell'area di Porta Navile, intorno agli anni venti, gli edifici hanno forme e decorazioni più sobrie e crescono in altezza per contenere appartamenti per il ceto medio. I primi edifici moderni risalgono lungo la via San Martino fino al teatro Matteotti, opera dell'architetto Mario Passanti.

Fino alla seconda guerra mondiale Moncalieri cresce in maniera coerente, successivamente, le leggi sulla ricostruzione autorizzano interventi radicali nel tessuto antico, come la costruzione del palazzo moderno nella settecentesca cortina architettonica di via Real Collegio: il cuore della città antica però, tollera appena le piccole riplasmazioni (Cassio e Pistoì 1997).



**Figura 4-1: Prima fonte documentaria iconografica raffigurante il borgo di Moncalieri e la cinta muraria.**

**Fonte: Pietro Bombarda, "Tipico sij figura del finaggio, contenzioso tra Moncalieri e Trufarello", 1596**



Figura 4-2: Centro storico di Moncalieri

## 4.2 Costruzione del database

Per una valutazione del rischio sismico a scala urbana la costruzione del database è un passaggio fondamentale. I dati spesso sono forniti da banche dati esistenti, quasi sempre gratuite, riducendo così i costi relativi al sopralluogo dell'area oggetto di studio. Tali dati però possono essere obsoleti, di scarsa qualità o incompleti in quanto di solito vengono digitalizzati quelli che precedentemente erano forniti in formato cartaceo. È necessario infatti un ulteriore studio e valutazione prima di poter essere utilizzati.

Anche l'utilizzo di riprese satellitari sta diventando sempre più diffuso, grazie anche ad un aumento delle capacità dei satelliti e delle tecnologie. Le immagini aeree vengono utilizzate in molte discipline per mappare, monitorare e valutare oggetti visibili dallo spazio, inoltre possono essere utilizzate per ricavare i dati sugli edifici che possono essere utili per valutare la vulnerabilità delle grandi aree urbane.

L'acquisizione dei dati digitalizzati può essere inserita in strumenti GIS, utili per studi a scala territoriale, grazie ai quali è possibile identificare la copertura del suolo, la forma degli edifici o caratteristiche come la posizione, l'altezza, l'irregolarità in piano, l'epoca, etc..

Fondamentale è stato anche studiare la storia dell'area di interesse in quanto offre informazioni sul patrimonio immobiliare, sugli sviluppi, sulle tendenze delle strutture e le pratiche costruttive adottate al momento dello sviluppo, la storia politica, la ricostruzione dopo eventi distruttivi del passato. La storia può anche mostrare la crescita della popolazione e i movimenti di questa nel tempo, in modo da indicare potenziali punti di pressione sulle aree urbane (Stone 2017).

Il primo passo è stato quindi quello di ottenere e immagazzinare i dati relativi alla città di Moncalieri nel software QGis (<https://www.qgis.org/it/site/>), uno strumento GIS (Geographic Information System), open source, che permette l'acquisizione, la registrazione, l'analisi, la visualizzazione, la restituzione, la condivisione e la presentazione di informazioni derivanti da dati geografici.

Per sviluppare le valutazioni sul rischio sismico è fondamentale ottenere più informazioni possibili sulle caratteristiche degli edifici dell'area oggetto di studio quali, per esempio, la forma in pianta degli edifici, l'altezza, la datazione storica e la destinazione d'uso.

I dati utilizzati sono quelli del Geoportale della Regione Piemonte, da cui è possibile scaricare i dati in formato shapefile o le immagini raster attraverso collegamenti WMTS. Nel nostro caso i dati vettoriali sono stati scaricati dal database geotopografico della Regione Piemonte (Regione Piemonte 2018) ed inseriti come vettori all'interno del programma QGis.

I vettori, oltre a definire il poligono con la forma dell'edificio, utile per identificare l'uso del suolo della città di Moncalieri, contengono anche i informazioni sugli edifici, quali l'altezza (Figura 4-3; Figura 4-5), la destinazione d'uso (Figura 4-6; Figura 4-8), l'epoca di costruzione (Figura 4-9; Figura 4-11), l'area ed il perimetro. Le altezze degli edifici sono state calcolate dall'Arpa Piemonte ([http://webgis.arpa.piemonte.it/geoportalservice\\_arpa/](http://webgis.arpa.piemonte.it/geoportalservice_arpa/)) attraverso l'analisi delle differenze dei valori medi di DTM (Modello Digitale del Terreno) e DSM (Modello Digitale delle Superfici) ricadenti all'interno di ogni singola unità volumetrica perimetrata. Nel caso in cui la quota ottenuta non risultasse valida è stata attribuita, dove possibile, una quota simbolica sulla base delle caratteristiche dell'edificio e della localizzazione dell'edificio stesso (Regione Piemonte 2018).

Inoltre, per valutare il rischio sismico è stato necessario determinare il numero di piani degli edifici della città di Moncalieri e la loro tipologia costruttiva grazie all'elaborazione dei dati già ottenuti.

Per quanto riguarda il numero di piani (Figura 4-12; Figura 4-14) è stato dedotto dividendo l'altezza totale degli edifici per un valore di interpiano, differenziato in base all'epoca di costruzione delle strutture, ricavato da una relazione ENEA (Margiotta e Puglisi 2009). Si è considerato che:

- Gli edifici costruiti anteriormente al 1820 avessero altezza di interpiano pari a 3.6 metri;
- Gli edifici costruiti tra il 1820 e il 1880 avessero altezza di interpiano pari a 3.5 metri;
- Gli edifici costruiti tra il 1880 ed il 1920 avessero altezza di interpiano pari a 3.4 metri;
- Gli edifici costruiti tra il 1920 ed il 1960 avessero altezza di interpiano di 3.2 metri;
- Gli edifici costruiti tra il 1960 ed il 1990 avessero altezza di interpiano pari a 3 metri;

- Gli edifici costruiti tra il 2000 fino ad arrivare ai giorni nostri avessero altezza di interpiano pari a 2.7 metri.

Per quanto riguarda invece la definizione della tipologia costruttiva (Figura 4-15; Figura 4-17), si è fatta una prima assunzione basandosi sull'epoca di costruzione delle strutture; si sono infatti considerati:

- Gli edifici costruiti tra il 1800 e il 1900 con tipologia costruttiva in muratura;
- Gli edifici dal 1900 al 2000 con tipologia costruttiva in muratura e cemento armato;
- Gli edifici dal 2000 fino ai giorni nostri con tipologia costruttiva in cemento armato.

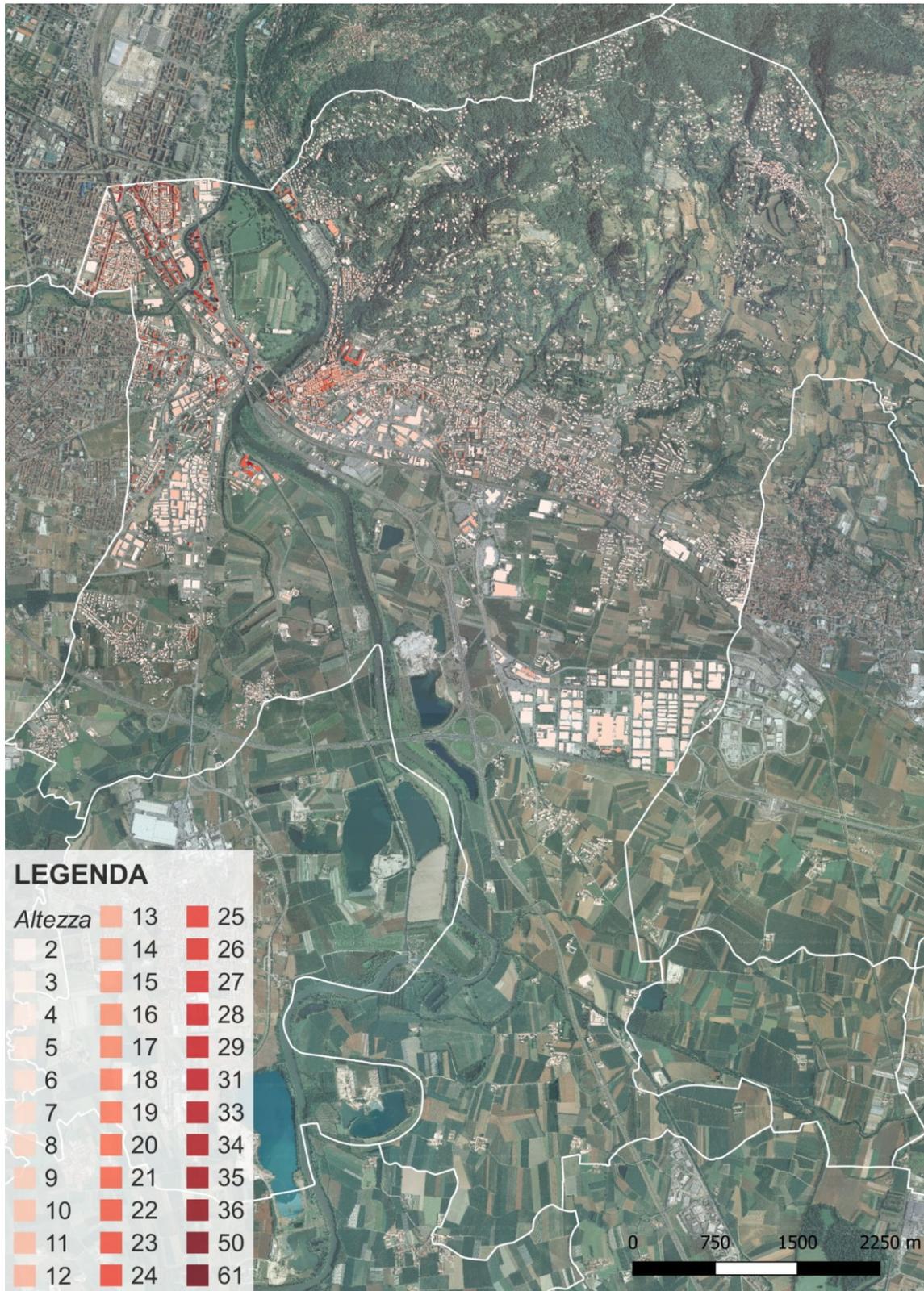


Figura 4-3: Ortofoto del territorio di Moncalieri con inserimento della classificazione degli edifici di Moncalieri in base all'altezza

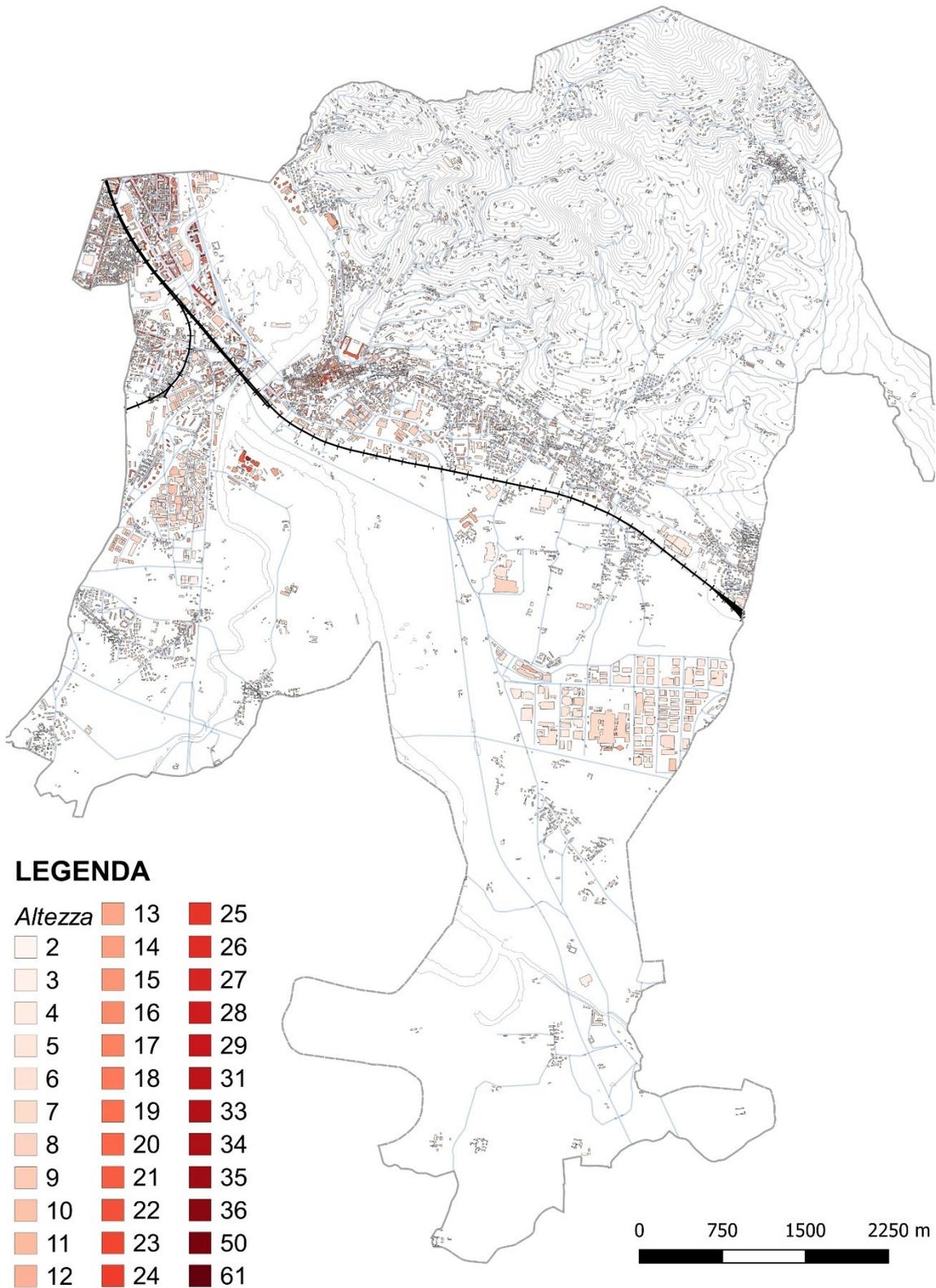


Figura 4-4: Mappa tematica con i principali elementi infrastrutturali e la classificazione degli edifici in base all'altezza

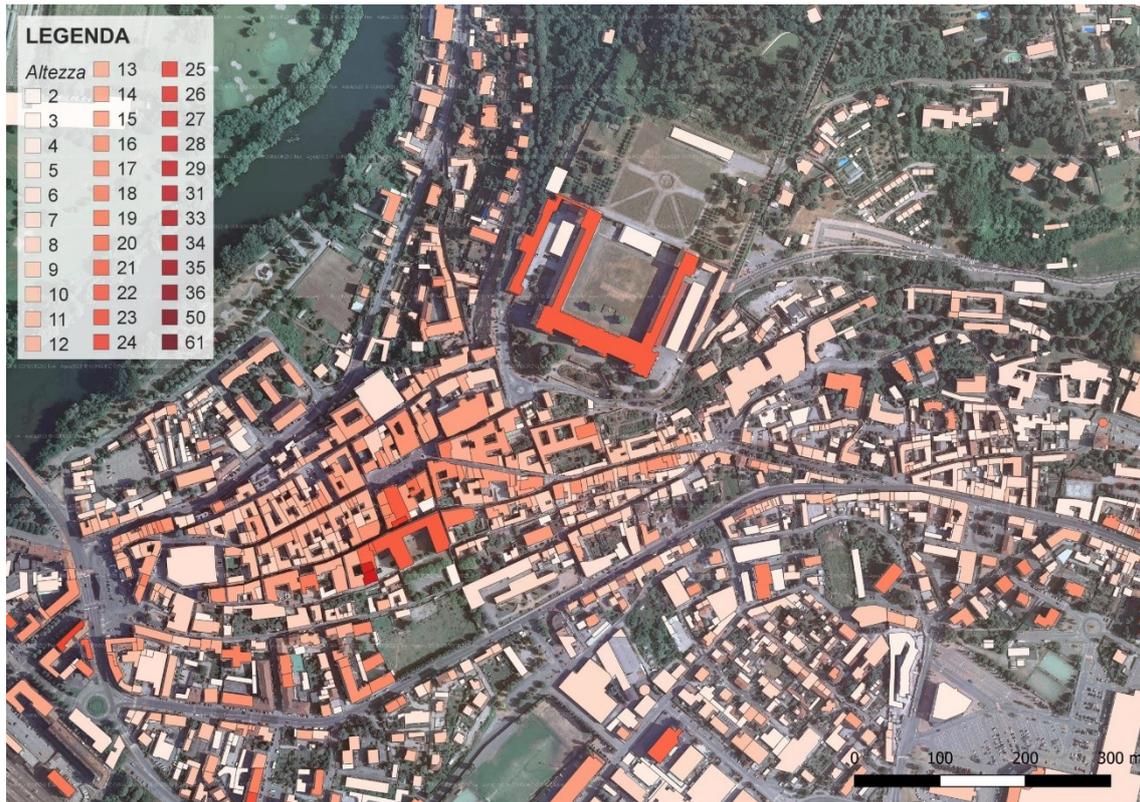


Figura 4-5: Classificazione degli edifici di Moncalieri in base all'altezza: zoom centro storico

Le altezze degli edifici sono state reperite, come precedentemente scritto, dal Geoportale della regione Piemonte. Quasi tutti gli edifici hanno un'altezza all'infuori dei palazzi moderni che sono alti, costruiti per soddisfare l'incremento demografico dovuto al passaggio di Moncalieri da città agricola a città industriale. Inoltre, si può osservare dalla legenda come i dati siano da trattare ed indagare ancora più minuziosamente in quanto, per esempio, la struttura di 61 metri è piuttosto elevate per questo tipo di cittadina.





Figura 4-6: Ortofoto del territorio di Moncalieri con inserimento della classificazione degli edifici di Moncalieri in base alla destinazione d'uso

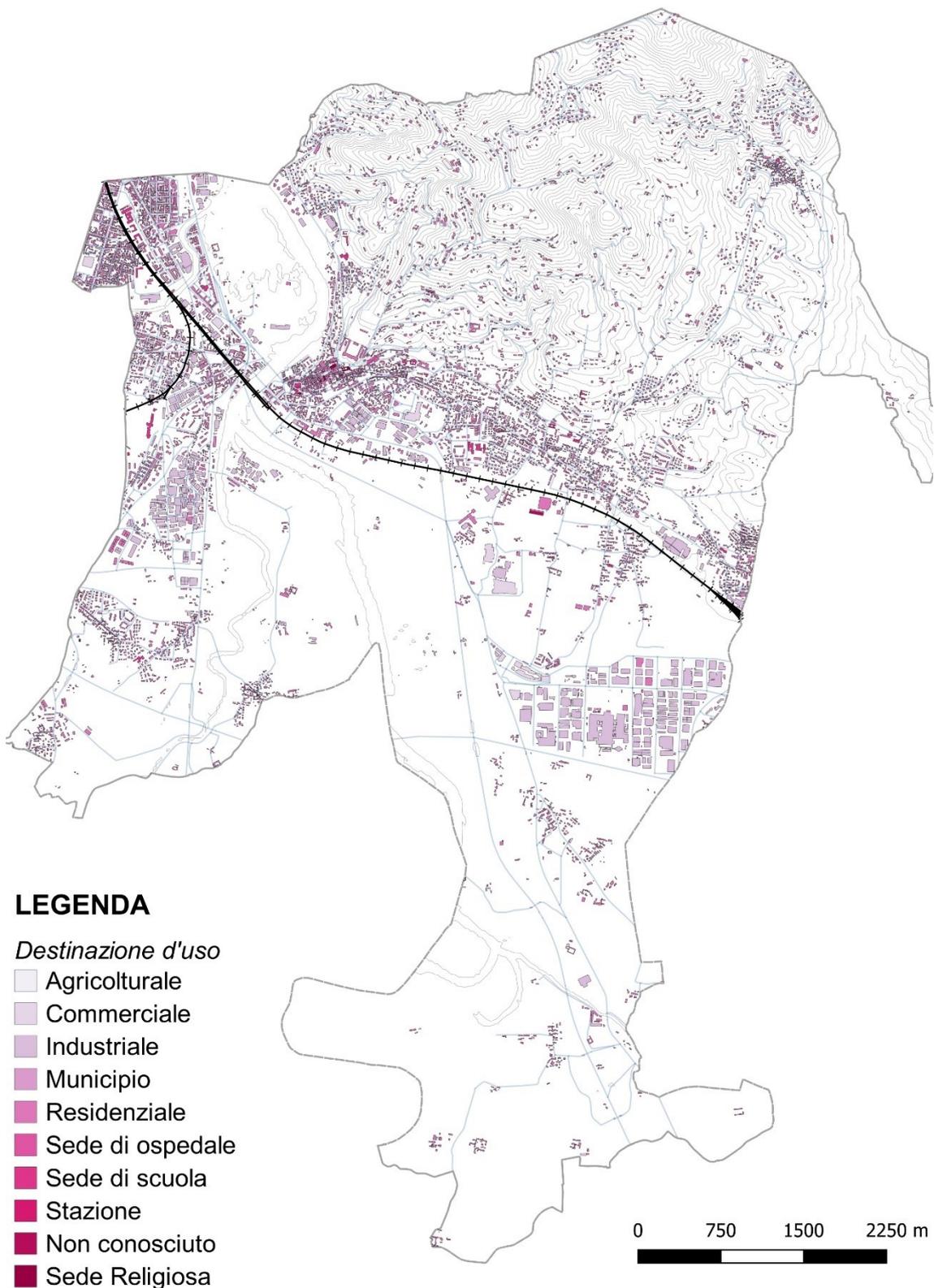


Figura 4-7: Mappa tematica con i principali elementi infrastrutturali e la classificazione degli edifici in base alla destinazione d'uso

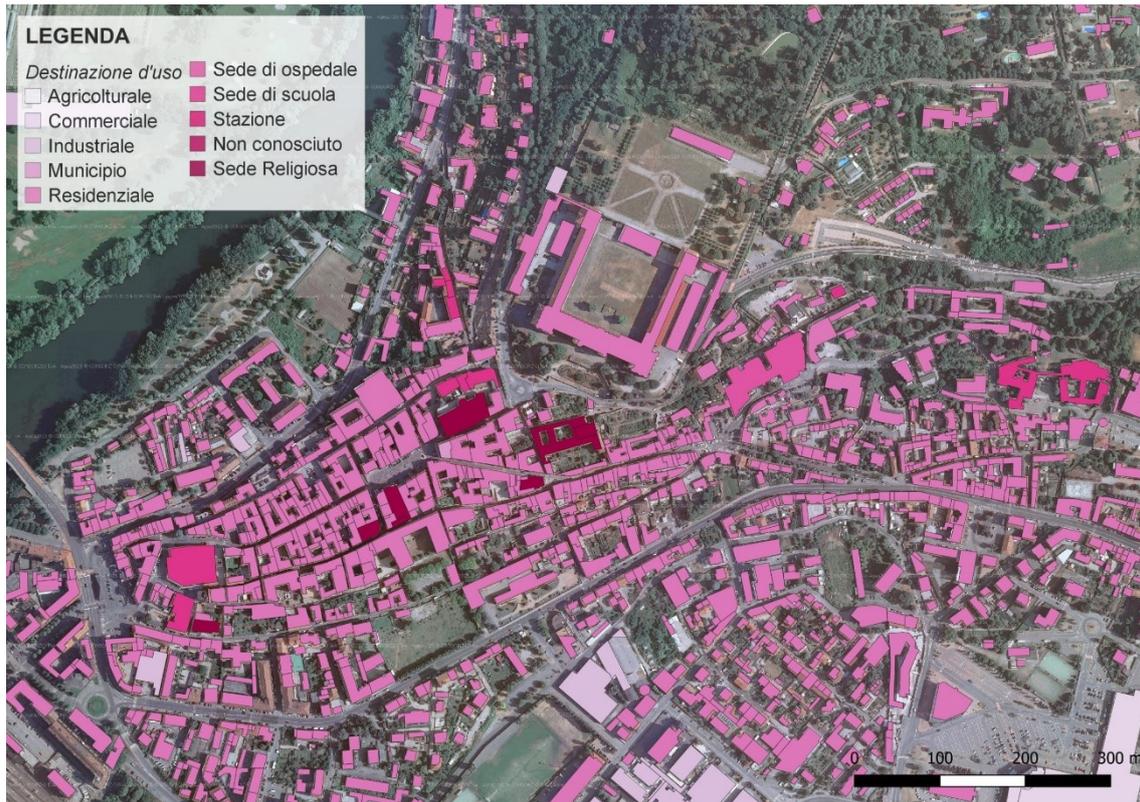


Figura 4-8: Classificazione degli edifici di Moncalieri in base alla destinazione d'uso: zoom centro storico



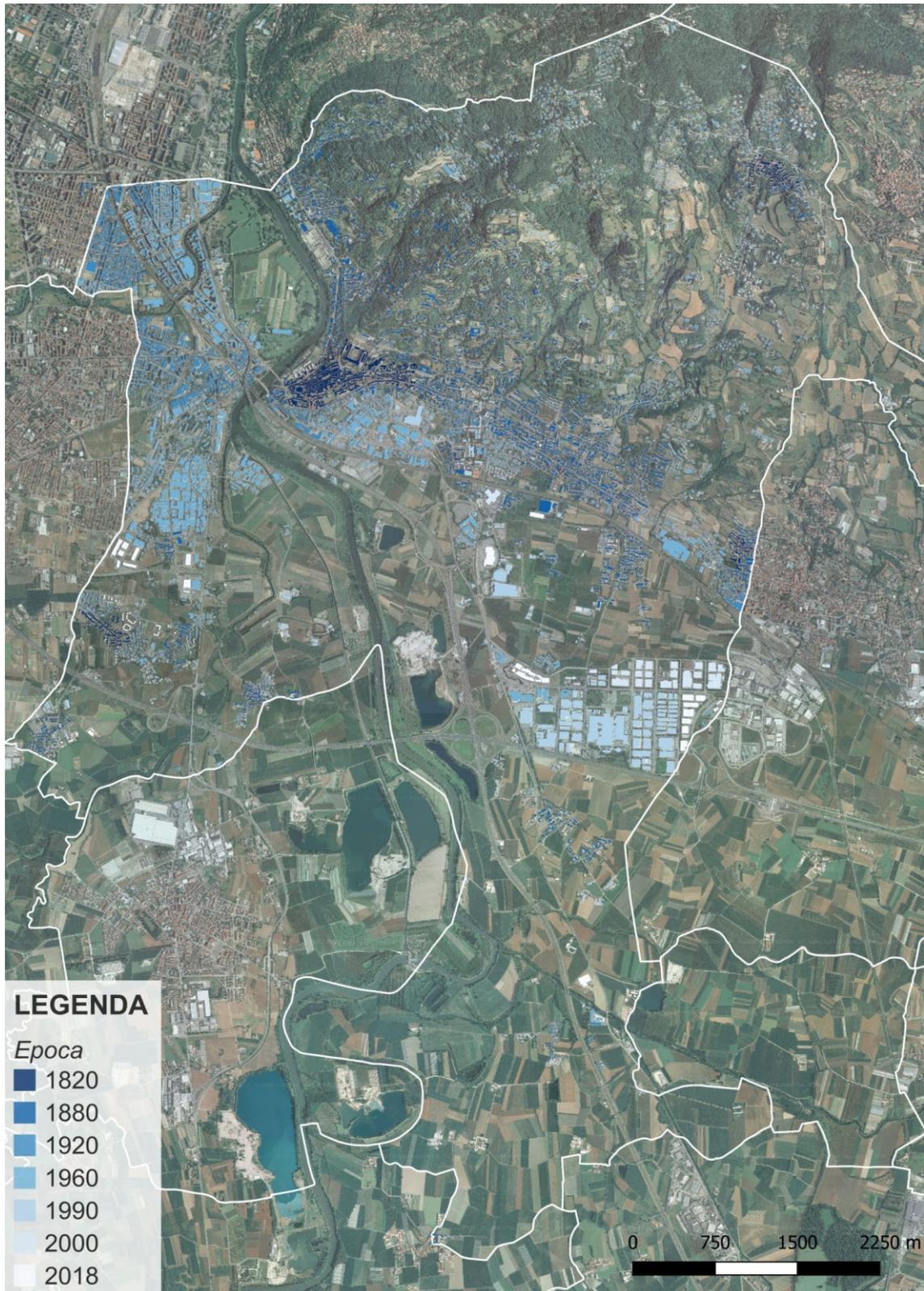


Figura 4-9: Ortofoto del territorio di Moncalieri con inserimento della classificazione degli edifici di Moncalieri in base all'epoca

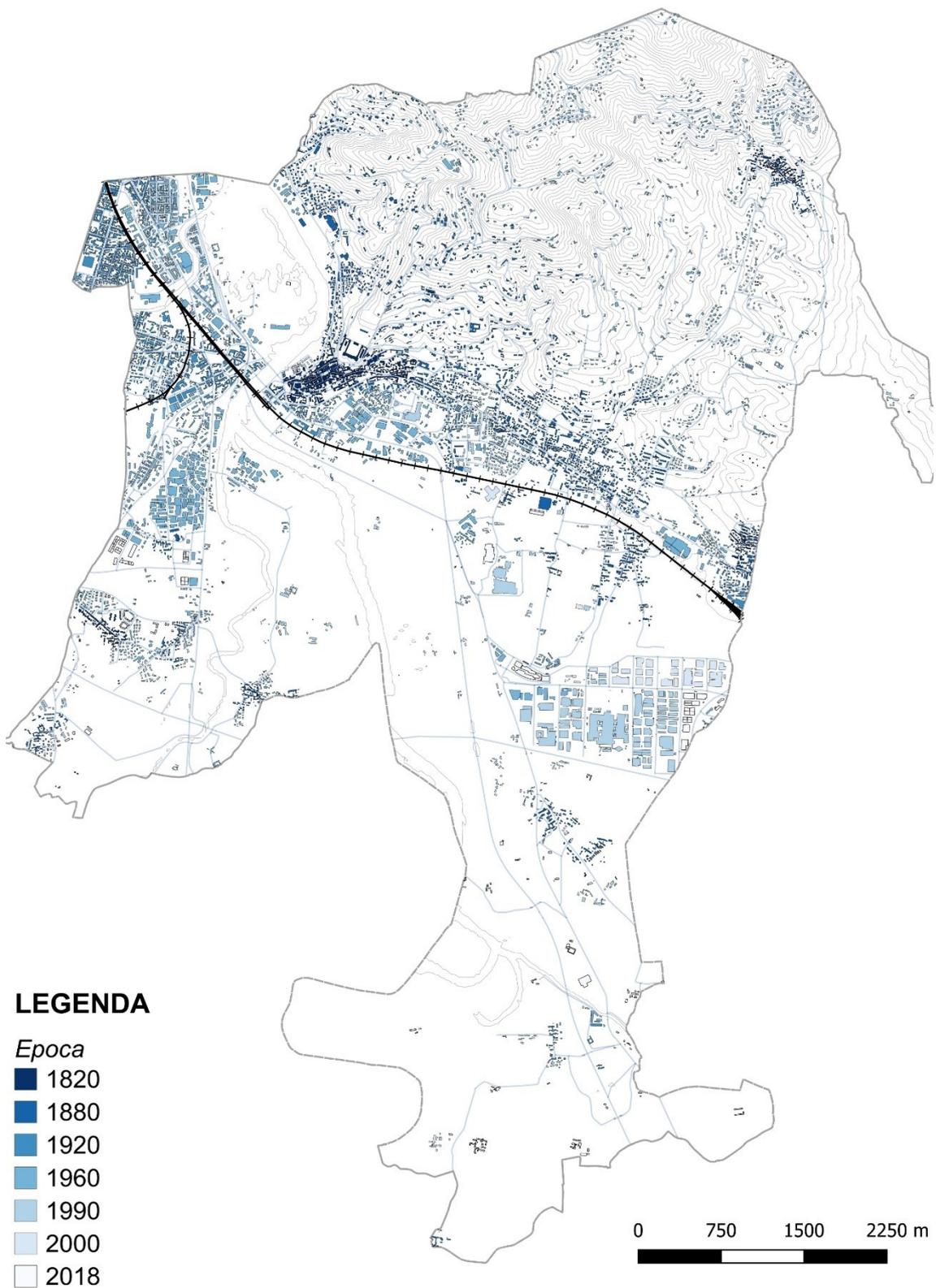
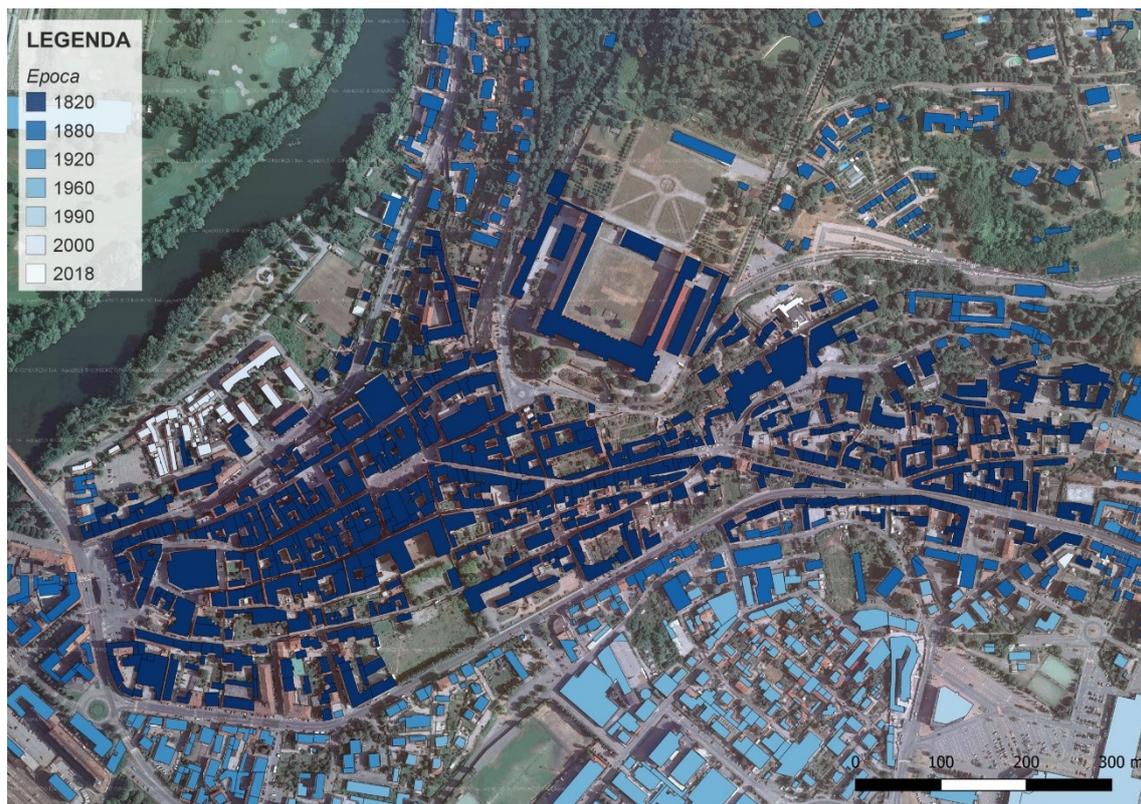
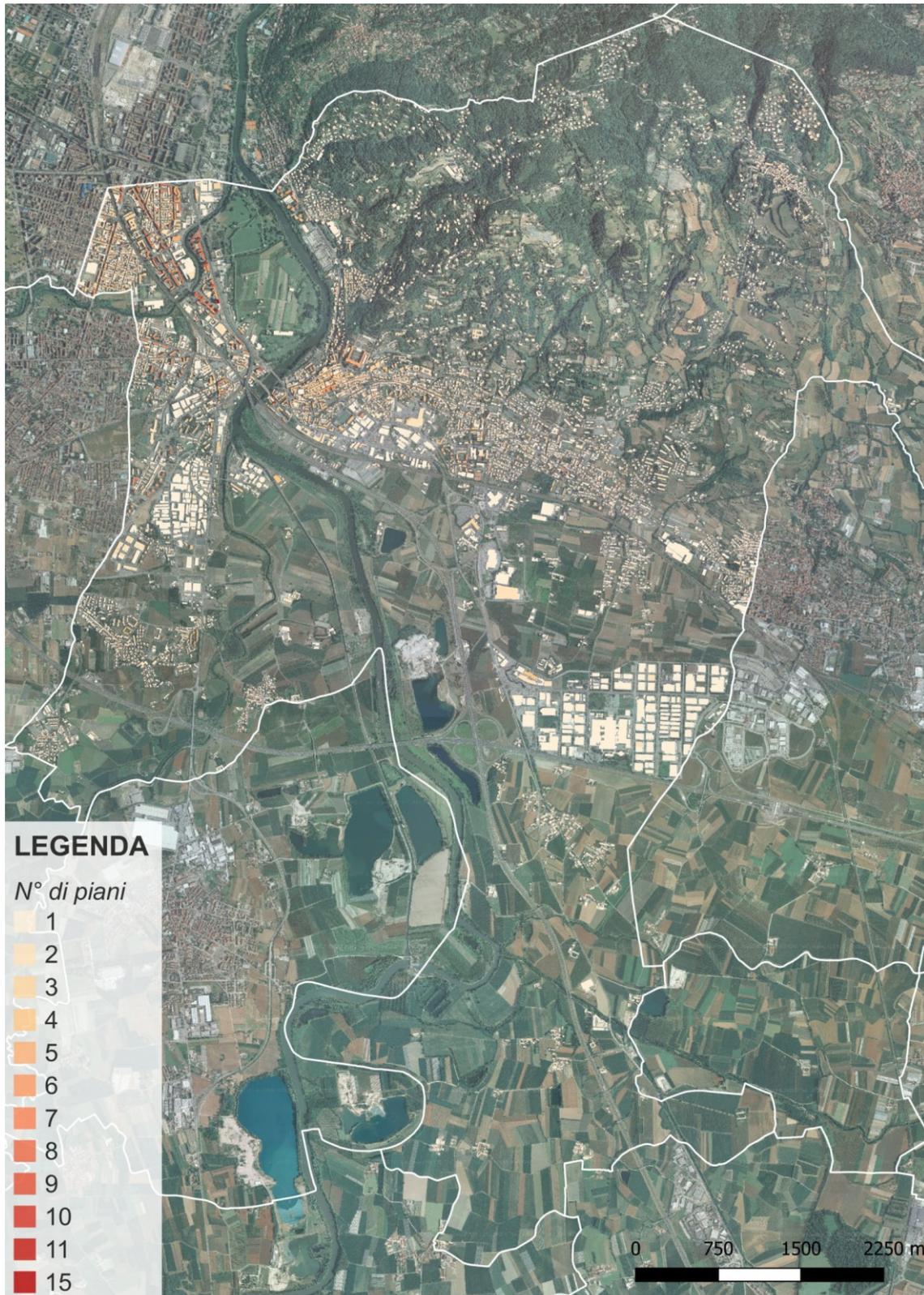


Figura 4-10: Mappa tematica con i principali elementi infrastrutturali e la classificazione degli edifici in base all'epoca



**Figura 4-11: Classificazione degli edifici di Moncalieri in base all'epoca: zoom centro storico**





**Figura 4-12: Ortofoto del territorio di Moncalieri con inserimento della classificazione degli edifici di Moncalieri in base al numero di piani**

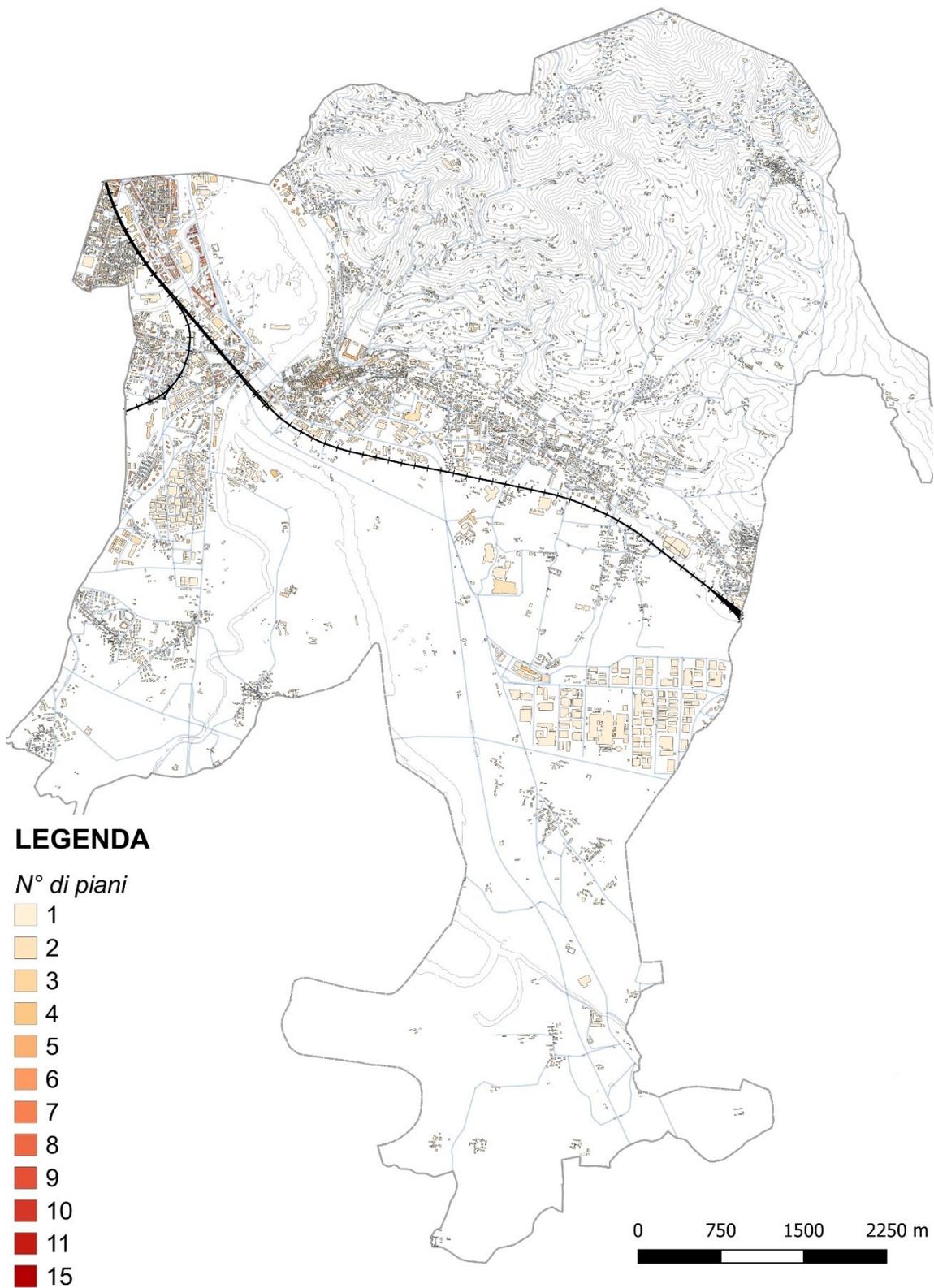
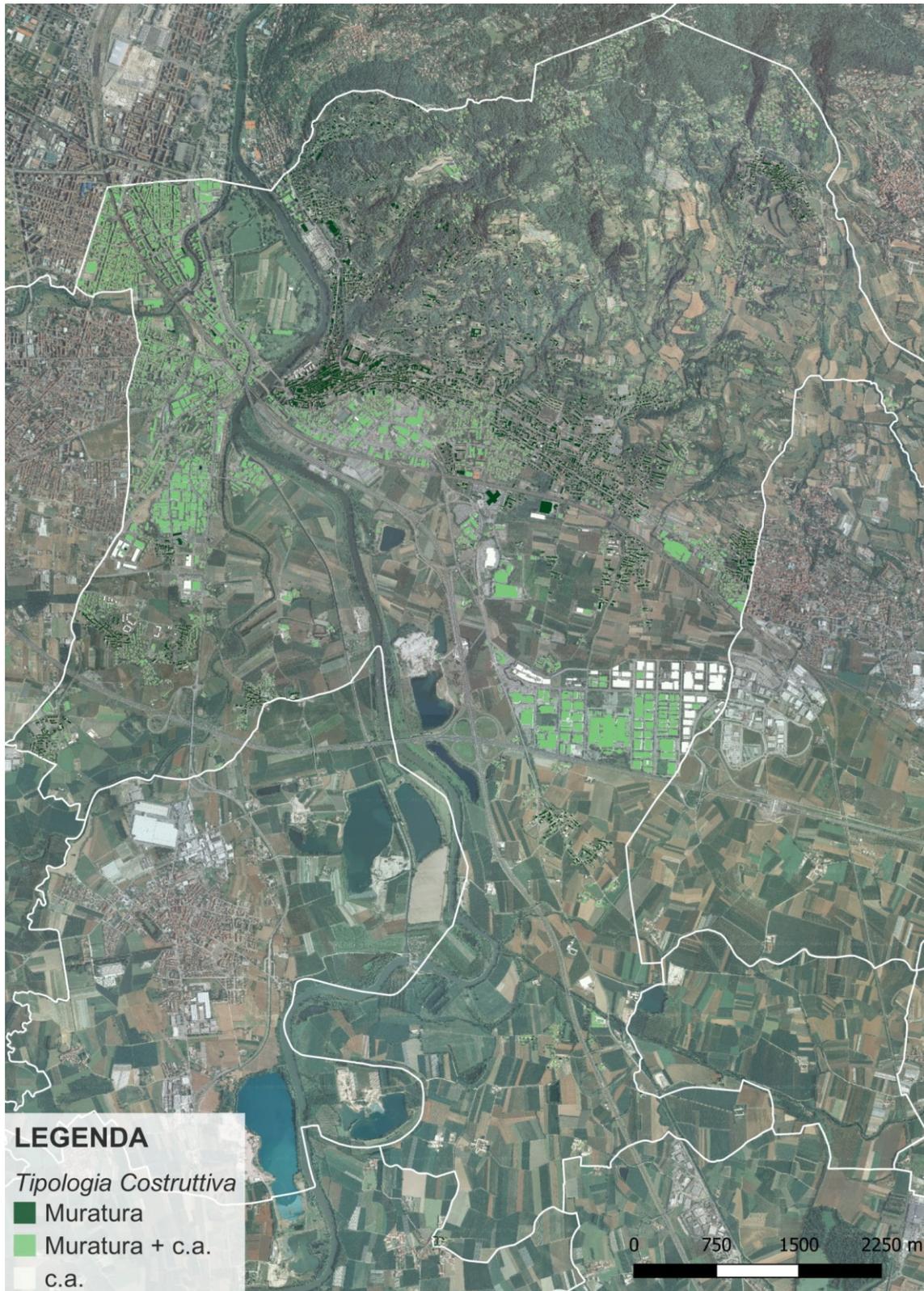


Figura 4-13: Mappa tematica con i principali elementi infrastrutturali e la classificazione degli edifici in base al numero di piani



Figura 4-14: Classificazione degli edifici di Moncalieri in base al numero di piani: zoom centro storico





**Figura 4-15: Ortofoto del territorio di Moncalieri con inserimento della classificazione degli edifici di Moncalieri in base alla tipologia costruttiva**

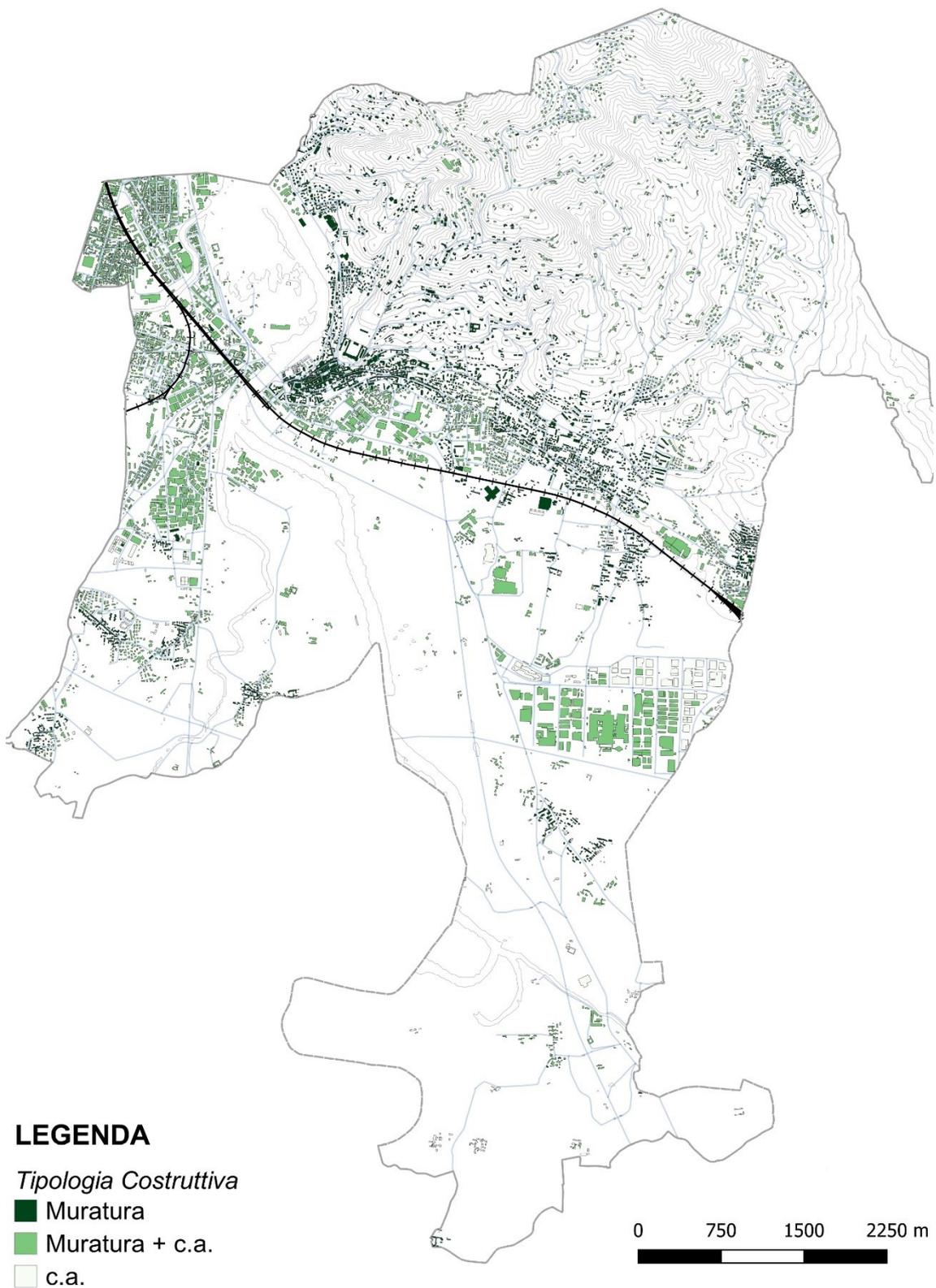


Figura 4-16: Mappa tematica con i principali elementi infrastrutturali e la classificazione degli edifici in base alla tipologia costruttiva

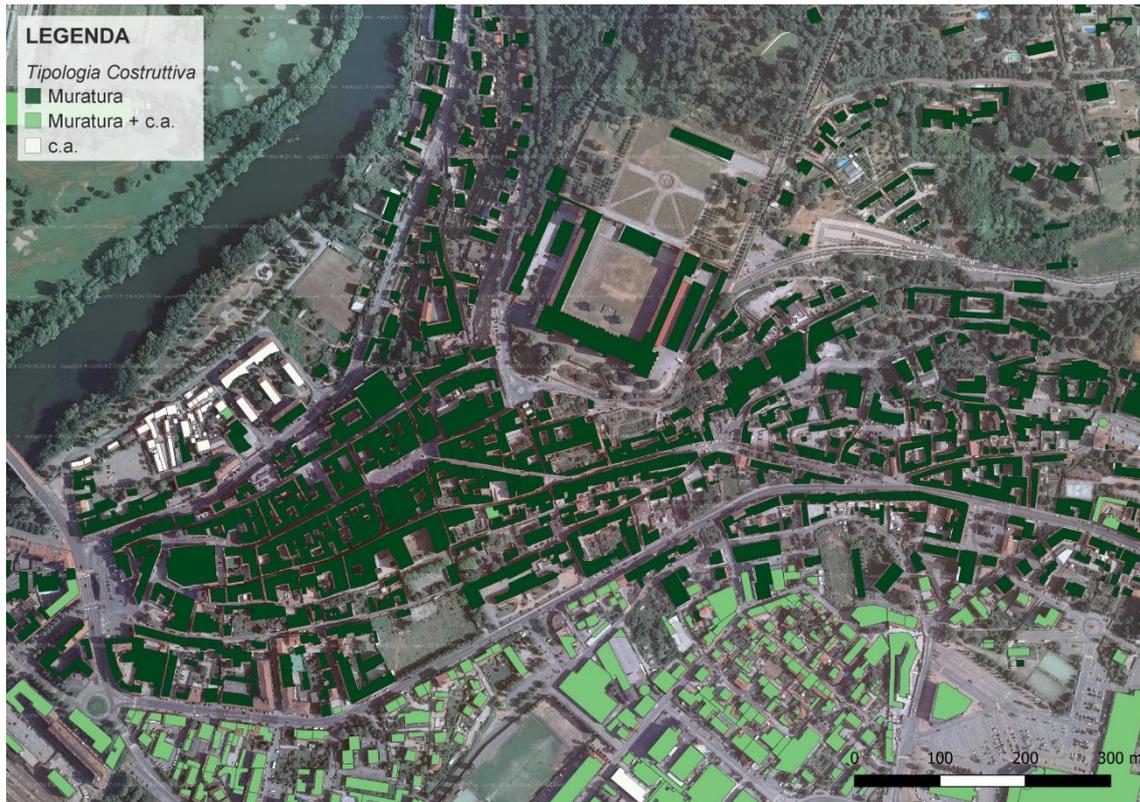


Figura 4-17: Classificazione degli edifici di Moncalieri in base alla tipologia: zoom centro storico

Infine, sono stati individuati i principali edifici vincolati presenti nel centro storico attraverso il catalogo dei beni culturali del comune di Moncalieri (Assessorato alla Pianificazione Territoriale - Ufficio di Piano Territoriale di Coordinamento 2009).

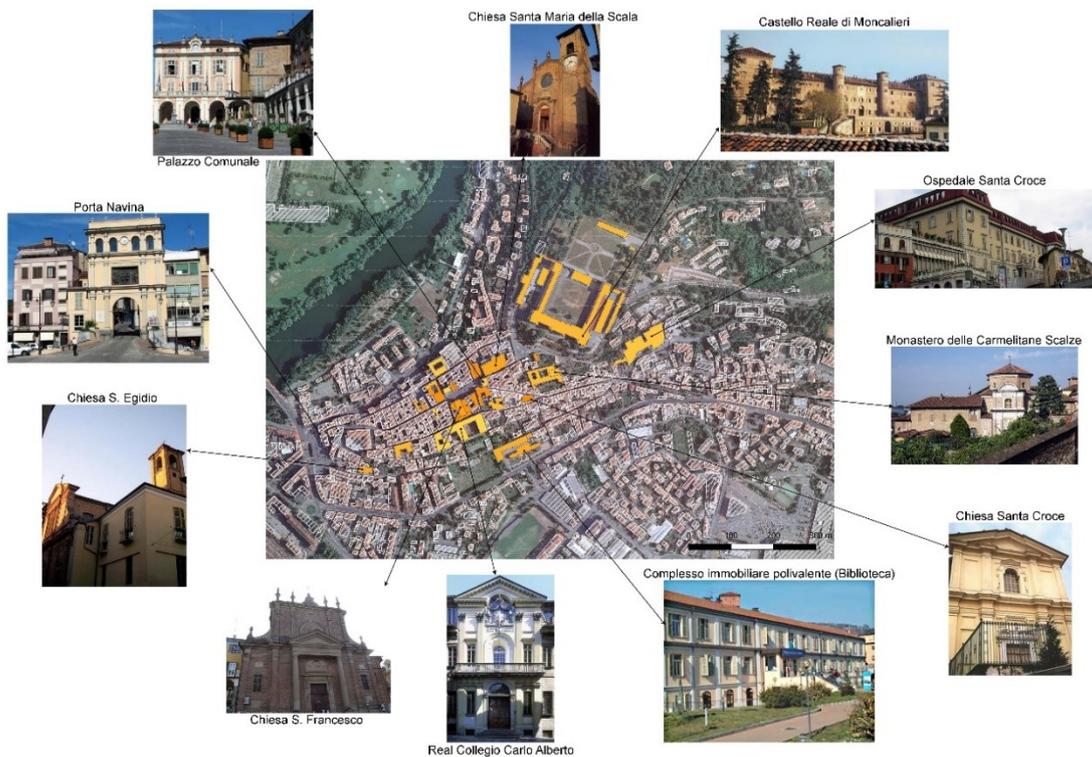


Figura 4-18: Individuazione dei principali edifici vincolati nel centro storico di Moncalieri

### 4.3 Analisi sviluppate sul centro storico di Moncalieri

Attraverso il software OpenQuake si è valutata la pericolosità ed il rischio sismico di 647 edifici del centro storico della città di Moncalieri, situato a sud del fiume Po, considerando unicamente gli edifici in muratura costruiti precedentemente al 1820.



Figura 4-19: Individuazione area oggetto di studio - centro storico di Moncalieri

Su quest'area sono state eseguite tre differenti tipi di analisi sul rischio sismico, quali *stochastic event based probabilistic seismic risk analysis*, *scenario damage assessment* e *scenario risk assessment* (Figura 4-20).

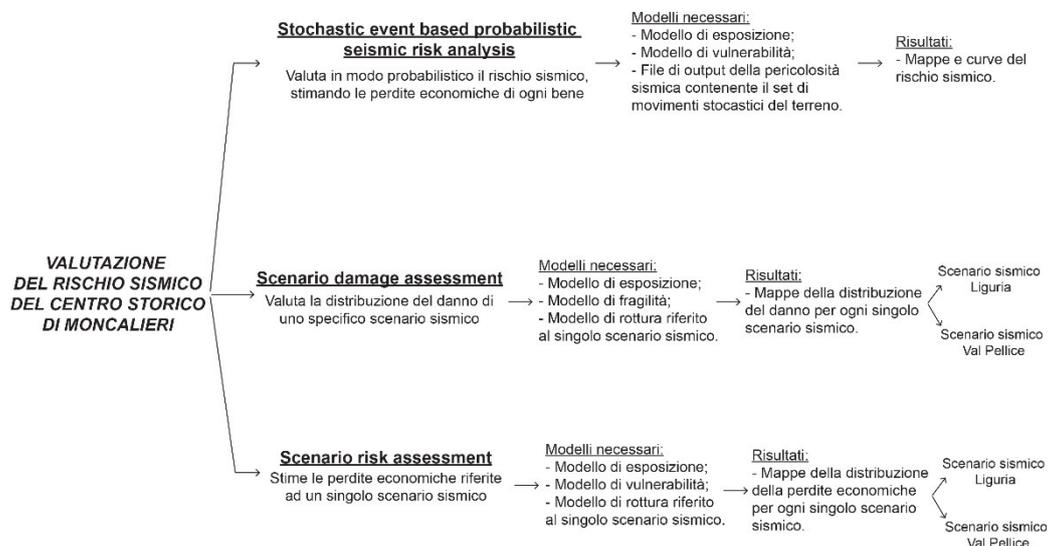


Figura 4-20: Schema riassuntivo sulle analisi eseguite e i risultati ottenuti

*Stochastic event based probabilistic seismic risk analysis* utilizza un approccio basato sulla simulazione di Monte Carlo per valutare in modo probabilistico il rischio, stimando le perdite economiche di ogni bene all'interno di uno specifico periodo di tempo.

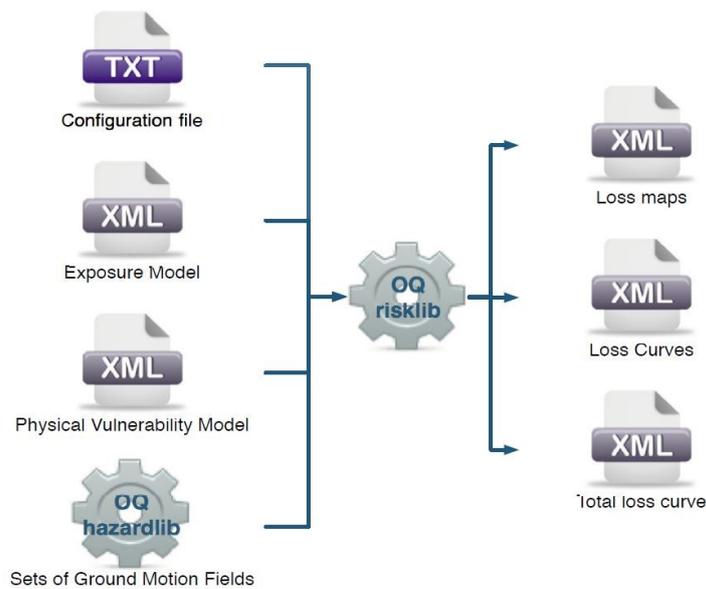
Il metodo Monte Carlo, fu sviluppato per la prima volta negli anni 40 per risolvere un modello di input-output in termini probabilistici nell'ambito del gioco d'azzardo; oggi viene utilizzato nell'analisi dei rischi naturali e delle relative incertezze. Tale metodo serve a convertire la matrice probabilistica relativa ai livelli di danno di un edificio in un risultato deterministico; lo scenario sismico non deve infatti offrire intervalli di probabilità ma precise indicazioni sul grado di danno di ogni costruzione in modo tale da generare un "sisma virtuale" con danni realistici sulle strutture. Tale metodo si basa sulla stima del valore medio di una variabile attraverso un'indagine campionaria. È necessario eseguire test in numero sufficientemente grande per poter controllare in che condizioni si trova una certa variabile di controllo e da ciò poter ricavare una serie di valori che forniranno il valore medio (Caretta 2013).

L'analisi stocastica richiede la definizione di vari modelli di input, quali il modello di esposizione, il modello di vulnerabilità per ogni tipo di perdita (nel nostro caso saranno considerate solo le perdite di tipo strutturale), definendo delle funzioni di vulnerabilità associate ad ogni tassonomia presente nel modello di esposizione e un modello contenente un set di eventi sismici stocastici che rappresenta la sismicità della regione interessata in uno specifico periodo di tempo. I principali risultati di questa analisi sono le curve relative alle perdite economiche, che descrivono la probabilità di eccedenza di livelli di perdita differenti in un periodo di tempo prefissato e le mappe relative alle perdite economiche dei beni descritti nel modello di esposizione, inoltre vengono calcolate le tabelle di perdita che descrivono le perdite totali dei beni considerando ogni evento sismico.

Per il calcolo della pericolosità sismica, questa indagine fa affidamento sull'analisi *probabilistic event-based hazard*, che simula la sismicità, considerando un periodo di tempo prefissato, attraverso un set di eventi stocastici. Il numero di eventi in un determinato periodo è simulato campionando la corrispondente probabilità di distribuzione per ogni rottura generata dal modello *seismic source*: il file *sets of ground motion fields* contiene quindi tutti i modelli di rottura. Per ogni rottura o evento stocastico viene generata una correlazione spaziale del movimento del terreno, tenendo in considerazione sia la variabilità relativa ai movimenti del terreno sia degli eventi residui ottenuti dalle correlazioni spaziali.

L'uso del *logic tree* permette di considerare le incertezze nella scelta del modello *seismic source* e nella scelta dei movimenti del terreno per le differenti regioni tettoniche.

I file richiesti per eseguire tale analisi e i risultati forniti sono illustrati in Figura 4-21.



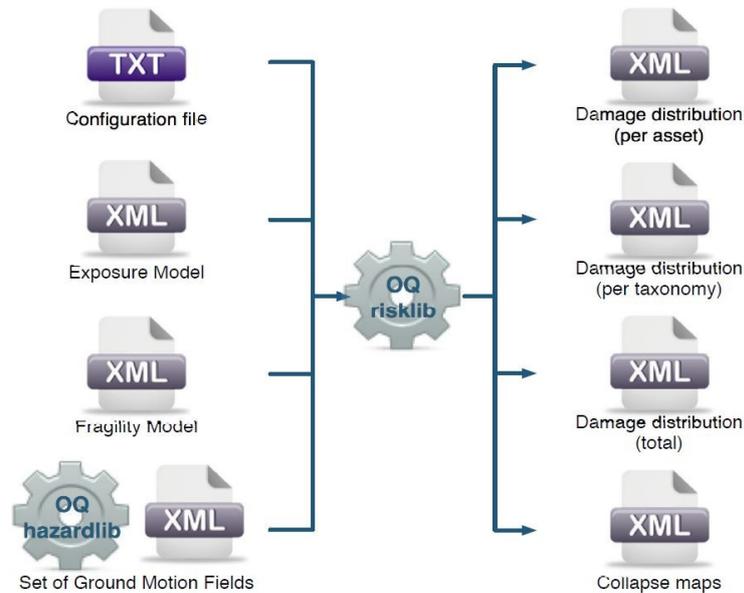
**Figura 4-21: Stochastic Event Based Probabilistic Seismic Risk Analysis: file di input e di output (Pagani, Silva, et al. 2018)**

La seconda analisi eseguita sul centro storico di Moncalieri valuta il danno di uno specifico scenario sismico attraverso l'analisi *scenario damage assessment*. Tale analisi calcola la distribuzione statistica del danno per ogni edificio definito nel modello di esposizione considerando un singolo scenario di rottura. Il calcolo richiede come file di input il modello di rottura di un singolo terremoto, il modello di esposizione e il modello di fragilità.

Tra i risultati principali vi sono le mappe relative alla distribuzione statistica del danno per ogni bene, la distribuzione del danno per ogni tassonomia e le mappe di collasso che contengono il numero di edifici distrutti all'interno dell'area di interesse.

Nel calcolo dello scenario le caratteristiche di rottura, quali per esempio la magnitudo, l'ipocentro e la geometria di faglia sono modellate come elementi deterministici.

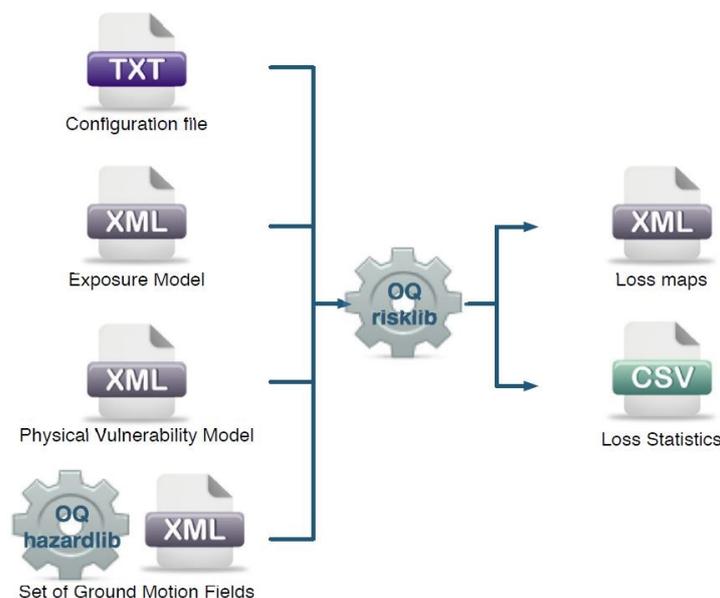
I file di input necessari per il calcolo e i file di output sono illustrati in Figura 4-22.



**Figura 4-22: Scenario Damage: file di input e di output (Pagani, Silva, et al. 2018)**

Come ultima analisi sono state definite le perdite in termini economici del centro storico di Moncalieri per ogni scenario di rottura considerato nell'analisi precedente; tale calcolo è stato eseguito attraverso l'analisi *scenario risk assessment* che stima le perdite statistiche per ogni bene definito nel modello di esposizione. I file di input richiesti sono il modello che descrive lo scenario sismico, il modello di esposizione ed il modello di vulnerabilità. Per ogni movimento del terreno la perdita economica è campionata per ogni struttura catalogata nel modello di esposizione attraverso le correlazioni tra il modello di vulnerabilità e la tassonomia presente nel modello di esposizione.

I file di input e di output relativi alla valutazione del rischio per un singolo scenario sismico sono definiti in Figura 4-23 (Pagani, Silva, et al. 2018)



**Figura 4-23: Scenario Risk: file di input e di output (Pagani, Silva, et al. 2018)**

#### 4.4 Valutazione della pericolosità sismica del centro storico di Moncalieri: definizione dei file di input

Per valutare il rischio sismico del centro storico di Moncalieri è fondamentale, come già precedentemente affermato, calcolare la pericolosità sismica della regione interessata.

La PGA (Peak Ground Acceleration) è uno dei parametri più comuni utilizzati per scopi ingegneristici per valutare la pericolosità sismica, definita da normativa come la distribuzione spaziale della PGA con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni. In Figura 4-24 si riportano le mappe con una probabilità di eccedenza del 10% e del 2% che corrispondono ad un periodo di ritorno di 475 e 2475 anni

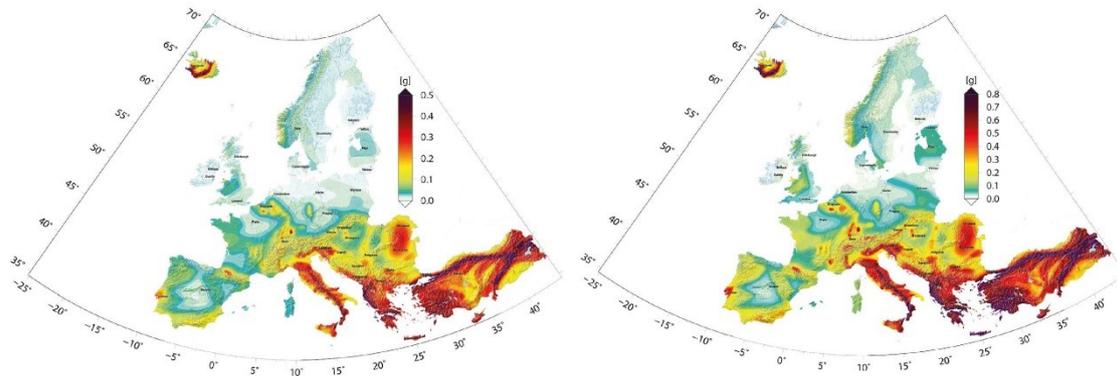


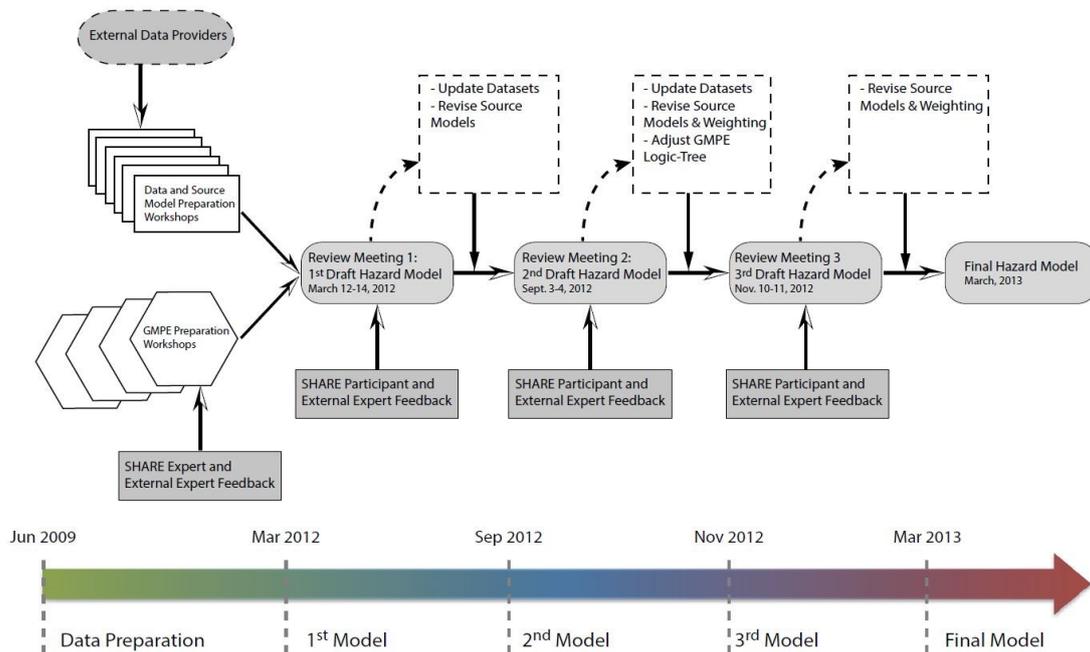
Figura 4-24: PGA con una probabilità di eccedenza del 10% (a destra) e del 2% (a sinistra) in 50 anni (Woessner, et al. 2015)

Il calcolo della pericolosità sismica è fondamentale nelle analisi sul rischio in quanto fornisce il file relativo al movimento del terreno da inserire come input nella valutazione del rischio sismico.

La costruzione dei file di input necessari per la valutazione della pericolosità sismica è complessa e richiede una quantità enorme di dati, per tale motivo sono stati utilizzati quelli formulati dal progetto SHARE, accessibili online tramite il sito <http://www.efehr.org> oppure tramite il portale SHARE ([www.share-eu.org](http://www.share-eu.org)).

Il progetto SHARE (Seismic Hazard Harmonization in Europe) è stato sviluppato sia per superare le differenze tra i modelli precedenti sia per trarre vantaggio dai miglioramenti sviluppati nel corso degli anni sia per definire nuovi approcci nella modellazione dei terremoti in modo da arrivare alla generazione di nuove misurazioni che definiscono il movimento del terreno e i modelli di attenuazione. Tale progetto è stato fondato nel 2009, della durata di tre anni e mezzo, con lo scopo di costruire un modello di pericolosità di riferimento per l'Europa e la Turchia, basato sulla compilazione di dati omogenei, senza essere vincolati dai confini nazionali, e sull'integrazione di tutte le discipline coinvolte. Il progetto ha riunito importanti scienziati di 18 istituti di ricerca europei appartenenti a 12 differenti paesi, più di 50 ricercatori tra sismologi, geodetici, ingegneri sismici e altri specialisti e il contributo di più di 250 esperti europei e di tutto il mondo, che sono intervenuti nell'integrazione del progetto durante i vari meeting. I meeting

avevano lo scopo di assemblare dati di alta qualità, definire i modelli dei terremoti e definire le procedure standard da adottare Figura 4-25.



**Figura 4-25: Struttura e tempi di lavoro del progetto SHARE (Woessner, et al. 2015)**

Il progetto SHARE ha quindi fornito un modello globale sulla pericolosità sismica, chiamato ESHM13 (European Seismic Hazard Model 2013); è inoltre il primo progetto che ha contribuito, con i suoi risultati, all'iniziativa GEM (Global Earthquake Model-<https://www.globalquakemodel.org/>).

Per valutare la pericolosità sismica sono quindi necessarie due componenti essenziali: un modello sui terremoti, utilizzato per caratterizzare la sismicità dell'area di interesse, e un modello sui movimenti del terreno, che riguarda l'attenuazione delle ampiezze di tali movimenti attraverso un set di equazioni (GMPEs).

L'area considerata dal progetto si estende dalla dorsale medio atlantica fino all'Est Europa, dalle zone di subduzione del Mediterraneo e dalla faglia in Turchia fino alla zona Baltica: l'area studiata comprende quindi una grande quantità di zone tettoniche differenti. Di conseguenza la definizione dei modelli necessari alla valutazione della pericolosità sismica è molto complessa, sia per la diversità sismo tettoniche, che portano a differenti proprietà di propagazione delle onde, sia a causa della qualità e quantità di dati disponibili (Woessner, et al. 2015).

L'ESHM13 fornisce una serie completa di risultati sulla pericolosità sismica e sulle incertezze; tali risultati possono servire come riferimento per aggiornare le norme sismiche a scala nazionale ed Europea e come modello per scopi e applicazioni simili nel mondo. Tale modello rappresenta un miglioramento significativo rispetto ai prototipi precedenti grazie a vari elementi aggiunti, quali la compilazione di un database contenente tutti i parametri necessari alla valutazione della pericolosità sismica, l'adozione di procedure rigorose e standardizzate in tutte le fasi del processo, il contributo multidisciplinare dato da tutti gli esperti, la considerazione delle incertezze

epistemiche, sia per i componenti del modello sia per i risultati ottenuti, e l'aver realizzato una documentazione trasparente che permette a qualsiasi persona l'accesso a tutti i dati, risultati e metodi.

Successivamente i file ESHM13 sono stati modificati dalla GEM in modo tale da essere funzionanti anche per le più moderne versioni del software OpenQuake.

Di seguito vengono analizzati e descritti i modelli del progetto SHARE utilizzati per la valutazione della pericolosità sismica di Moncalieri.

#### **4.4.1 ESHM13 – La modellazione dei terremoti**

I modelli che identificano i terremoti, chiamati dal progetto SHARE AS (Area Source model), SEIFA (SEismicity and accumulated FAult model) e FSBG (Fault Source and BackGround model) modellano i sismi basandosi su informazioni sismologiche, geologiche, tettoniche e geodetiche, calcolando e distribuendo l'attività sismica futura.

##### Modello Area Source (AS)

Per diversi anni la valutazione della pericolosità sismica si è basata sul modello *area source*, sia in Euroasia sia nel resto del mondo.

Le zone sono state progettate con l'ipotesi che i terremoti possano verificarsi ovunque all'interno di una zona tettonica. Nel modello vengono delineate, attraverso valutazioni di esperti, la sismicità, le zone tettoniche, la geologia e la geodesia, generalmente senza assegnare incertezze nei confini delle varie aree; inoltre la sismicità della crosta terrestre è stata considerata fino ad una profondità di 40 km.

Tale modello ha come obiettivo quello di unire i più recenti modelli nazionali con l'ex modello Euro-Mediterraneo, armonizzando i confini tra le varie nazioni. Durante la costruzione del modello la sfida principale è dominata dalla variabilità degli ambienti sismo tettonici considerati, dalle differenze presenti nelle varie documentazioni, dalla disponibilità di dati, dalle differenti filosofie adottate nei modelli precedenti e dalla necessità di armonizzare tale modello con quelli passati. Nella fase finale di armonizzazione, le piccole aree che risultavano essere prive di sismicità sono state rimosse. Il modello finale è formato da 432 aree rappresentate dalle linee nere in Figura 4-26.

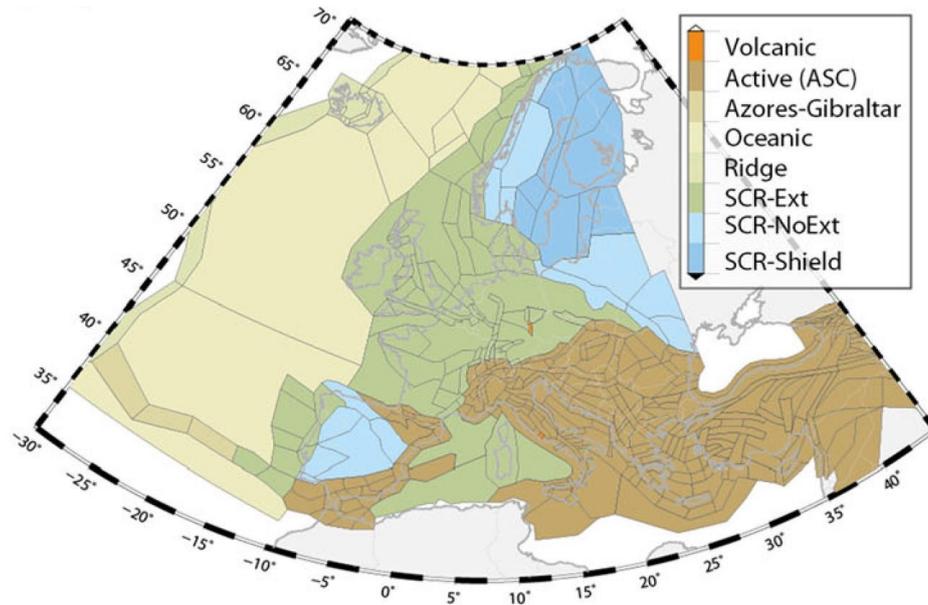


Figura 4-26: Zone definite nel modello AS rappresentate dalle sottili linee nere (Woessner, et al. 2015)

Le differenze tra le varie zone tettoniche in Europa sono riflesse nella delineazione finale delle aree: nell'area Mediterranea, specialmente nei Balcani, in Grecia, Turchia e Italia, le faglie attive hanno giocato un ruolo fondamentale nel definire il modello. Durante il progetto SHARE sono migliorate le conoscenze sulle faglie presenti nel sud della Spagna mentre poche informazioni sono state fatte per la parte nord-europea. Il catalogo include circa 8000 eventi; molte aree, però, contengono solo pochi dati, per esempio, 196 zone contengono circa 10 eventi.

Tale modello mostra alti valori di pericolosità lungo le faglie principali, ossia lungo la Turchia, le coste della Grecia e lungo l'intera lunghezza dell'Appennino italiano (Woessner, et al. 2015).

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

In contrasto con gli altri modelli, questo è più raffinato in quanto utilizza stime sulla produttività totale e sulla distribuzione di frequenza-magnitudo, archiviati all'interno del catalogo SHEEC (SHARE European Earthquake Catalogue). In un primo momento sono stati utilizzati i cataloghi completi e, successivamente, sono stati distribuiti spazialmente i tassi sui terremoti, stimati considerando le sismicità passate, secondo una combinazione pesata di due funzioni, una di densità e una di probabilità spaziale. Il peso di queste due funzioni dipende dalla magnitudo dei terremoti determinate attraverso esperimenti.

Il modello, inizialmente sviluppato per la California (Hiemer e Jackson 2013), è stato successivamente applicato a scala Europea: i ricercatori hanno generato un modello utilizzando i terremoti con una profondità inferiore a 40 km e considerando le faglie attive presenti nel database europeo delle faglie sismologiche (European Database of Seismogenic Faults, (Basili, et al. 2013)).

La modellazione della sismicità nelle zone di subduzione è stata eseguita separatamente, combinando il modello della Calabria, con quello Ellenico e con quello di Cipro, attraverso una complessa geometria tridimensionale.

Tale modello suppone che la distribuzione di frequenza-magnitudo dei terremoti passati sia la migliore per stimare la produttività e la distribuzione dei sismi, in quanto viene ipotizzato che i terremoti futuri si verificheranno nelle vicinanze di quelli passati e che i terremoti più intensi avverranno con più probabilità sulle faglie già individuate o in quelle di scorrimento.

Le assunzioni precedentemente citate vengono parametrizzate per stimare il tasso annuale dei terremoti come funzione di spazio e magnitudo.

La previsione del tasso annuale riferito alla sismicità della superficie terrestre descrive un'immagine relativamente calma, con il tasso più alto nelle regioni attualmente attive (Figura 4-27).

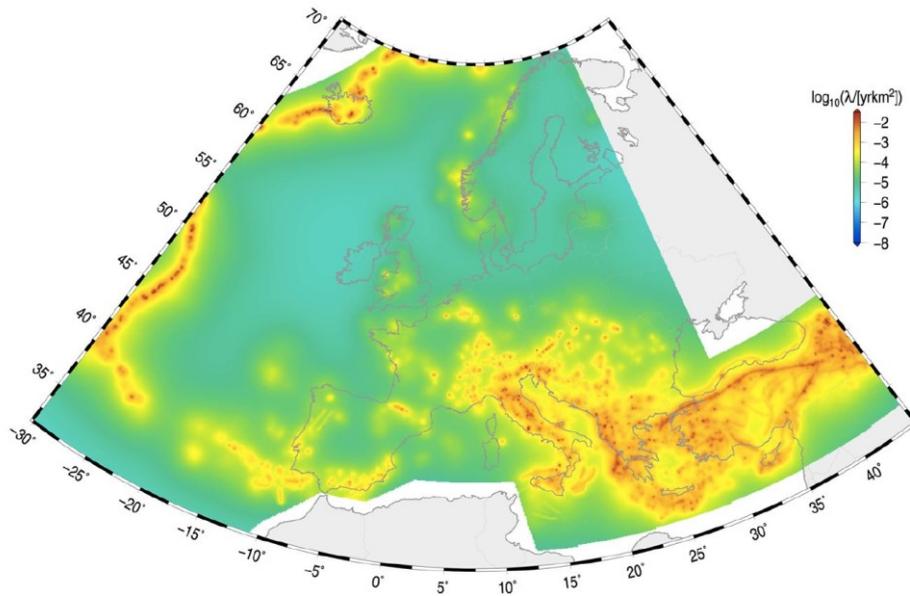


Figura 4-27: Distribuzione spaziale del tasso di terremoti previsto [ $M_w=4.5/km^2$ ] secondo il modello SEIFA (Woessner, et al. 2015)

Il modello ammette una magnitudo massima pari a 8.6 per gli eventi in Europa e in Turchia. In sintesi, tale modello concentra la pericolosità sismica nei luoghi in cui già in passato si è verificato un terremoto (Woessner, et al. 2015).

#### Modello Fault Source and Background (FSGB)

In questo modello l'attività delle faglie è determinata dai dati disponibili sulle deformazioni, e il tasso di attività dipende principalmente dallo scorrimento e dalla massima magnitudo delle faglie. Poiché non si conoscono tutte le faglie crostali presenti all'interno dell'area coperta dal progetto SHARE, e, più precisamente, mancano informazioni sulle regioni con bassa deformazione, sono state aggiustate le aree comprese nel modello AS in termini di dimensioni e produttività sui confini.

All'interno di una zona di *background* si è assunto che sono conosciute tutte le faglie in grado di generare un terremoto di magnitudo superiore a 6.5. Questi eventi sono modellati attraverso una geometria tridimensionale, considerando che i terremoti con magnitudo compreso tra 4.5 e 6.4 possano verificarsi in tutte le zone di *background*. Il potenziale sismico di ogni faglia è valutato attraverso il tasso di attività sismica, secondo la distribuzione Gutenberg-Richter.

Tale modello comprende principalmente le aree del sud dell'Europa, della Turchia e alcune parti del nord Europa. Il modello del tasso annuale dei terremoti è mostrato in (Figura 4-28).

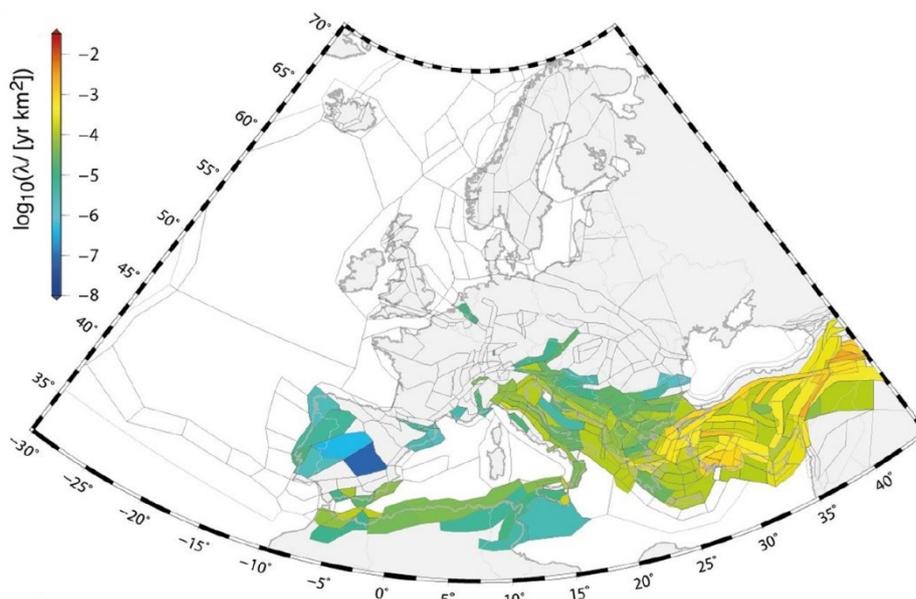


Figura 4-28: Tasso annuale di terremoti secondo il modello FSGB per  $\log_{10}(\lambda(M_w \geq 4.5/\text{km}^2))$  (Woessner, et al. 2015)

Tale modello quindi si concentra sulla definizione delle aree del Mediterraneo settentrionale e sull'area chiamata Lower Rhine Embayment, localizzata nell'Europa settentrionale. Questo modello prevede un movimento del terreno più alto lungo le faglie a scorrimento veloce, quali quelle della Turchia, mentre le faglie dell'Europa sud-orientale e dell'Italia, con scorrimento più lento, forniscono una pericolosità da moderata a bassa. Queste differenze dipendono principalmente da come i tassi sono stati modellati: infatti, i tassi relativi alle faglie di scorrimento veloce sono stati modellati in modo da superare la sismicità osservata di un fattore pari a dieci mentre quelli calcolati per le faglie lente corrispondono, in linea generale, ai tassi osservati (Woessner, et al. 2015).

#### 4.4.2 ESHM13 – Il movimento del terreno

Il *logic tree* costruito per i movimenti del terreno (GMPEs) è stato sviluppato utilizzando un nuovo approccio che combina le definizioni di esperti europei con i dati testati attraverso una procedura iterativa, in modo da definire il possibile movimento del terreno futuro. La fase di test dei dati ha coinvolto la regione tettonica dell'Europa portando alla selezione di quattordici equazioni. Queste equazioni caratterizzano i movimenti del terreno futuri considerando le magnitudo, le profondità, i range di distanze e tutte le condizioni geologiche esistenti in Europa. I dati indicati forniscono informazioni preziose circa la capacità delle equazioni di prevedere il movimento del terreno in differenti regioni, questi dati si basano su un solido database dei movimenti compilato dal progetto SHARE. Il database è stato registrato per tutto il mondo, compresa l'Europa, il Medio Oriente, la California ed il Giappone e contiene 13500 documenti di

2268 eventi registrati da 3708 stazioni ed è stata attentamente valutata, attraverso un approccio gerarchico, la rimozione delle doppie voci relative agli eventi, le informazioni sulle stazioni e sulle forme d'onda.

La strategia adottata per selezionare le equazioni prevede 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 obiettiva delle equazioni prescelte secondo i dati a disposizione seguendo la procedura descritta da Scherbaum et al.;
- 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.

Infine, sono state selezionate le seguenti equazioni: quattro per la crosta attiva superficiale ed oceanica, cinque per le regioni continentali stabili, quattro modelli sono stati selezionati per le zone di subduzione ed uno per le aree vulcaniche (Woessner, et al. 2015).

## 4.5 Valutazione del rischio sismico del centro storico di Moncalieri: definizione dei file di input

Il rischio sismico, come già precedentemente accennato, stima le perdite economiche che possono verificarsi dopo un evento catastrofico, in questo caso un sisma. Tale valutazione presuppone la conoscenza di alcuni elementi base quali:

- il set di movimenti del terreno, calcolato attraverso l'analisi di pericolosità sismica, l'esposizione e la vulnerabilità delle strutture nel caso dell'analisi *Stochastic event based probabilistic seismic risk*;
- il modello di rottura del terreno, il modello di esposizione e di fragilità nel caso dell'analisi *scenario damage assessment*;
- il modello di rottura del terreno, il modello di esposizione e di vulnerabilità nel caso dell'analisi *scenario risk assessment*.

Le valutazioni sono state fatte con il programma OpenQuake convertendo i file necessari al calcolo nel linguaggio NRML (*Natural Hazards Risk Markup Language*) con lo strumento *Risk Input Preparation Toolkit* presente nella piattaforma di Openquake.

Di seguito vengono illustrati i dati utilizzati per la creazione dei modelli.

### 4.5.1 Modello di rottura

Come precedentemente annunciato, oltre ad eseguire un'analisi probabilistica del rischio sismico con un set di movimento del terreno stocastici, si è anche valutato il rischio sismico, sia in termini di distribuzione del danno sia in termini di perdita economica, valutando scenari sismici ben precisi.

Per eseguire tale analisi è stato quindi necessario creare dei file che descrivono lo scenario di rottura desiderato. Per la costruzione del file NRML da inserire nelle valutazioni si è utilizzato lo strumento presente nella piattaforma di OpenQuake (Figura 4-29).

Sono stati definiti dodici modelli di rottura, due riferiti a terremoti storici avvenuti nelle vicinanze di Moncalieri mentre i restanti scenari sono stati ipotizzati.

Tra i terremoti storici si è considerato quello del 1808 in Val Pellice, nel Pinerolese, distante circa 55 km da Moncalieri, di magnitudo 5.7 e ipocentro ad una profondità di circa 25 km. Nel "Catalogo dei Forti Terremoti in Italia" (Guidoboni, et al. 2018) viene riportato che le scosse iniziarono il 2 aprile 1808 e si protrassero fino alla fine di ottobre, danneggiando gravemente i paesi delle valli dei torrenti Pellice e Chisone, nel circondario di Pinerolo. Le scosse che causarono gli effetti maggiori furono quelle del 2 aprile, con danni ingenti al patrimonio edilizio, con crolli totali e parziali, nei paesi di Bibiana, Bricherasio, Luserna, Perosa Argentina, San Germano Chisone e Torre Pellice. Non vi sono testimonianze di danni provocati a Moncalieri ma viene riportato che a Torino vi furono danni leggeri, quindi si suppone che anche a Moncalieri il

terremoto sia stato avvertito. Infatti, tale scossa fu sentita in un'area molto ampia, dalla Valle del Rodano, a Ginevra, fino a Genova (Guidoboni, et al. 2018).

L'altro terremoto storico considerato è quello del 1887 ad Imperia, distante circa 126 km da Moncalieri, di magnitudo 6.3 e con ipocentro ad una profondità di 15 km. La scossa principale fu avvertita in una vastissima area, estesa per 568.000 kmq. I danni provocati furono un effetto cumulativo delle tre scosse avvenute la mattina del 23 febbraio 1887, causando i danni maggiori lungo i 100 km di costa ligure compresi tra Mentone e Albisola e nelle località poste a 15-20 km dalla costa. Gli effetti dell'evento furono particolarmente gravi in corrispondenza della regione montuosa, che segna il confine tra la catena appenninica e le Alpi marittime. Vi furono alcune anomalie nella distribuzione territoriale degli effetti del terremoto che furono attribuite, dagli osservatori scientifici dell'epoca, alle diverse risposte che i terreni, litologicamente diversi, offrono alle onde sismiche. Gravissimi danni con numerosi crolli vi furono in 93 località, gravi danni in 208 paesi e danni leggeri in 410; in altre 800 località la scossa fu avvertita più o meno fortemente senza danni. Inoltre, viene riportato che a Moncalieri la scossa fu avvertita fortemente (Guidoboni, et al. 2018).

Successivamente, sono stati valutati i danni e le relative perdite di terremoti ipotetici con epicentro nei luoghi dei due terremoti storici del 1808 e del 1887, ad una profondità di 10 km e con una magnitudo crescente, da 4.5 fino ad un massimo di 6.5.

Oltre alla magnitudo e all'ipocentro la piattaforma OpenQuake richiede anche una serie di altri parametri inerenti all'inclinazione delle faglie. Il *rake* è la direzione in cui l'*hanging wall*, ossia il blocco che sta sopra la faglia, si muove durante la rottura, misurato relativamente allo *strike* sul piano di faglia; è stato posto pari a 90°, ipotizzando quindi una faglia inversa. Lo *strike* è 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. Per i terremoti storici non si hanno notizie relative agli angoli di rottura quindi sono stati ipotizzate uguali agli altri scenari.

Magnitude (Mw)

Rake (degrees)

Hypocenter

Longitude (degrees):

Latitude (degrees):

Depth (km):

Rupture type

Select rupture type:

Arbitrary Fault Rupture |  Simple Fault Rupture

Single Planar Rupture OR Multi-Planar Rupture  |  Complex Fault Rupture

Arbitrary Fault Rupture

Strike (degrees)

Dip (degrees)

Figura 4-29: Modello per la creazione di scenari di rottura presente nella piattaforma OpenQuake

### 4.5.2 Il modello di esposizione

Nel modello di esposizione vengono inseriti tutti gli edifici analizzati: nel nostro caso sono state catalogate 647 strutture e, per ognuna di esse, si sono determinate le coordinate geografiche (latitudine e longitudine), la tassonomia (che approfondiremo di seguito), il costo parametrico riferito alla ristrutturazione o ricostruzione dell'edificio dopo un evento sismico, detto anche *replacement cost*, e la superficie di ogni edificio in quanto il costo è stato considerato per unità di area.

I valori geografici e quelli inerenti alla superficie di ogni struttura sono stati determinati attraverso il programma QGIS; gli shapefile infatti contengono le informazioni sulle coordinate geografiche e sull'area del poligono riferito ad ogni edificio.

#### “Replacement cost”

Nel nostro studio vengono considerati unicamente i costi strutturali, ossia quelli relativi alla ristrutturazione e/o ricostruzione post-sisma della struttura portante; i costi non strutturali, i costi relativi ai contenuti ed i costi che tengono conto delle perdite dovute all'interruzione dell'attività a causa dell'evento sismico sono stati trascurati.

I costi parametrici strutturali sono stati determinati considerando la tabella 6 (Figura 4-30) del Decreto del Presidente della Repubblica del 9 settembre 2016 definito per la ricostruzione nei luoghi interessati dal sisma del 24 agosto 2016 nelle regioni di Abruzzo, Lazio, Marche e Umbria. Questi costi parametrici vengono utilizzati per valutare i prezzi di ristrutturazione dopo aver accertato il livello di danno di ogni edificio.

Nel nostro caso sono state fatte una serie di supposizioni in quanto, avendo svolto delle previsioni, non è stato possibile verificare il livello di danno. Si è quindi ipotizzato un livello operativo L1, considerando una vulnerabilità delle strutture da bassa a significativa, ed uno stato di danno 2, ossia un “danno lieve” o inferiore o uguale al “danno grave”, in quanto Moncalieri è localizzata in una bassa zona sismica, inoltre si è ipotizzata per tutti gli edifici un’area superiore a 220 m<sup>2</sup>.

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

Figura 4-30: Costi parametrici di ristrutturazione post-sisma

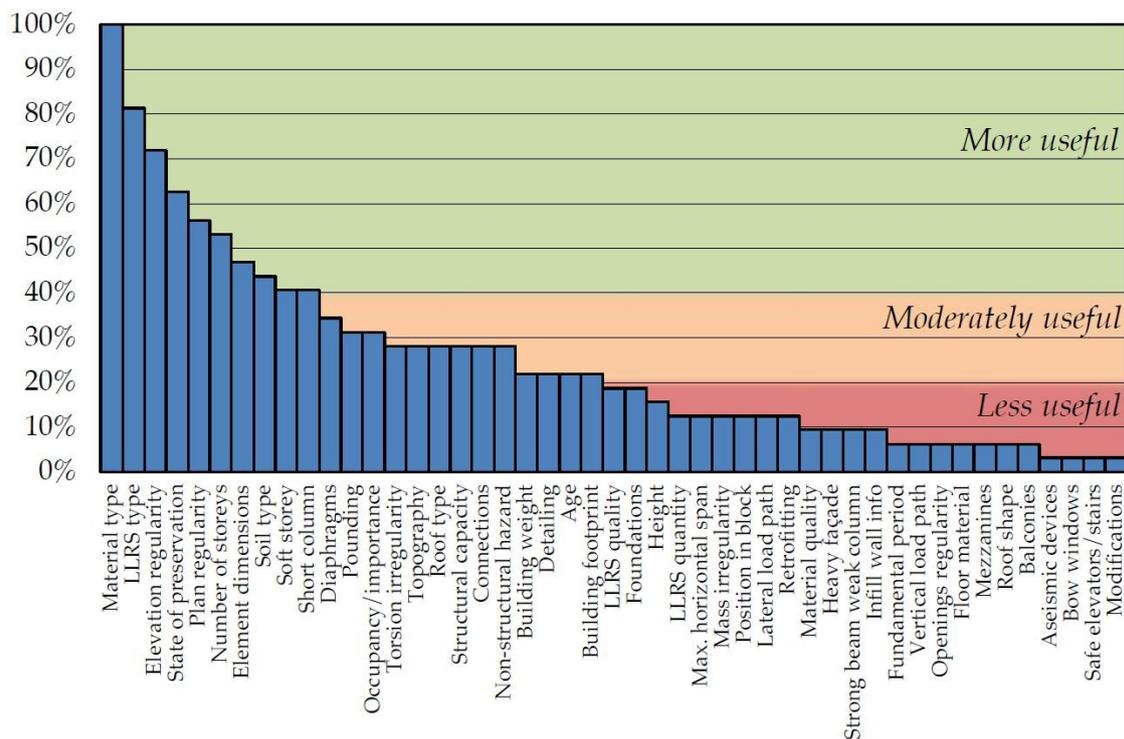
Il costo evidenziato in Figura 4-30 è stato incrementato del 40% per gli edifici dichiarati di interesse culturale, quali le chiese e gli edifici vincolati dalla soprintendenza, evidenziati nel paragrafo 4.2, mentre è stato incrementato del 20% per tutti gli altri edifici in quanto appartenenti tutti al centro storico e quindi si suppone siano sottoposti a vincoli. Tali incrementi sono previsti dal Decreto del Presidente della Repubblica del 9 settembre 2016 per la ricostruzione nei luoghi interessati dal sisma del 24 agosto 2016 precedentemente citato.

In conclusione, si è considerato un costo di 910 €/m<sup>2</sup> per gli edifici del patrimonio culturale e un costo di 780 €/m<sup>2</sup> per i restanti edifici del centro storico.

#### La tassonomia

Nel modello di esposizione è fondamentale determinare la tassonomia di ogni edificio, necessaria sia a correlare tale modello con quello di vulnerabilità o di fragilità sia per evidenziare le peculiarità delle strutture.

Ogni edificio possiede delle caratteristiche intrinseche che possono essere più o meno utili nella valutazione del comportamento sismico delle strutture e, tali attributi, assumono pesi differenti nell’analisi del rischio sismico. In Figura 4-31 sono stati individuati gli indicatori principali e vengono suddivisi in base all’utilità e all’influenza che essi hanno nella definizione del comportamento di una struttura. Tra i parametri considerati di grande utilità vi sono il tipo di materiale e il tipo di struttura portante (LLRS). È anche importante conoscere la presenza o meno di debolezze sismiche, quali, per esempio, le irregolarità in pianta ed in altezza oppure la presenza o meno di piani soffici nella struttura, è inoltre utile conoscere quei fattori che influenzano la capacità strutturale, quali, per esempio, il numero di piani, le dimensioni degli elementi strutturali e il tipo di suolo (Stone 2017).



**Figura 4-31: Caratteristiche di un edificio che possono influenzarne il comportamento sismico, dalla più utile alla meno utile (Stone 2017)**

La tassonomia utilizzata nello studio è quella proposta dalla GEM, sviluppata seguendo quella precedentemente realizzata dal progetto SYNER-G (<http://www.vce.at/SYNER-G/files/project/proj-overview.html>), che segue un modello europeo e viene impiegata per descrivere e classificare gli edifici in maniera uniforme. La tassonomia, come già precedentemente accennato, utilizza le caratteristiche delle strutture per comprendere al meglio il comportamento sismico sia di un singolo edificio sia di una classe di edifici. La GEM ha quindi sviluppato un database di semplice comprensione e facilmente adattabile ma completo allo stesso tempo. Tale cooperazione ha condotto un ampio lavoro sulla classificazione degli edifici, sviluppando un sistema tassonomico che evidenzia le caratteristiche chiave dell'edificio. Gli attributi sono sviluppati in vari livelli (da 1 a 5) e sono stati formulati anche grazie all'opinione della comunità GEM. I dati appartenenti al livello 1 sono, secondo GEM, necessari per caratterizzare l'edificio in termini di rischio sismico e comprendono: la definizione del tipo di materiale e del tipo di sistema di carico laterale (LLRS), l'altezza dell'edificio, l'epoca di costruzione, l'occupazione, la posizione, l'irregolarità o regolarità dell'edificio, la forma del tetto, il tipo di materiale con cui è costituito il solaio e la definizione dei sistemi di fondazione (Stone 2017).

Nel caso studio di Moncalieri, non avendo a disposizione schede descrittive di ogni edificio del centro storico, sono state classificate le strutture in maniera speditiva, considerando le caratteristiche immediatamente reperibili dai database, quali tipologia costruttiva, tipo di struttura resistente ai carichi, epoca dell'edificio, altezza, numero di piani e destinazione d'uso, acquisite ed elaborate come descritto nel paragrafo 4.2.

Nel centro storico gli edifici presi in considerazione sono tutti in muratura portante e costruiti in un'epoca antecedente al 1820. Le caratteristiche che, nel nostro caso, hanno contraddistinto il comportamento di un edificio da quello di un altro sono state l'altezza ed il numero di piani. Si è tenuta conto anche della differente destinazione d'uso dei vari edifici, senza però indagarla a fondo; l'unica distinzione che è stata fatta è quella tra edifici monumentali e non monumentali. In conclusione, si sono definite 63 tassonomie come riportato nella Tabella 1.

La tassonomia di ogni edificio è stata determinata attraverso TaxTweb (Figura 4-32), strumento presente all'interno del portale della GEM che considera gli attributi di livello 1 con una serie di caratteristiche nel menu a tendina tra cui poter scegliere.

Interessante, potrebbe essere osservare come variano le valutazioni sul rischio sismico aggiungendo un numero di attributi maggiore e quindi caratterizzando in maniera più dettagliata l'edificio.

The image displays four screenshots of the TaxTweb interface, arranged in a 2x2 grid. Each screenshot shows a different section of the building classification tool, with a navigation bar at the top containing tabs for 'Structural System', 'Building Information', 'Exterior Attributes', 'Roof/Floor/Foundation', 'Introduction', and 'Click and Help'.

- Top-left screenshot:** Shows 'Direction specification' (Unspecified direction selected), 'Material of lateral load-resisting system' (Unknown Material, Unknown Material technology), and 'Lateral load-resisting system' (Unknown lateral load-resisting system, System ductility).
- Top-right screenshot:** Shows 'Height' (Number of storeys above/below ground, Height above grade, Slope of the ground), 'Date' (Date of construction or retrofit), and 'Occupancy' (Building occupancy type - general/detail).
- Bottom-left screenshot:** Shows 'Building position within a block' (Unknown building position), 'Shape of the building plan' (Unknown plan shape), 'Structural irregularity' (Type of irregularity, Plan/Vertical structural irregularity - primary/secondary), and 'Exterior walls' (Unknown material of exterior walls).
- Bottom-right screenshot:** Shows 'Roof' (Roof shape, Roof covering, Roof system material, Roof system type, Roof connections), 'Floor' (Floor system material, Floor system type, Floor connections), and 'Foundation' (Unknown foundation system).

Each panel includes a 'Taxonomy string for this building typology:' text input field and a 'Type of taxonomy:' dropdown menu (set to 'Short') with a 'Permalink' link.

Figura 4-32: TaxTweb della GEM utilizzato per la definizione delle 63 tassonomie

<b>TASSONOMIA</b>	
1	M99/LWAL/HAPP:4+HFAPP:14+HD:15/YAPP:1820/RES
2	M99/LWAL/HAPP:3+HFAPP:12+HD:15/YAPP:1820/RES
3	M99/LWAL/HAPP:3+HFAPP:11+HD:15/YAPP:1820/RES
4	M99/LWAL/HAPP:3+HFAPP:14+HD:15/YAPP:1820/RES
5	M99/LWAL/HAPP:4+HFAPP:16+HD:15/YAPP:1820/RES
6	M99/LWAL/HAPP:5+HFAPP:18+HD:15/YAPP:1820/RES
7	M99/LWAL/HAPP:4+HFAPP:17+HD:15/YAPP:1820/RES
8	M99/LWAL/HAPP:4+HFAPP:15+HD:15/YAPP:1820/RES
9	M99/LWAL/HAPP:2+HFAPP:7+HD:15/YAPP:1820/RES
10	M99/LWAL/HAPP:2+HFAPP:6+HD:15/YAPP:1820/RES
11	M99/LWAL/HAPP:4+HFAPP:15+HD:15/YAPP:1820/MIX
12	M99/LWAL/HAPP:4+HFAPP:13+HD:15/YAPP:1820/RES
13	M99/LWAL/HAPP:2+HFAPP:8+HD:15/YAPP:1820/RES
14	M99/LWAL/HAPP:2+HFAPP:10+HD:15/YAPP:1820/RES
15	M99/LWAL/HAPP:2+HFAPP:9+HD:15/YAPP:1820/RES
16	M99/LWAL/HAPP:2+HFAPP:6+HD:15/YAPP:1820/EDU
17	M99/LWAL/HAPP:1+HFAPP:10+HD:15/YAPP:1820/ASS+ASS1
18	M99/LWAL/HAPP:1+HFAPP:3+HD:15/YAPP:1820/RES
19	M99/LWAL/HAPP:1+HFAPP:4+HD:15/YAPP:1820/RES
20	M99/LWAL/HAPP:1+HFAPP:5+HD:15/YAPP:1820/RES
21	M99/LWAL/HAPP:3+HFAPP:14+HD:15/YAPP:1820/EDU
22	M99/LWAL/HAPP:3+HFAPP:12+HD:15/YAPP:1820/ASS
23	M99/LWAL/HAPP:5+HFAPP:20+HD:15/YAPP:1820/ASS
24	M99/LWAL/HAPP:7+HFAPP:27+HD:15/YAPP:1820/ASS
25	M99/LWAL/HAPP:6+HFAPP:21+HD:15/YAPP:1820/ASS
26	M99/LWAL/HAPP:3+HFAPP:13+HD:15/YAPP:1820/RES
27	M99/LWAL/HAPP:1+HFAPP:3+HD:15/YAPP:1820/OCO
28	M99/LWAL/HAPP:1+HFAPP:15+HD:15/YAPP:1820/ASS+ASS1
29	M99/LWAL/HAPP:5+HFAPP:17+HD:15/YAPP:1820/OCO
30	M99/LWAL/HAPP:1+HFAPP:21+HD:15/YAPP:1820/ASS+ASS1
31	M99/LWAL/HAPP:6+HFAPP:24+HD:15/YAPP:1820/ASS+ASS1
32	M99/LWAL/HAPP:5+HFAPP:19+HD:15/YAPP:1820/RES
33	M99/LWAL/HAPP:3+HFAPP:10+HD:15/YAPP:1820/MIX
34	M99/LWAL/HAPP:3+HFAPP:10+HD:15/YAPP:1820/RES
35	M99/LWAL/HAPP:3+HFAPP:14+HD:15/YAPP:1820/ASS
36	M99/LWAL/HAPP:1+HFAPP:14+HD:15/YAPP:1820/ASS+ASS1
37	M99/LWAL/HAPP:2+HFAPP:9+HD:15/YAPP:1820/EDU
38	M99/LWAL/HAPP:3+HFAPP:12+HD:15/YAPP:1820/EDU
39	M99/LWAL/HAPP:2+HFAPP:8+HD:15/YAPP:1820/EDU
40	M99/LWAL/HAPP:4+HFAPP:17+HD:15/YAPP:1820/GOV+GOV1
41	M99/LWAL/HAPP:2+HFAPP:6+HD:15/YAPP:1820/OCO
42	M99/LWAL/HAPP:1+HFAPP:6+HD:15/YAPP:1820/IND
43	M99/LWAL/HAPP:2+HFAPP:7+HD:15/YAPP:1820/OCO
44	M99/LWAL/HAPP:2+HFAPP:8+HD:15/YAPP:1820/OCO
45	M99/LWAL/HAPP:4+HFAPP:12+HD:15/YAPP:1820/RES
46	M99/LWAL/HAPP:3+HFAPP:12+HD:15/YAPP:1820/ASS+ASS1
47	M99/LWAL/HAPP:1+HFAPP:17+HD:15/YAPP:1820/ASS+ASS1
48	M99/LWAL/HAPP:1+HFAPP:4+HD:15/YAPP:1820/COM+COM11
49	M99/LWAL/HAPP:1+HFAPP:4+HD:15/YAPP:1820/COM+COM12
50	M99/LWAL/HAPP:3+HFAPP:13+HD:15/YAPP:1820/EDU+EDU2
51	M99/LWAL/HAPP:3+HFAPP:12+HD:15/YAPP:1820/EDU+EDU2
52	M99/LWAL/HAPP:3+HFAPP:11+HD:15/YAPP:1820/EDU+EDU2
53	M99/LWAL/HAPP:5+HFAPP:21+HD:15/YAPP:1820/ASS
54	M99/LWAL/HAPP:1+HFAPP:4+HD:15/YAPP:1820/ASS
55	M99/LWAL/HAPP:1+HFAPP:3+HD:15/YAPP:1820/ASS
56	M99/LWAL/HAPP:1+HFAPP:5+HD:15/YAPP:1820/ASS
57	M99/LWAL/HAPP:2+HFAPP:8+HD:15/YAPP:1820/ASS
58	M99/LWAL/HAPP:3+HFAPP:8+HD:15/YAPP:1820/COM+COM4
59	M99/LWAL/HAPP:1+HFAPP:5+HD:15/YAPP:1820/COM+COM4
60	M99/LWAL/HAPP:3+HFAPP:9+HD:15/YAPP:1820/COM+COM4
61	M99/LWAL/HAPP:3+HFAPP:12+HD:15/YAPP:1820/COM+COM4
62	M99/LWAL/HAPP:1+HFAPP:3+HD:15/YAPP:1820/IND
63	M99/LWAL/HAPP:1+HFAPP:4+HD:15/YAPP:1820/IND

Tabella 1: Le 63 tassonomie definite per il centro storico di Moncalieri

### 4.5.3 Modello di fragilità

Per valutare la vulnerabilità sismica (e di conseguenza il rischio sismico) e la distribuzione del danno nel centro storico di Moncalieri è necessario definire un numero di funzioni di fragilità pari al numero di tassonomie presenti nel modello di esposizione.

Le curve di fragilità sono state differenziate in base al numero di piani degli edifici. Per quanto riguarda invece la destinazione d'uso, come già detto nel paragrafo 4.5.2, le curve sono state scelte distinguendo unicamente gli edifici monumentali (chiese) da quelli non monumentali.

Le funzioni di fragilità degli edifici non monumentali sono state definite attraverso lo strumento FFM (Fragility Functions Manager) definito dalla SYNER-G e descritto nel paragrafo 3.2. Le curve si differenziano unicamente considerando il numero di piani degli edifici in quanto la tipologia costruttiva è la stessa per tutte le strutture del centro storico.

Le curve prese come riferimento sono quelle di (Borzi, Crowley e Pinho 2008b) determinate per l'Italia attraverso un metodo analitico statico non lineare (Figura 4-33; Figura 4-34; Figura 4-35; Figura 4-36).

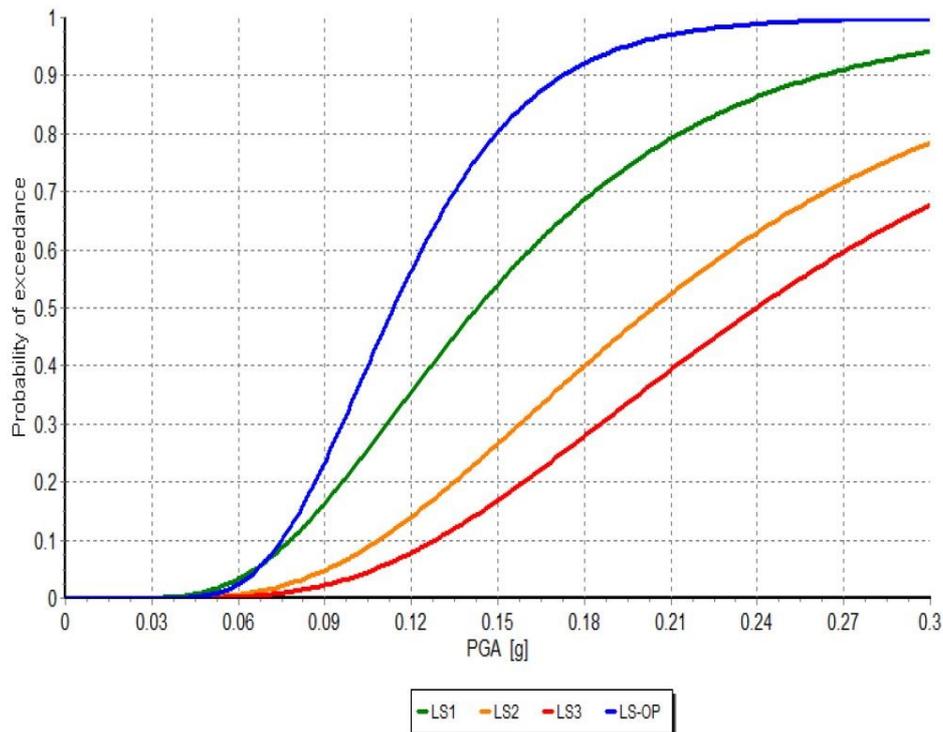


Figura 4-33: Curve di fragilità edifici non monumentali fino a due piani (Borzi, Crowley e Pinho 2008b)

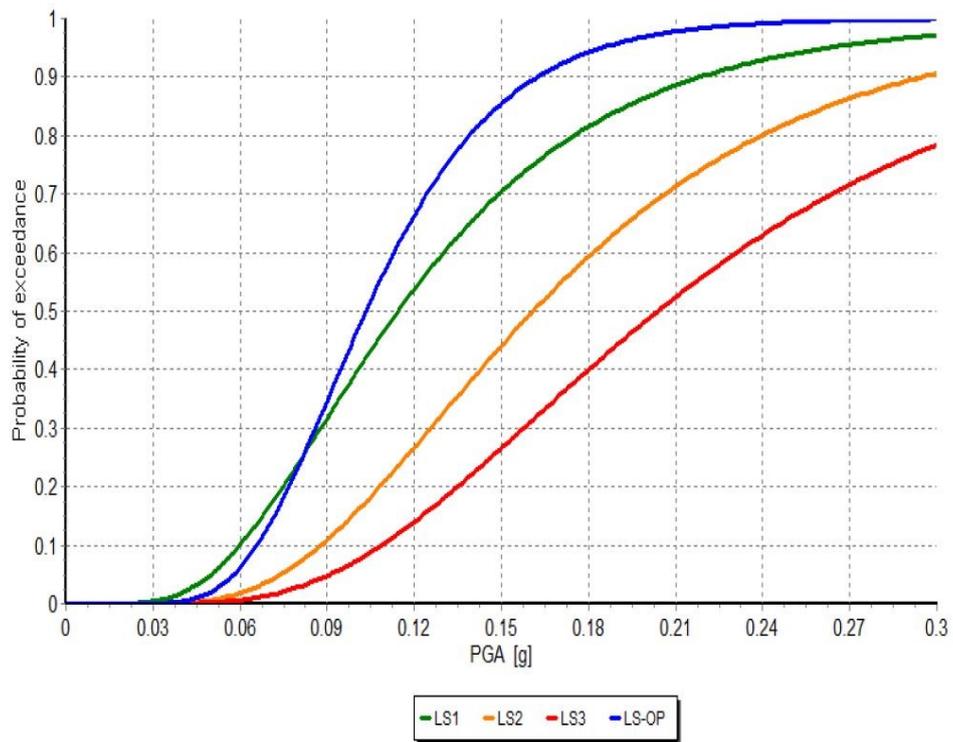


Figura 4-34: Curve di fragilità edifici non monumentali a tre piani (Borzi, Crowley e Pinho 2008b)

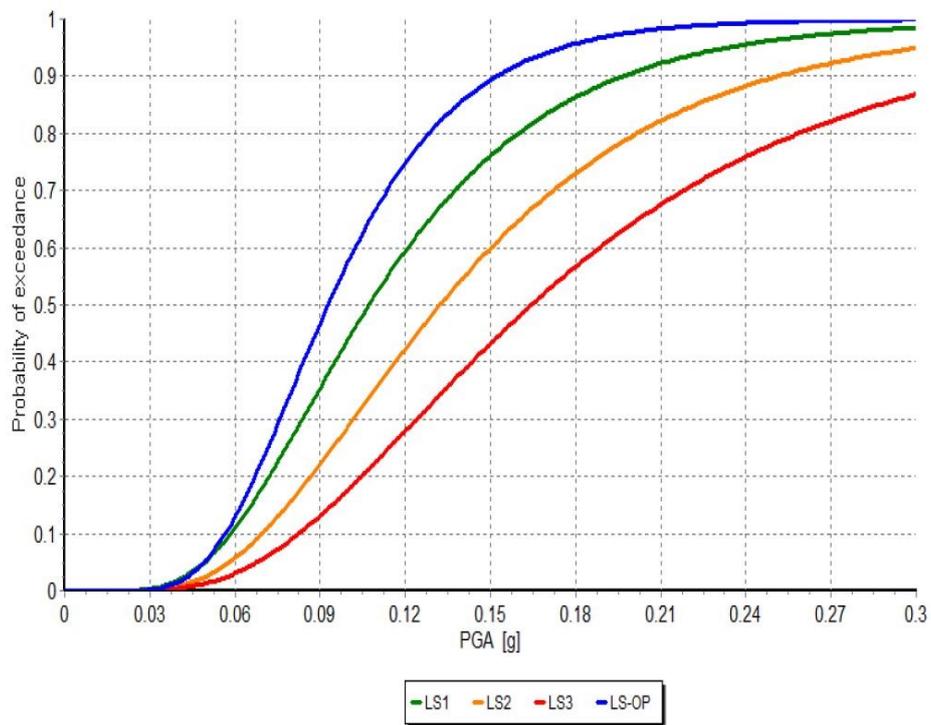
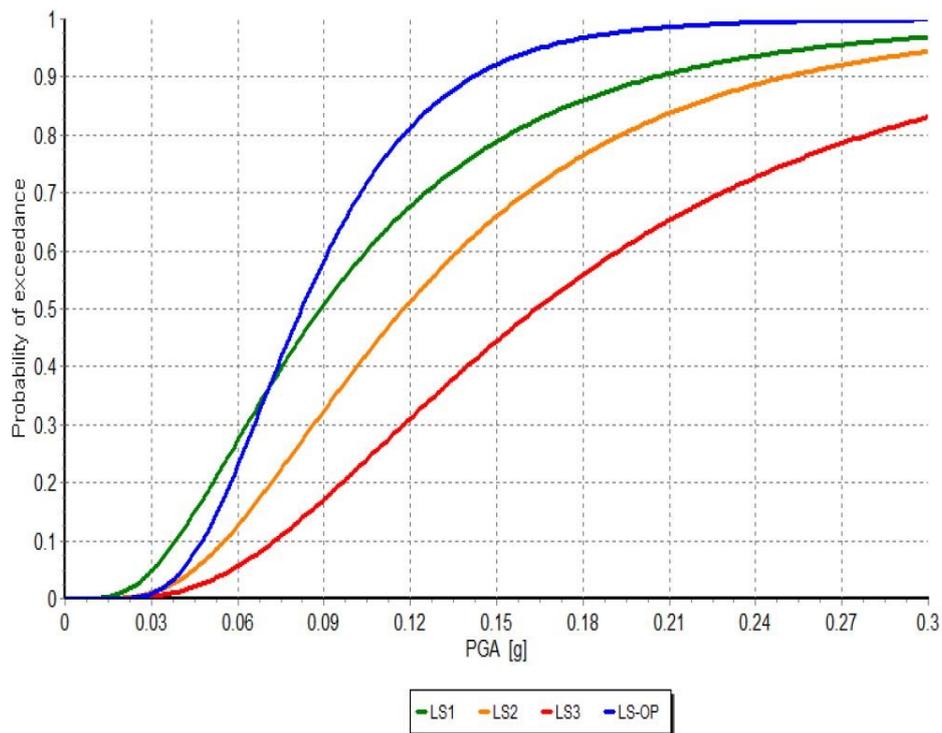


Figura 4-35: Curve di fragilità edifici non monumentali a quattro piani (Borzi, Crowley e Pinho 2008b)



**Figura 4-36: Curve di fragilità edifici non monumentali con un numero di piani da 5 in su (Borzi, Crowley e Pinho 2008b)**

Per quanto riguarda invece la funzione di fragilità che descrive gli edifici monumentali, quali le chiese, è stata utilizzata quella creata da (Lagomarsino e Podestà, *Seismic Vulnerability of Ancient Churches: II. Statistical Analysis of Surveyed Data and Methods for Risk Analysis* 2004) analizzando la vulnerabilità di una serie di chiese in Umbria e nelle Marche. La curva di fragilità presentata in Figura 4-37 è per chiese aventi un indice di vulnerabilità pari a 0.89, indice che descrive il principale comportamento sismico di buona parte delle cattedrali Italiane.

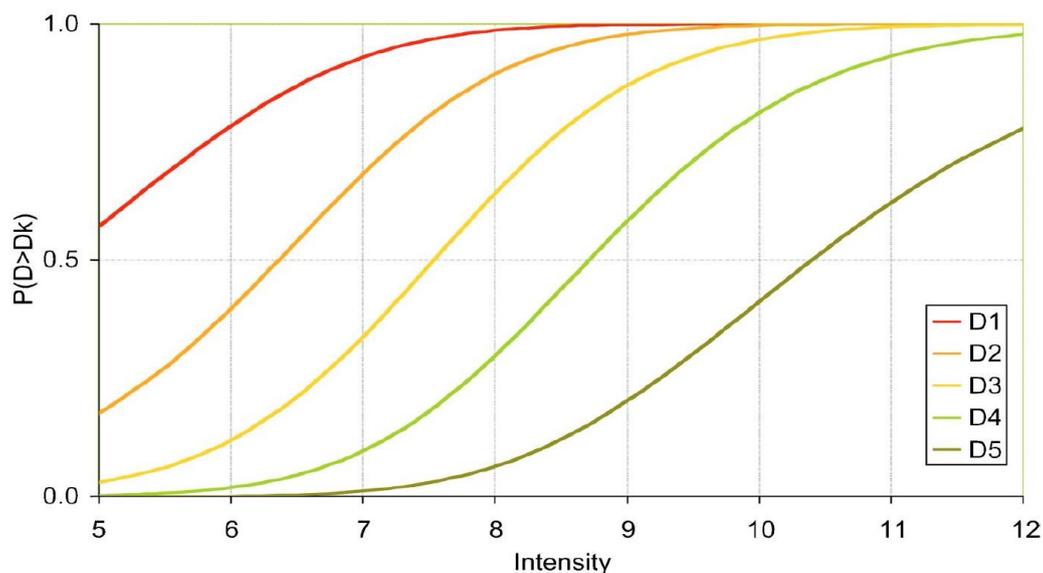


Figura 4-37: Curve di fragilità edifici monumentali (Chiese) (Lagomarsino e Podestà, *Seismic Vulnerability of Ancient Churches: II. Statistical Analysis of Surveyed Data and Methods for Risk Analysis 2004*)

#### 4.5.4 Il modello di vulnerabilità

È fondamentale determinare la vulnerabilità di una struttura per valutare il rischio sismico di un particolare luogo.

Per il centro storico di Moncalieri sono state definite cinque curve di vulnerabilità: quattro funzioni per gli edifici non monumentali ed una funzione per descrivere il comportamento delle chiese.

Le curve di vulnerabilità sono state costruite partendo dalle curve di fragilità individuate nel paragrafo 4.5.3. Le funzioni sono state definite in termini di perdite economiche, valutando il *mean damage factor* (MDF) secondo l'Equazione 5 definita nel paragrafo 3.1. Successivamente le curve sono state create correlando il *mean damage factor*, che identifica il danno provocato dal sisma in termini di perdite economiche, con l'accelerazione al suolo.

Il modello di vulnerabilità è stato elaborato secondo il linguaggio NRML attraverso la piattaforma di Openquake, descrivendo la funzione di vulnerabilità come una funzione discreta, caratterizzata dall'intensità, dal *mean damage factor* e dalla covarianza. Quest'ultima viene definita come l'incertezza legata alla funzione di vulnerabilità ed è stata calcolata secondo le raccomandazioni di (Porter 2010), come definito dal grafico in Figura 4-38 che esprime l'andamento classico della covarianza, decrescente al crescere del *mean damage factor*.

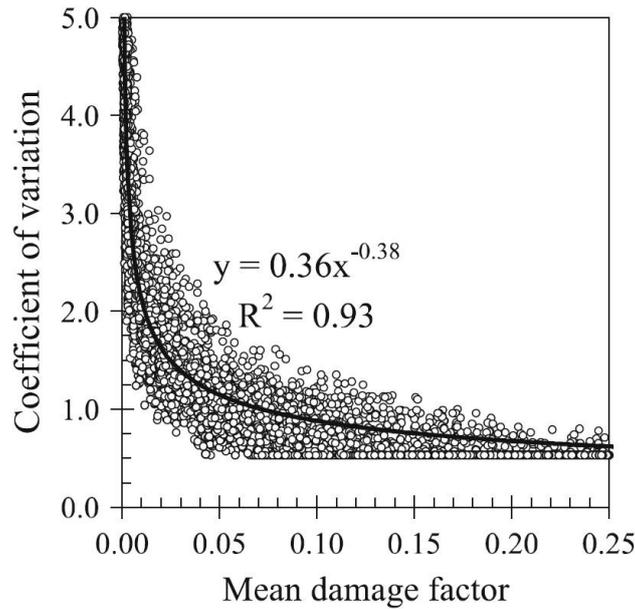


Figura 4-38: Andamento della covarianza secondo (Porter 2010)

Le quattro curve definite per gli edifici non monumentali sono state differenziate in base al numero di piani: si è costruita una curva per le strutture aventi uno o due piani, una curva per quelli aventi tre piani, una per gli edifici a quattro piani ed un'altra per le strutture aventi dai cinque piani in su.

Di seguito vengono proposte le curve di vulnerabilità per gli edifici non monumentali e monumentali utilizzate nella definizione del modello di vulnerabilità per il centro storico di Moncalieri.

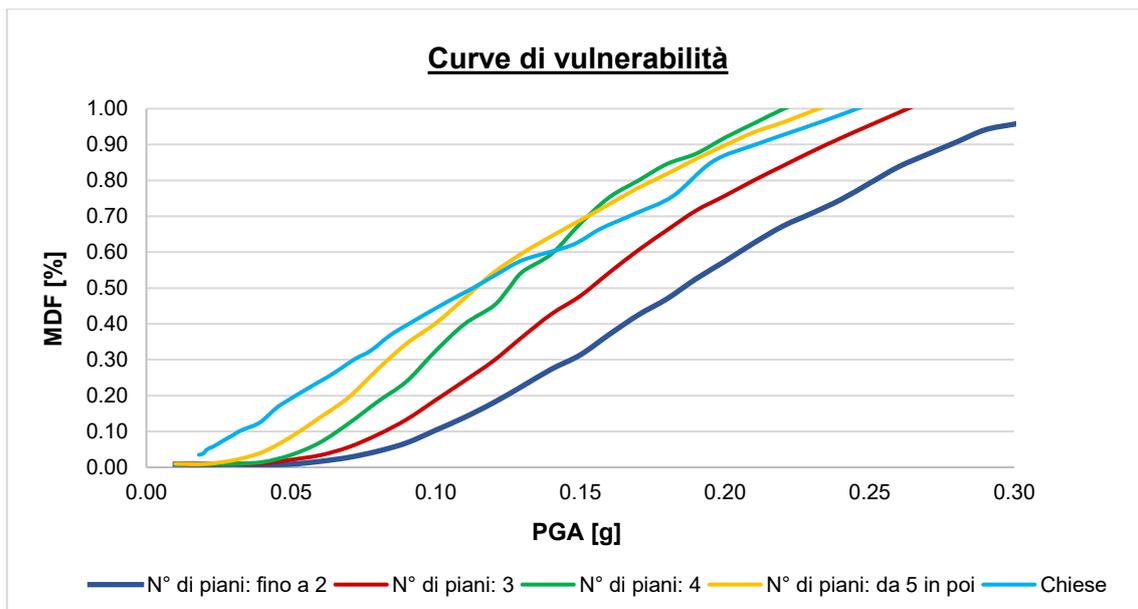


Figura 4-39: Curve di vulnerabilità edifici non monumentali e monumentali utilizzate per il centro storico di Moncalieri

## 4.6 Definizione dei file di configurazione

Come già detto nei paragrafi 2.3 e 2.4, è necessario definire un file di configurazione per calcolare ed ottenere i risultati relativi alle analisi che si andranno ad eseguire. In particolare, per ottenere i movimenti del terreno presunti è necessario calcolare la pericolosità sismica.

La piattaforma OpenQuake permette di realizzare un file zip di configurazione con all'interno i modelli ed i parametri necessari per eseguire il calcolo sia della pericolosità sia del rischio sismico.

Nel caso dell'analisi sismica probabilistica (*stochastic event based probabilistic seismic risk analysis*) il file di configurazione deve contenere i modelli definiti nel paragrafo 4.4 per la valutazione della pericolosità sismica e i modelli di esposizione e di vulnerabilità definiti nei paragrafi 4.5.2 e 4.5.4 rispettivamente. Inoltre, è necessario indicare dei parametri necessari alla definizione del sito e del calcolo della pericolosità.

Il sito viene caratterizzato dal punto di vista sismico e dinamico attraverso la definizione del parametro vs30, che corrisponde alla velocità, in m/s, delle onde di taglio negli strati di terreno presenti nel sito, fino ad una profondità di almeno 30 m dal piano campagna. Tale parametro viene richiesto dalla piattaforma OpenQuake e nel nostro caso è stato posto pari ad 800 m/s, valore che corrisponde ad un terreno formato da depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti. Altri parametri utilizzati per definire il sito sono la profondità minima in cui le onde di taglio hanno una velocità maggiore di 2.5 km/s e 1 km/s e sono state poste rispettivamente pari a 5 km e 100 m.

Per quanto riguarda invece i parametri necessari al calcolo della pericolosità, sono stati richiesti il tipo di intensità con cui i movimenti del suolo devono essere generati (*PGA-peak ground acceleration*), la massima distanza tra la sorgente e il sito (200 km), il troncamento della distribuzione gaussiana, posto pari a 3, il periodo di indagine per il calcolo della pericolosità, assunto di 100 anni e il set di eventi stocastici per percorso dell'albero logico. In questo caso non è stata aggiunta alcun tipo di correlazione spaziale nel calcolo del movimento del terreno.

Nel file di configurazione necessario al calcolo del singolo scenario sismico devono essere inseriti il modello di rottura, definito nel paragrafo 4.5.1 e il modello di fragilità (paragrafo 4.5.3) nel caso di *scenario damage assessment* o il modello di vulnerabilità (paragrafo 4.5.4) nel caso di *scenario risk assessment*. Inoltre, devono essere definiti una serie di parametri descrittivi del sito di interesse e il tipo di calcolo che si andrà ad eseguire. Per quanto riguarda la descrizione del sito, sono stati richiesti ed utilizzati gli stessi parametri definiti sopra per il calcolo dell'analisi probabilistica.

Invece, per il calcolo del movimento del terreno, è stato necessario scegliere l'equazione (*GMPEs-ground motion prediction equations*) che governasse tale calcolo, la correlazione spaziale, il livello di troncamento della distribuzione gaussiana utilizzata nel calcolo della pericolosità, la distanza massima della sorgente che contribuirà al calcolo del pericolo e il numero di movimenti del terreno.

L'equazione scelta per prevedere i movimenti del terreno è quella definita da Bindi (2011), limitata alla zona Italiana, utilizzata per magnitudo momento comprese tra 4.1 e 6.9 (Douglas

2019). Nel caso di singoli scenari è stata anche utilizzata una correlazione spaziale definita da Jayaram e Baker (JB2009). Tale correlazione viene utilizzata in applicazioni dove si richiede la conoscenza congiunta di movimenti del terreno in diversi siti durante lo stesso terremoto. La predizione dei movimenti del terreno in differenti siti può essere calcolata se si conosce la correlazione tra questi due elementi; ignorare o sottostimare tale correlazione può portare a sovrastimare le perdite frequenti e sottostimare quelle più rare (Jayarama e Baker 2009).

## 4.7 Elaborazione dati: risultati ottenuti

Come già anticipato nel paragrafo 4.3 le analisi eseguite sul centro storico di Moncalieri sono: *stochastic event based probabilistic seismic risk analysis*, *scenario damage assessment* e *scenario risk assessment*.

Queste tre analisi forniscono risultati molto differenti tra di loro; infatti, se nell'analisi *stochastic event based probabilistic seismic risk analysis* viene valutato il rischio sismico, in termini di perdite economiche (esprese in €), considerando un set di eventi sismici stocastici, ossia valutando movimenti del terreno che possono verificarsi con ogni probabilità nella zona considerata, nelle analisi *scenario damage assessment* e *scenario risk assessment* vengono invece fornite mappe relative alla distribuzione del danno e alle perdite economiche di uno specifico scenario sismico.

Di seguito verranno riportati i risultati ottenuti.

### 4.7.1 *Stochastic event based probabilistic seismic risk analysis output*

Nell'analisi probabilistica è fondamentale valutare la pericolosità sismica del sito oggetto di studio. Di conseguenza, vengono riportate le mappe di pericolosità sismica dell'intero Piemonte (Figura 4-40; Figura 4-41; Figura 4-42; Figura 4-43; Figura 4-44) e, subito di seguito, le mappe di pericolosità sismica relative al centro storico di Moncalieri (Figura 4-45; Figura 4-46; Figura 4-47; Figura 4-48; Figura 4-49; Figura 4-50). Le prime sono state reperite dal sito dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (Meletti e Montaldo 2006) mentre le seconde sono il risultato dell'elaborazione dei file di input descritti nel paragrafo 4.4 calcolati attraverso il motore OpenQuake-engine.

Come si può notare, il Piemonte è una zona non sismica, solo nelle zone del Pinerolese e delle Alpi Marittime la sismicità tende ad aumentare. Si può notare inoltre come, la pericolosità sismica aumenti al diminuire del tasso annuale di superamento.

Focalizzandosi sul centro storico di Moncalieri, le mappe di pericolosità sismica mostrano che possono verificare sismi con accelerazioni al suolo piuttosto basse, comprese tra 0.17, per tempi di ritorno più alti, e 0.05, per tempi di ritorno più bassi

### 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.

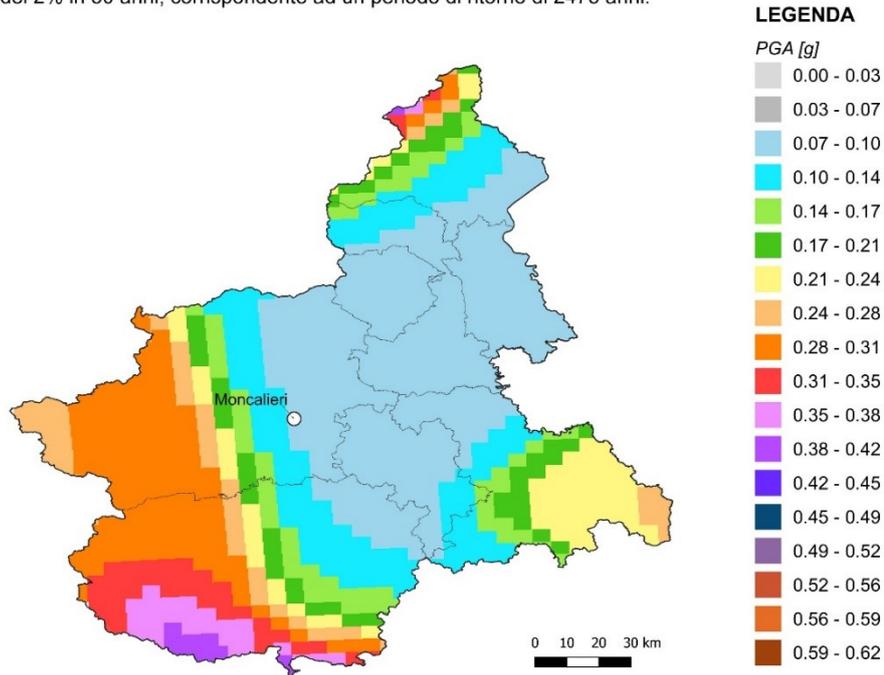


Figura 4-40: Mappa di pericolosità sismica del Piemonte calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 2% in 50 anni

### Mappa Pericolosità Sismica del Piemonte

Mappa pericolosità sismica del Piemonte, considerando una probabilità di eccedenza del 5% in 50 anni, corrispondente ad un periodo di ritorno di 975 anni.

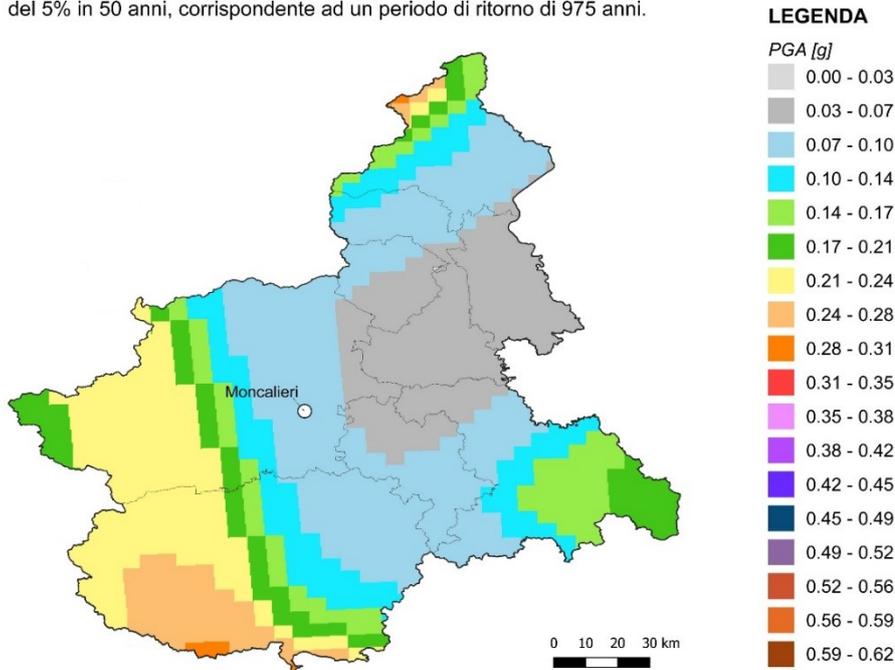


Figura 4-41: Mappa di pericolosità sismica del Piemonte calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 5% in 50 anni

### 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.

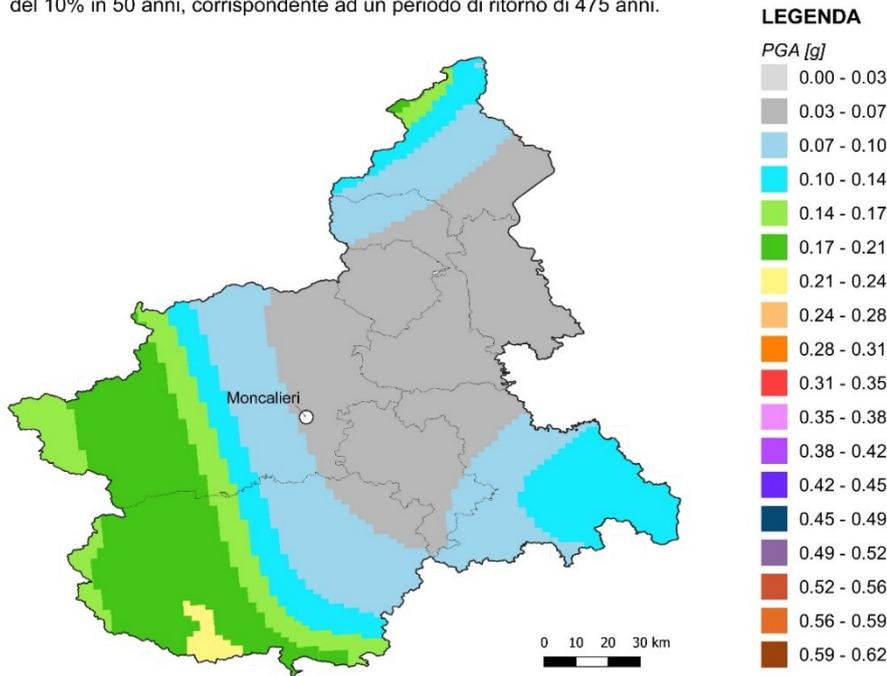


Figura 4-42: Mappa di pericolosità sismica del Piemonte calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni

### 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.

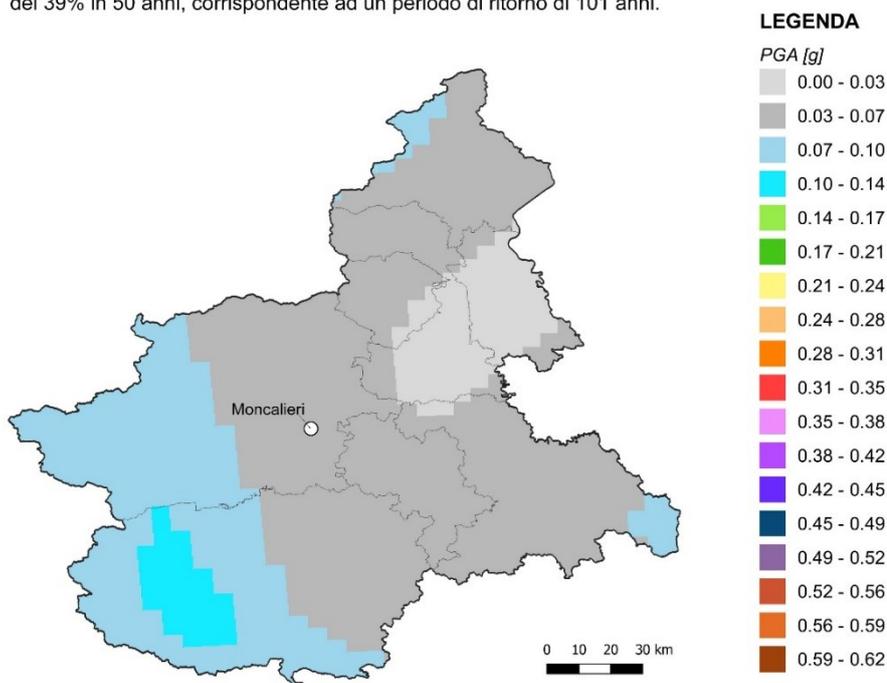
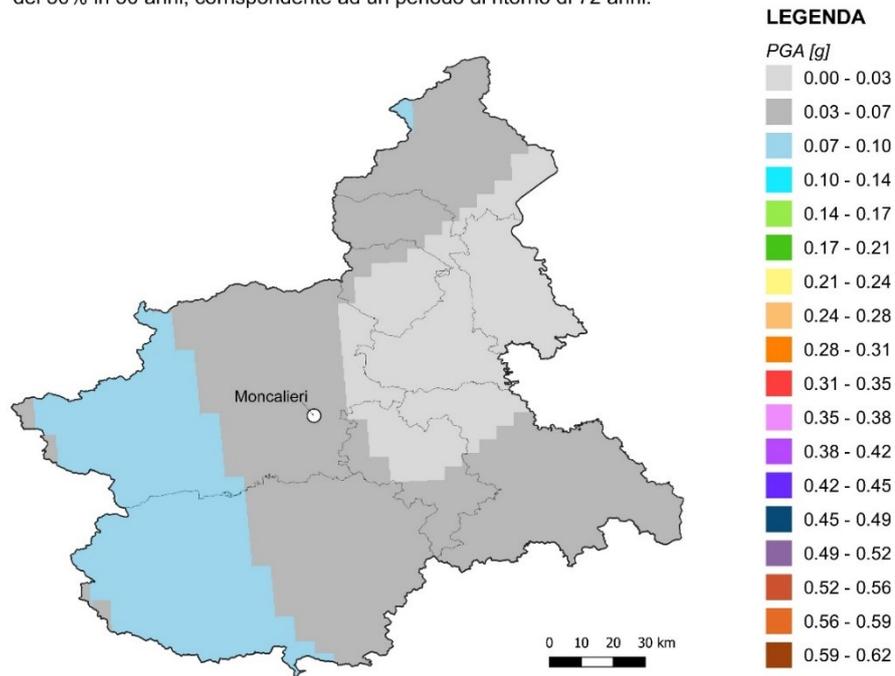


Figura 4-43: Mappa di pericolosità sismica del Piemonte calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 39% in 50 anni

### 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 4-44: Mappa di pericolosità sismica del Piemonte calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 50% in 50 anni**

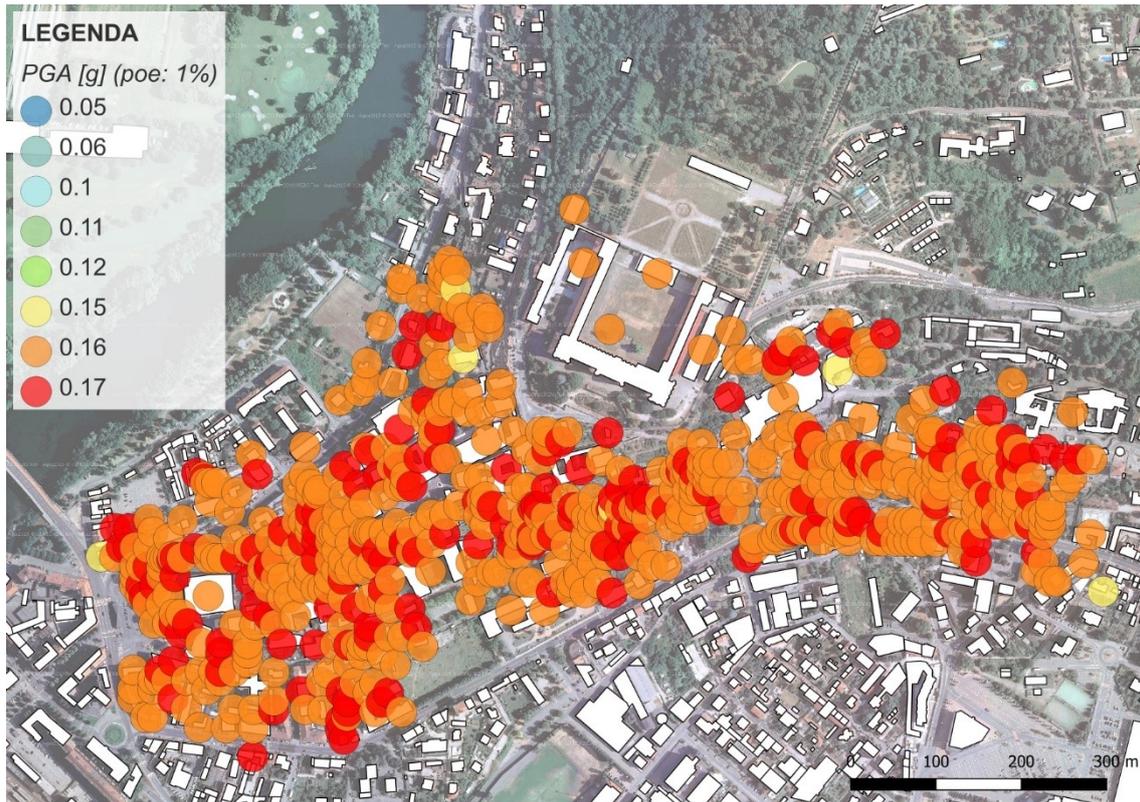


Figura 4-45: Mappa di pericolosità sismica del centro storico di Moncalieri calcolata considerando una probabilità di eccedenza dell'1% in 50 anni

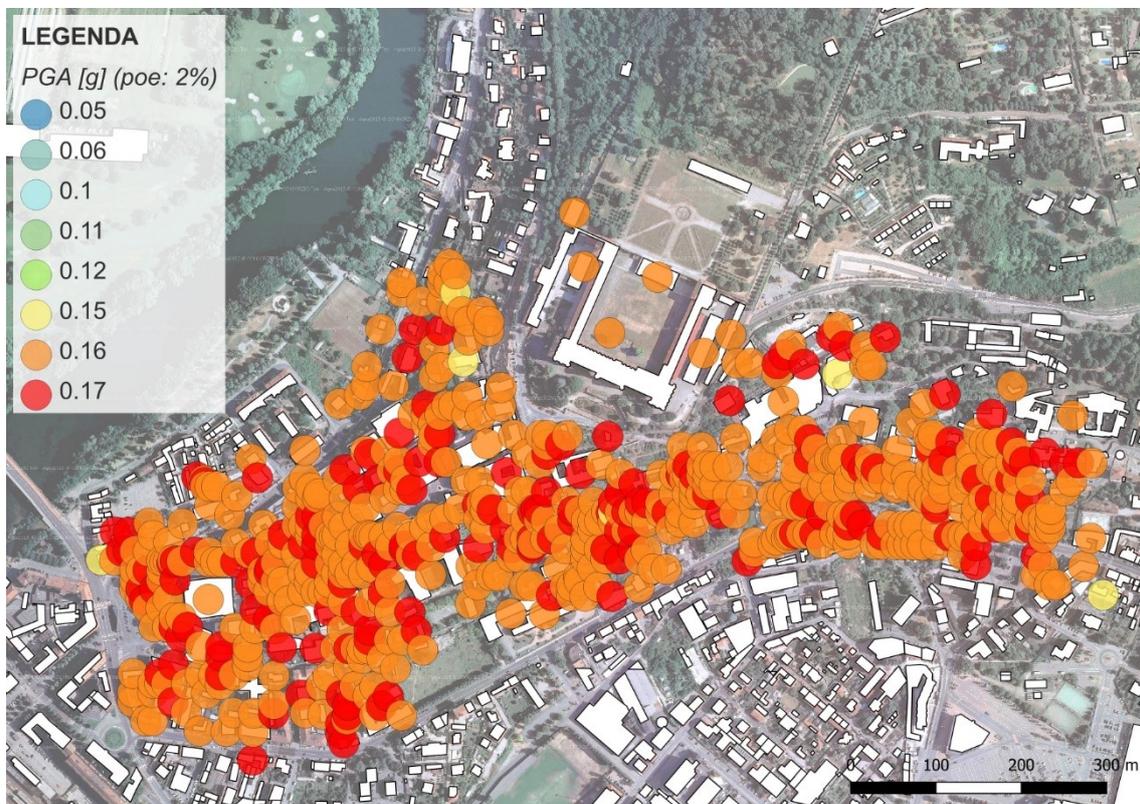


Figura 4-46: Mappa di pericolosità sismica del centro storico di Moncalieri calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 2% in 50 anni

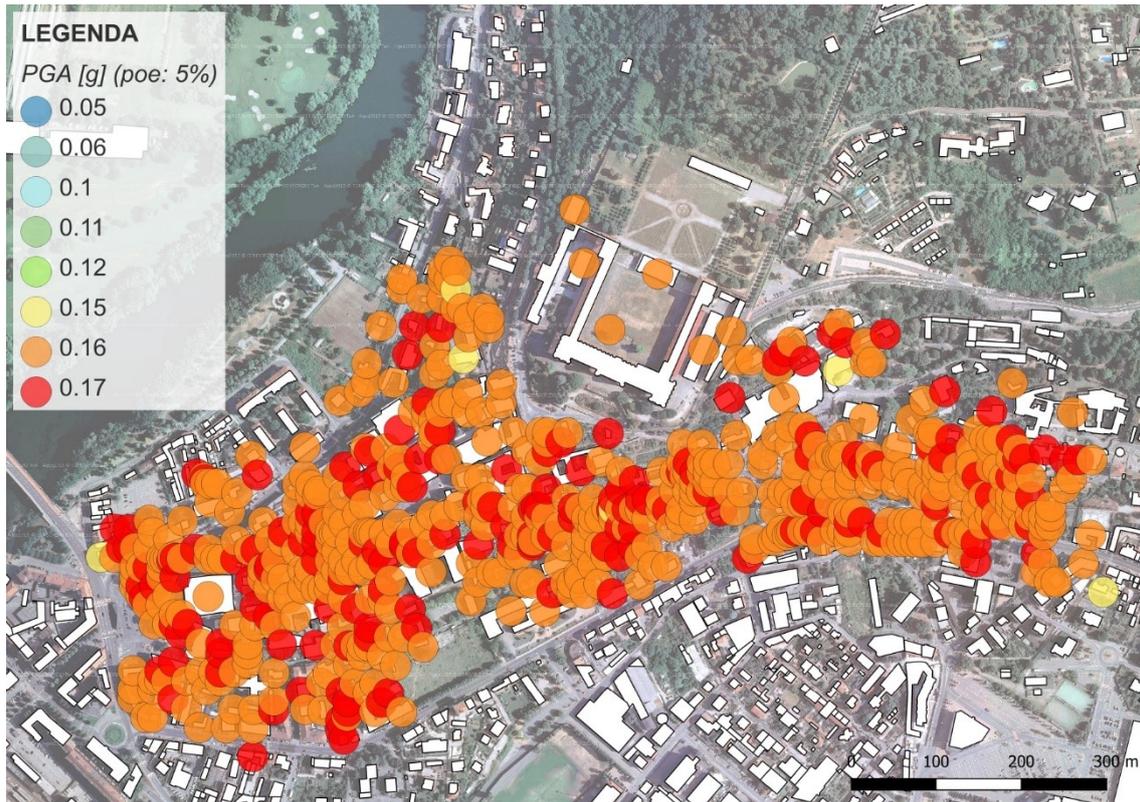


Figura 4-47: Mappa di pericolosità sismica del centro storico di Moncalieri calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 5% in 50 anni

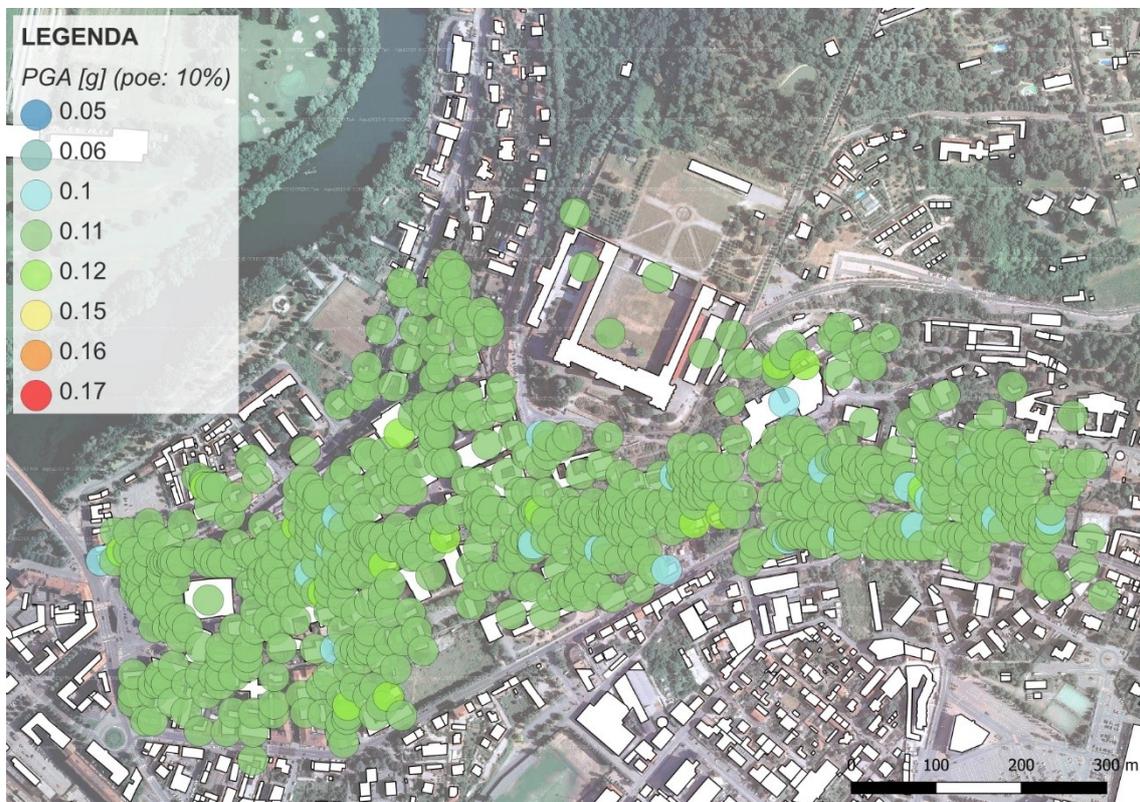


Figura 4-48: Mappa di pericolosità sismica del centro storico di Moncalieri calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni

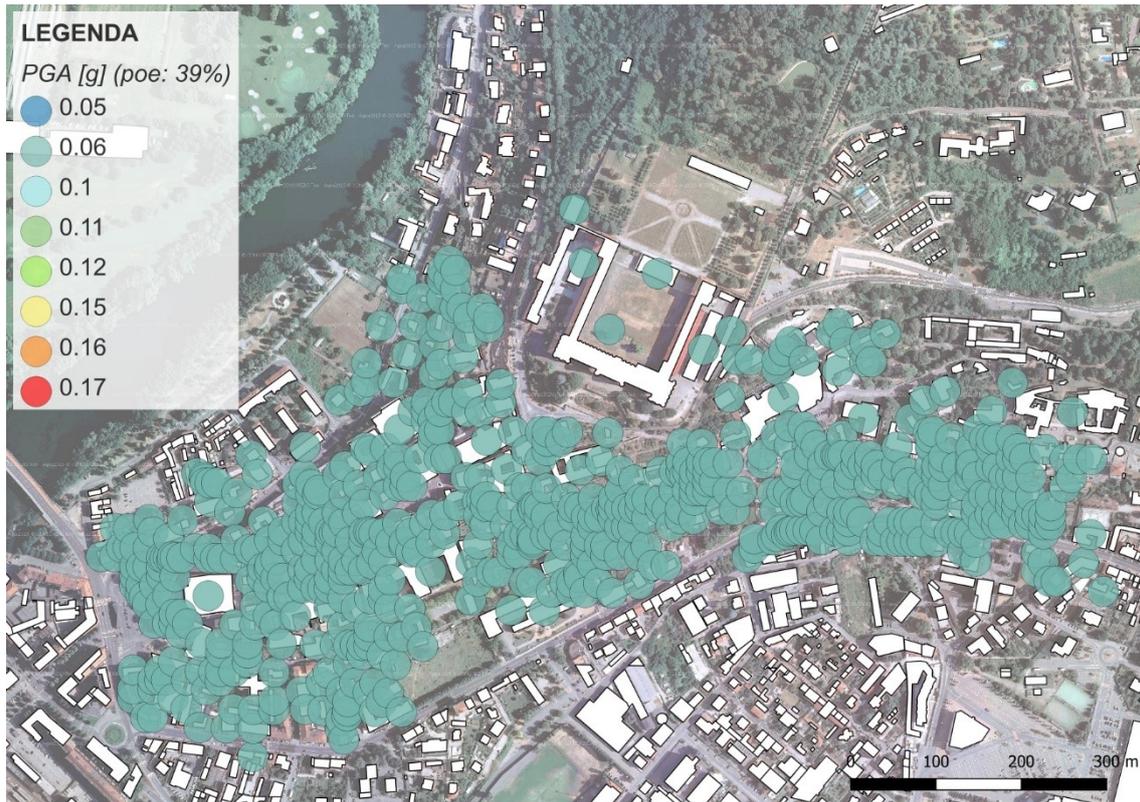


Figura 4-49: Mappa di pericolosità sismica del centro storico di Moncalieri calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 39% in 50 anni

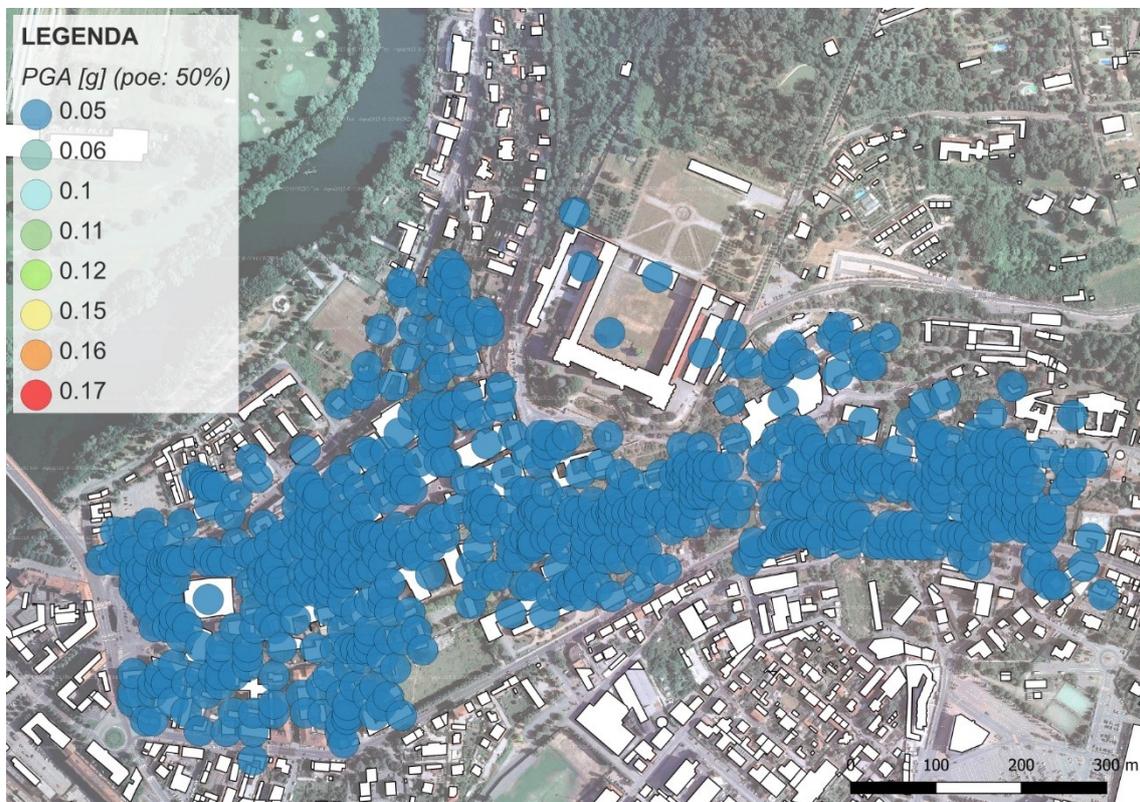


Figura 4-50: Mappa di pericolosità sismica del centro storico di Moncalieri calcolata considerando una probabilità di eccedenza dell'50% in 50 anni

Successivamente si è calcolato il rischio sismico del centro storico di Moncalieri considerando un set di eventi sismici probabilistici. OpenQuake utilizza un modello sismogenetico, elaborato attraverso il calcolo della pericolosità sismica, che genera diverse possibili realizzazioni all'interno di un determinato lasso di tempo; nel nostro caso si è osservato un periodo di 100 anni. Le mappe del rischio sono il risultato dell'elaborazione dei modelli di esposizione, di vulnerabilità e del set di movimenti stocastici del terreno. Tali mappe definiscono le perdite economiche medie e sono state calcolate per probabilità di eccedenza dell'1% (Figura 4-51), del 2% (Figura 4-52), del 5% (Figura 4-53), del 10% (Figura 4-54), del 39% (Figura 4-55) e del 50% (Figura 4-56) in 50 anni, riferendosi alle accelerazioni al suolo rappresentate nelle mappe di pericolosità sismica del centro storico di Moncalieri in Figura 4-45; Figura 4-46; Figura 4-47; Figura 4-48; Figura 4-49; Figura 4-50.

Si può notare come, nelle mappe del rischio sismico con probabilità di eccedenza dell'1%, del 2%, del 5% e del 10% le perdite in termini economici sono pressoché le stesse, in quanto le accelerazioni al suolo considerate sono comprese tra 0.17 e 0.11. In questi casi le perdite economiche sono distribuite lungo tutte le fasce, come si può notare dagli istogrammi rappresentati a fianco delle mappe, con un massimo di 4'889'440€ per il castello di Moncalieri. Per probabilità di eccedenza pari al 39% ed al 50%, considerando accelerazioni del suolo di 0.06 e 0.05 rispettivamente, le perdite economiche diminuiscono e buona parte degli edifici si concentrano nella fascia compresa tra 0 € a 15'000 €.

Le perdite maggiori si hanno per gli edifici la cui la superficie in pianta è considerevole, in quanto si sono utilizzati dei prezzi di ristrutturazione e/o ricostruzione parametrici (€/m<sup>2</sup>), quali per esempio il castello, l'ospedale, le scuole, ecc., inoltre si può notare una perdita economica leggermente superiore per gli edifici vincolati rispetto a quelli non vincolati in quanto per i primi si è aggiunta una maggiorazione dei costi considerati (secondo quanto già detto nel paragrafo 2.4.1).

Se vengono confrontate le mappe del centro storico di Moncalieri con quelle definite per regioni ad alta sismicità si può notare come le perdite economiche da noi calcolate sono piuttosto contenute, in quanto il Piemonte ha un rischio sismico basso, ma da non sottovalutare.

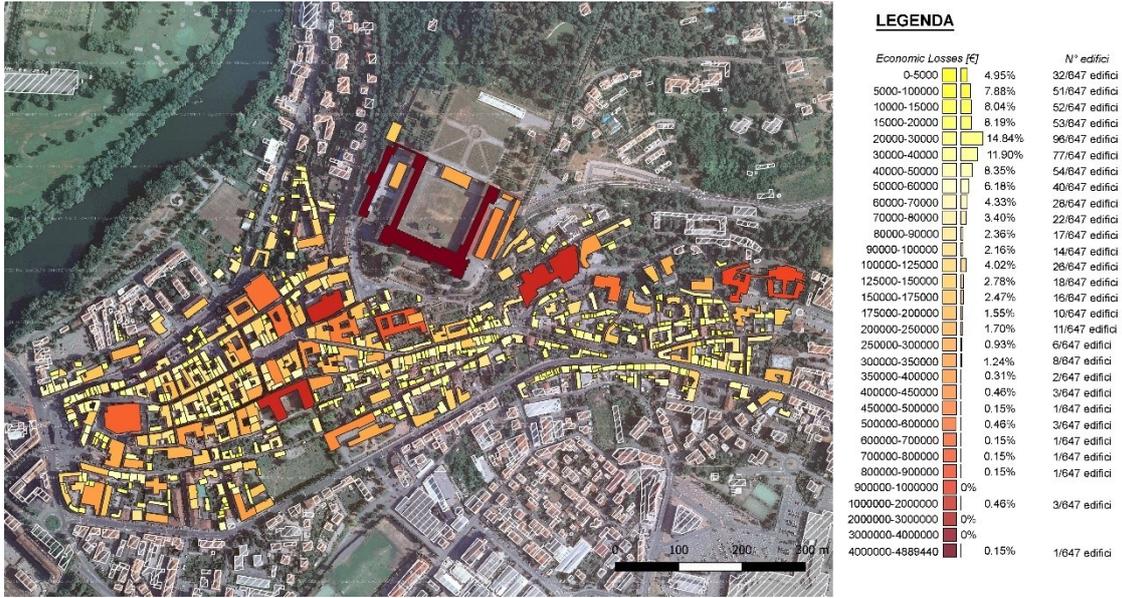


Figura 4-51: Mappa del rischio sismico del centro storico di Moncalieri considerando una probabilità di eccedenza dell'1% in 50 anni

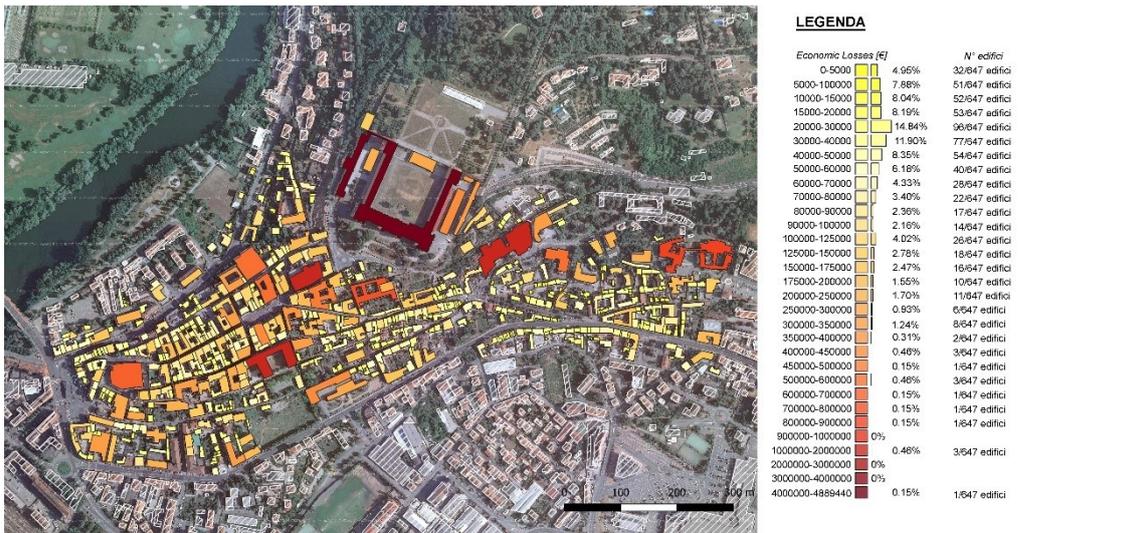


Figura 4-52: Mappa del rischio sismico del centro storico di Moncalieri considerando una probabilità di eccedenza del 2% in 50 anni

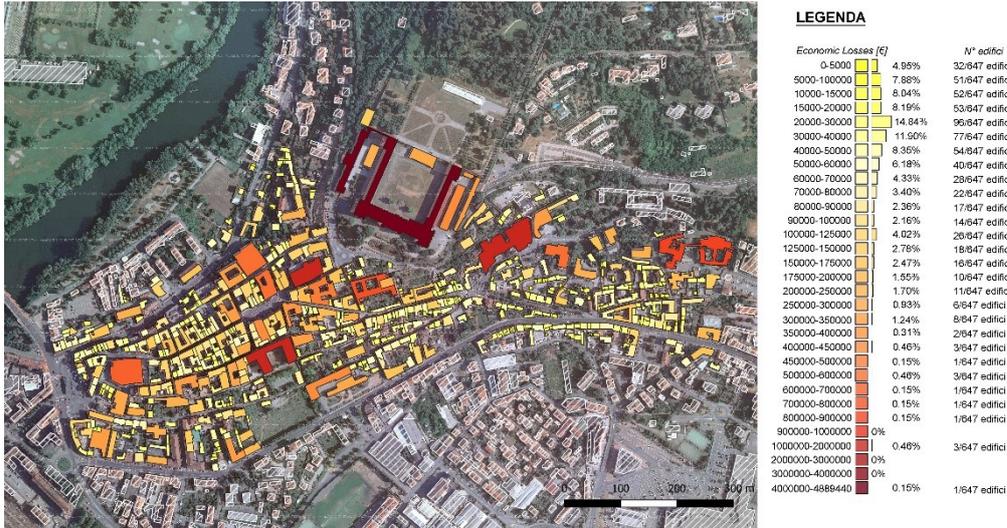


Figura 4-53: Mappa del rischio sismico del centro storico di Moncalieri considerando una probabilità di eccedenza del 5% in 50 anni

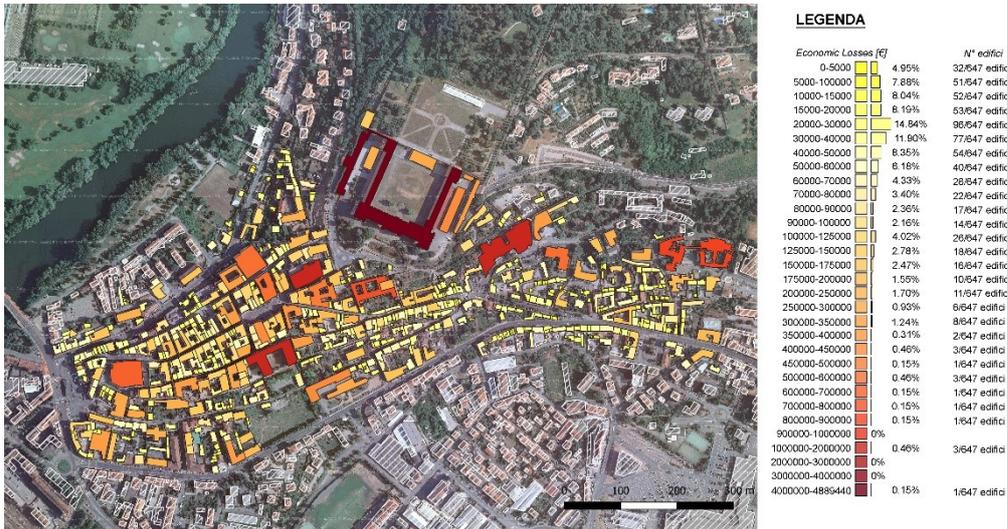


Figura 4-54: Mappa del rischio sismico del centro storico di Moncalieri considerando una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni

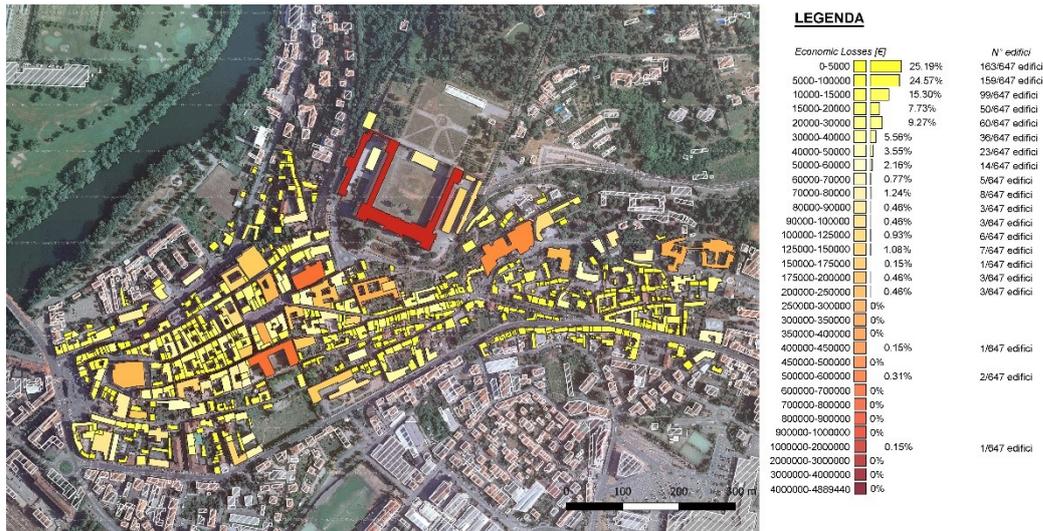


Figura 4-55: Mappa del rischio sismico del centro storico di Moncalieri considerando una probabilità di eccedenza del 39% in 50 anni

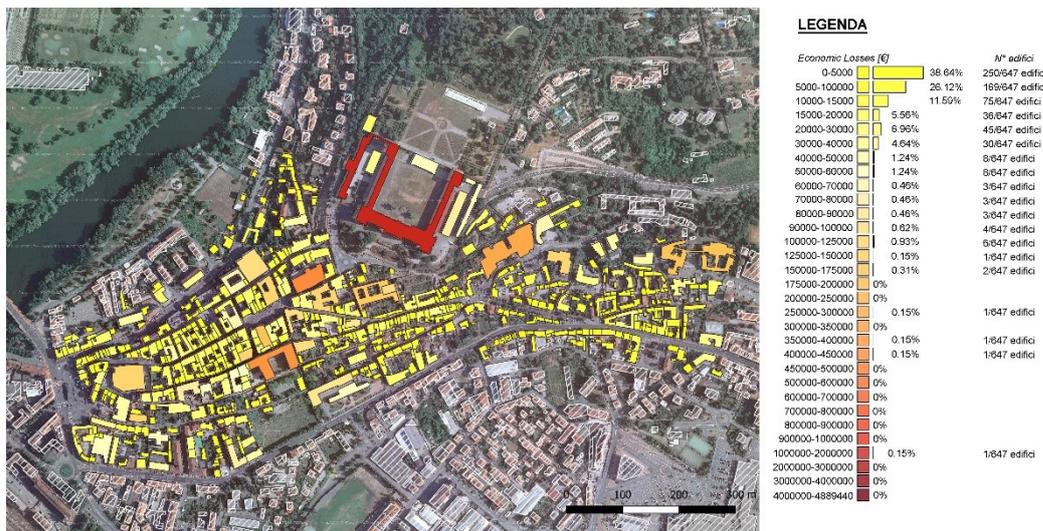
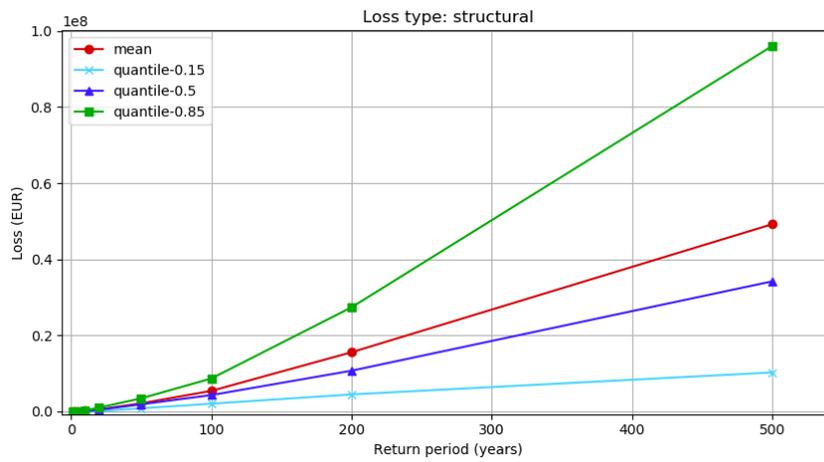


Figura 4-56: Mappa del rischio sismico del centro storico di Moncalieri considerando una probabilità di eccedenza del 50% in 50 anni

Inoltre, tale analisi fornisce le curve di perdita (Figura 4-57), che descrivono la probabilità di superamento delle perdite economiche totali, ossia considerando tutti i beni catalogati, in un dato intervallo di tempo, fornendo la relazione tra i differenti livelli di perdita e un determinato periodo di ritorno. Queste curve possono fornire informazioni critiche per sviluppare misure adatte a ridurre il rischio, possono essere anche utilizzate per definire differenti scenari sismici associati ai diversi periodi di ritorno, oppure è possibile utilizzare tali curve per progettare dei piani di emergenza post-disastro o per valutare la necessità di rifugi temporanei.



**Figura 4-57: Curve di perdita per l'intero centro storico di Moncalieri**

Dal grafico si può notare come, per un periodo di ritorno di 500 anni si ha una perdita economica totale (considerando quindi tutti gli edifici all'interno del centro storico di Moncalieri) pari a 32'869'200 €.

#### 4.7.2 Scenario damage assessment e scenario risk assessment analysis output

Le analisi *scenario damage assessment* e *scenario risk assessment* viaggiano parallelamente in quanto per ogni scenario sismico (descritti nel paragrafo 4.5.1) viene valutata la distribuzione del danno e le corrispondenti perdite economiche. Soltanto per la simulazione dei terremoti storici del 1808 in Val Pellice e del 1887 in Liguria non sono state stimate le perdite economiche in quanto sarebbe stato inutile, considerando anche la differente moneta presente in quegli anni. I dodici scenari sismici sono stati simulati considerando la distribuzione attuale del centro storico di Moncalieri e gli edifici ad oggi presenti e, anche per gli scenari storici, si è considerato l'abitato odierno e non quello del 1800.

L'analisi *scenario damage assessment* fornisce una mappa che illustra la distribuzione del danno per ognuno dei 647 edifici considerati. La mappa fornisce la probabilità che si verifichi un determinato stato di rottura considerando quattro livelli di danno -no damage, slight, moderate, collapse- che possono avere luogo a causa del singolo evento.

Per ogni distribuzione del danno si è calcolata, attraverso l'analisi *scenario risk assessment*, la perdita economica per ogni singolo scenario.

##### Val Pellice, terremoto storico del 1808

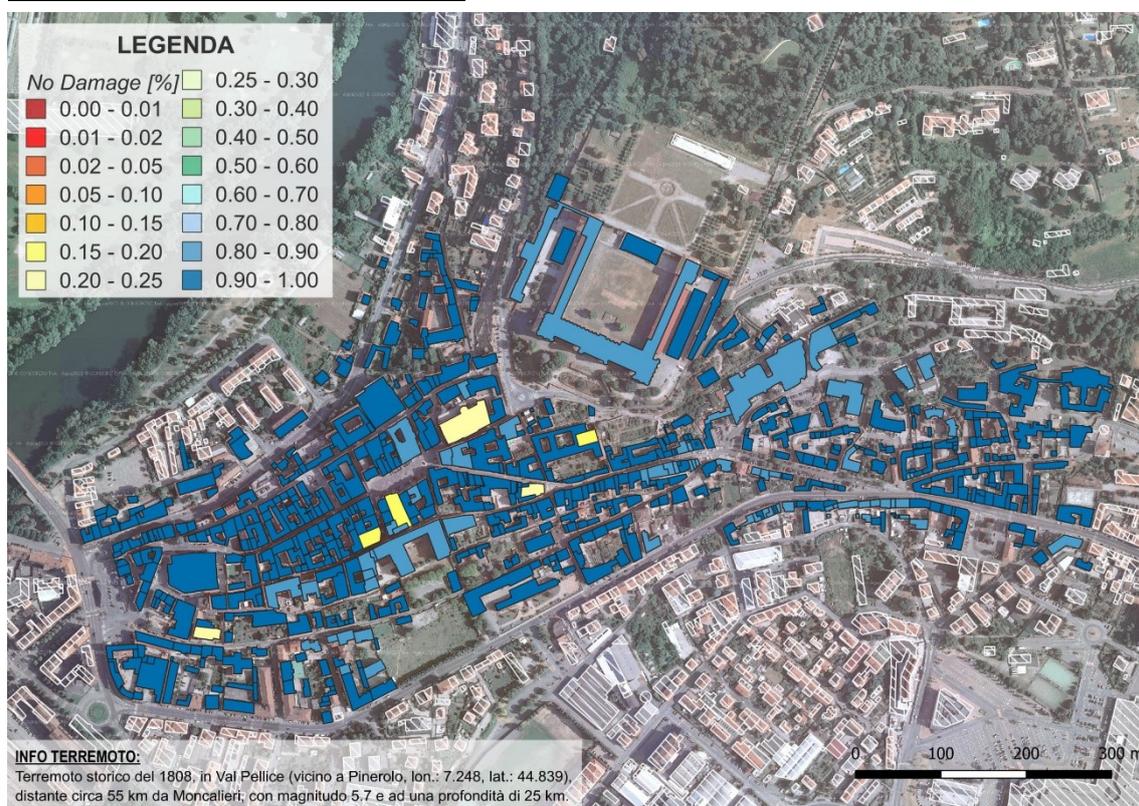
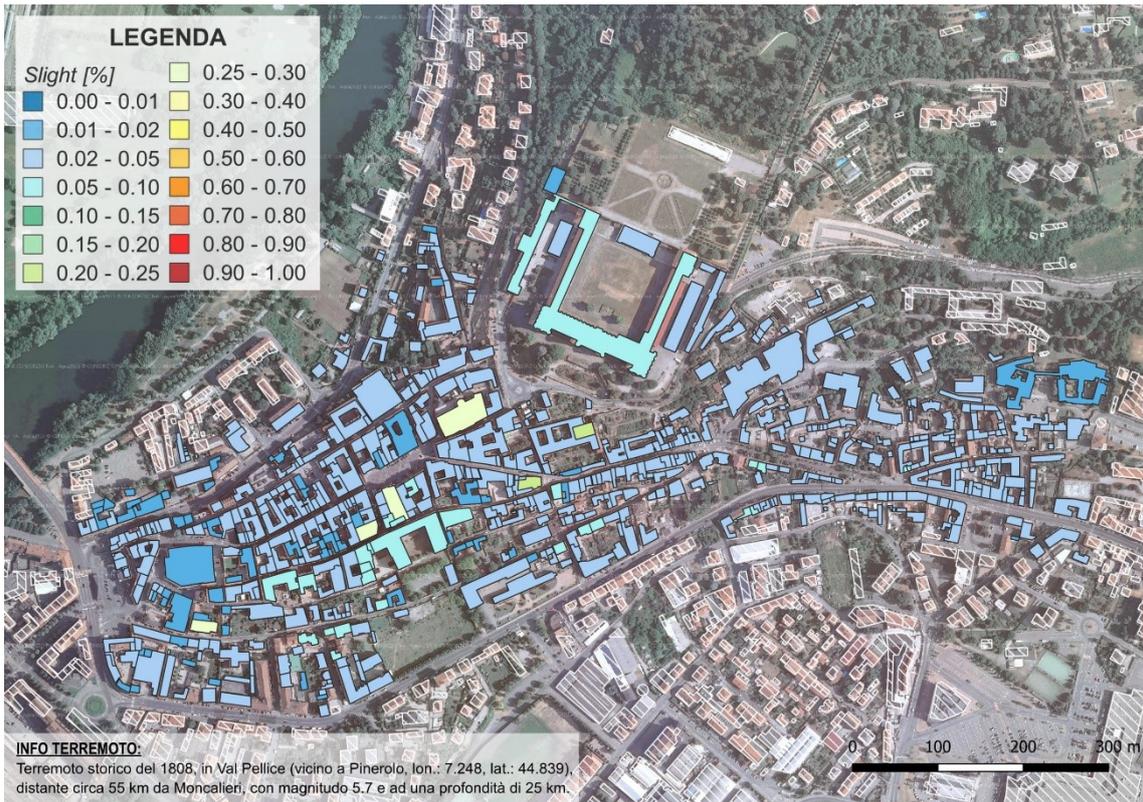
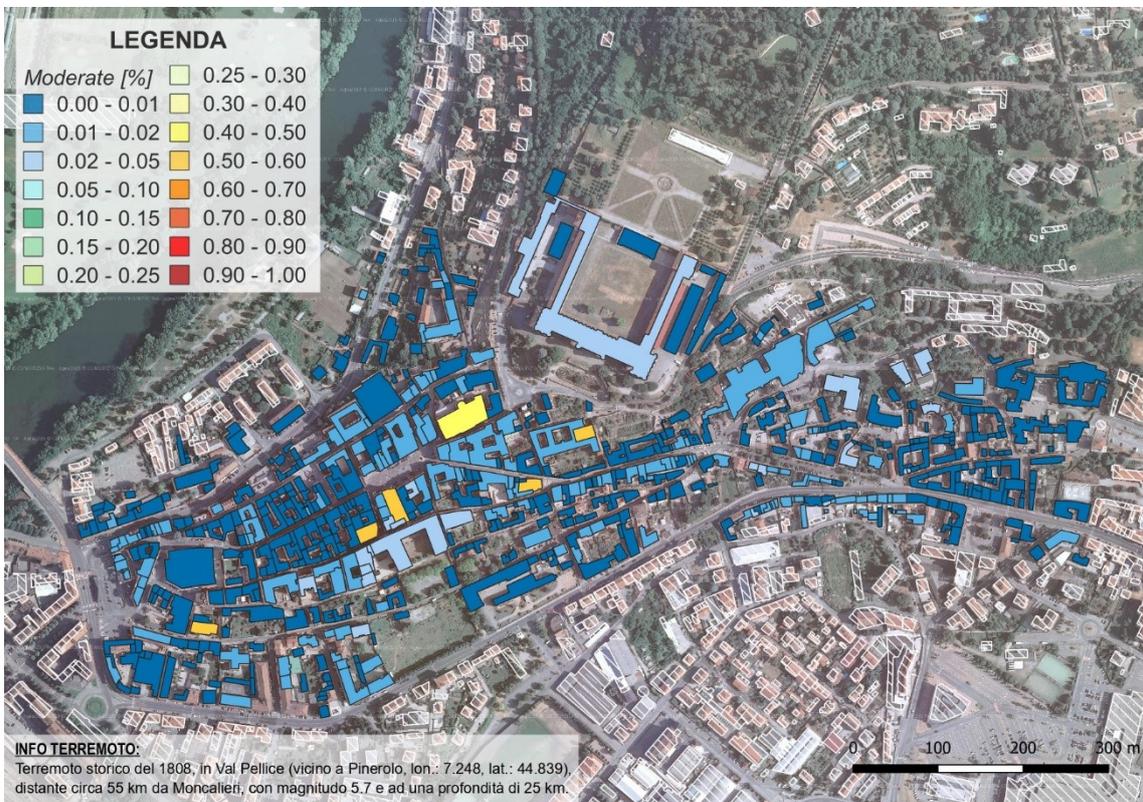


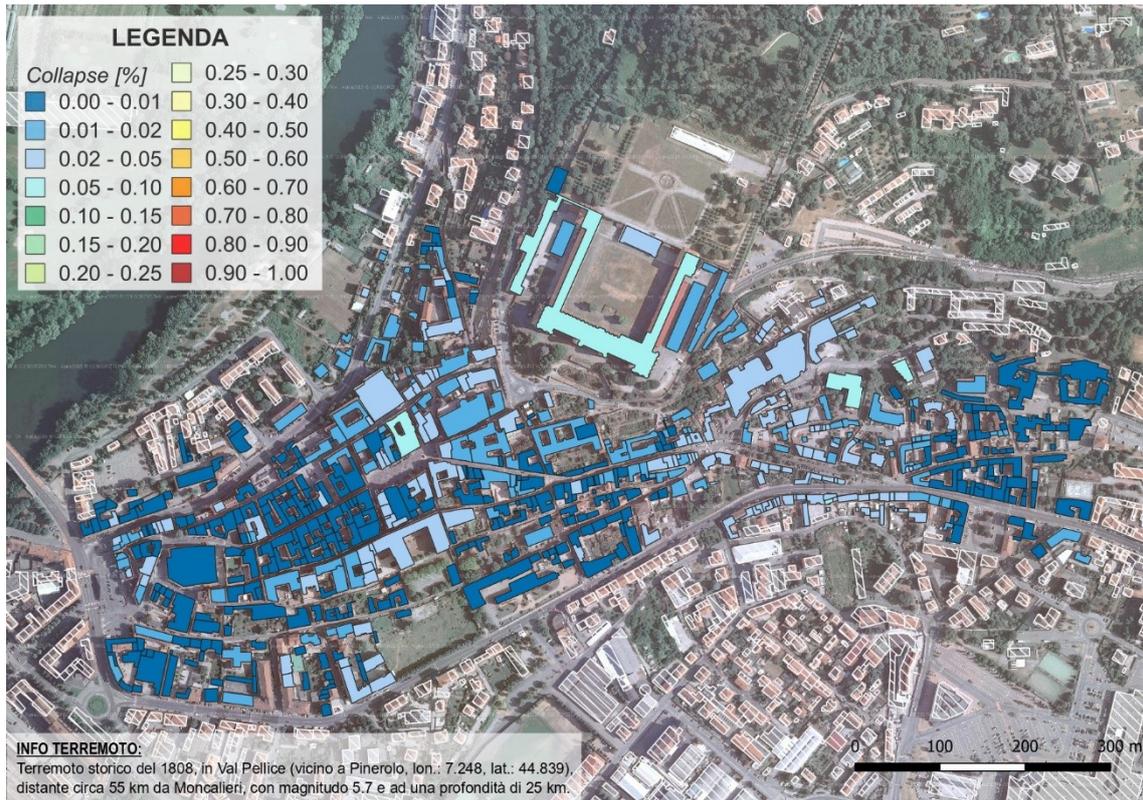
Figura 4-58: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando il terremoto storico del 1808 con epicentro in Val Pellice – No damage



**Figura 4-59: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando il terremoto storico del 1808 con epicentro in Val Pellice – Slight**



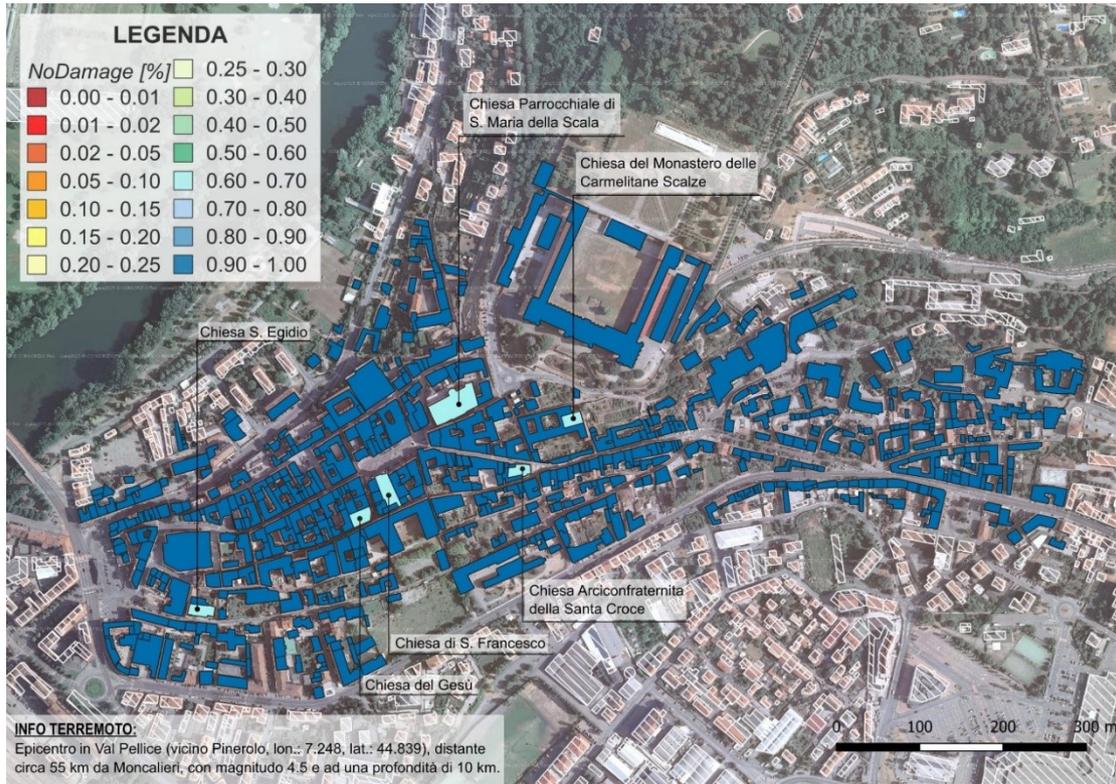
**Figura 4-60: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando il terremoto storico del 1808 con epicentro in Val Pellice – Moderate**



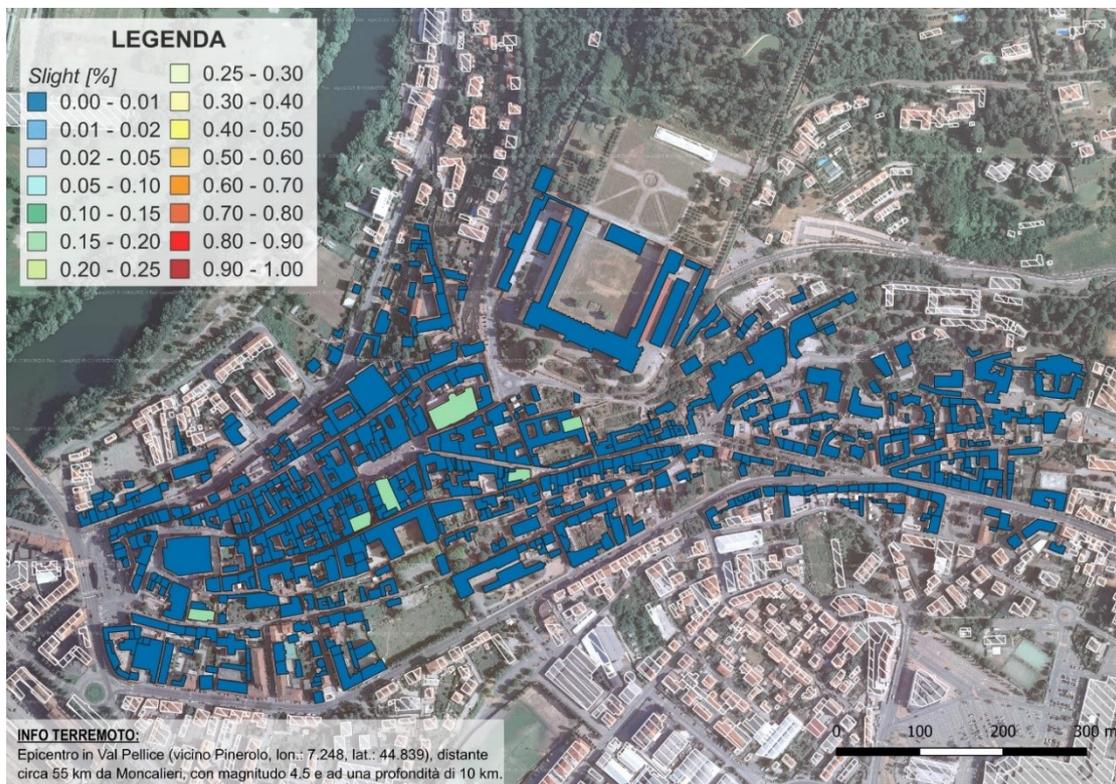
**Figura 4-61: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando il terremoto storico del 1808 con epicentro in Val Pellice – Collapse**

Qualora oggi si verificasse un terremoto di magnitudo 5.7, uguale a quello del 1808, con epicentro in Val Pellice, si nota dalla Figura 4-58 che la maggior parte degli edifici ha una probabilità compresa tra l'80% ed il 100% di non essere danneggiati. Fatta eccezione per le chiese che hanno una probabilità di non danneggiarsi pari al 15%-25% (elementi gialli), strutture più vulnerabili, in cui i meccanismi di rottura rischiano di attivarsi anche nel caso di terremoti con magnitudo molto basse. In Figura 4-59 si può notare come la probabilità che si verifichi un leggero danneggiamento delle strutture è molto bassa, con un massimo del 10% per il castello di Moncalieri. La Figura 4-60 mostra che la probabilità che si verifichi un danno moderato alle strutture è pari al massimo al 5% per la maggior parte delle strutture del centro storico, fatta eccezione per gli edifici monumentali in cui la percentuale di probabilità che si possono danneggiare gravemente è piuttosto alta (compresa tra il 40% ed il 60%). Infine, in Figura 4-61 si può notare come nessun edificio ha una concreta probabilità di poter giungere al collasso.

Val Pellice, magnitudo 4.5



**Figura 4-62:** Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 4.5 con epicentro in Val Pellice – *No damage*



**Figura 4-63:** Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 4.5 con epicentro in Val Pellice – *Slight*

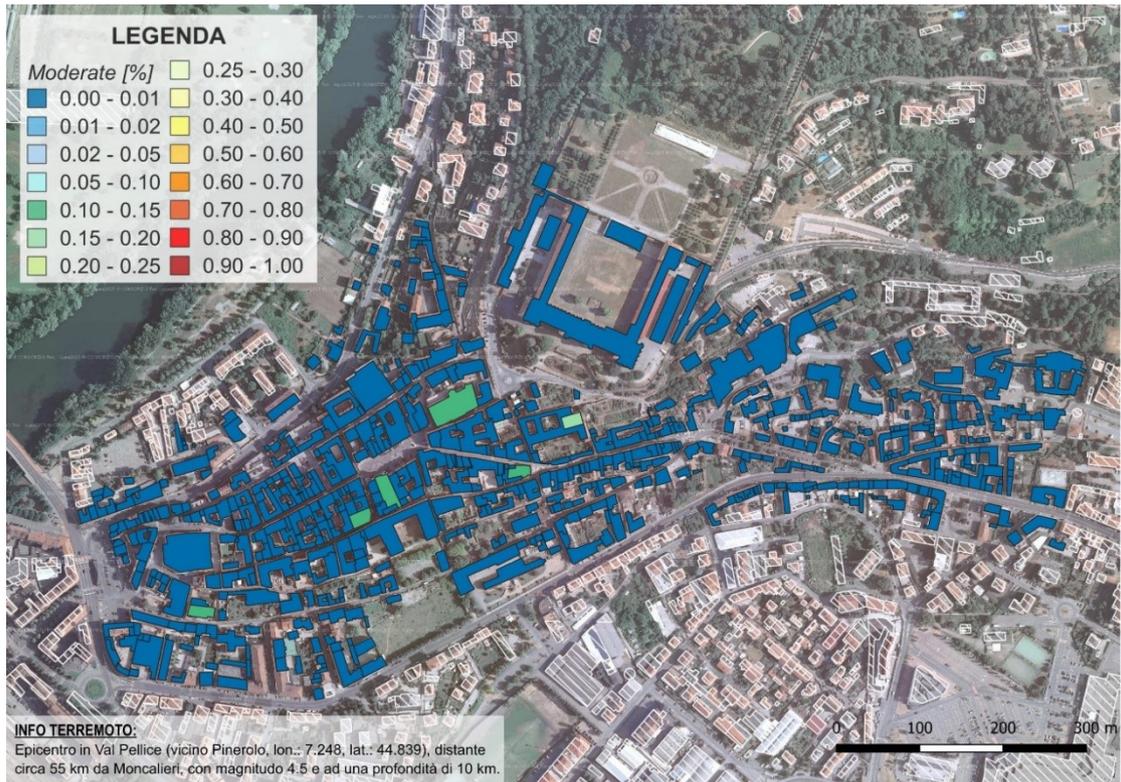


Figura 4-64: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 4.5 con epicentro in Val Pellice – *Moderate*

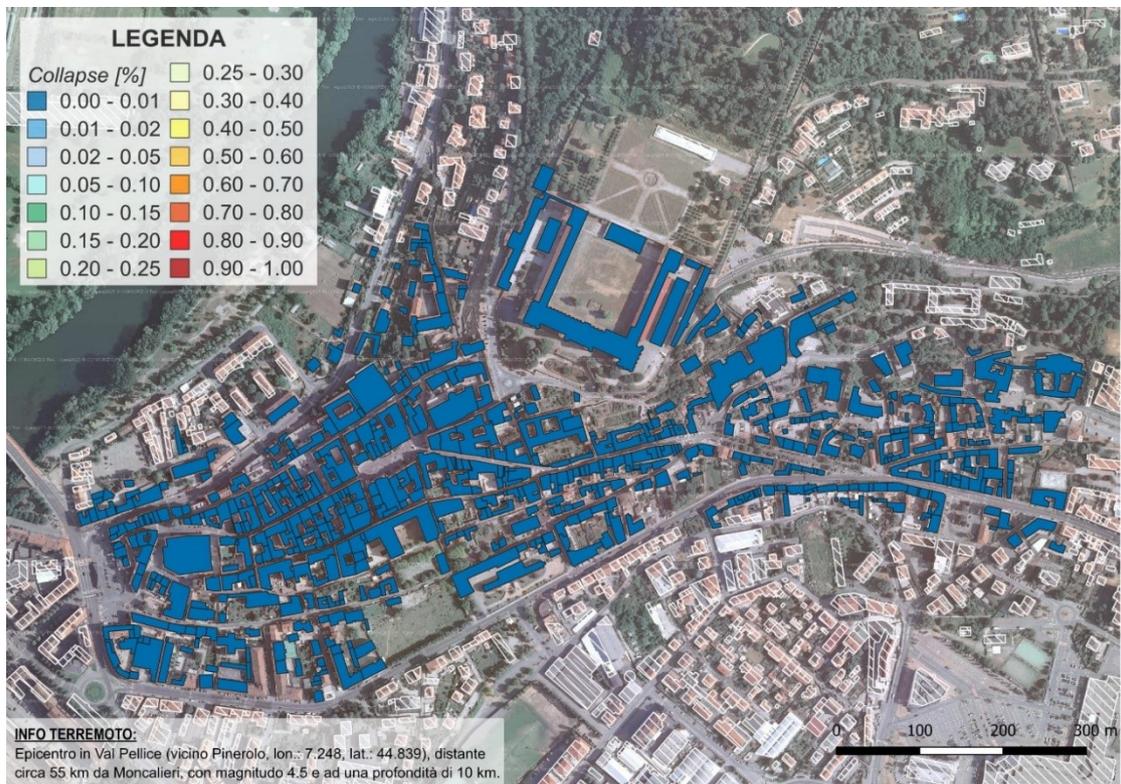
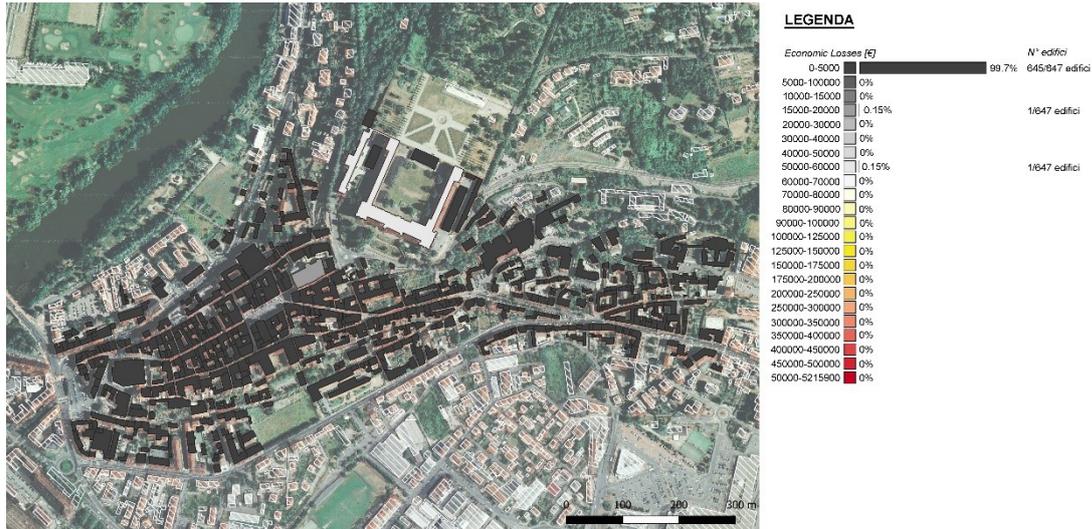


Figura 4-65: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 4.5 con epicentro in Val Pellice – *Collapse*

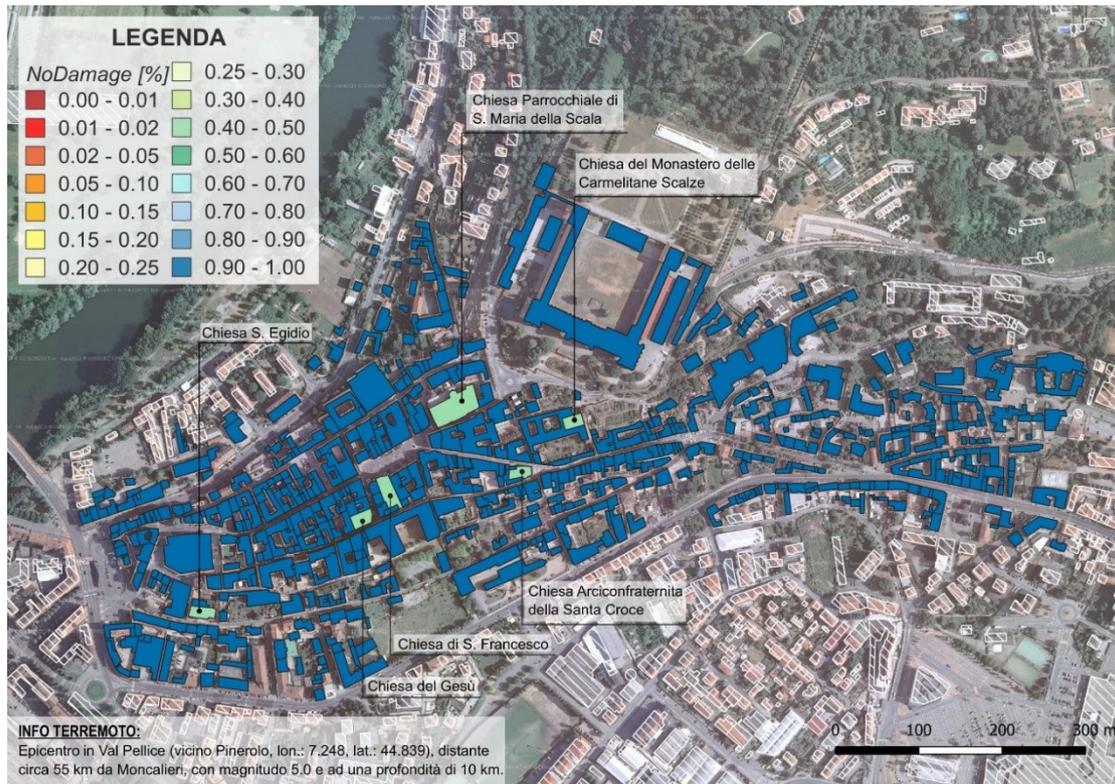
Nelle figure precedenti si può osservare la distribuzione del danno nel caso in cui si verificasse un terremoto di magnitudo 4.5 con epicentro in Val Pellice. In Figura 4-62 si può notare come un terremoto di tale entità non provochi alcun tipo di danno al centro storico di Moncalieri; soltanto le chiese hanno una probabilità di non danneggiarsi pari al 60%-70% e, di conseguenza, una probabilità pari al 15%-20% che si verifichi un danno basso ed una probabilità del 10%-15% che si verifichi un danno moderato (Figura 4-63 e Figura 4-64 rispettivamente). Nessun edificio invece è soggetto a collasso (Figura 4-65).



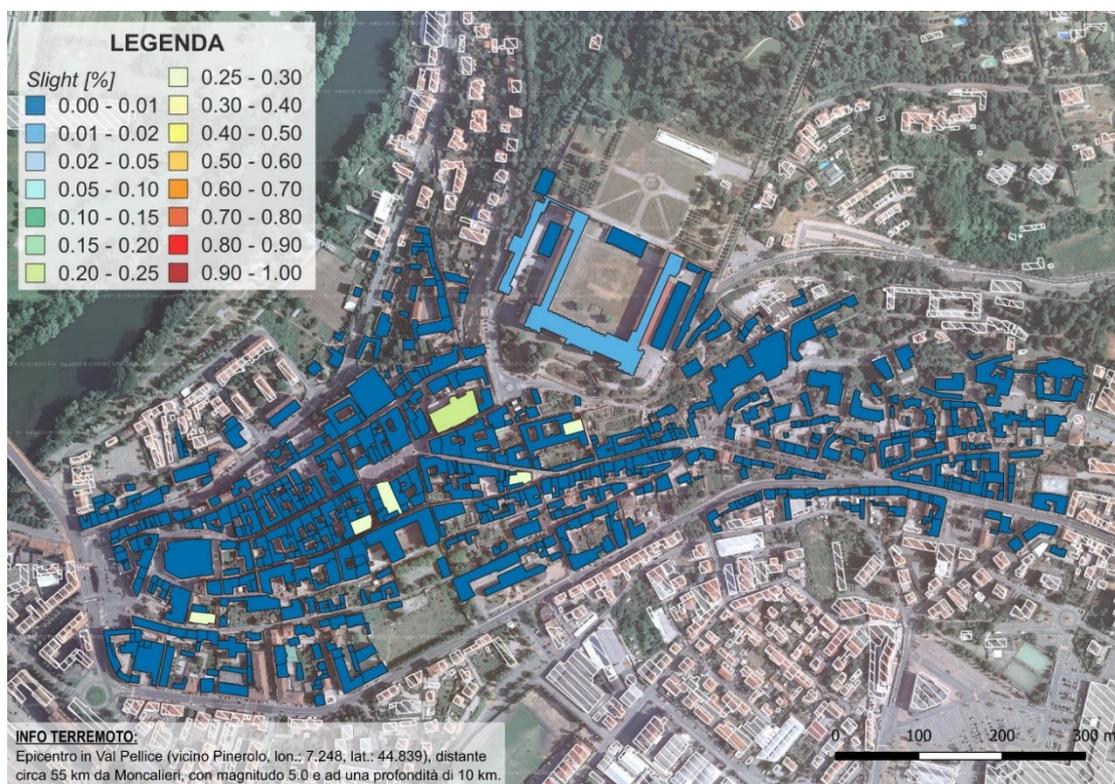
**Figura 4-66: Perdite economiche del centro storico di Moncalieri considerando un terremoto di magnitudo 4.5 con epicentro in Val Pellice**

In Figura 4-66 si può notare, coerentemente con quanto appena detto, che le perdite economiche sono nulle con un terremoto di magnitudo 4.5, in quanto tutti gli edifici sono compresi nella prima fascia, che va da 0 a 5000 €. Solo due edifici si trovano al di fuori di questo intervallo, il castello di Moncalieri e la chiesa Parrocchiale di Santa Maria della Scala, probabilmente a causa della superficie ampia di queste due strutture.

Val Pellice, magnitudo 5.0



**Figura 4-67:** Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.0 con epicentro in Val Pellice – *No damage*



**Figura 4-68:** Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.0 con epicentro in Val Pellice – *Slight*

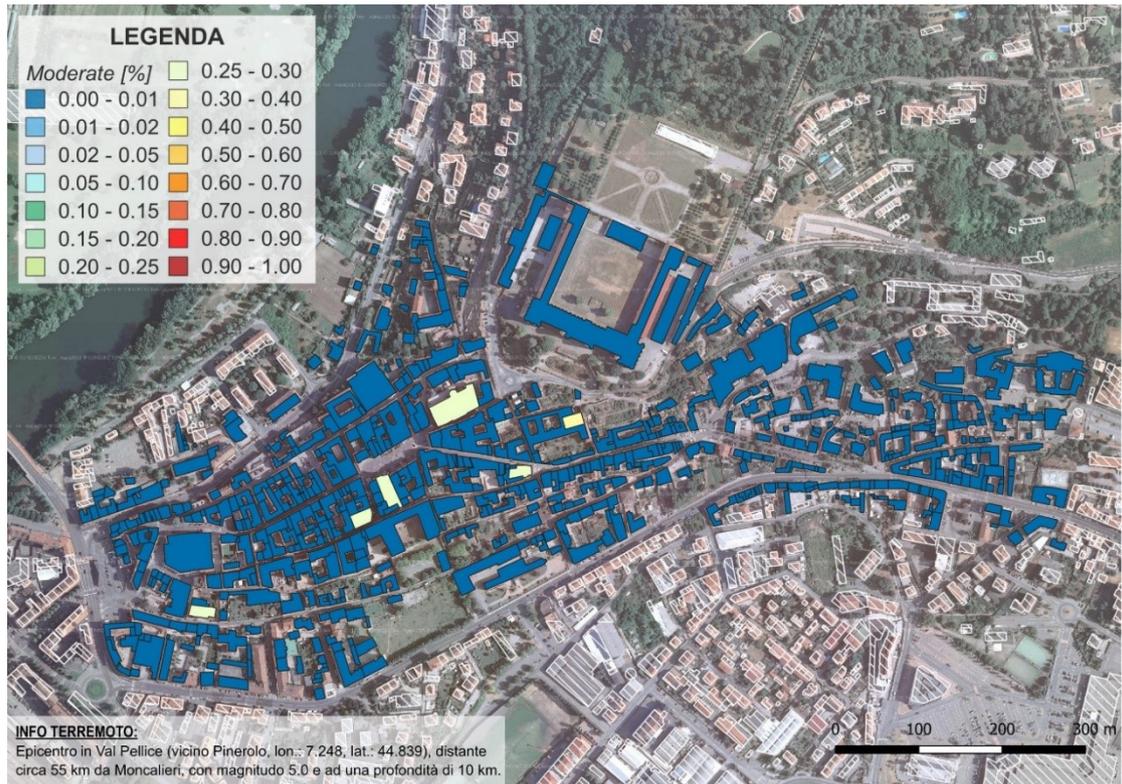


Figura 4-69: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.0 con epicentro in Val Pellice – *Moderate*

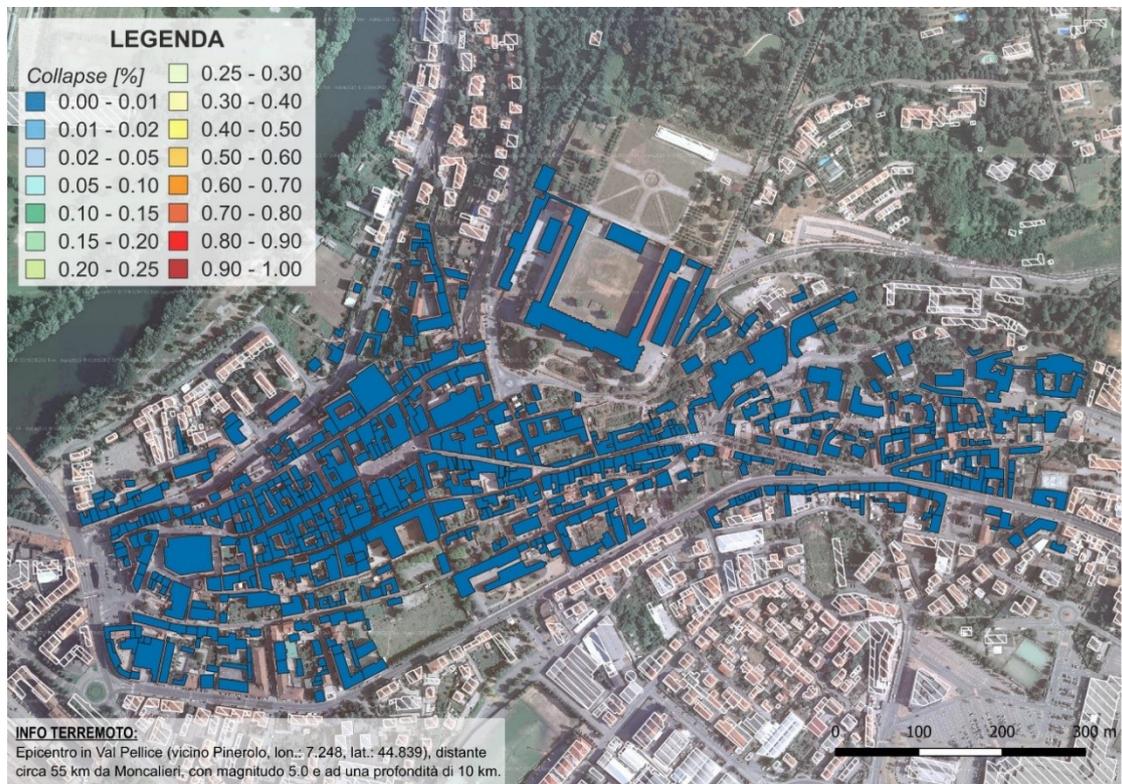
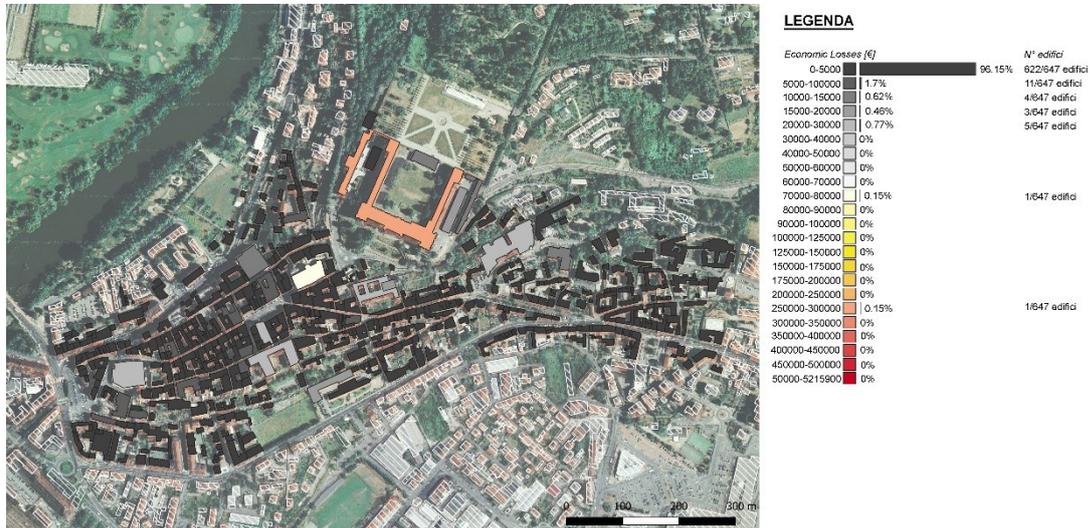


Figura 4-70: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 4.5 con epicentro in Val Pellice – *Collapse*

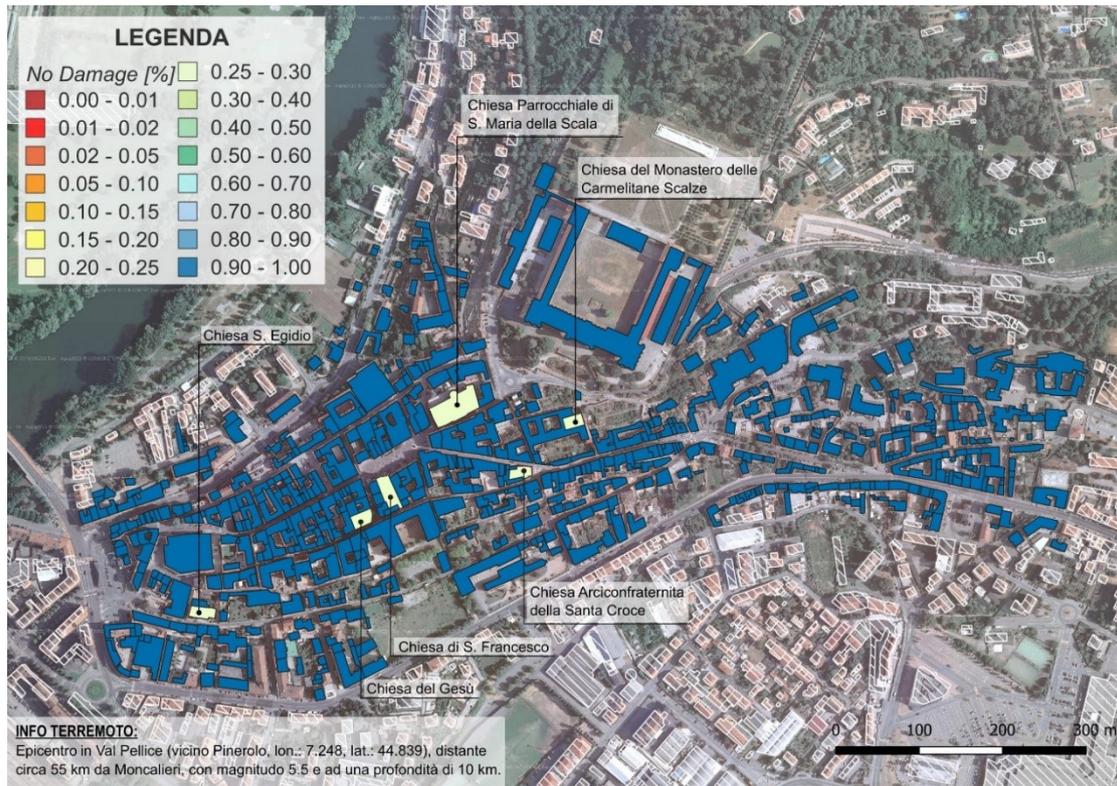
In Figura 4-67, Figura 4-68, Figura 4-69 e in Figura 4-70 si può notare la distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri con un terremoto di magnitudo 5.0 ed epicentro in Val Pellice. Anche in questo scenario, come in quello precedente, le uniche strutture che hanno probabilità di subire un danno leggero (20%-30%) o moderato (30%-50%) sono le chiese.



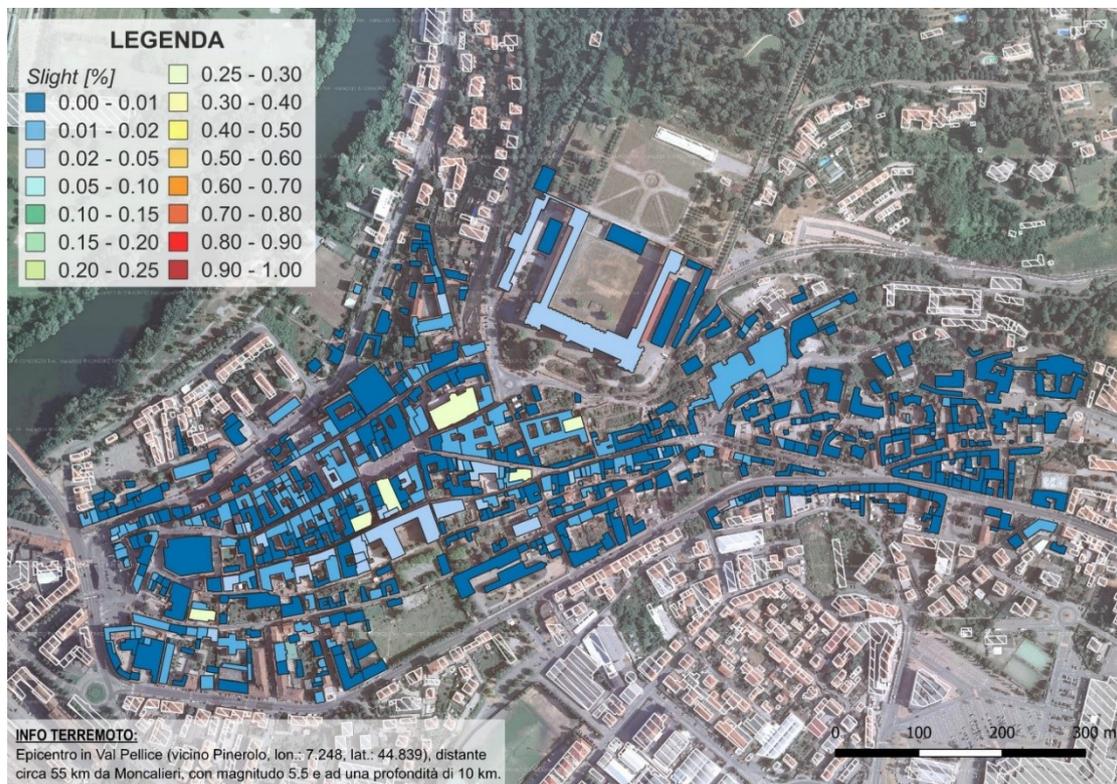
**Figura 4-71: Perdite economiche del centro storico di Moncalieri considerando un terremoto di magnitudo 5.0 con epicentro in Val Pellice**

In Figura 4-71 viene mostrata la mappa delle perdite economiche di ogni edificio con una magnitudo di 5.0. Anche in questo caso gli edifici sono concentrati, per la maggior parte (96.15%) nell'intervallo compreso tra 0 € e 5000 €, fatta sempre eccezione per il castello di Moncalieri.

Val Pellice, magnitudo 5.5



**Figura 4-72:** Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.5 con epicentro in Val Pellice – *No damage*



**Figura 4-73:** Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.5 con epicentro in Val Pellice – *Slight*

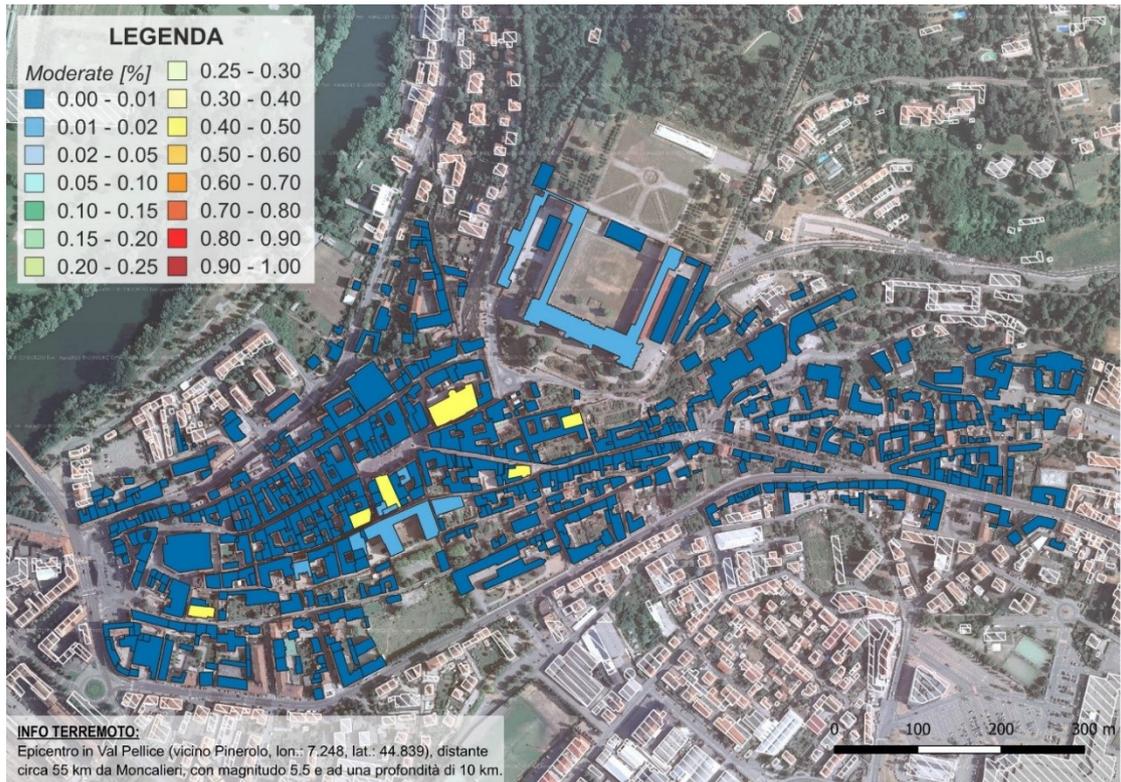


Figura 4-74: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 4.5 con epicentro in Val Pellice – *Moderate*

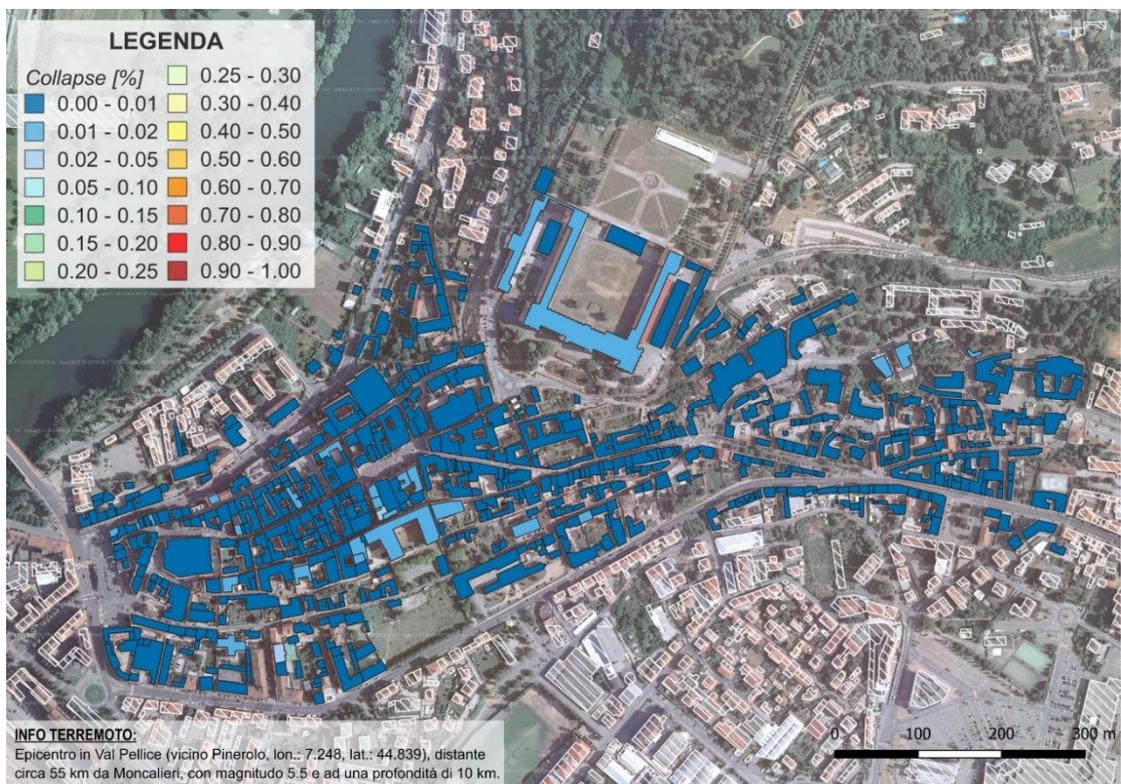
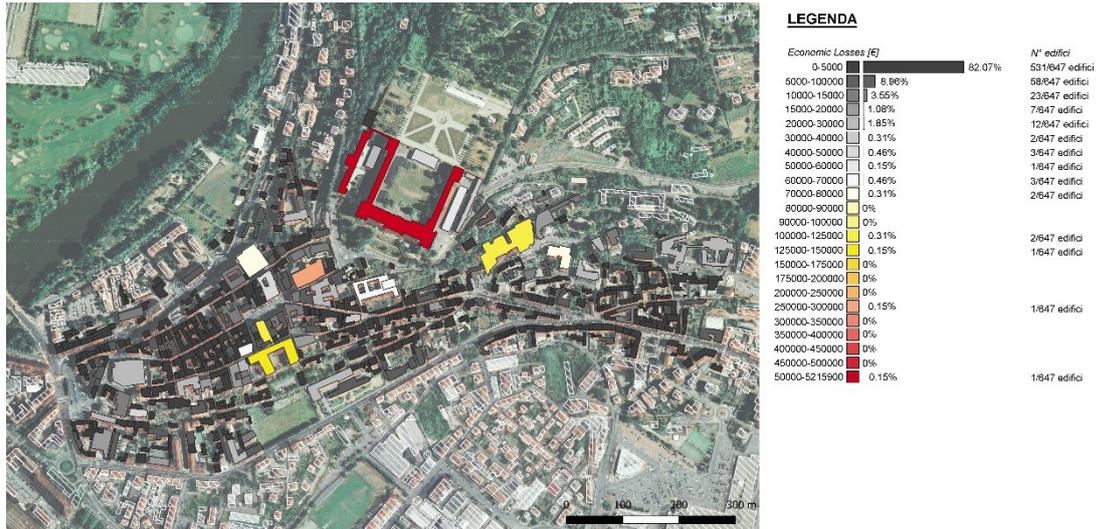


Figura 4-75: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.5 con epicentro in Val Pellice – *Collapse*

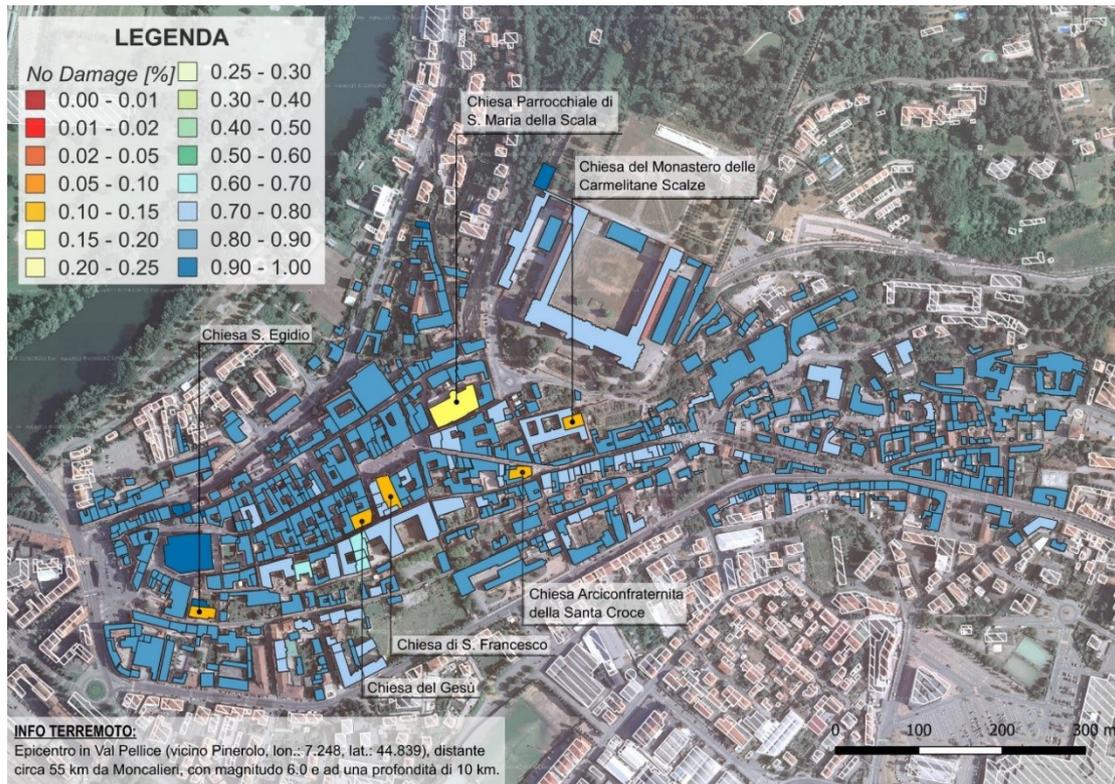
Aumentando la magnitudo a 5.5, si può notare in Figura 4-72 che la probabilità che non si verifichi alcun tipo di danno è sempre massima per gli edifici non monumentali mentre per quelli monumentali diminuisce (25%-30%). La probabilità che si verifichi un danno leggero è compresa tra il 25% ed il 30% nelle chiese mentre ha una probabilità massima del 5% negli altri edifici (Figura 4-73). Mentre la probabilità che si verifichi un danno moderato è presente solo negli edifici ecclesiastici (40%-50%) (Figura 4-74). La probabilità di collasso è invece nulla (Figura 4-75).



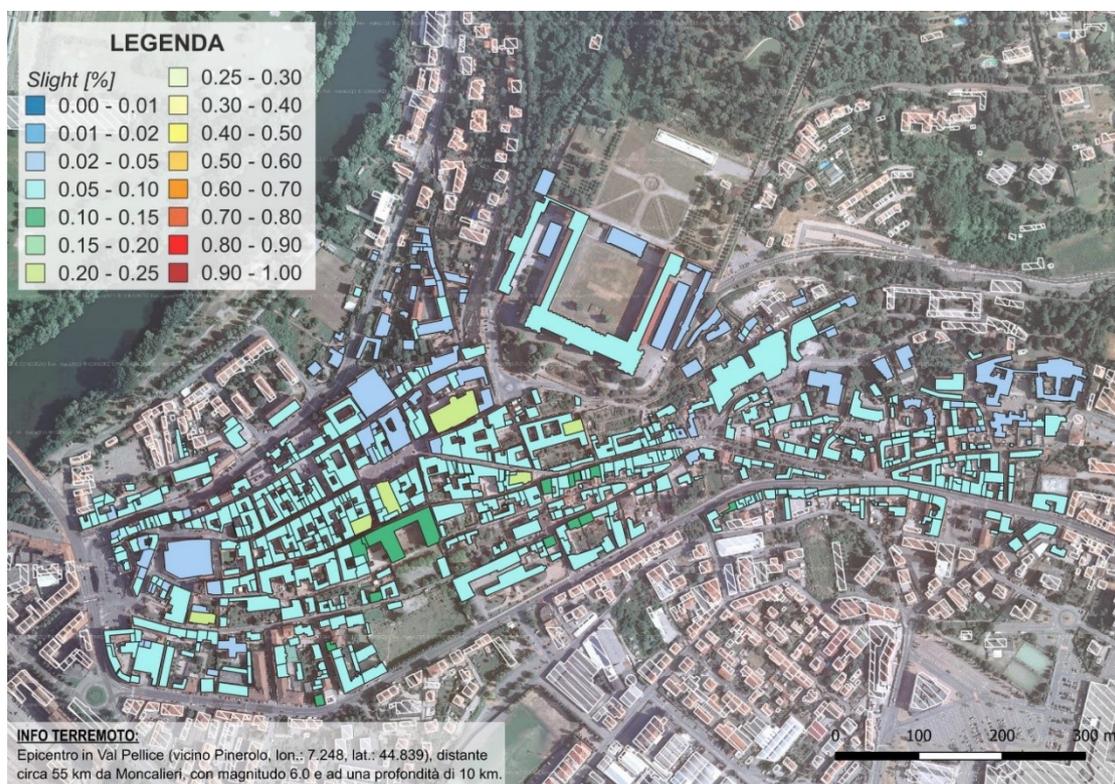
**Figura 4-76: Perdite economiche del centro storico di Moncalieri considerando un terremoto di magnitudo 5.5 con epicentro in Val Pellice**

La distribuzione delle perdite economiche nel caso di un terremoto in Val Pellice con magnitudo con una magnitudo pari a 5.5 sono molto basse e si concentrano nella parte più alta dell'istogramma, come mostra la Figura 4-76.

Val Pellice, magnitudo 6.0



**Figura 4-77: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.0 con epicentro in Val Pellice – No damage**



**Figura 4-78: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.0 con epicentro in Val Pellice – Slight**

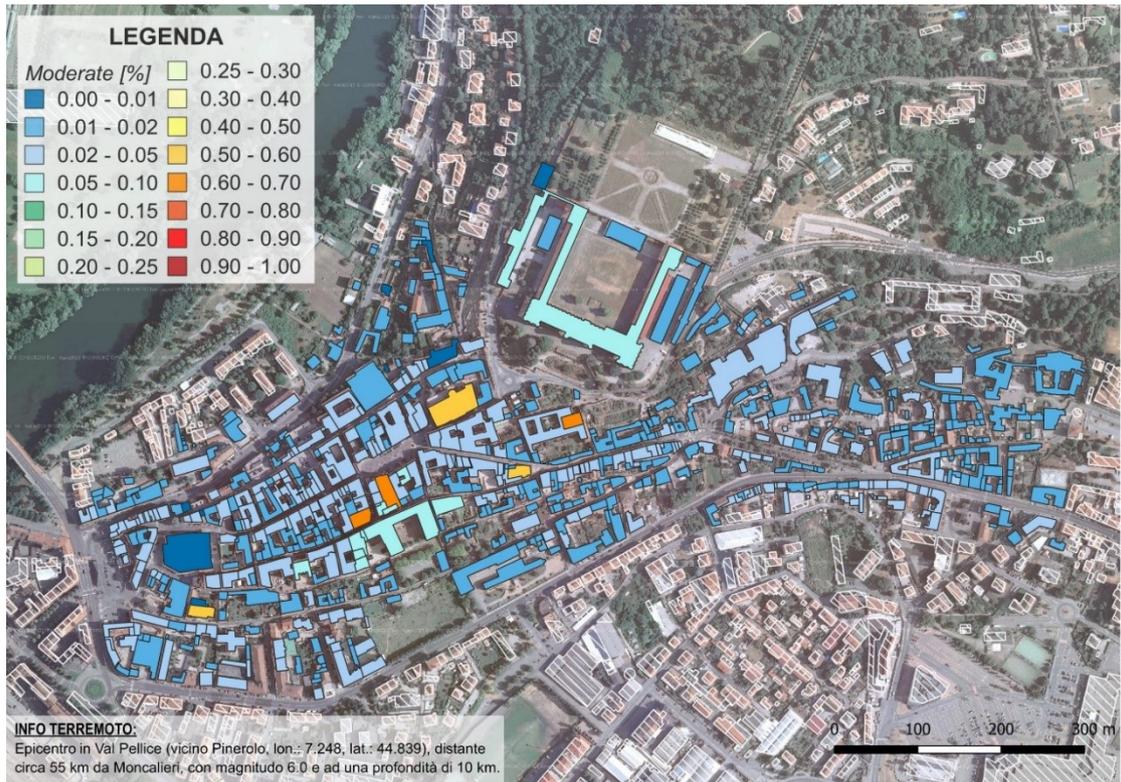


Figura 4-79: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.0 con epicentro in Val Pellice – *Moderate*

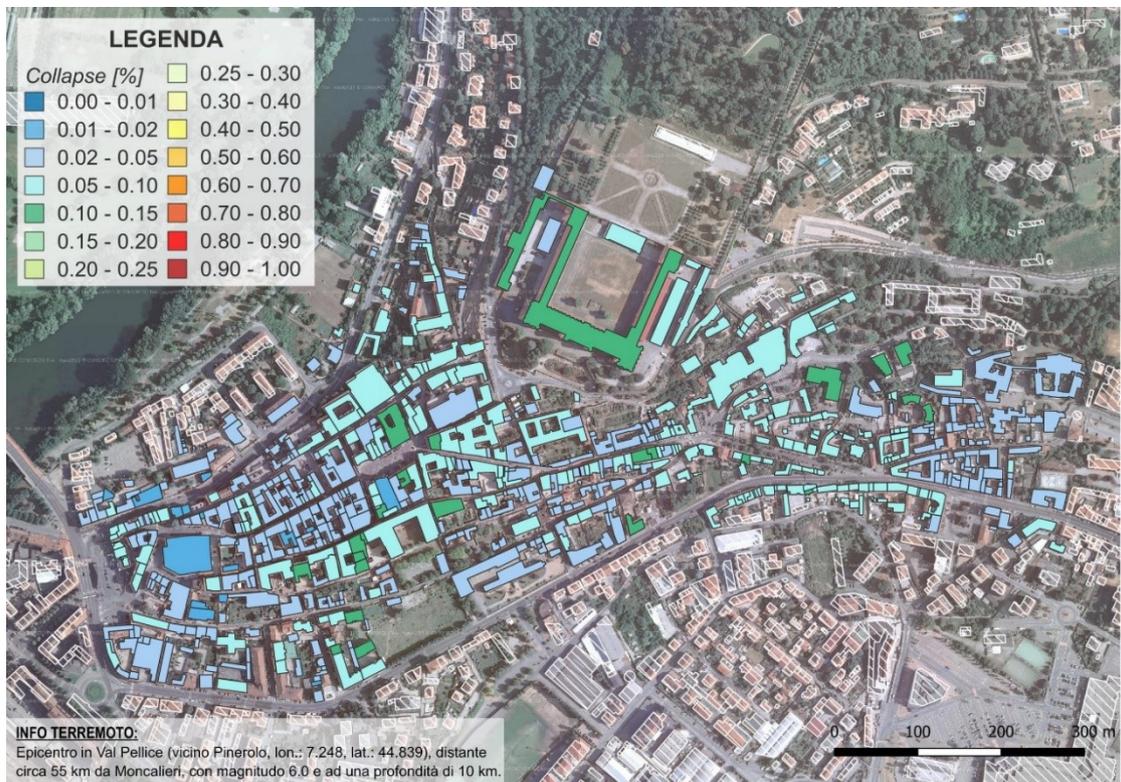
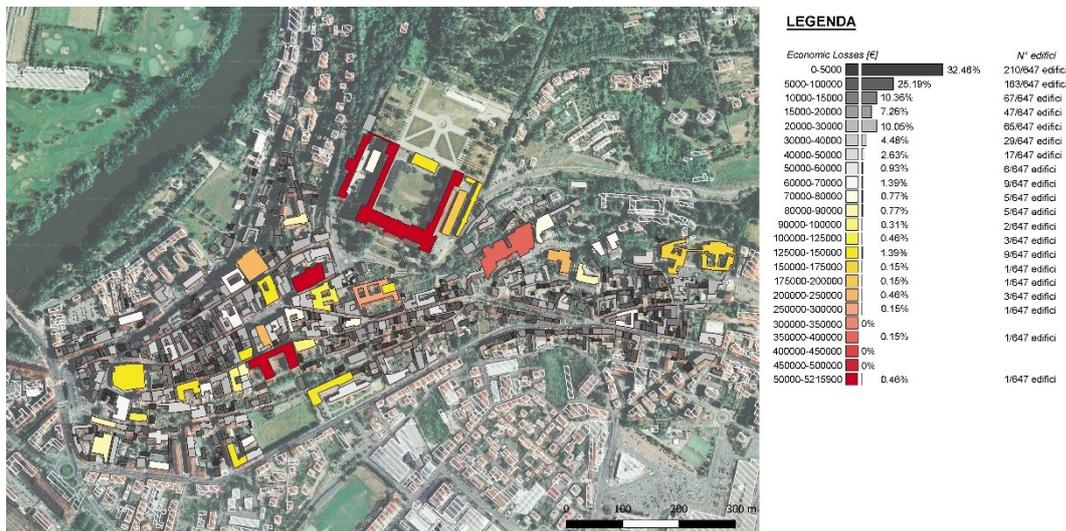


Figura 4-80: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.0 con epicentro in Val Pellice – *Collapse*

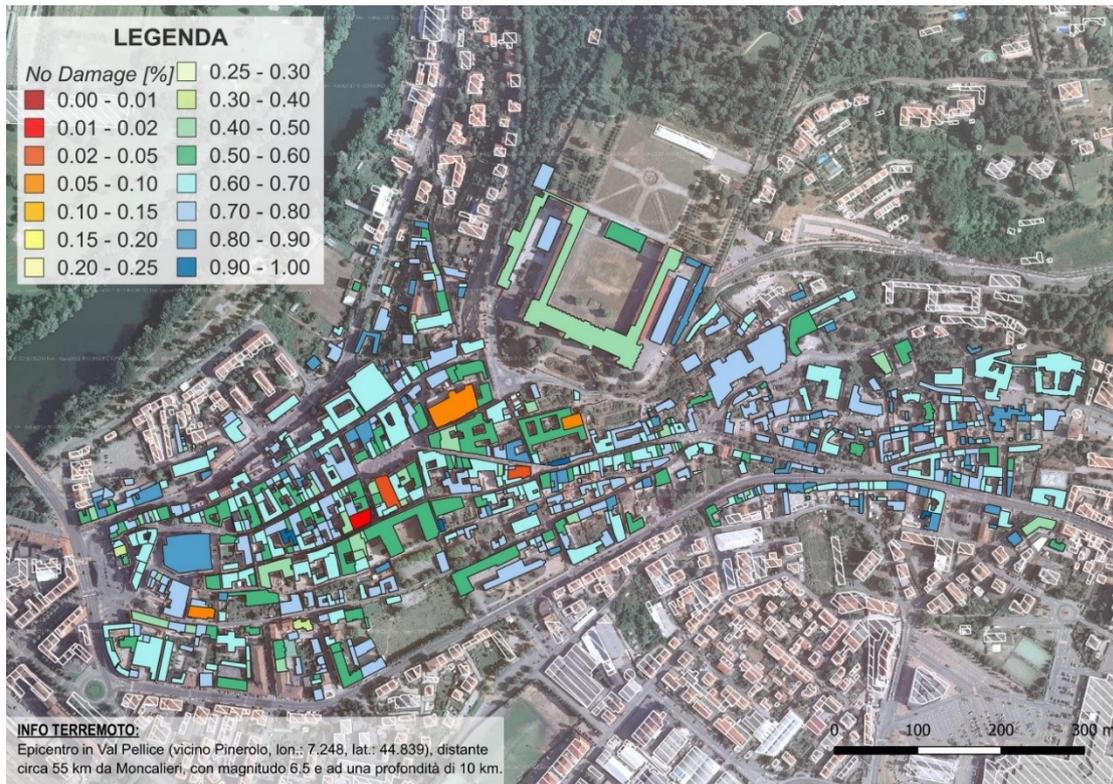
Con una magnitudo pari a 6.0 localizzata in Val Pellice iniziano a notarsi delle distribuzioni di danno differenti da quelle precedenti. Abbiamo infatti che la probabilità che le strutture del centro storico non subiscano alcun tipo di danno diminuisce (Figura 4-77): le chiese hanno una probabilità molto bassa di non danneggiarsi, pari al 10%-20%; la probabilità tra il 70% e l'80% comprende le strutture con tre e quattro piani fuori terra, infine, vi sono una serie di edifici con un numero di piani pari o superiore a 5 che hanno una probabilità di non subire danni compresa tra il 60% ed il 70%. La Figura 4-78 mostra la distribuzione di possibilità delle strutture di subire un danno leggero: quasi tutti gli edifici hanno una probabilità di subire un danno lieve fino al 10% mentre, è compresa tra il 10% ed il 15% per gli edifici con un numero di piani maggiore di 5. La probabilità che si verifichi un danno moderato è mostrata in Figura 4-79, dove le chiese hanno una probabilità superiore al 50% che si possano danneggiare in tale maniera. L'ultima mappa mostra la percentuale di edifici che possono subire un collasso (Figura 4-80) e gli unici edifici che hanno una probabilità pari al 10%-15% di collassare sono quelli con un numero di piani pari o superiore a quattro.



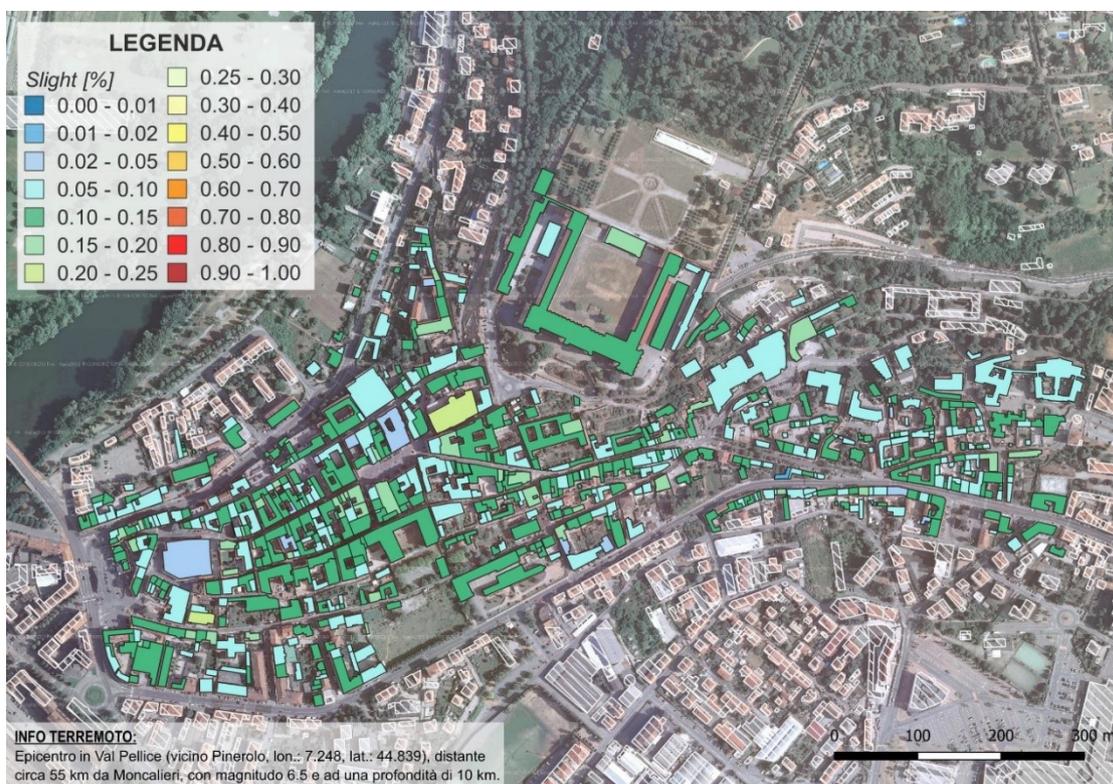
**Figura 4-81: Perdite economiche del centro storico di Moncalieri considerando un terremoto di magnitudo 6.0 e con epicentro in Val Pellice**

La mappa in Figura 4-81 mostra le perdite economiche per un terremoto di magnitudo 6.0 in Val Pellice. In questo caso si nota una maggiore distribuzione delle perdite, concentrandosi comunque principalmente nella fascia compresa tra 0 € e 5000 €.

Val Pellice, magnitudo 6.5



**Figura 4-82:** Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.5 con epicentro in Val Pellice – *No damage*



**Figura 4-83:** Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.5 con epicentro in Val Pellice – *Slight*

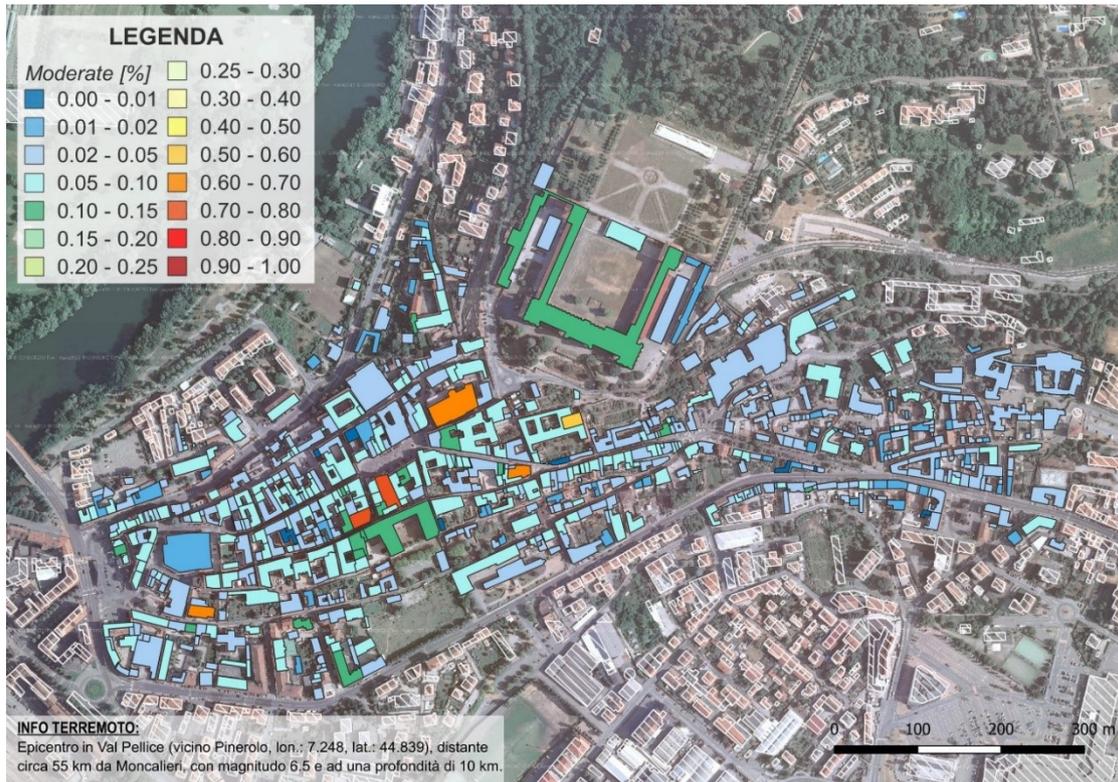


Figura 4-84: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.5 con epicentro in Val Pellice – *Moderate*

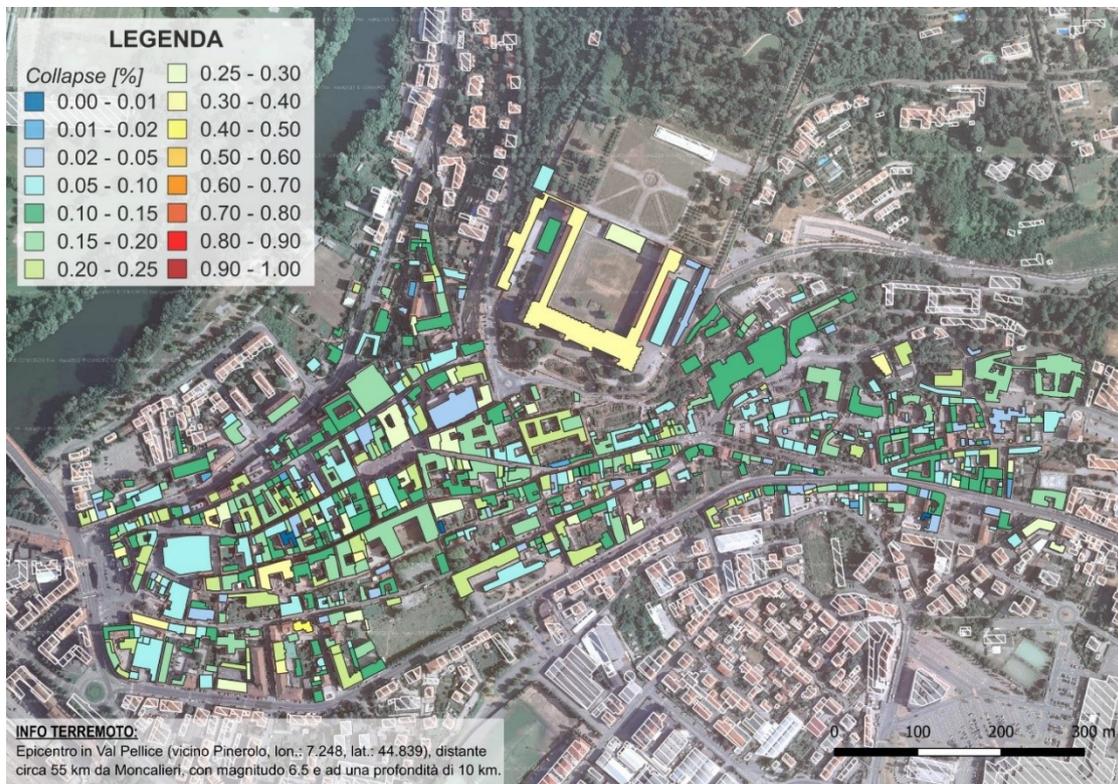
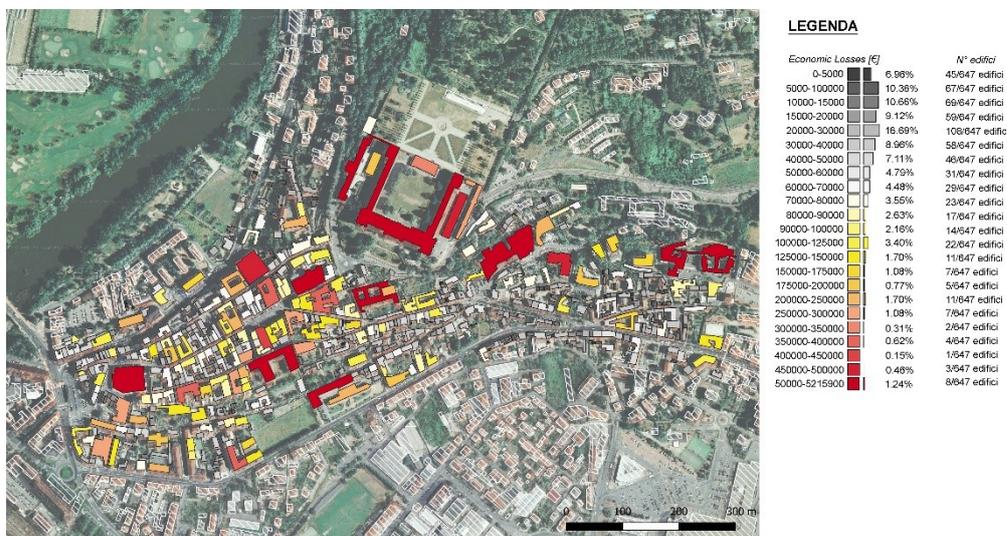


Figura 4-85: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.5 con epicentro in Val Pellice – *Collapse*

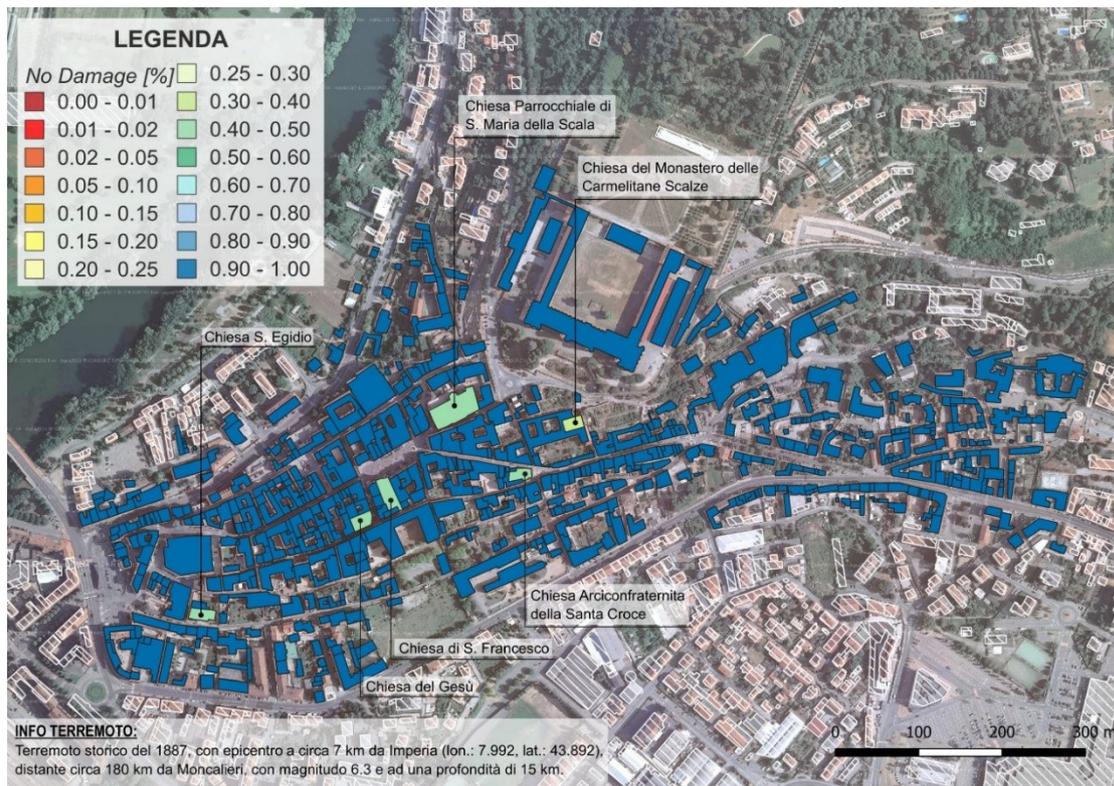
Considerando un terremoto con magnitudo 6.5 ed epicentro in Val Pellice, la mappa in Figura 4-82 mostra che tutti gli edifici del centro storico con un numero di piani pari o superiore a tre hanno una probabilità di non danneggiarsi compresa tra il 40%-60%, gli edifici monumentali invece hanno una probabilità di non danneggiarsi bassissima, compresa tra l'1% ed il 10%, i restanti edifici hanno una probabilità che varia tra il 60% ed il 90%. La Figura 4-83 mostra invece che il 43% degli edifici del centro storico di Moncalieri hanno una probabilità compresa tra il 10% e il 15% che si verifichi un danno leggero. La Figura 4-84 mostra che le chiese hanno una probabilità che si verifichi un danno moderato compresa tra il 50% ed il 90%. Infine, la Figura 4-85 mostra come tutti gli edifici hanno una probabilità, seppur molto bassa, di poter collassare nel caso di uno scenario sismico di questo tipo.



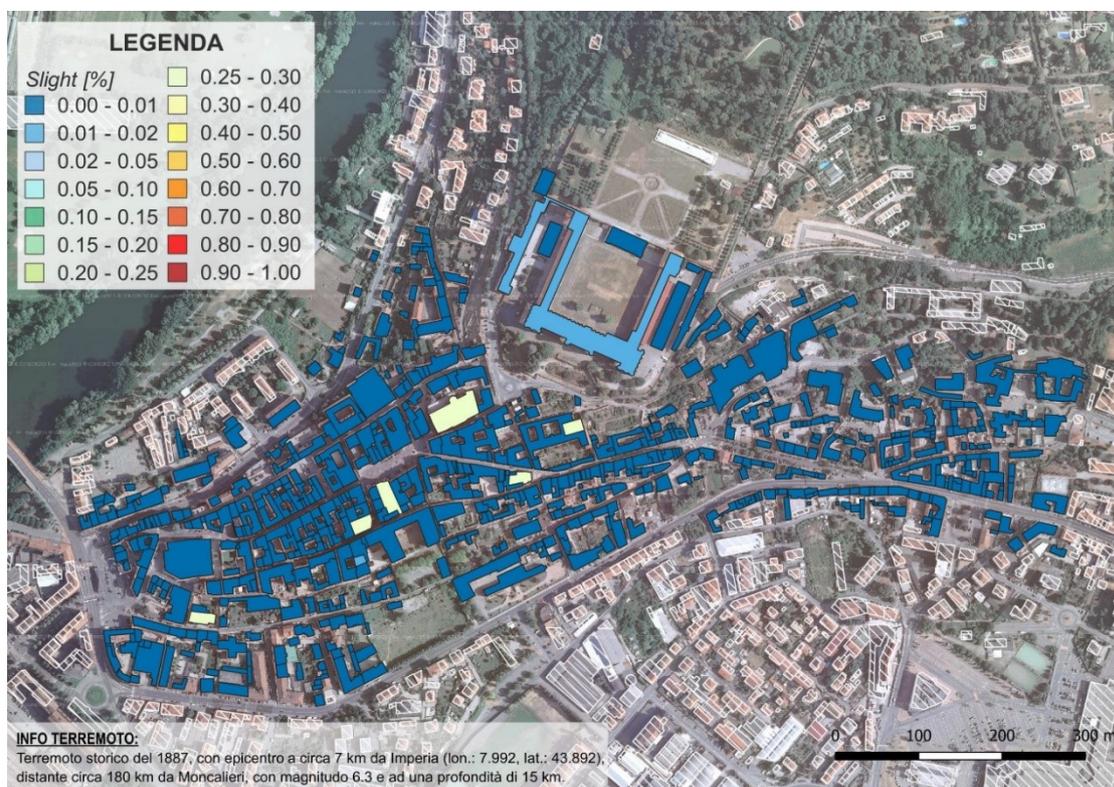
**Figura 4-86: Perdite economiche del centro storico di Moncalieri considerando un terremoto di magnitudo 6.5 con epicentro in Val Pellice**

La Figura 4-86 mostra invece le perdite economiche considerando un terremoto di magnitudo 6.5. Da tale mappa si può notare come la distribuzione delle perdite economiche, evidenziata anche dall'istogramma in figura, è molto distribuita, mostrando perdite anche piuttosto elevate.

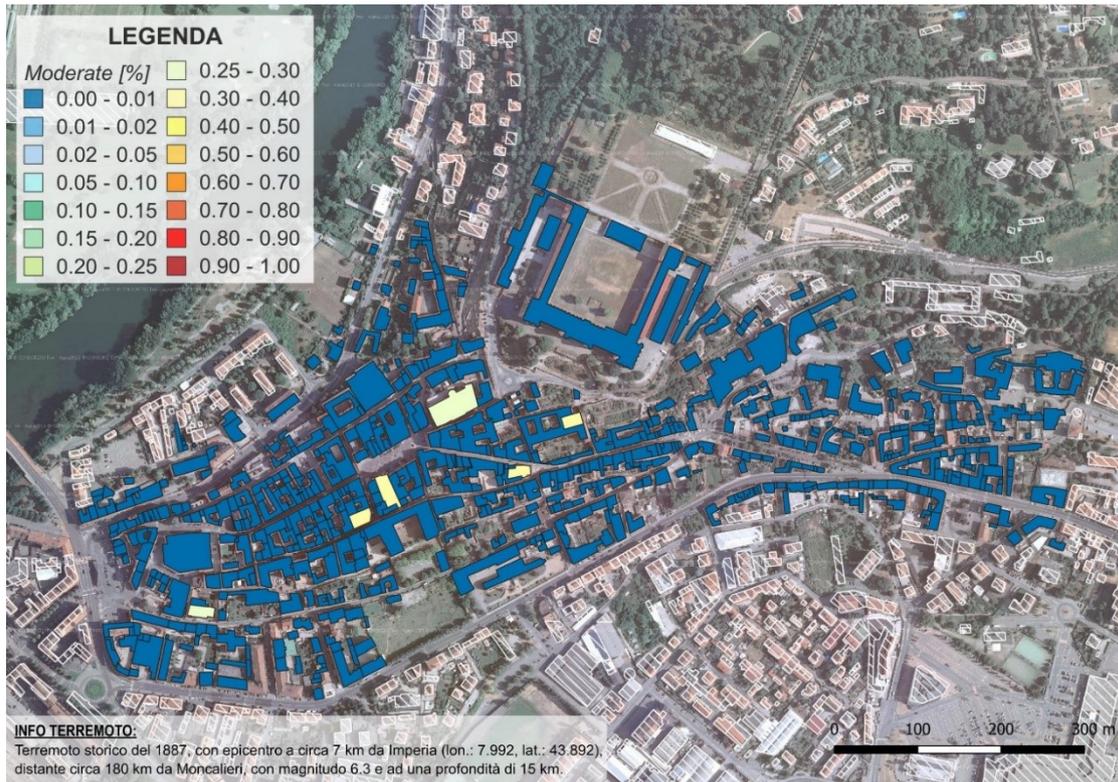
Liguria, terremoto storico 1887



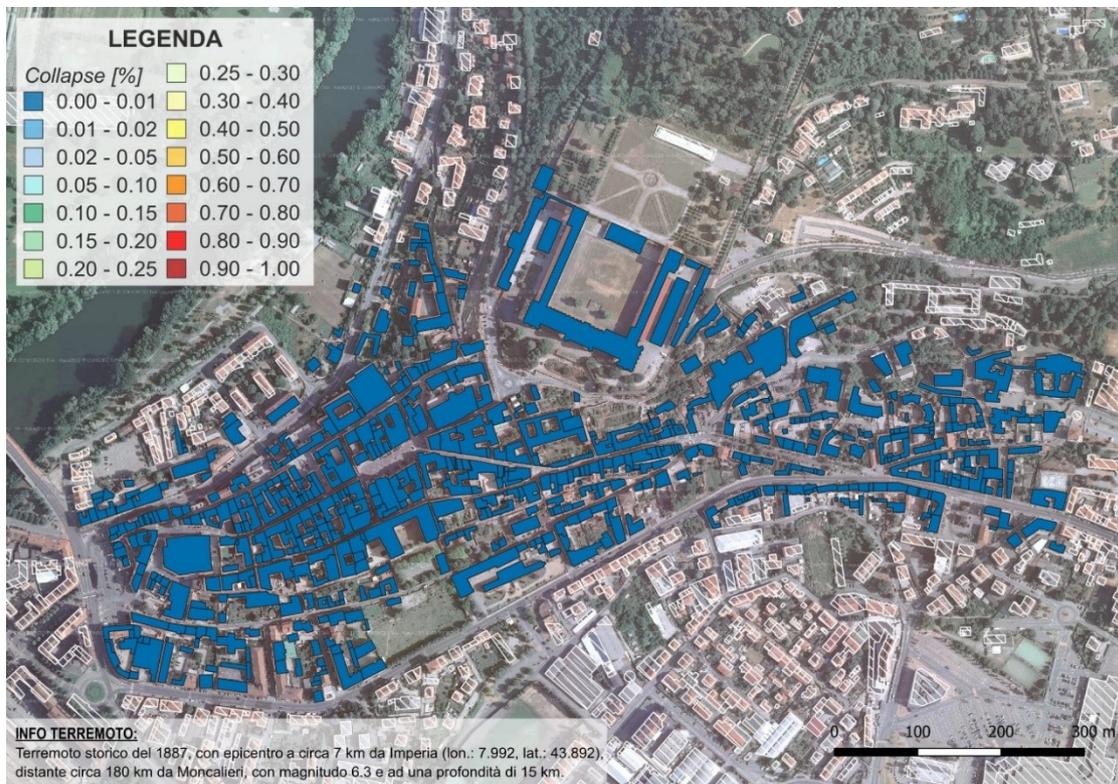
**Figura 4-87:** Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando il terremoto storico del 1887 con epicentro in Liguria (vicino da Imperia) – *No damage*



**Figura 4-88:** Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando il terremoto storico del 1887 con epicentro in Liguria (vicino da Imperia) – *Slight*



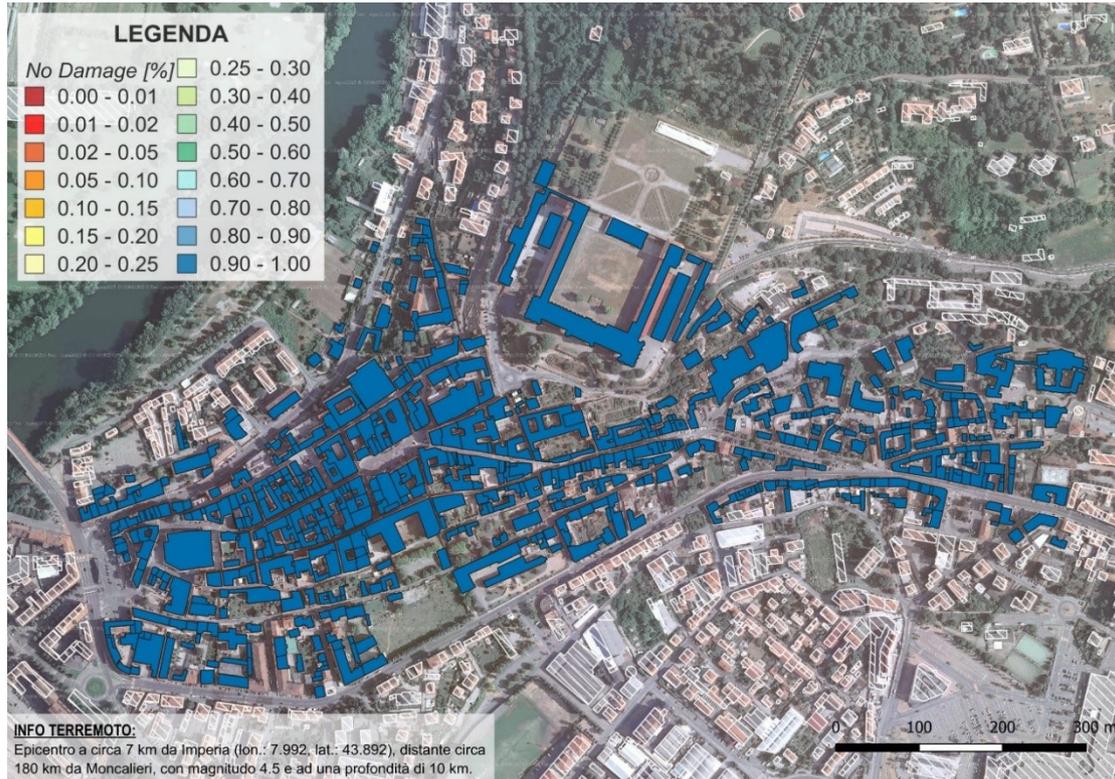
**Figura 4-89: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando il terremoto storico del 1887 con epicentro in Liguria (vicino da Imperia) – Moderate**



**Figura 4-90: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando il terremoto storico del 1887 con epicentro in Liguria (vicino da Imperia) – Collapse**

In Figura 4-87, Figura 4-88, Figura 4-89 e Figura 4-90 vengono mostrate le mappe della distribuzione del danno considerando il terremoto storico del 1887 avvenuto in Liguria, vicino ad Imperia, con magnitudo di 6.3. In questo caso le uniche strutture che possono subire un danno sono le chiese, con una probabilità del 30%-40% che sia un danno lieve e del 25%-40% che sia un danno moderato. Nessun edificio invece ha probabilità di collassare nel caso in cui si verifichi uno scenario di questo tipo.

Liguria, magnitudo 4.5



**Figura 4-91: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 4.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – No damage**

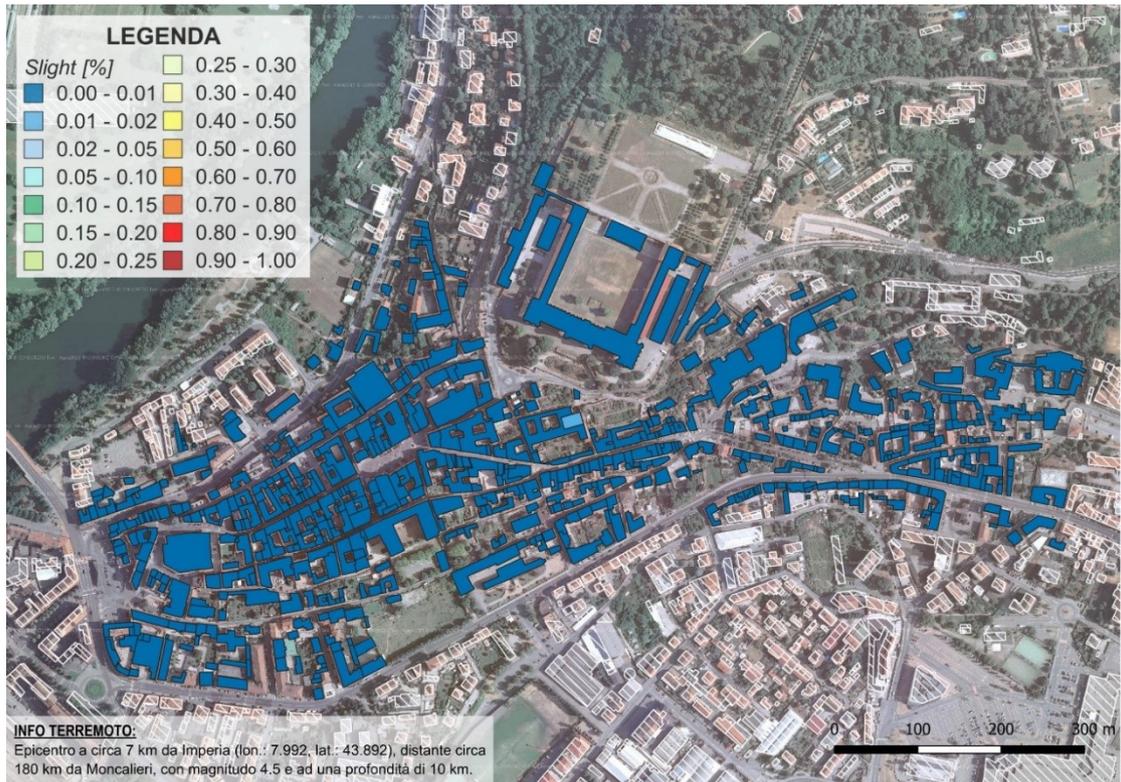


Figura 4-92: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 4.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – *Slight*

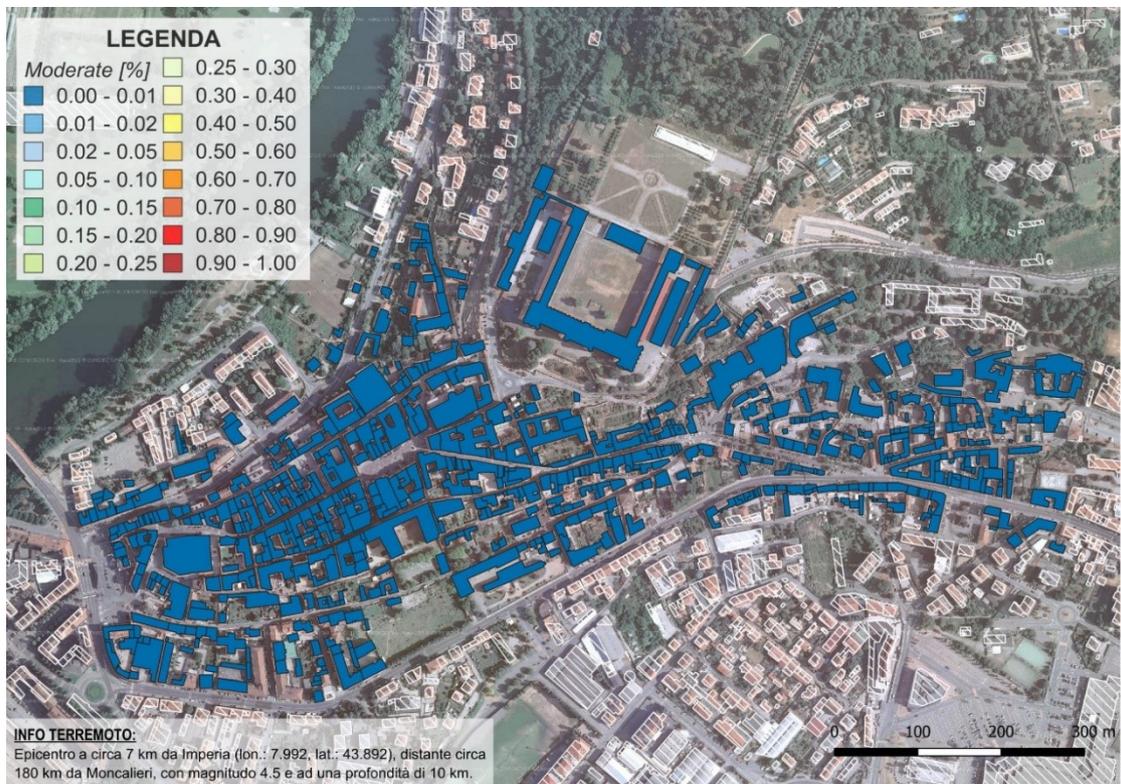


Figura 4-93: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 4.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – *Moderate*

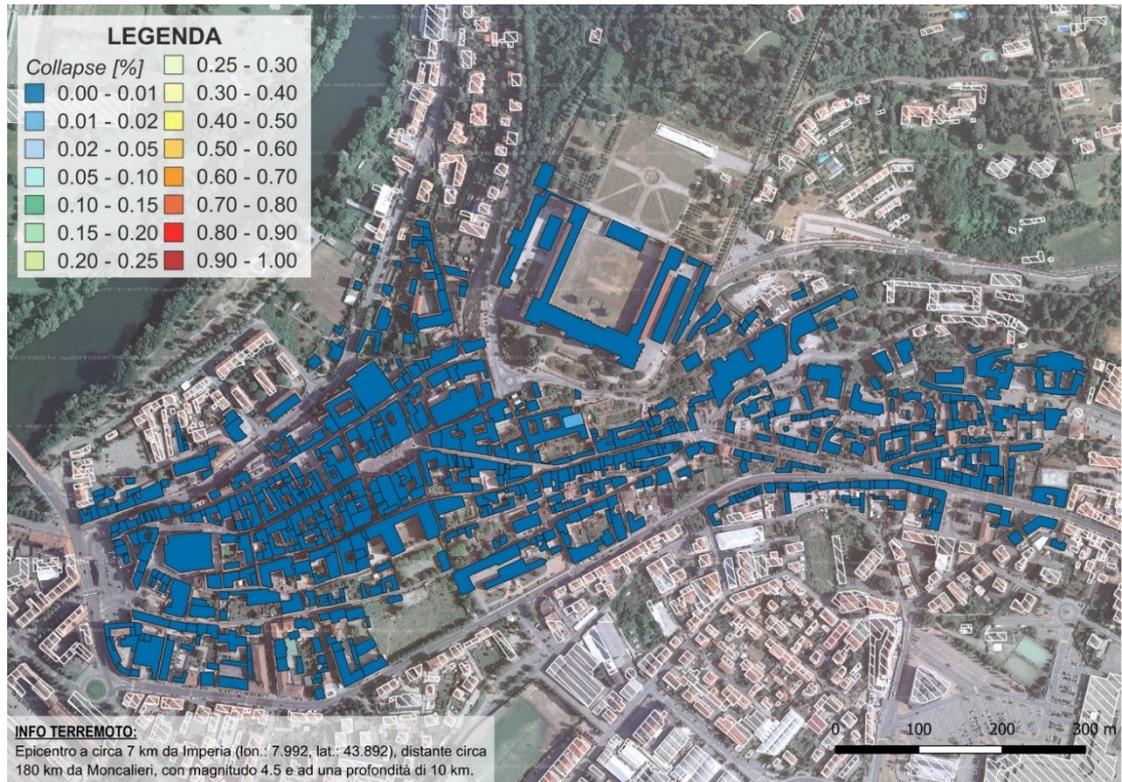


Figura 4-94: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 4.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – Collapse

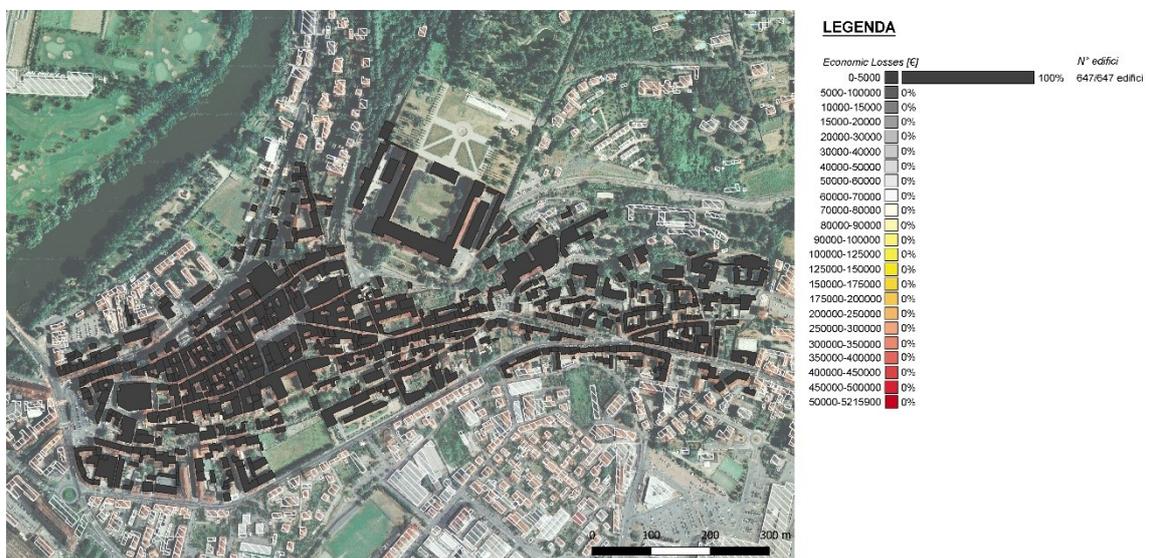
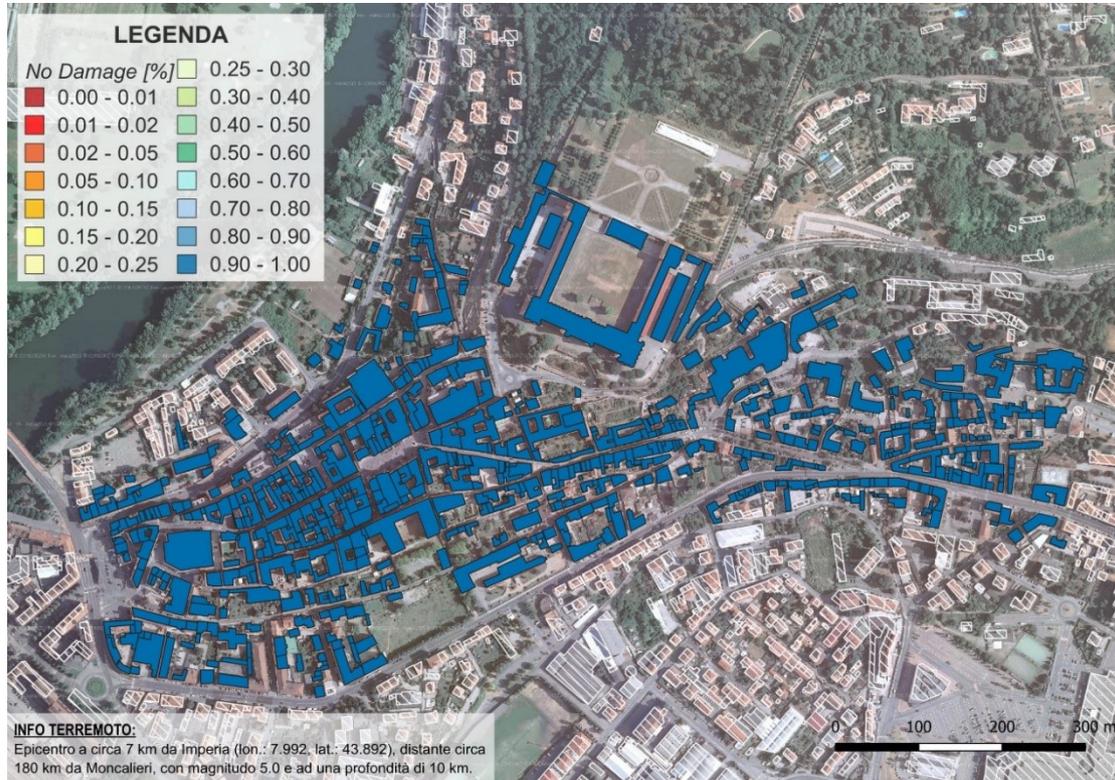


Figura 4-95: Perdite economiche del centro storico di Moncalieri considerando un terremoto di magnitudo 4.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia)

In Figura 4-91, Figura 4-92, Figura 4-93 e Figura 4-94 viene mostrata la distribuzione percentuale del danno nel centro storico di Moncalieri, considerando un terremoto con epicentro in Liguria di magnitudo 4.5. Come ci si poteva aspettare nessun edificio ha probabilità di subire alcun tipo di danno.

In Figura 4-95 vengono mostrate le perdite economiche riferite a questa tipologia di scenario e, coerentemente con le mappe di distribuzione del danno, le perdite economiche sono nulle.

Liguria, magnitudo 5.0



**Figura 4-96: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.0 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – No damage**

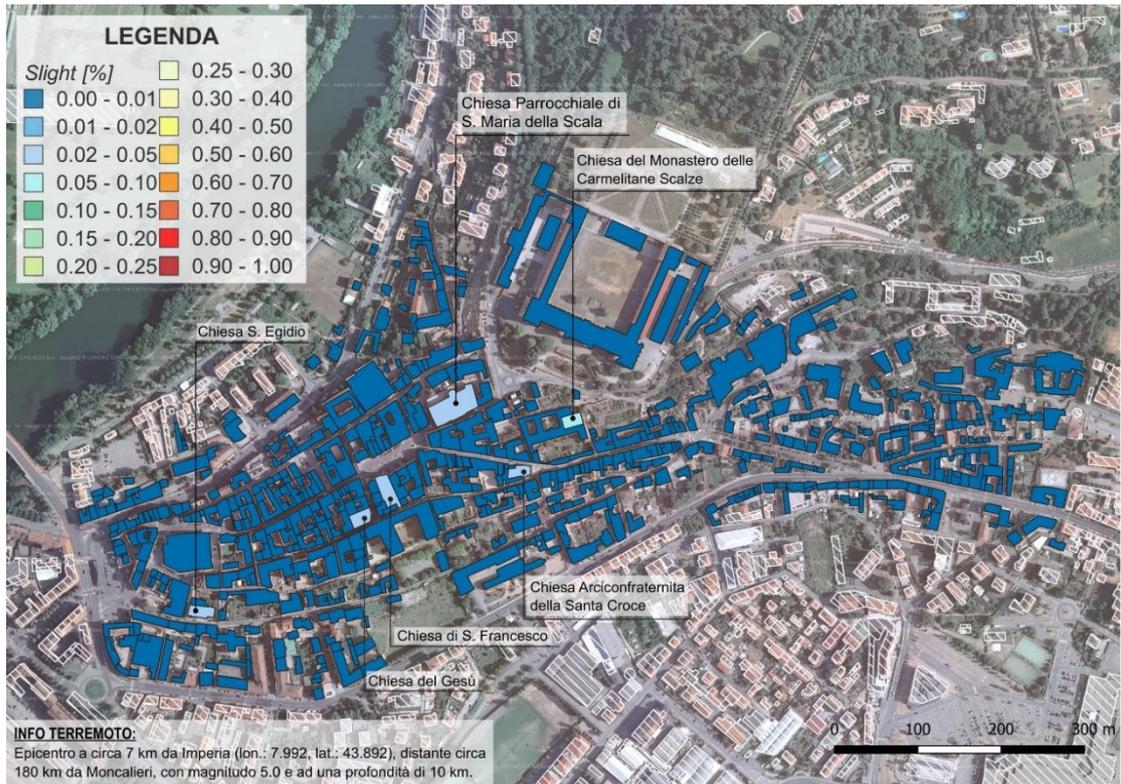


Figura 4-97: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.0 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – *Slight*

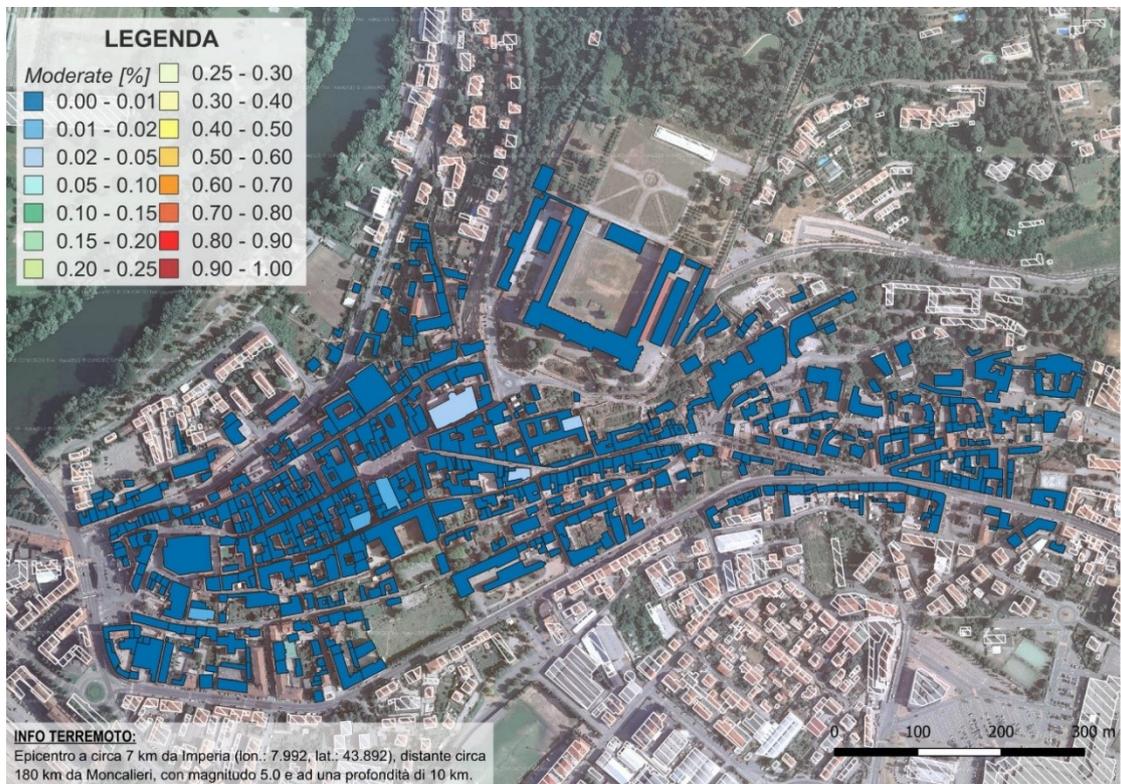


Figura 4-98: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.0 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – *Moderate*

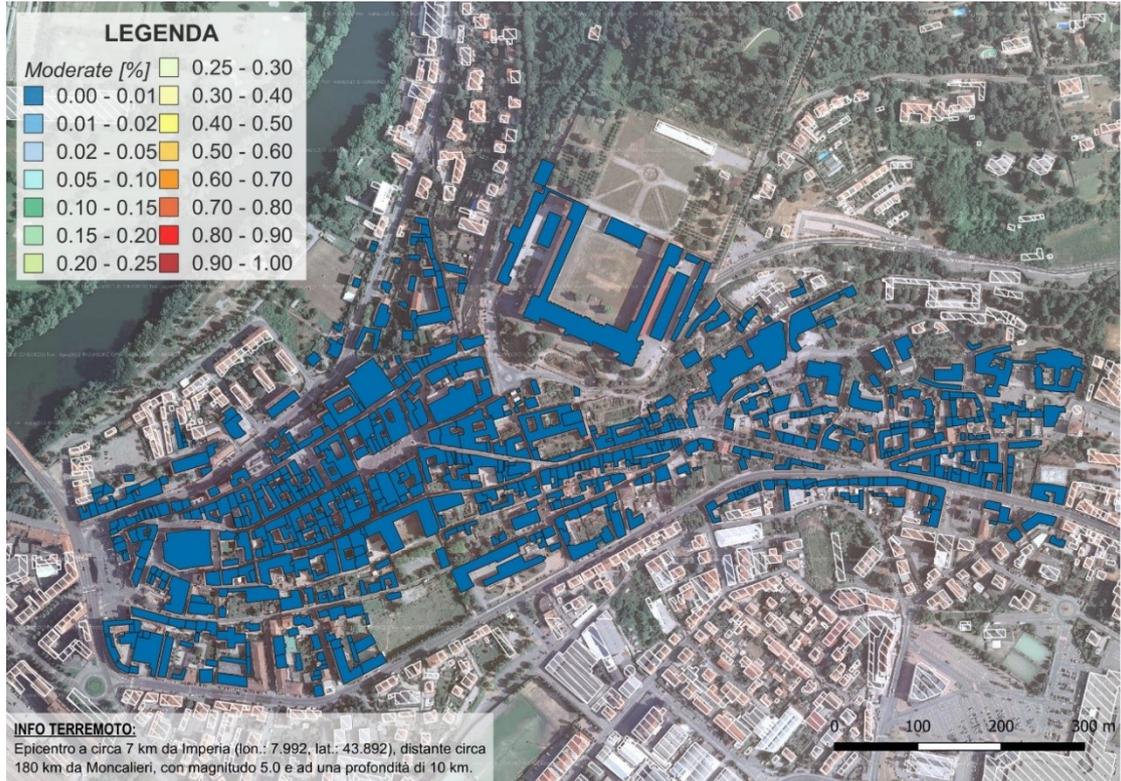


Figura 4-99: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.0 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – Collapse

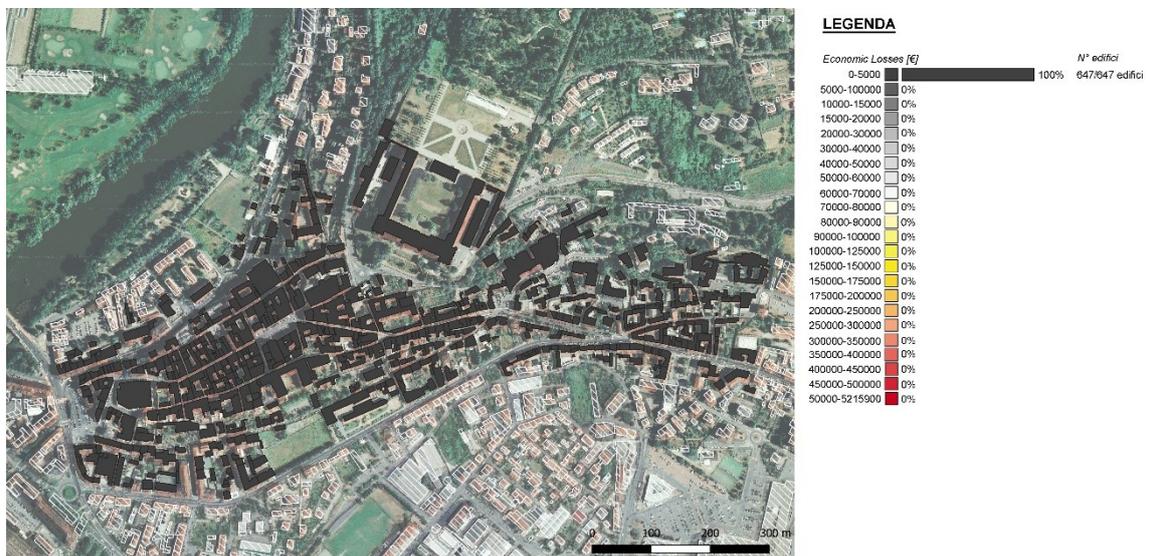
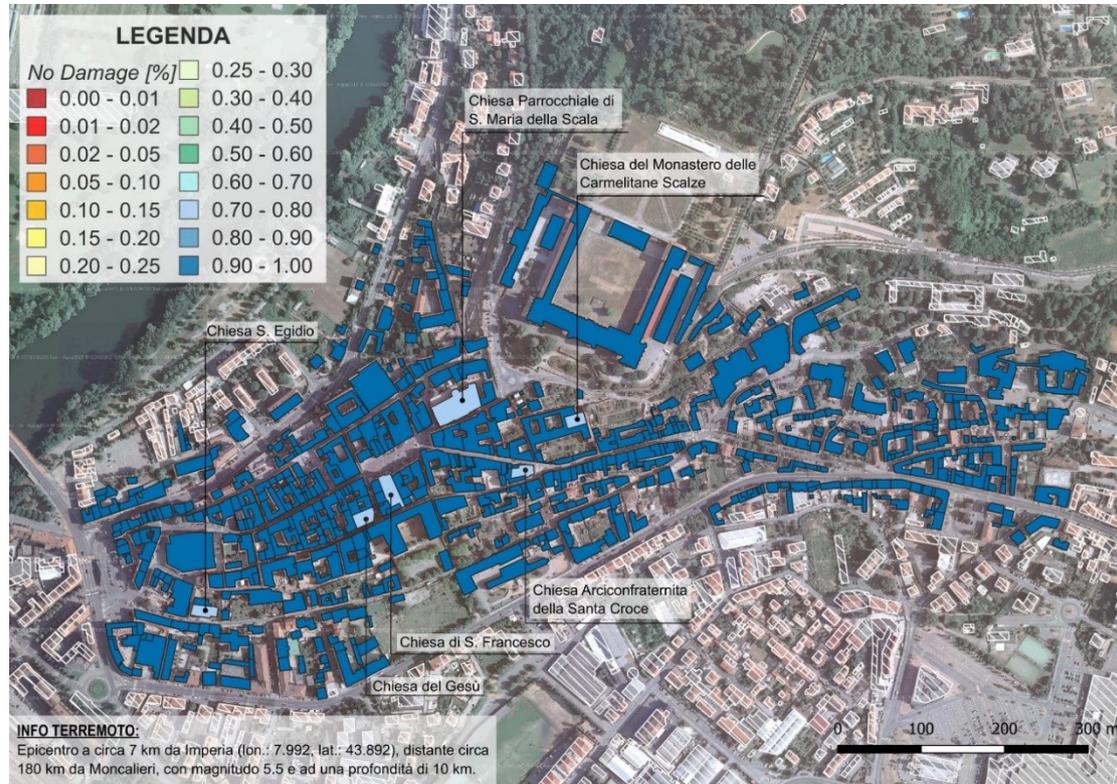


Figura 4-100: Perdite economiche del centro storico di Moncalieri considerando un terremoto di magnitudo 5.0 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia)

La Figura 4-97, la Figura 4-98, la Figura 4-99 e la Figura 4-100 mostrano la distribuzione del danno nel centro storico di Moncalieri per un terremoto di magnitudo 5.0 ed epicentro in Liguria; anche in questo caso nessun edificio ha probabilità di essere danneggiato; vi è una probabilità dell'1% e del 2% che possa verificarsi un danno di tipo leggero o moderato negli edifici monumentali, ma è talmente basso da potersi considerare trascurabile.

La Figura 4-100, coerentemente con le altre mappe, mostra una perdita economica nulla per questo scenario sismico.

Liguria, magnitudo 5.5



**Figura 4-101: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – No damage**

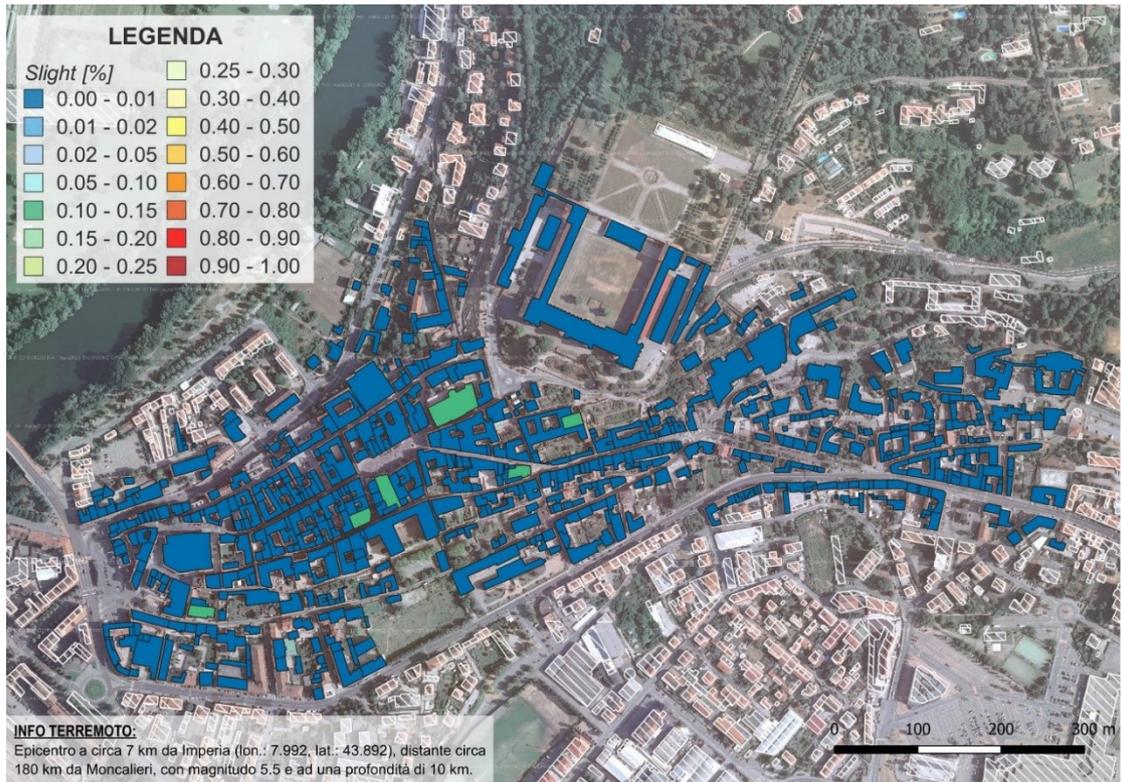


Figura 4-102: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – *Slight*

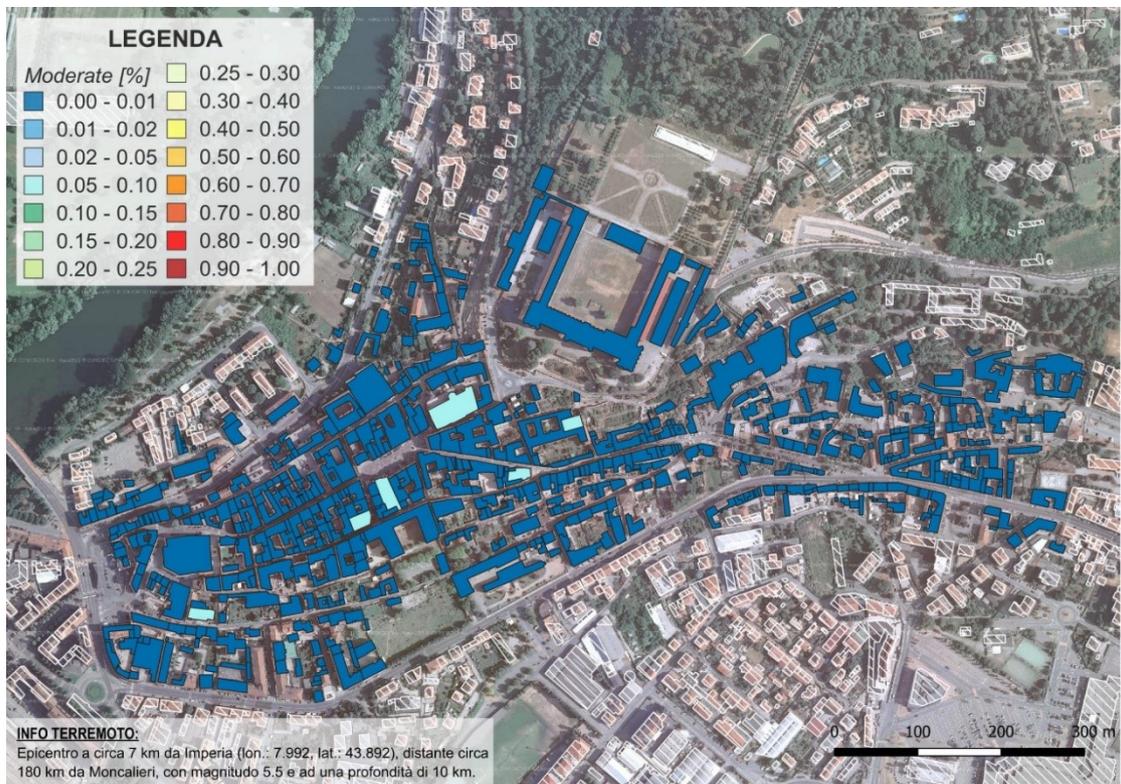


Figura 4-103: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – *Moderate*

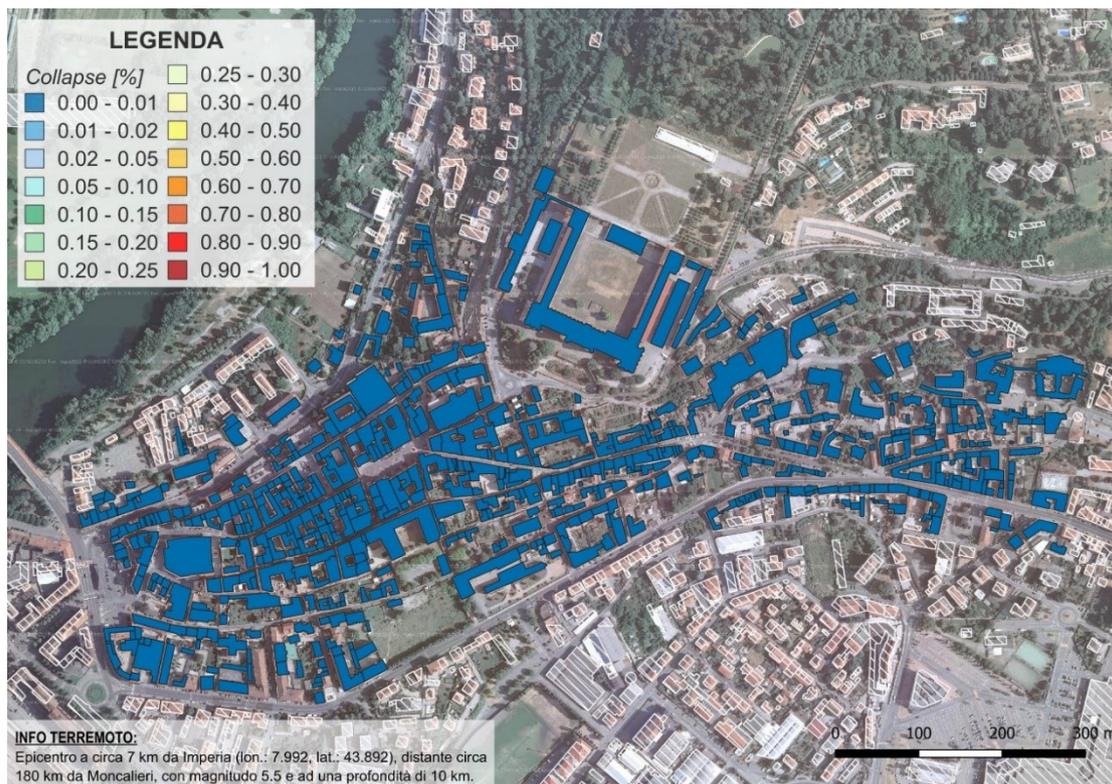


Figura 4-104: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – Collapse

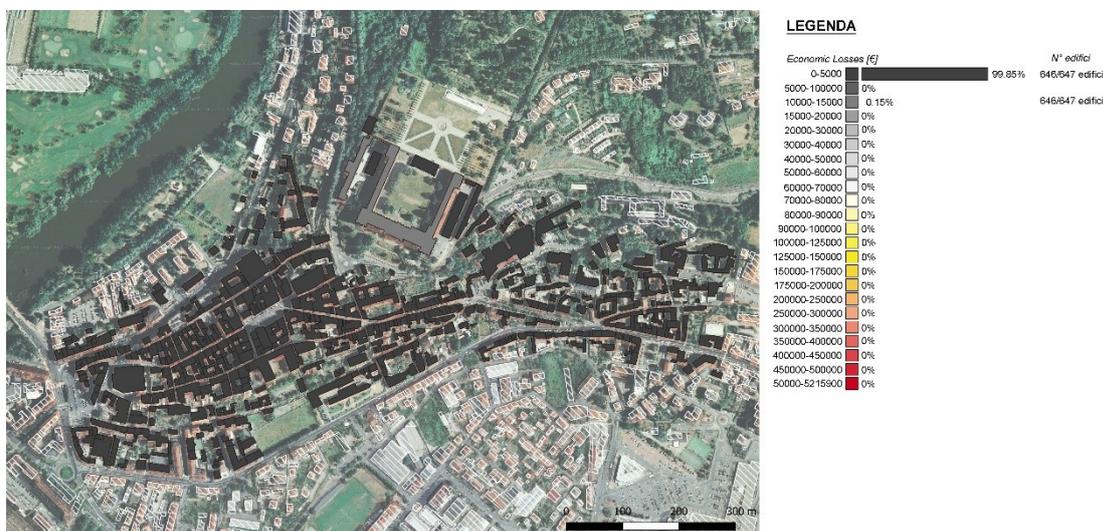


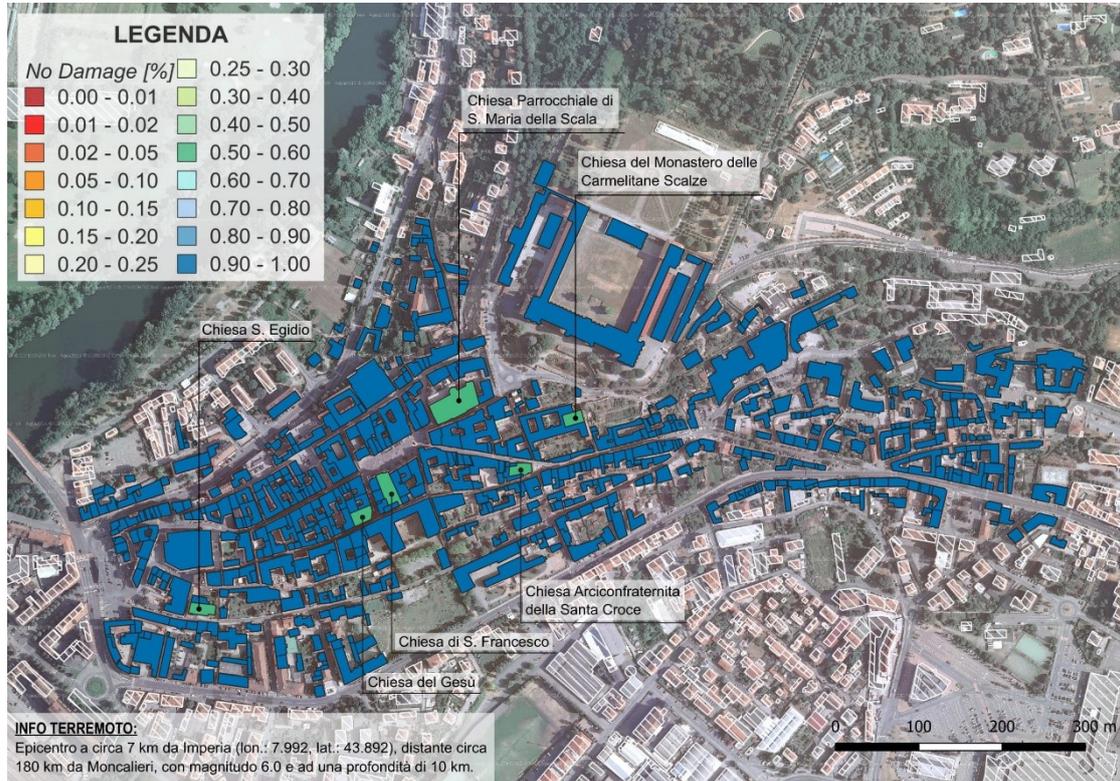
Figura 4-105: Perdite economiche del centro storico di Moncalieri considerando un terremoto di magnitudo 5.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia)

Nel caso in cui si verifichi un terremoto di magnitudo pari a 5.5 in Liguria, vicino ad Imperia, si ha una probabilità compresa tra il 70% e l'80% che non si verifichi alcun tipo di danno nelle chiese del centro storico di Moncalieri mentre per tutti gli altri edifici la probabilità che questi non subiscano alcun tipo di danno è pari al 100%. (Figura 4-101). Di conseguenza, per gli edifici monumentali, si avrà una probabilità del 10%-15% che si verifichi un danno leggero (Figura

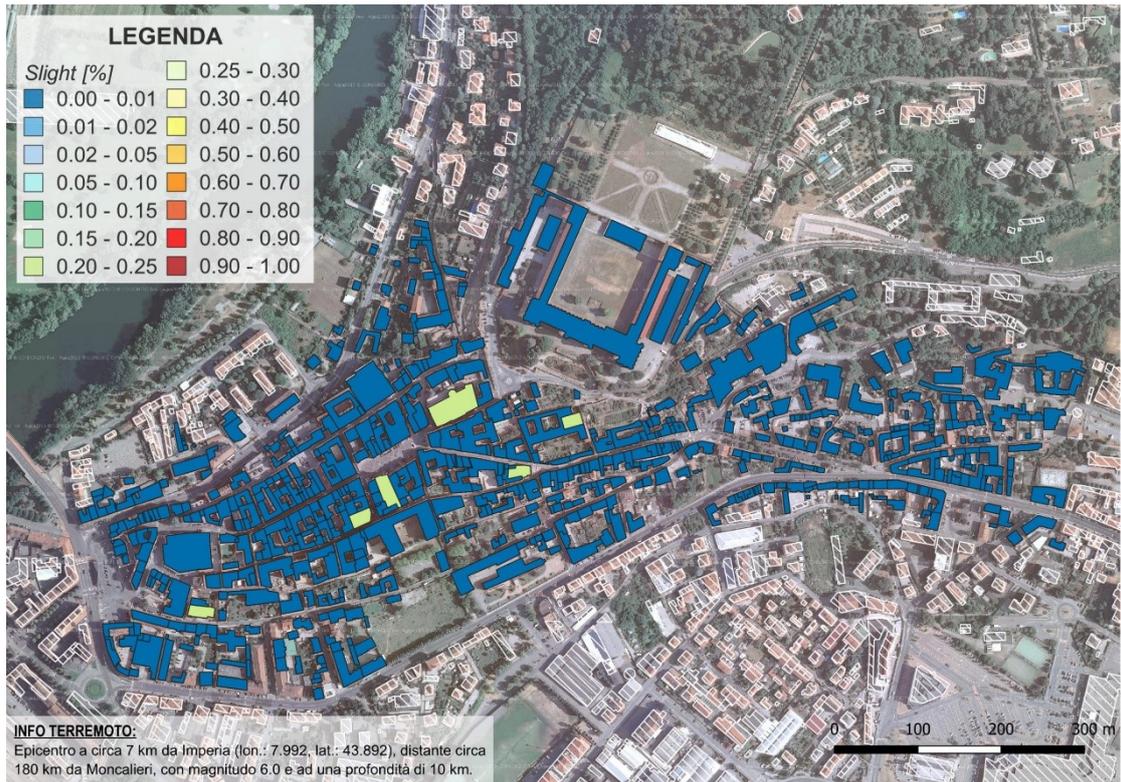
4-102) ed una probabilità del 5%-10% che si verifichi un danno medio (Figura 4-103). Nessun edificio invece ha alcuna probabilità di collassare (Figura 4-104).

Per quanto riguarda la Figura 4-105, coerentemente con le mappe di cui sopra, riporta una perdita economica nulla per questo tipo di scenario sismico.

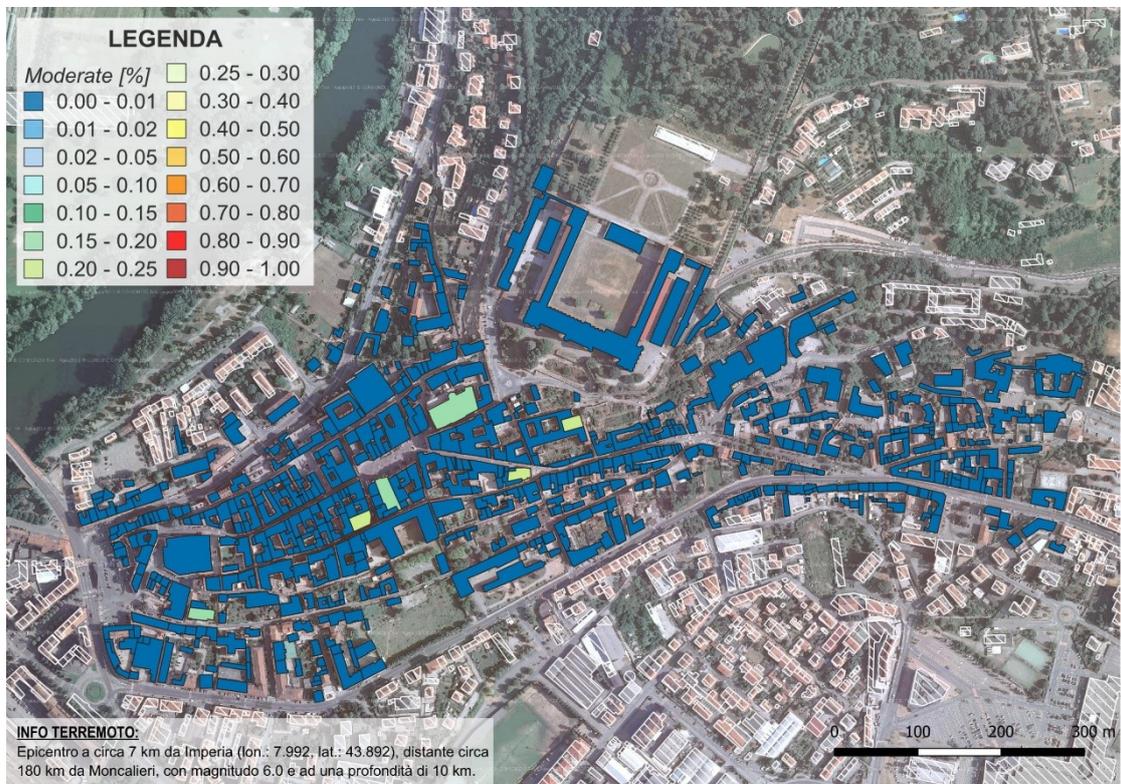
#### Liguria, magnitudo 6.0



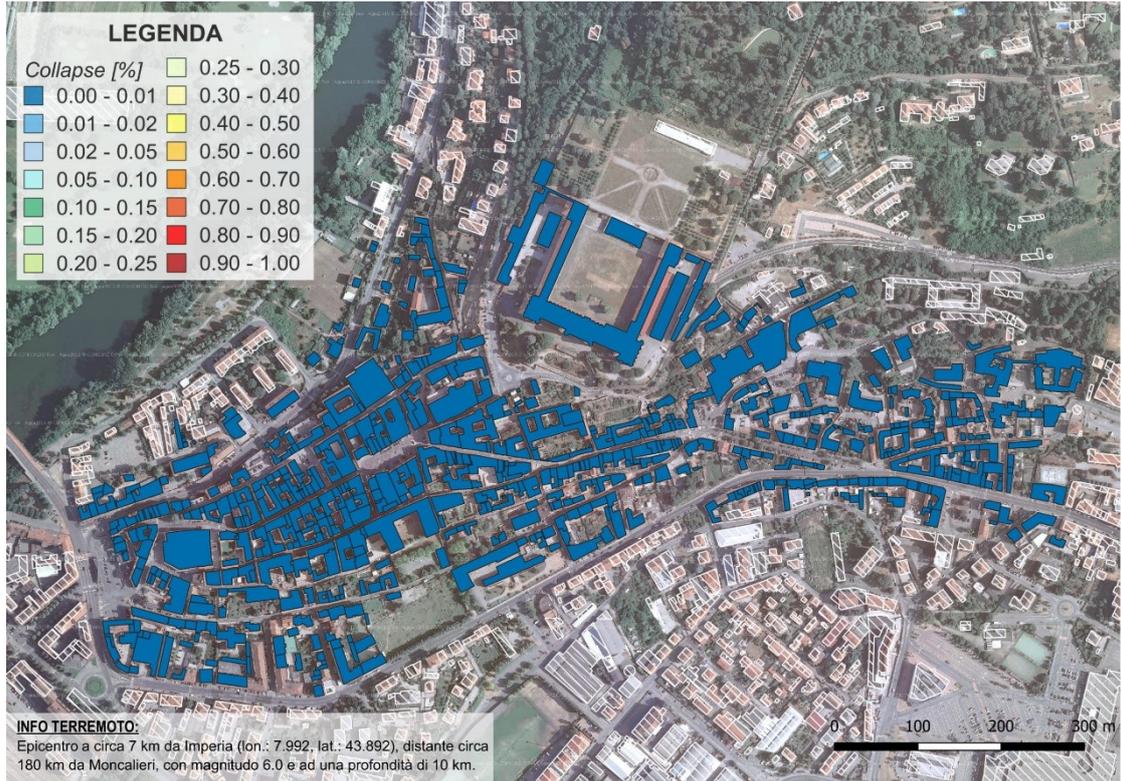
**Figura 4-106: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.0 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – No damage**



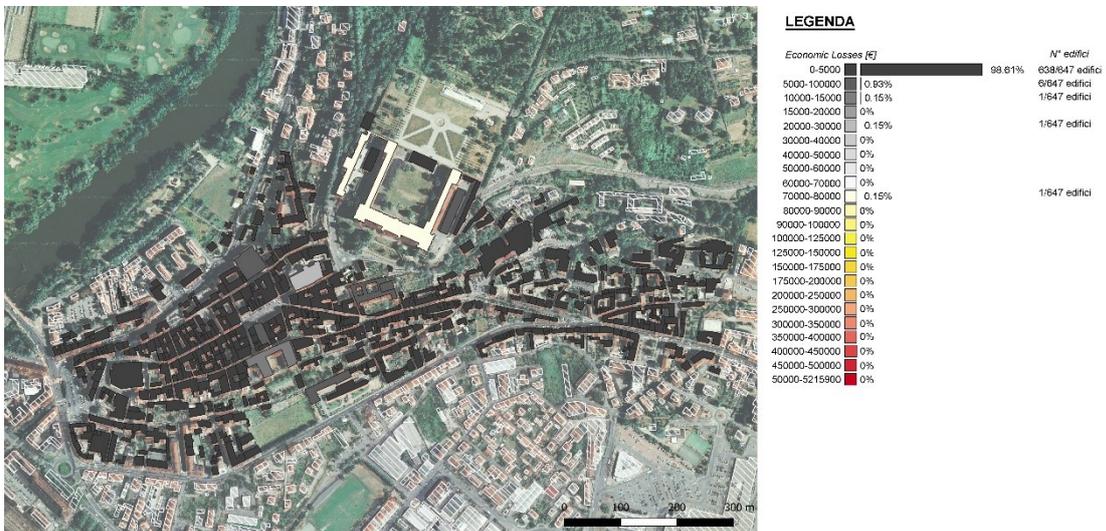
**Figura 4-107: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.0 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – Slight**



**Figura 4-108: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.0 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – Moderate**



**Figura 4-109: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.0 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – Collapse**

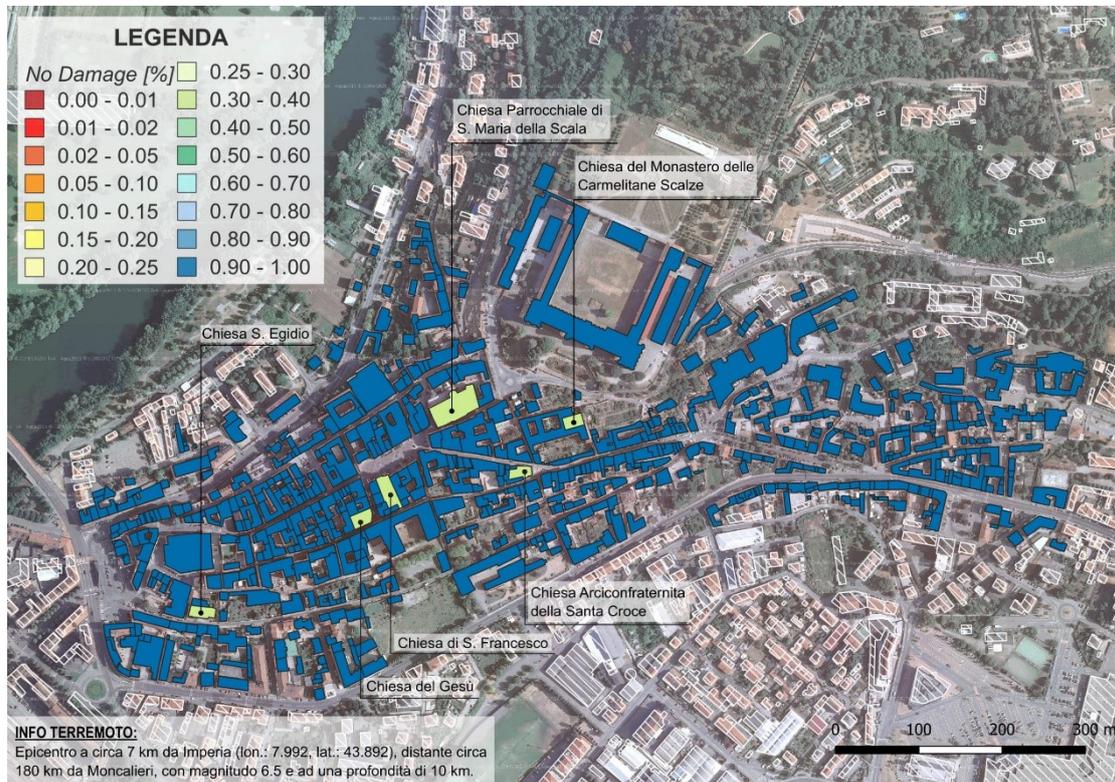


**Figura 4-110: Perdite economiche del centro storico di Moncalieri considerando un terremoto di magnitudo 6.0 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia)**

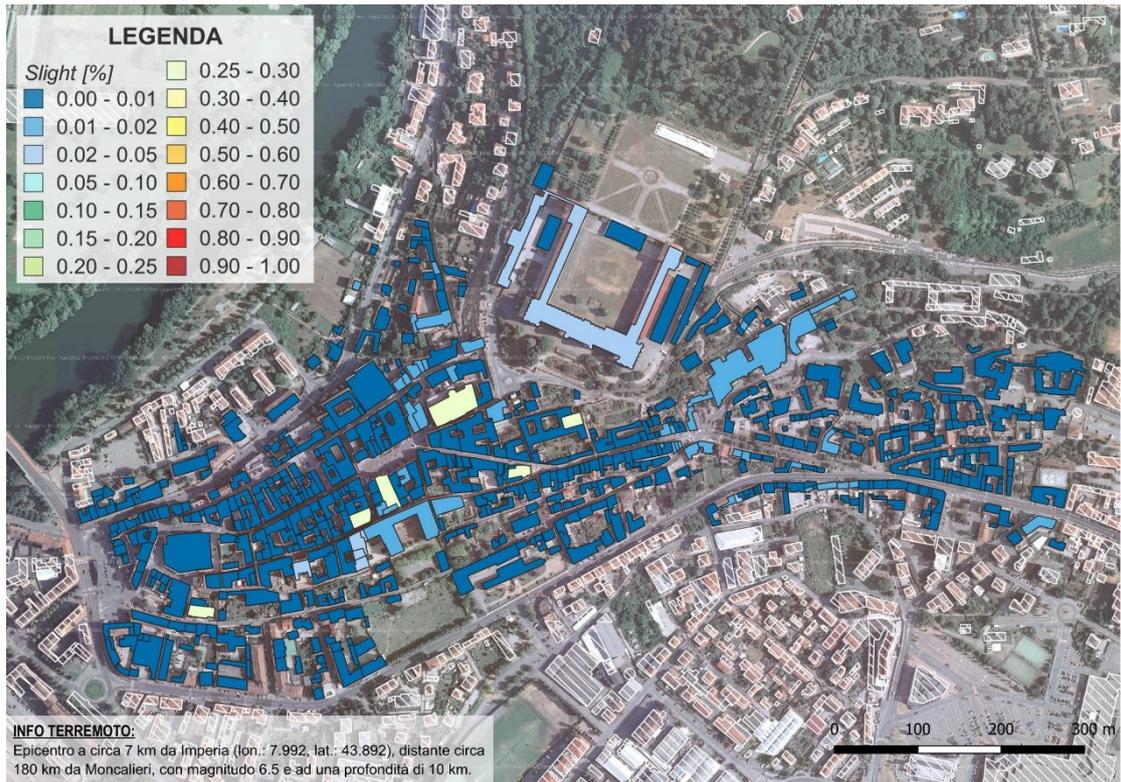
Considerando un terremoto di magnitudo 6.0 con epicentro in Liguria si può notare dalla Figura 4-106, dalla Figura 4-107, dalla Figura 4-108 e dalla Figura 4-109 come il danno può verificarsi solo negli edifici di tipo monumentale (chiese), con una percentuale di probabilità compresa tra il 30% ed il 40% che si verifichi un danno leggero e tra il 30% e 50% che si verifichi un danno più ingente. Nessuna struttura invece è soggetta a collasso per un evento di tale entità.

La Figura 4-110 mostra come sono distribuite le perdite economiche del centro storico di Moncalieri con uno scenario simile; come sempre, nella prima fascia, con perdite tra 0 € e 5000 €, ricadono la maggior parte degli edifici (96.61%), ad esclusione, come sempre, del castello di Moncalieri.

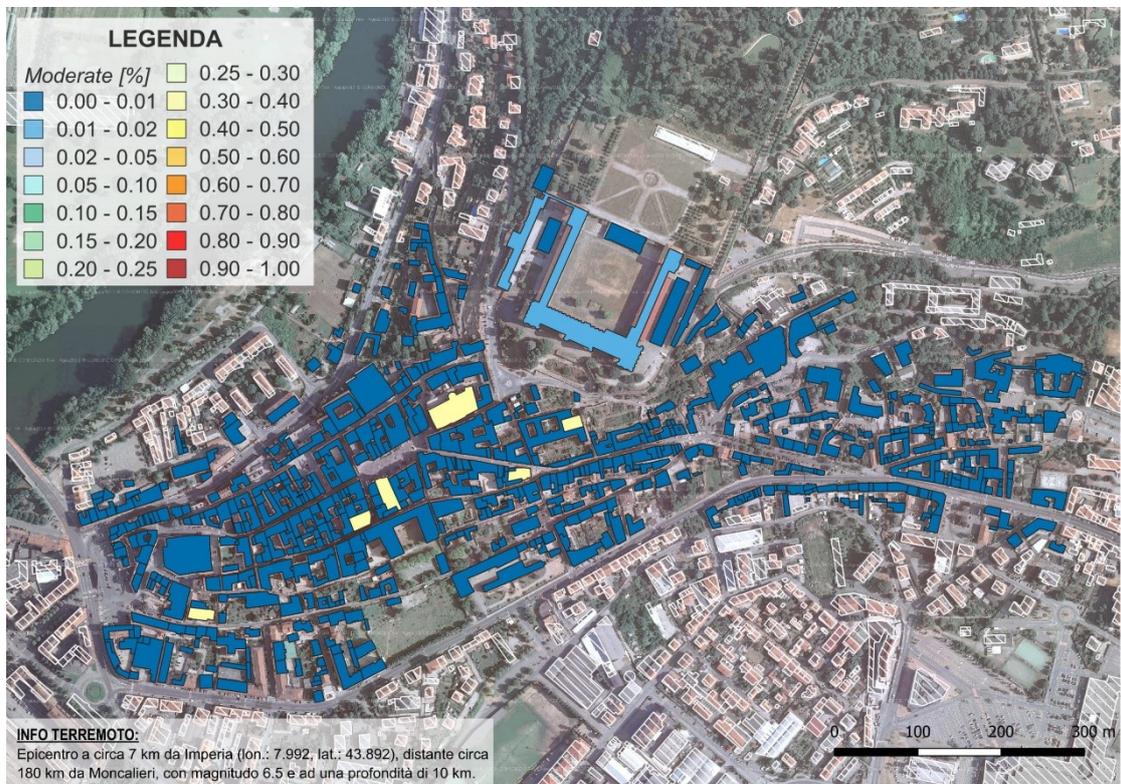
Liguria, magnitudo 6.5



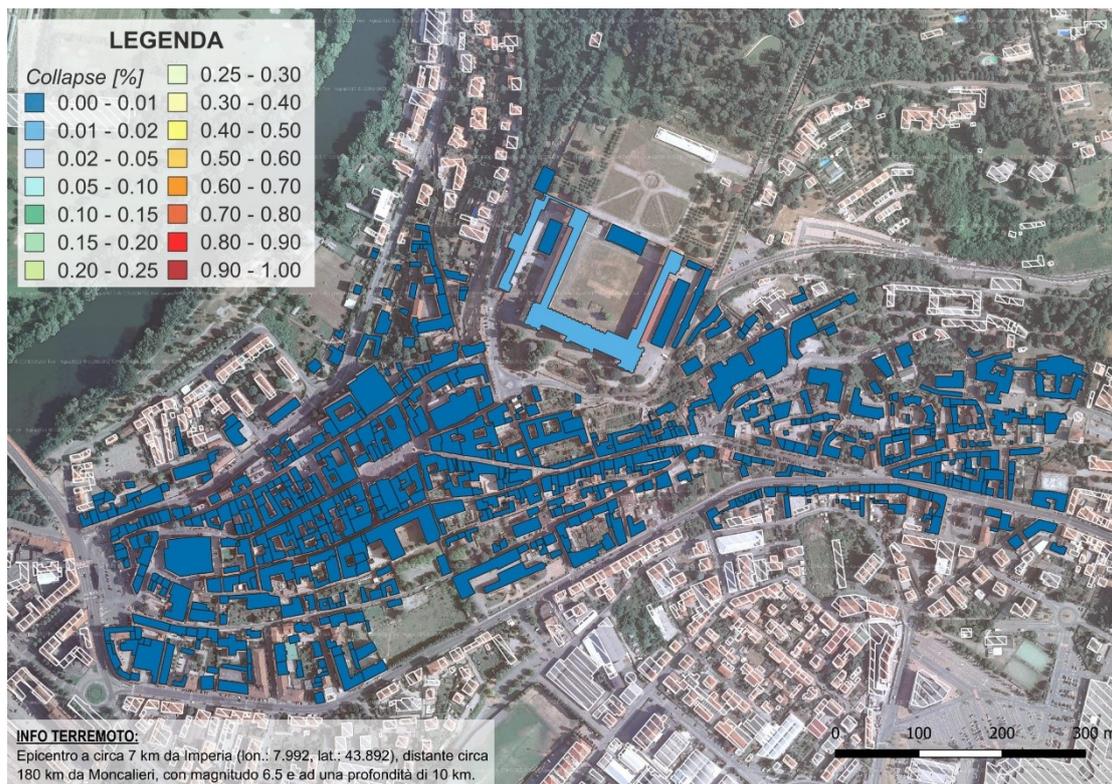
**Figura 4-111: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – No damage**



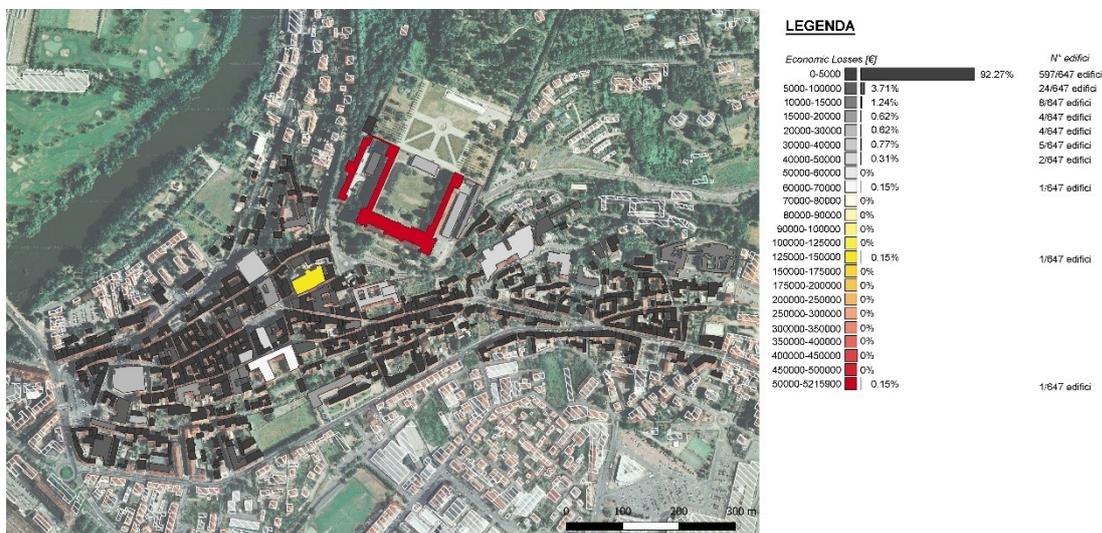
**Figura 4-112:** Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – *Slight*



**Figura 4-113:** Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – *Moderate*



**Figura 4-114: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – Collapse**



**Figura 4-115: Perdite economiche del centro storico di Moncalieri considerando un terremoto di magnitudo 6.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia)**

La Figura 4-111, la Figura 4-112, la Figura 4-113 e la Figura 4-114 mostrano la distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri nel caso in cui si verifichi un evento sismico di magnitudo 6.5 con epicentro in Liguria. Anche in questo caso non vi sono elevati danni alle strutture del centro storico, solo gli edifici monumentali hanno una probabilità compresa tra il 30% ed il 40%

di non subire danni. Di conseguenza, per tali edifici vi è una probabilità compresa tra il 25% ed il 30% di subire un danno basso ed una probabilità del 30%-40% di soffrire un danno moderato.

La Figura 4-115 mostra le perdite economiche del centro storico di Moncalieri per lo scenario già delineato poco sopra e, anche per questo evento, il 92.27% degli edifici ha una perdita economica compresa tra 0 e 5000€.

## 4.8 Discussione dei risultati

Nel paragrafo 4.7.1 sono stati illustrati i risultati ottenuti eseguendo un'analisi di tipo probabilistico. Tale studio non si riferisce ad uno scenario specifico, infatti i file di input utilizzati per il calcolo della pericolosità sismica hanno permesso di calcolare l'accelerazione al suolo più probabile per la zona oggetto di studio con probabilità di eccedenza del 1%, 2%, 5%, 10%, 39% e 50%.

Come prevedibile, le accelerazioni al suolo sono piuttosto basse anche considerando periodi di ritorno elevati, come viene mostrato dalla Figura 4-116.

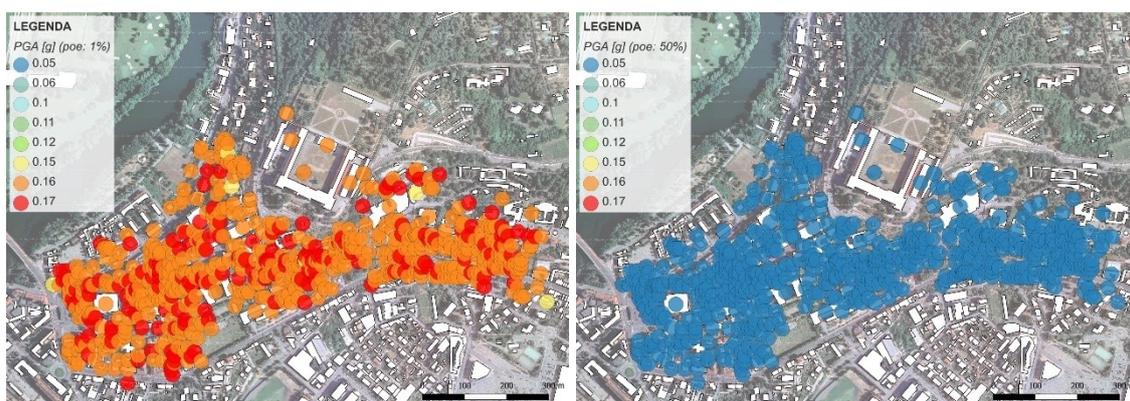


Figura 4-116: Confronto delle mappe di pericolosità sismica del centro storico di Moncalieri considerando una probabilità di eccedenza dell'1% (sinistra) e del 50% (destra)

Dopo aver identificato la pericolosità sismica del sito di interesse sono state elaborate le mappe del rischio sismico del centro storico di Moncalieri. Si è deciso di studiare tale zona in quanto più vulnerabile e con una più alta concentrazione di edifici vincolati risalenti anche ad epoca medievale.

Comparando i risultati delle mappe del rischio con probabilità di eccedenza dell'1% in 50 anni (periodo di ritorno di 2475 anni; Figura 4-117-Figura 4-118) e con probabilità di eccedenza del 50% in 50 anni (periodo di ritorno di 72 anni; Figura 4-119-Figura 4-120) si è notato che, nel primo caso, le perdite economiche sono maggiori, con una perdita massima pari a 4'889'440€ riferita al castello di Moncalieri. Nel secondo caso le perdite sono inferiori, concentrandosi principalmente tra 0€ e 40'000€, anche qui, l'unico risultato che si discosta dal resto degli edifici è il castello di Moncalieri, in quanto ha una superficie in pianta molto vasta.

Dall'istogramma in Figura 4-121 si confrontano la distribuzione del numero di edifici presenti in ogni fascia di perdita per le due probabilità di eccedenza. Se con una probabilità di eccedenza del 50% gli edifici si concentrano principalmente nelle prime fasce, caratterizzate da perdite più basse, per probabilità di eccedenza pari all'1% gli edifici si distribuiscono in quasi tutte le fasce economiche considerate.

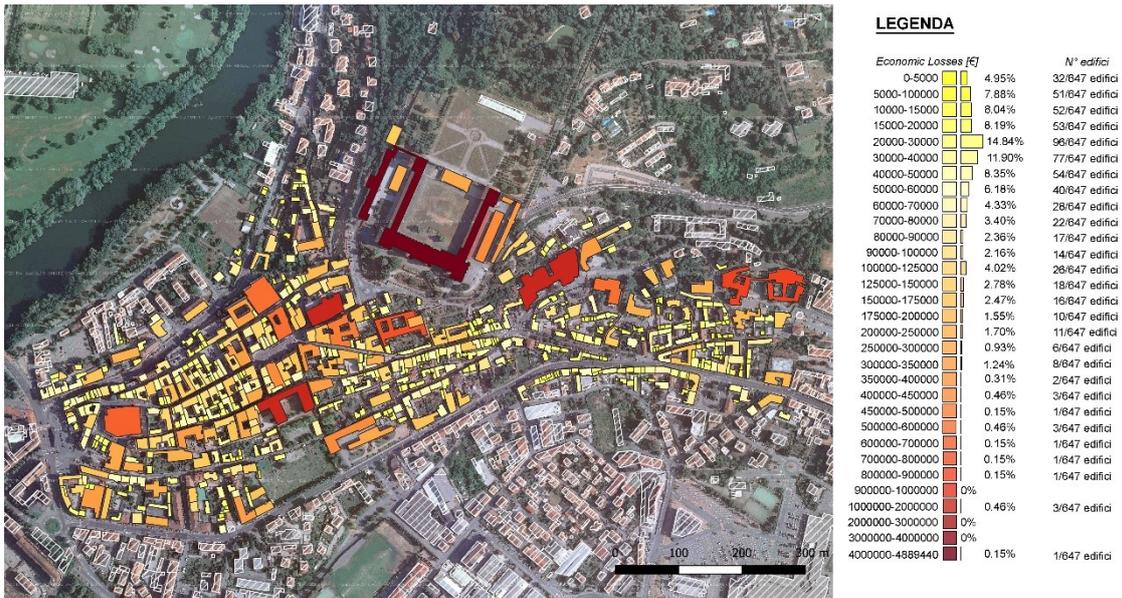


Figura 4-117: Distribuzione delle perdite economiche nella città di Moncalieri con una probabilità di eccedenza dell'1% in 50 anni

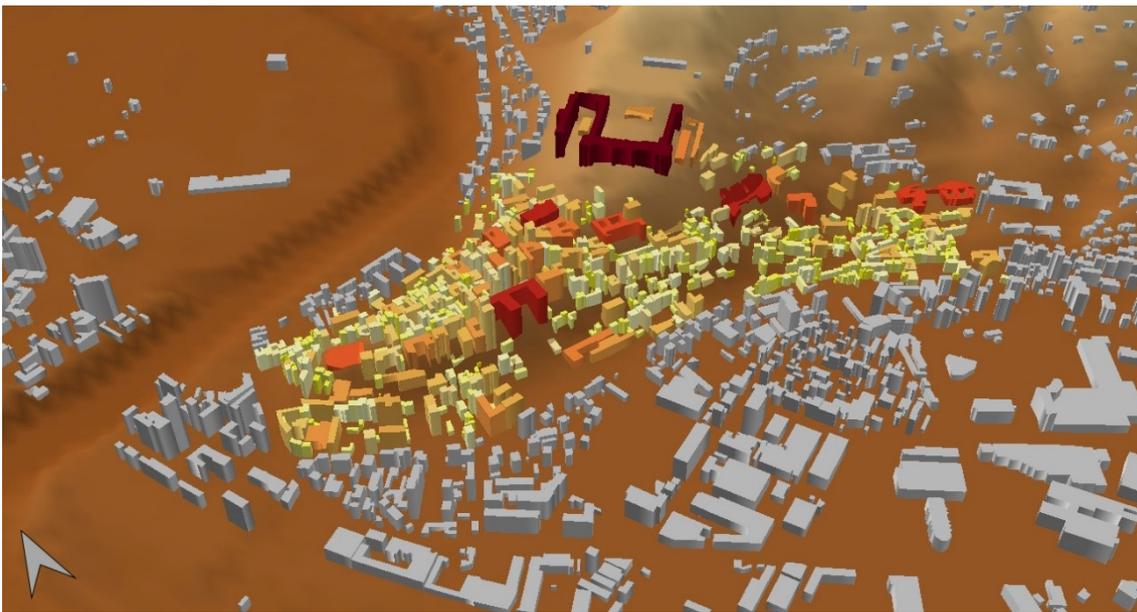


Figura 4-118: Visualizzazione 3D del rischio sismico del centro storico di Moncalieri con probabilità di eccedenza dell'1% in 50 anni (ArcScene)

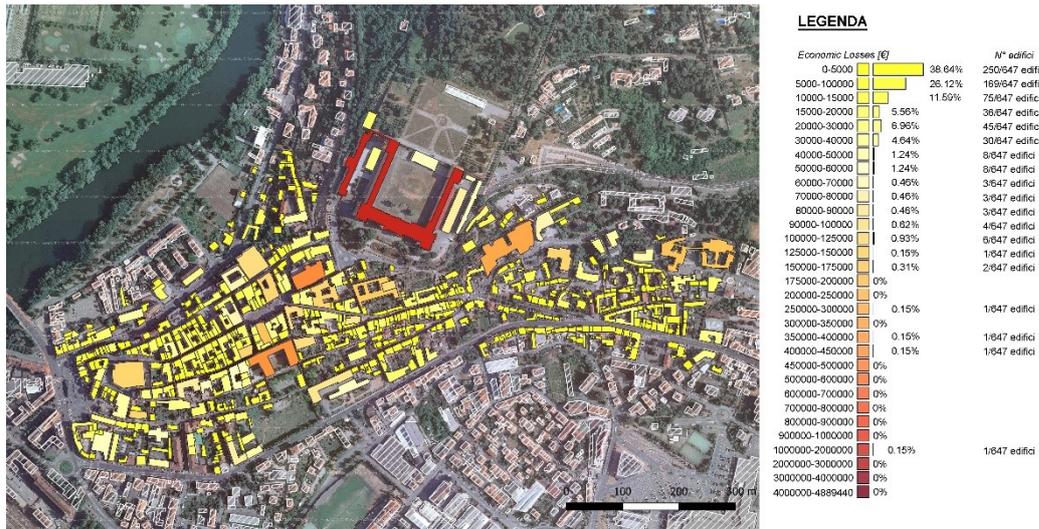


Figura 4-119: Distribuzione delle perdite economiche nella città di Moncalieri con una probabilità di eccedenza del 50% in 50 anni

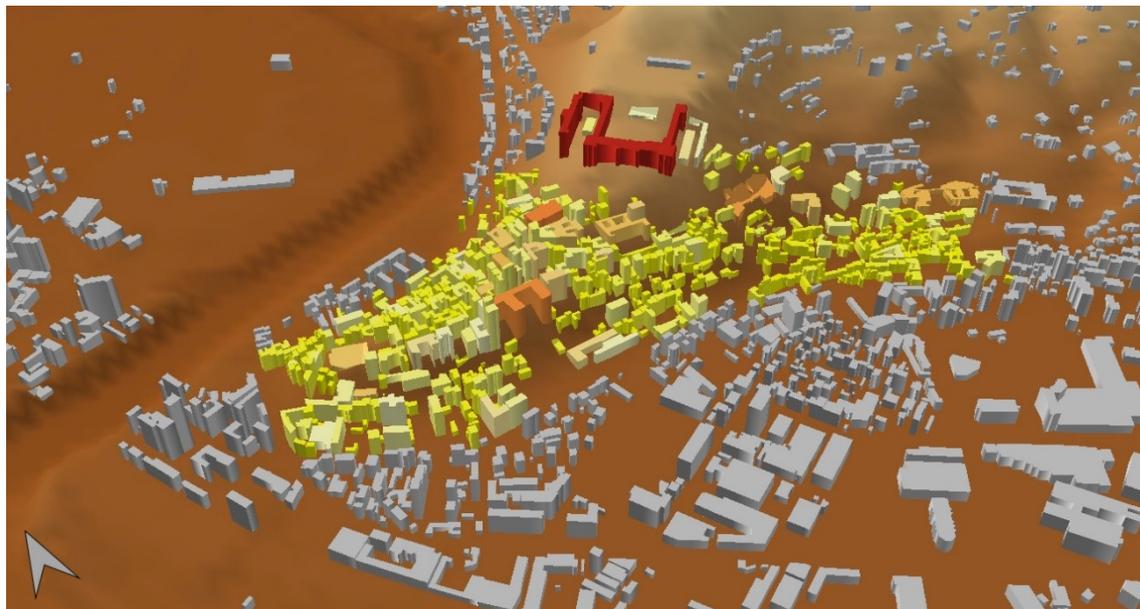
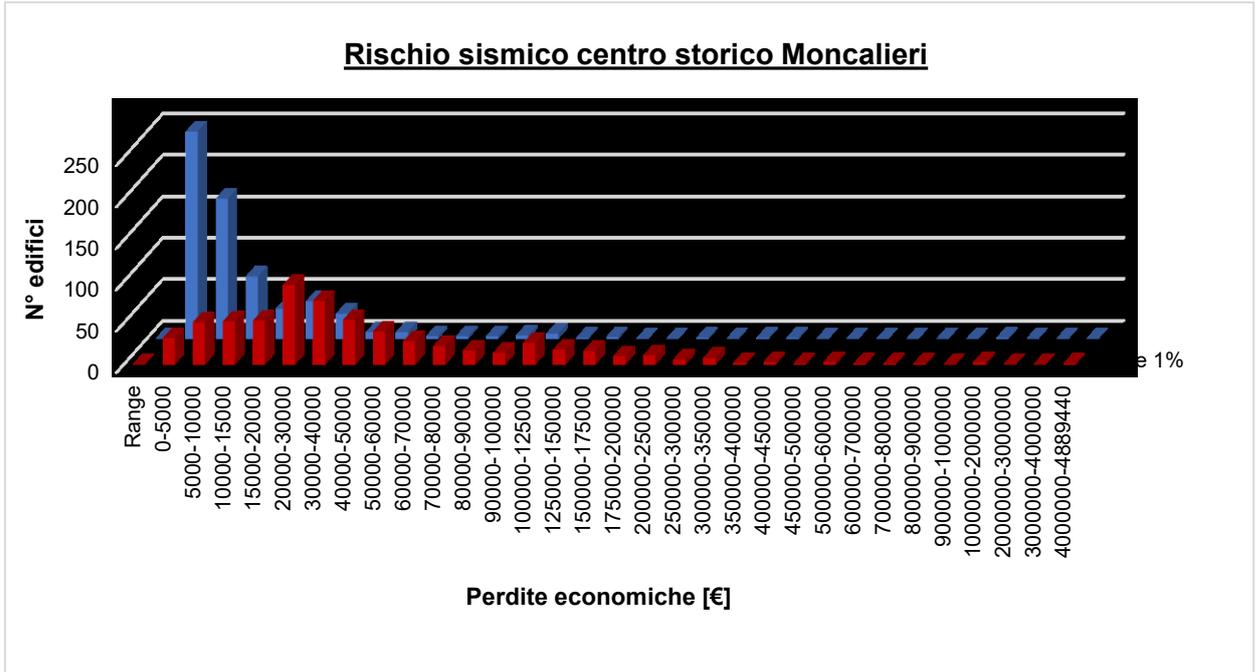


Figura 4-120: Visualizzazione 3D del rischio sismico del centro storico di Moncalieri con probabilità di eccedenza del 50% in 50 anni (ArcScene)



**Figura 4-121: Distribuzione del numero di edifici nelle varie fasce di perdita per probabilità di eccedenza dell'1% e del 50%**

Inoltre, si è notato che gli elementi con un più alto impatto economico sono gli edifici vincolati, in quanto è stata apportata una maggiorazione di prezzo, e gli edifici con una superficie in pianta considerevole, in quanto sono stati considerati dei costi al m<sup>2</sup>.

Le mappe del rischio, in termini di perdite economiche, costruite per la città di Moncalieri forniscono dati attendibili, nonostante sia stata eseguita un'analisi speditiva per valutare le caratteristiche degli edifici. Tali mappe, inoltre, forniscono un primo interessante spunto per identificare gli edifici più a rischio e per introdurre i primi piani di gestione e mitigazione degli eventi catastrofici.

Nel paragrafo 4.7.2 invece sono stati elencati i risultati relativi alla distribuzione del danno e delle perdite nel centro storico di Moncalieri considerando differenti scenari sismici.

Eseguendo tali analisi si è notato come il verificarsi di un terremoto con epicentro in Liguria e con magnitudo pari a 6.5, può provocare danni lievissimi al centro storico di Moncalieri; le uniche strutture che hanno una probabilità, seppur bassa, di danneggiarsi sono gli edifici monumentali che, coerentemente con quanto già ribadito, possono attivare i tipici meccanismi di rottura anche per terremoti di lieve intensità. Nel caso invece in cui si verificasse un terremoto con stessa magnitudo ma epicentro in Val Pellice si può notare come, nel centro storico di Moncalieri, la probabilità di danneggiamento degli edifici aumenta notevolmente.

Di seguito vengono comparati i due differenti scenari sismici (Figura 4-122).

4 Analisi della pericolosità e del rischio sismico della città di Moncalieri

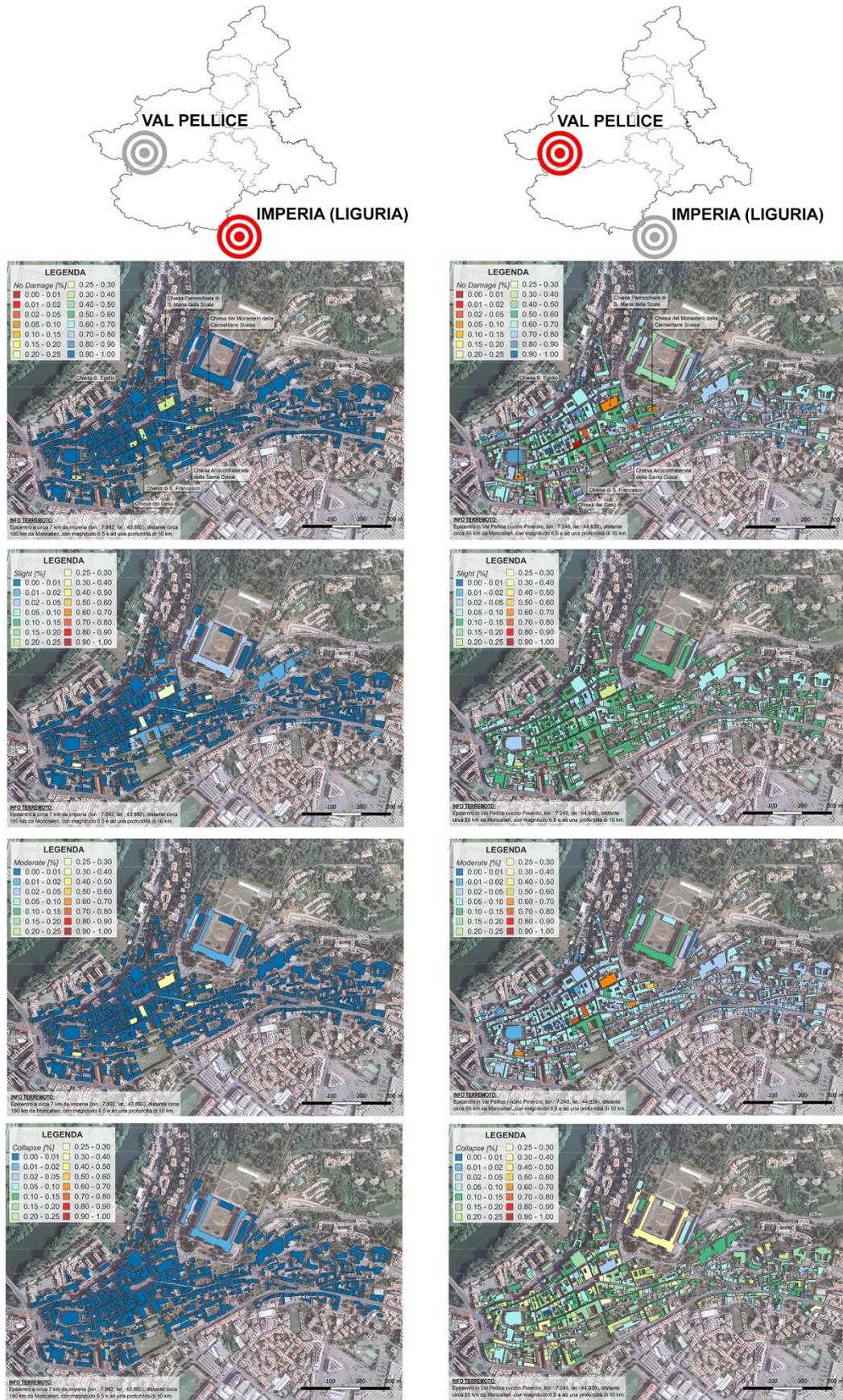


Figura 4-122: Comparazione delle mappe di distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.5 ed epicentro in Liguria (sinistra) e Val Pellice (destra)

Successivamente, vengono comparati i due istogrammi che mostrano in maniera immediata il numero di edifici che può subire danno nel caso di terremoto con magnitudo 6.5 in Liguria (Figura 4-123) ed in Val Pellice (Figura 4-124). Viene rimarcata la differenza di danni che possono causare i due terremoti con stessa intensità ma con epicentro posizionato in due luoghi differenti. Se l'epicentro fosse in Liguria gli edifici risulterebbero per la maggior parte non danneggiati, fatta eccezione per le sei chiese (con probabilità compresa tra il 30% ed il 40%). Nel caso invece in cui il terremoto avvenisse in Val Pellice il numero di edifici con probabilità massima di non subire alcun tipo di danno è assente.

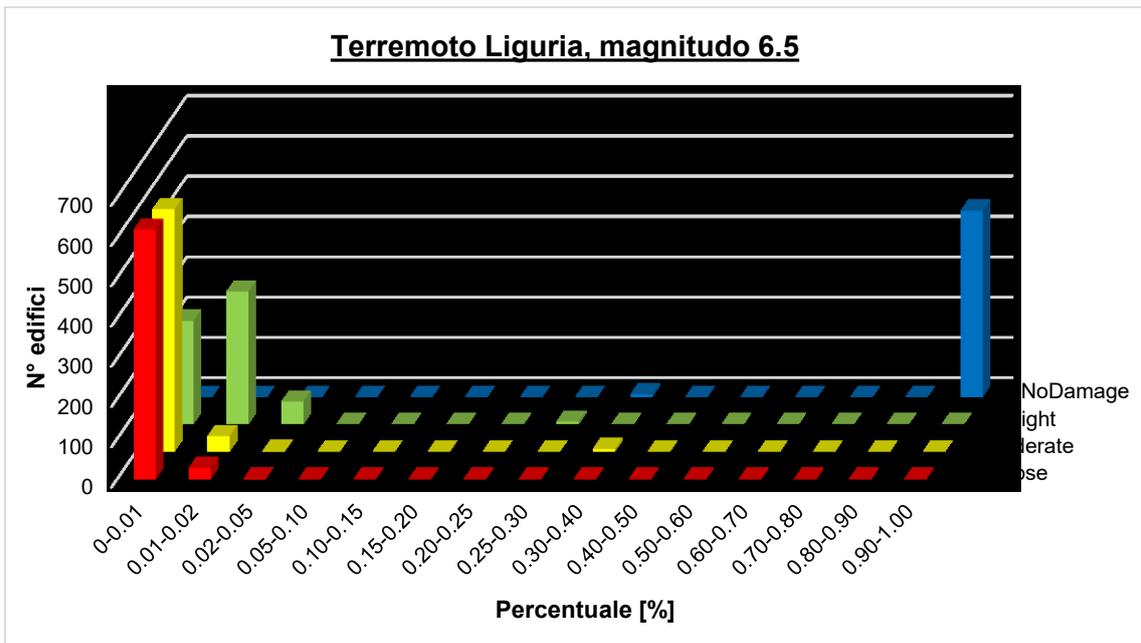


Figura 4-123: Istogramma che mostra il numero di edifici con *no damage*, danno *slight*, *moderate* e *complete* per un terremoto con epicentro in Liguria e magnitudo 6.5

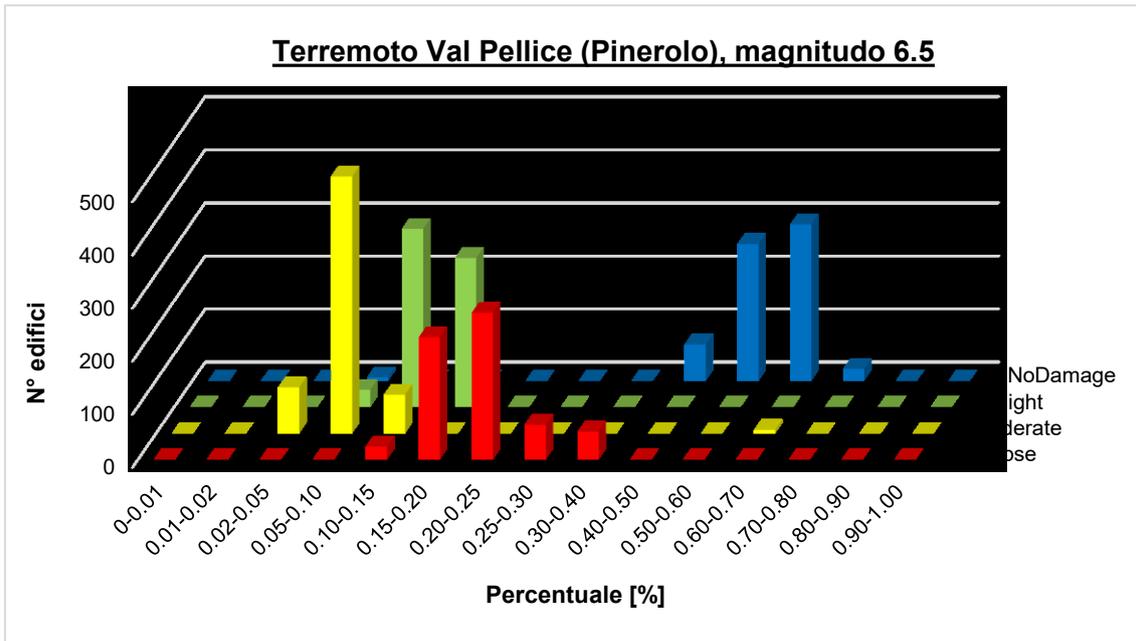
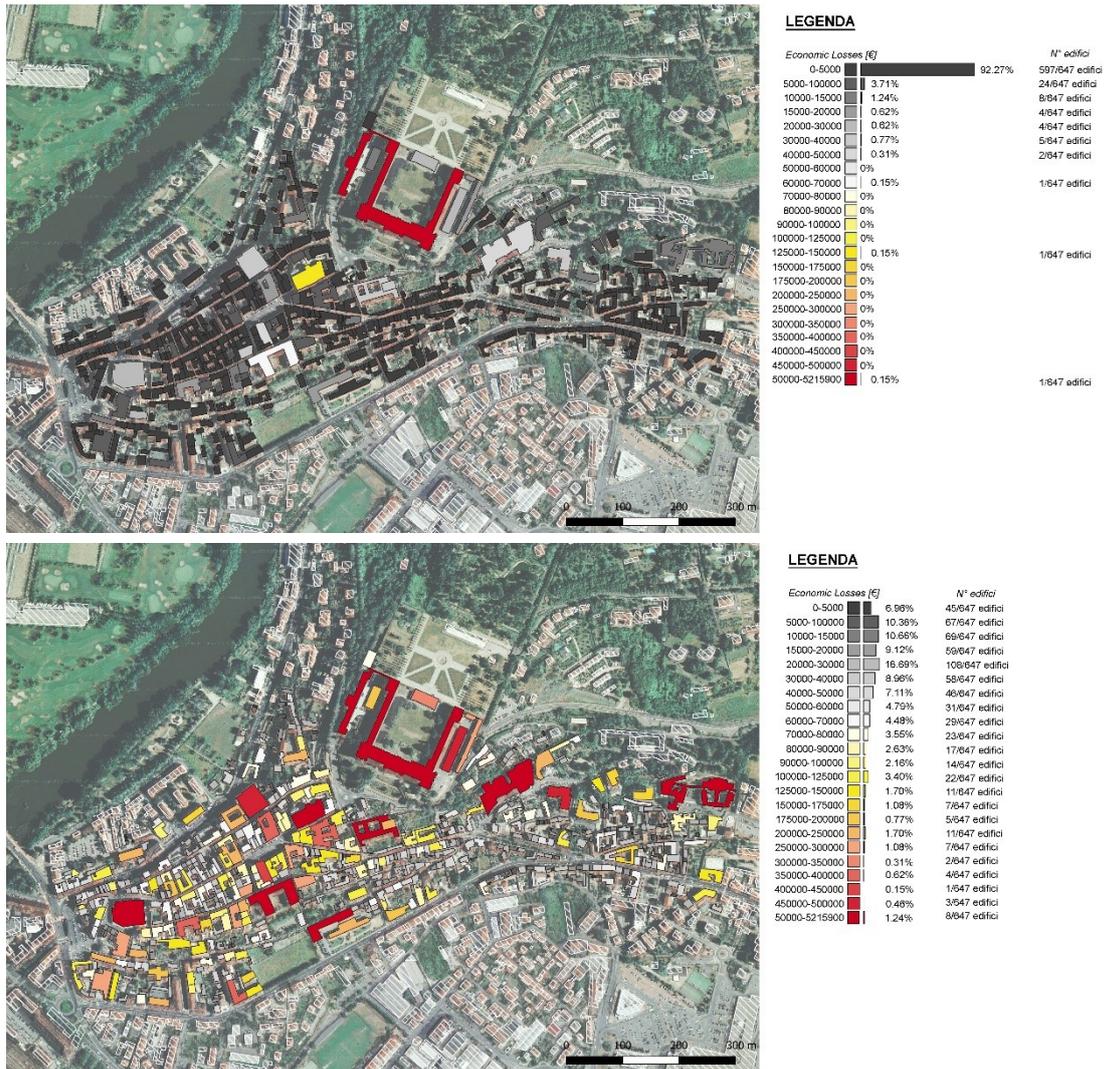


Figura 4-124: Istogramma che mostra il numero di edifici con no damage, danno slight, moderate e complete per un terremoto con epicentro in Val Pellice e magnitudo 6.5

Anche dalla distribuzione delle perdite economiche si può notare la differente percezione che il centro storico di Moncalieri ha nei confronti dei due terremoti con stessa intensità ma con epicentro in luoghi differenti. Infatti, se con epicentro in Liguria si ha il 92.27% di edifici con perdite comprese tra 0 € e 5000 €, in Val Pellice le perdite economiche del centro storico di Moncalieri aumentano enormemente, distribuendosi lungo tutte le fasce di prezzi (Figura 4-125).



**Figura 4-125: Distribuzione delle perdite economiche nel centro storico di Moncalieri causate da terremoto di magnitudo 6.5 con epicentro in Liguria (in alto) e in Val Pellice (in basso)**

Quindi, i danni che provocherebbe un terremoto di alta intensità nella zona del Pinerolese al centro storico di Moncalieri non sono da sottovalutare. Anzi, essendo considerata una zona a bassa sismicità l'avvento di un terremoto potrebbe provocare più danni del dovuto in quanto le abitazioni probabilmente non sono costruite seguendo le classiche tecniche anti-sismiche.



## 5 Conclusioni

Le analisi a scala territoriale stanno diventando uno strumento sempre più influente, utilizzato dai diversi enti per differenti scopi: sia per la catalogazione di beni ambientali e urbanistici sia per la loro gestione. Gli odierni strumenti permettono di rendere editabili e correlabili questi enormi database di dati in modo da renderli più dinamici, in quanto prima risultavano statici in differenti cartografie. Ad oggi, attraverso moderni software, è possibile valutare la risposta di un sistema urbano e ambientale al turbamento di un evento esterno, sia esso improvviso e catastrofico, come un terremoto o un'alluvione, o più prolungato nel tempo (cambiamenti climatici o consumo del suolo).

Il presente lavoro di tesi ha lo scopo di gettare le basi per la realizzazione di strumenti pianificatori, utili sia ad enti, pubblici o privati, sia alla collettività, adatti a ridurre il rischio e gestire e mitigare i disastri causati da eventi catastrofici, quali, nel nostro caso, i terremoti. Questo tipo di valutazioni a scala territoriale è sempre più oggetto di ricerca, in quanto i movimenti improvvisi del terreno causano perdite economiche ed umane, entrambe di grave impatto per la nazione, oltre che perdite relative al patrimonio storico e culturale.

Lo scenario che si verifica successivamente ad un sisma è la conseguenza di una serie di eventi simultanei che possono essere gestiti e mitigati: è qui che si inserisce l'analisi sul rischio.

Le analisi sono state svolte sulla città di Moncalieri, situata in Piemonte, utilizzata come caso studio del progetto. Il punto di partenza dell'intero lavoro è stato quello di raccogliere i dati degli edifici situati a Moncalieri, utili a definire il comportamento sismico delle strutture e necessari all'elaborazione delle varie analisi. I dati a scala territoriale sono stati introdotti in uno strumento GIS, adatto alla loro catalogazione ed elaborazione.

In un secondo momento si è deciso di concentrare le analisi del rischio sismico sul centro storico di Moncalieri, in quanto più vulnerabile rispetto agli altri nuclei insediativi.

Alla base delle valutazioni sul rischio sismico vi è uno studio sulla pericolosità sismica del sito oggetto di studio e sull'esposizione, vulnerabilità e fragilità delle strutture.

Per studiare il comportamento sismico degli edifici, gli sono state attribuite delle caratteristiche che potevano essere valutate in maniera immediata, grazie ai dati vettoriali forniti dal Geoportale della Regione Piemonte, quali la datazione degli edifici, la loro destinazione d'uso, la loro tipologia costruttiva, la loro altezza totale ed il numero di piani presenti in ogni struttura del centro storico. Dopo aver individuato i vari attributi è stato possibile definire una tassonomia per ogni struttura e associargli un modello di vulnerabilità e di fragilità che ne descrivesse il comportamento sismico.

Grazie all'elaborazione di questi dati è stato possibile ottenere una mappa del rischio sismico del centro storico di Moncalieri, in termini di perdite economiche; tali perdite si riferiscono alla parte strutturale dell'edificio, sono state infatti trascurate le perdite economiche non strutturali, quelle relative al contenuto presente all'interno di ogni edificio e quelle relative all'interruzione

dell'attività a causa del sisma. Questo strumento è utile per individuare gli edifici più vulnerabili e studiare strategie di mitigazione con priorità più alta per le strutture che contribuiscono maggiormente alle perdite totali. Per approfondire la ricerca si è deciso di valutare anche la distribuzione del danno e le relative perdite economiche di dodici specifici scenari sismici.

I risultati ottenuti hanno mostrato che, nonostante una catalogazione estremamente speditiva delle caratteristiche degli edifici, è stato comunque possibile arrivare a dei risultati concreti, che potranno successivamente essere affinati per una migliore valutazione. È fondamentale sottolineare che è stato possibile ottenere esiti soddisfacenti, con cui poter già sviluppare piani di prevenzione e mitigazione, solo ed unicamente elaborando i dati offerti dal Geoportale Piemonte, senza la necessità di recarsi sul luogo oggetto di studio, in questo caso Moncalieri. Tali dati, se presi separatamente sono a sé stanti mentre se elaborati insieme possono fruttare notevoli risultati. Gli esiti sul rischio sismico sono stati successivamente implementati in ambiente GIS, in modo tale da poter essere di facile comprensione per qualsiasi soggetto, dallo specialista al cittadino.

In conclusione, le analisi eseguite in tale studio possono essere utili per lo stato, i professionisti o i ricercatori che necessitano di immediate stime sulla pericolosità e il rischio sismico in modo da pianificare l'uso del suolo, migliorare le costruzioni, i piani di risposta alle emergenze ed ogni altro tipo di mitigazione del rischio.

Infine, volendo brevemente indicare gli sviluppi previsti per il progetto si può formulare il seguente elenco:

- Acquisizione di maggiori informazioni sugli edifici, quali per esempio la disposizione dei muri, la presenza o meno di irregolarità in pianta ed in altezza, in modo da definire una tassonomia più dettagliata e, di conseguenza, diversificare maggiormente il comportamento sismico degli edifici;
- Aumentare il raggio di studio al di fuori del centro storico di Moncalieri, in modo tale da non concentrarsi unicamente sulle strutture in muratura, ma anche, per esempio, sugli edifici in cemento armato e su quelli industriali;
- Considerare, oltre alle perdite strutturali, anche quelle non strutturali, quelle relative ai contenuti (per esempio, all'interno di una chiesa vi saranno oggetti con valore differente rispetto a quelli presenti all'interno di un'abitazione) e quelle relative all'interruzione dell'attività;
- Successivamente sarebbe interessante estendere questo tipo di analisi all'intera regione e, successivamente, anche a regioni a più alta sismicità, in modo tale da evidenziare i luoghi dove le perdite economiche sono maggiori;
- Tali analisi dovrebbero poi essere sviluppate anche per le infrastrutture, per valutare quelle che, nel caso di eventi sismici, sono le prime ad essere danneggiate;

- Infine, scopo ultimo del progetto, è quello di arrivare a formulare delle metodologie in grado di mitigare e gestire i rischi, inoltre, dopo aver valutato gli edifici attraverso le perdite economiche sarebbe interessante definire come poter agire su tali strutture in modo da ridimensionare tali perdite.



## 6 Bibliografia

- 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.
- Basaglia, A., A. Aprile, E. Spacone, e F. Pilla. «Performance-based Seismic Risk Assessment of Urban System.» *International Journal of Architectural Heritage*, 2018.
- Basili, R., et al. 2013. <http://diss.rm.ingv.it/share-edsf/>.
- Bellini, A., et al. «Abbecedario minimo per il restauro, oggi parte settima (Q-R).» In *L'abbeccedario Minimo*, di M. D. Bardeschi, 34-35. 2016.
- Bertolotto, C. «Moncalieri Medievale: una forma urbana sui percorsi della strada di Francia.» 247-261. Torino, s.d.
- Borzi, B., H. Crowley, e R. Pinho. «Simplified Pushover-Based Earthquake Loss Assessment (SP-BELA) Method for Masonry Buildings.» *Internationa Journal of Architectural Heritage*, 2008b: 353-376.
- Brunetta, G., et al. «Territorial Resilience towards a proactive meaning for Spatial Planning.» *Sustainability*, 2019 (in corso di pubblicazione).
- Cara, S., A. Aprile, L. Pelà, e P. Roca. «Seismic Risk Assessment and Mitigation Emergency Limit of Historical Buildings along Strategic Urban Roadways. Application to the "Antiga Esquerra de L'Eixample" Neighborhood of Barcelona.» *International Journal of Architectural Heritage*, 2018.
- Caretta, E. «La generazione di scenari sismici per la valutazione delle prestazioni antisismiche dei ponti nella rete viaria della regione Veneto.» Padova, 2013.
- Cassio, C., e M. L. Pistoì. *Moncalieri tra ieri e oggi: dalla fabbrica alla casa*. Torino: Celid, 1997.
- Catulo, R., A. P. Falcao, R. Bento, e S. Ildefonso. «Simplified evaluation of seismic vulnerability of Lisbon Heritage City Centre based on a DGIS-based methodology.» *Journal of Cultural Heritage*, 2018: 108-116.
- Chaulagain, H., H. Rodrigues, V. Silva, E. Spacone, e H. Varum. «Seismic risk assessment and hazard mapping in Nepal.» *Natural Hazards*, 2015: 583-602.
- DeSanctis, A. *Terremoti e idrocarburi. In Olanda danni per miliardi, il governo chiede scusa. E in Italia?* 2 Luglio 2015. <http://cdca.it/archives/14188>.
- Despotaki, V., V. Silva, S. Lagormarsino, I. Pavlova, e J. Torres. «Evaluation of Seismic Risk on UNESCO Cultural Heritage sites in Europe.» *International Journal of Architectural Heritage*, 2018.

- Dogliani, F., A. Moretti, e V. Petrini. *Le chiede e il terremoto*. Trieste: Edizioni LINT Trieste, 1994.
- Douglas, J. *Ground motion prediction equations 1964-2018*. Glasgow: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Strathclyde, 2019.
- ETH Zurich. *ETH zurich Servizio Sismico Svizzero*. s.d. <http://www.seismo.ethz.ch/it/knowledge/things-to-know/causes-of-earthquakes/induced/>.
- Ferreira, T. M. *How to manage and mitigate disaster risk in urban areas?* 2018. [https://blog.mscah.org/how-to-manage-and-mitigate-disaster-risk-in-urban-areas/?fbclid=IwAR1vrTK\\_Fy02OKdNai-SJv43J\\_kEOSK6pN0\\_LGblSVVtZSgOzU6babzbUY8&utm\\_source=facebook&utm\\_medium=post&utm\\_campaign=socialmediasahc](https://blog.mscah.org/how-to-manage-and-mitigate-disaster-risk-in-urban-areas/?fbclid=IwAR1vrTK_Fy02OKdNai-SJv43J_kEOSK6pN0_LGblSVVtZSgOzU6babzbUY8&utm_source=facebook&utm_medium=post&utm_campaign=socialmediasahc).
- Giovinazzi, S. «The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic risk analysis.» Firenze, 2005.
- Guidoboni, E., et al. «CFTI5Med, catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.-1997) e nell'area Mediterranea (760a.C.-1500).» *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)*. 2018. <http://storing.ingv.it/cfti/cfti5/#>.
- Hiemer, S., e D. D.; Wang, Q. Jackson. «A stochastic forecast of California earthquakes based on fault slip and smoothed seismicity.» *Bull Seismol Soc Am*, 2013: 799-810.
- Hofer, L., M. A. Zanini, e C. Pellegrino. «Pericolosità ed esposizione a livello mondiale: elementi primari da considerare per l'adozione di politiche di trasferimento del rischio all'industria assicurativa.» *ANIDIS 2015*. 2015.
- I terremoti di Groningen*. 27 Giugno 2017. <https://www.ilpost.it/2017/06/27/terremoti-groninger-estrazione-gas/>.
- Jayarama, N., e J. Baker. «Correlation model for spatially distributed ground-motion intensities.» *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2009: 1687-1708.
- Lagomarsino, S., e S. Cattari. «Fragility functions of masonry buildings.» In *SYNER-G: Typology definition and fragility functions for physical elements at seismic risk*, di K., Crowley, H., Kayania, A. M. Ptilakis, 111-156. Springer, 2014.
- Lagomarsino, S., e S. Podestà. «Seismic Vulnerability of Ancient Churches: II. Statistical Analysis of Surveyed Data and Methods for Risk Analysis.» *Earthquake Spectra*, 2004: 395-412.
- Lagomarsino, S. «On the vulnerability assessment of monumental buildings.» *Bull Earthquake Eng*, 2006: 445-463.

- Lagormarsino, S., e S. Cattari. «Seismic Vulnerability of Existing Buildings: Observational and Mechanical Approaches for Application in Urban Areas.» In *Seismic Vulnerability of Structures*, di P. Gueguen, 1-62. 2013.
- Margiotta, F., e G. (ENEA) Puglisi. *Caratterizzazione del parco edilizio nazionale Determinazione dell'edificio tipo per uso ufficio*. Ministero dello Sviluppo Economico, 2009.
- Meletti, C., e V. Montaldo. *Stime di pericolosità sismica per diverse probabilità di superamento in 50 anni: valori di ag*. 2006. <http://esse1.mi.ingv.it/d2.html>.
- Ministri, Il Presidente del Consiglio dei. «Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14/01/2008.» 2011.
- Pagani, M., D. Monelli, G. A. Weatherill, e J. Garcia. *The Openquake-Engine book: Hazard*. GEM Foundation, 2014.
- Pagani, M., V. Silva, A. Rao, M. Simionato, e R. Gee. *The OpenQuake-engine User Instruction Manual*. GEM Foundation, 2018.
- Pelà, L. «New Trends and Challenges in Large-Scale and Urban Assessment of Seismic Risk in Historical Centres.» *International Journal of Architectural Heritage*, 2018.
- Perazzolo Gallo, N. «Contributo allo sviluppo di un database integrato per la valutazione della vulnerabilità sismica di ponti nell'ambito di reti stradali.» Padova, 2012.
- Porter, K. «Cracking an Open Safe: Unvertainty in HAZUS-bbased Seismic Vulnerability Functions.» *Earthquake Spectra*, 2010: 893-900.
- Redweik, P., P. Teves-Costa, I. Vilas-Boas, e T. Santos. «3D City Models as Visual Support Tool for the Analysis of Building Seismic Vulnerability: the Case of Lisbon.» *Int J Disaster Risk Sci*, 2017: 308-325.
- Regione Piemonte. *BDTRE 2018 - Database Geotopografico (Dataset vettoriale)*. 2018. <http://www.geoportale.piemonte.it/geocatalogorp/index.jsp>.
- Rossetto, T., D. D'Ayala, I. Ioannou, e A. Meslem. «Evaluation of Existing Fragility Curves.» In *SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk*, di K., Crowley, H., Kaynia, A. M. Pitilakis, 47-93. Springer, 2014.
- Rossi, P. «Gestione dell'Emergenza Sismica in Sistemi a Rete.» 2014.
- Rus, K., V. Kilar, e D. Koren. «Resilience assessment of complex urban system to natural disaster: A new literature review.» *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018.
- Schwartz, C. «Towards a Swiss national Earthquake risk model: Sensitivity and gap analysis.» Zurich, 2015.

- Silva, V., H. Crowley, e M. Colombi. «Fragility Function Manager Tool.» In *SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk*, di K., Crowley, H., Kaynia, A. M. Pitilakis, 385-402. Springer, 2014.
- 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.» *Natural Hazards*, 2013.
- Srewil, Y. «Risk studies for squatter settlements of big cities.» 2008.
- Stone, H. «Exposure and Vulnerability for seismic risk evaluations.» 2017.
- Tsionis, G., M.L. Sousa, V. Palermo, e R. Maio. *Framework for resilience analysis of EU builings*. Ispra (VA): JRC Technica Reports, 2017.
- Tyagunov, S., G. Grunthal, R. Wahlstrom, L. Stempniewski, e J. Zschau. «Seismic risk mapping for Germany.» *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2006: 573-586.
- UNSDR. «Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030.» Sendai, Japan, 2015.
- Vargo, J., e E. Seville. «Resilience to Earthquake Disaster.» In *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, di M., Kougoumtzoglou, I. A., Patelli, E., Au, S. Beer. Springer Reference, 2015.
- Woessner, J., et al. «The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results.» *Bull Earthquake Eng*, 2015.
- Yong, C., C. Qi-Fu, e C. Ling. «Vulnerability analysis in earthquake loss estimate.» *Natural Hazards*, 2001.
- Zanini, M. A., L. Hofer, F. Faleschini, e C. Pellegrino. *The seismic risk map of Italy*. Cagliari, 9, 10, 11 Novembre 2017.

# 7 Indice delle figure

Figura 1-1: Incremento dei sismi indotti registrati in Olanda ( <a href="https://dwarshuis.com/earthquakes-groningen-gas-field/visualisation/">https://dwarshuis.com/earthquakes-groningen-gas-field/visualisation/</a> ) .....	4
Figura 1-2: Mappa della pericolosità sismica Europea .....	5
Figura 1-3: Paesi in cui sono stati catalogati i materiali da costruzione (sinistra) e il numero di piani (destra) nel censimento del 2011 (Tsionis, et al. 2017).....	13
Figura 2-1: Principali componenti di OpenQuake: OQ-Engine, OQ-Platform e OQ-Tools (Schwartz 2015) .....	15
Figura 2-2: Esempio della struttura del <i>logic tree</i> (Pagani, Silva, et al. 2018).....	18
Figura 2-3: Esempio di funzione di fragilità discreta (Pagani, Silva, et al. 2018) .....	21
Figura 2-4: Esempio di funzione di fragilità continua (Pagani, Silva, et al. 2018).....	21
Figura 3-1: Classificazione del <i>Central Damage Factor</i> secondo l'EMS-98 (Tyagunov, et al. 2006) .....	26
Figura 3-2: Comparazione delle curve di vulnerabilità di chiese e palazzi (possibile range del <i>mean value</i> ) (Lagormarsino, On the vulnerability assessment of monumental buildings 2006) 28	
Figura 3-3: I 28 meccanismi di collasso delle chiese per valutarne la vulnerabilità (Ministri 2011) .....	29
Figura 3-4: Descrizione della scala del danno secondo L'EMS-98 per edifici in muratura ed in cemento armato (Redweik, et al. 2017).....	30
Figura 3-5: Principali finestre dello strumento Fragility Function Manager (FFM) (Silva, Crowley e Colombi, Fragility Function Manager Tool 2014) .....	32
Figura 3-6: Finestra per la visualizzazione dei parametri che descrivono la curva di fragilità (Silva, Crowley e Colombi, Fragility Function Manager Tool 2014) .....	32
Figura 4-1: Prima fonte documentaria iconografica raffigurante il borgo di Moncalieri e la cinta muraria. Fonte: Pietro Bombarda, “Tippo sij figura del finaggio, contenzioso tra Monchalieri e Trufarello”, 1596.....	34
Figura 4-2: Centro storico di Moncalieri.....	35
Figura 4-3: Ortofoto del territorio di Moncalieri con inserimento della classificazione degli edifici di Moncalieri in base all'altezza.....	38
Figura 4-4: Mappa tematica con i principali elementi infrastrutturali e la classificazione degli edifici in base all'altezza.....	39
Figura 4-5: Classificazione degli edifici di Moncalieri in base all'altezza: zoom centro storico	40
Figura 4-6: Ortofoto del territorio di Moncalieri con inserimento della classificazione degli edifici di Moncalieri in base alla destinazione d'uso .....	42

Figura 4-7: Mappa tematica con i principali elementi infrastrutturali e la classificazione degli edifici in base alla destinazione d'uso.....	43
Figura 4-8: Classificazione degli edifici di Moncalieri in base alla destinazione d'uso: zoom centro storico.....	44
Figura 4-9: Ortofoto del territorio di Moncalieri con inserimento della classificazione degli edifici di Moncalieri in base all'epoca .....	46
Figura 4-10: Mappa tematica con i principali elementi infrastrutturali e la classificazione degli edifici in base all'epoca.....	47
Figura 4-11: Classificazione degli edifici di Moncalieri in base all'epoca: zoom centro storico	48
Figura 4-12: Ortofoto del territorio di Moncalieri con inserimento della classificazione degli edifici di Moncalieri in base al numero di piani.....	50
Figura 4-13: Mappa tematica con i principali elementi infrastrutturali e la classificazione degli edifici in base al numero di piani .....	51
Figura 4-14: Classificazione degli edifici di Moncalieri in base al numero di piani: zoom centro storico.....	52
Figura 4-15: Ortofoto del territorio di Moncalieri con inserimento della classificazione degli edifici di Moncalieri in base alla tipologia costruttiva .....	54
Figura 4-16: Mappa tematica con i principali elementi infrastrutturali e la classificazione degli edifici in base alla tipologia costruttiva.....	55
Figura 4-17: Classificazione degli edifici di Moncalieri in base alla tipologia: zoom centro storico .....	56
Figura 4-18: Individuazione dei principali edifici vincolati nel centro storico di Moncalieri ....	56
Figura 4-19: Individuazione area oggetto di studio - centro storico di Moncalieri.....	57
Figura 4-20: Schema riassuntivo sulle analisi eseguite e i risultati ottenuti.....	57
Figura 4-21: Stochastic Event Based Probabilistic Seismic Risk Analysis: file di input e di output (Pagani, Silva, et al. 2018) .....	59
Figura 4-22: Scenario Damage: file di input e di output (Pagani, Silva, et al. 2018).....	60
Figura 4-23: Scenario Risk: file di input e di output (Pagani, Silva, et al. 2018) .....	60
Figura 4-24: PGA con una probabilità di eccedenza del 10% (a destra) e del 2% (a sinistra) in 50 anni (Woessner, et al. 2015).....	61
Figura 4-25: Struttura e tempi di lavoro del progetto SHARE (Woessner, et al. 2015).....	62
Figura 4-26: Zone definite nel modello AS rappresentate dalle sottili linee nere (Woessner, et al. 2015) .....	64
Figura 4-27: Distribuzione spaziale del tasso di terremoti previsto [ $M_w=4.5/km^2$ ] secondo il modello SEIFA (Woessner, et al. 2015) .....	65

Figura 4-28: Tasso annuale di terremoti secondo il modello FSGB per $\log_{10}(\lambda(M_w \geq 4.5/km^2))$ (Woessner, et al. 2015).....	66
Figura 4-29: Modello per la creazione di scenari di rottura presente nella piattaforma OpenQuake .....	70
Figura 4-30: Costi parametrici di ristrutturazione post-sisma.....	71
Figura 4-31: Caratteristiche di un edificio che possono influenzarne il comportamento sismico, dalla più utile alla meno utile (Stone 2017) .....	72
Figura 4-32: TaxTweb della GEM utilizzato per la definizione delle 63 tassonomie.....	73
Figura 4-33: Curve di fragilità edifici non monumentali fino a due piani (Borzi, Crowley e Pinho 2008b) .....	75
Figura 4-34: Curve di fragilità edifici non monumentali a tre piani (Borzi, Crowley e Pinho 2008b) .....	76
Figura 4-35: Curve di fragilità edifici non monumentali a quattro piani (Borzi, Crowley e Pinho 2008b) .....	76
Figura 4-36: Curve di fragilità edifici non monumentali con un numero di piani da 5 in su (Borzi, Crowley e Pinho 2008b).....	77
Figura 4-37: Curve di fragilità edifici monumentali (Chiese) (Lagomarsino e Podestà, Seismic Vulnerability of Ancient Churches: II. Statistical Analysis of Surveyed Data and Methods for Risk Analysis 2004).....	78
Figura 4-38: Andamento della covarianza secondo (Porter 2010).....	79
Figura 4-39: Curve di vulnerabilità edifici non monumentali e monumentali utilizzate per il centro storico di Moncalieri .....	79
Figura 4-40: Mappa di pericolosità sismica del Piemonte calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 2% in 50 anni .....	83
Figura 4-41: Mappa di pericolosità sismica del Piemonte calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 5% in 50 anni .....	83
Figura 4-42: Mappa di pericolosità sismica del Piemonte calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni .....	84
Figura 4-43: Mappa di pericolosità sismica del Piemonte calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 39% in 50 anni .....	84
Figura 4-44: Mappa di pericolosità sismica del Piemonte calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 50% in 50 anni .....	85
Figura 4-45: Mappa di pericolosità sismica del centro storico di Moncalieri calcolata considerando una probabilità di eccedenza dell'1% in 50 anni .....	86
Figura 4-46: Mappa di pericolosità sismica del centro storico di Moncalieri calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 2% in 50 anni.....	86

Figura 4-47: Mappa di pericolosità sismica del centro storico di Moncalieri calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 5% in 50 anni.....	87
Figura 4-48: Mappa di pericolosità sismica del centro storico di Moncalieri calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni.....	87
Figura 4-49: Mappa di pericolosità sismica del centro storico di Moncalieri calcolata considerando una probabilità di eccedenza del 39% in 50 anni.....	88
Figura 4-50: Mappa di pericolosità sismica del centro storico di Moncalieri calcolata considerando una probabilità di eccedenza dell'50% in 50 anni .....	88
Figura 4-51: Mappa del rischio sismico del centro storico di Moncalieri considerando una probabilità di eccedenza dell'1% in 50 anni .....	90
Figura 4-52: Mappa del rischio sismico del centro storico di Moncalieri considerando una probabilità di eccedenza del 2% in 50 anni.....	90
Figura 4-53: Mappa del rischio sismico del centro storico di Moncalieri considerando una probabilità di eccedenza del 5% in 50 anni.....	91
Figura 4-54: Mappa del rischio sismico del centro storico di Moncalieri considerando una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni.....	91
Figura 4-55: Mappa del rischio sismico del centro storico di Moncalieri considerando una probabilità di eccedenza del 39% in 50 anni.....	92
Figura 4-56: Mappa del rischio sismico del centro storico di Moncalieri considerando una probabilità di eccedenza del 50% in 50 anni.....	92
Figura 4-57: Curve di perdita per l'intero centro storico di Moncalieri .....	93
Figura 4-58: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando il terremoto storico del 1808 con epicentro in Val Pellice – <i>No damage</i> .....	94
Figura 4-59: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando il terremoto storico del 1808 con epicentro in Val Pellice – <i>Slight</i> .....	95
Figura 4-60: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando il terremoto storico del 1808 con epicentro in Val Pellice – <i>Moderate</i> .....	95
Figura 4-61: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando il terremoto storico del 1808 con epicentro in Val Pellice – <i>Collapse</i> .....	96
Figura 4-62: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 4.5 con epicentro in Val Pellice – <i>No damage</i> .....	97
Figura 4-63: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 4.5 con epicentro in Val Pellice – <i>Slight</i> .....	97
Figura 4-64: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 4.5 con epicentro in Val Pellice – <i>Moderate</i> .....	98

Figura 4-65: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 4.5 con epicentro in Val Pellice – <i>Collapse</i> .....	98
Figura 4-66: Perdite economiche del centro storico di Moncalieri considerando un terremoto di magnitudo 4.5 con epicentro in Val Pellice .....	99
Figura 4-67: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.0 con epicentro in Val Pellice – <i>No damage</i> .....	100
Figura 4-68: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.0 con epicentro in Val Pellice – <i>Slight</i> .....	100
Figura 4-69: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.0 con epicentro in Val Pellice – <i>Moderate</i> .....	101
Figura 4-70: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 4.5 con epicentro in Val Pellice – <i>Collapse</i> .....	101
Figura 4-71: Perdite economiche del centro storico di Moncalieri considerando un terremoto di magnitudo 5.0 con epicentro in Val Pellice .....	102
Figura 4-72: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.5 con epicentro in Val Pellice – <i>No damage</i> .....	103
Figura 4-73: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.5 con epicentro in Val Pellice – <i>Slight</i> .....	103
Figura 4-74: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 4.5 con epicentro in Val Pellice – <i>Moderate</i> .....	104
Figura 4-75: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.5 con epicentro in Val Pellice – <i>Collapse</i> .....	104
Figura 4-76: Perdite economiche del centro storico di Moncalieri considerando un terremoto di magnitudo 5.5 con epicentro in Val Pellice .....	105
Figura 4-77: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.0 con epicentro in Val Pellice – <i>No damage</i> .....	106
Figura 4-78: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.0 con epicentro in Val Pellice – <i>Slight</i> .....	106
Figura 4-79: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.0 con epicentro in Val Pellice – <i>Moderate</i> .....	107
Figura 4-80: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.0 con epicentro in Val Pellice – <i>Collapse</i> .....	107
Figura 4-81: Perdite economiche del centro storico di Moncalieri considerando un terremoto di magnitudo 6.0 e con epicentro in Val Pellice .....	108
Figura 4-82: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.5 con epicentro in Val Pellice – <i>No damage</i> .....	109

Figura 4-83: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.5 con epicentro in Val Pellice – <i>Slight</i> .....	109
Figura 4-84: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.5 con epicentro in Val Pellice – <i>Moderate</i> .....	110
Figura 4-85: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.5 con epicentro in Val Pellice – <i>Collapse</i> .....	110
Figura 4-86: Perdite economiche del centro storico di Moncalieri considerando un terremoto di magnitudo 6.5 con epicentro in Val Pellice .....	111
Figura 4-87: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando il terremoto storico del 1887 con epicentro in Liguria (vicino da Imperia) – <i>No damage</i> .....	112
Figura 4-88: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando il terremoto storico del 1887 con epicentro in Liguria (vicino da Imperia) – <i>Slight</i> .....	112
Figura 4-89: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando il terremoto storico del 1887 con epicentro in Liguria (vicino da Imperia) – <i>Moderate</i> .....	113
Figura 4-90: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando il terremoto storico del 1887 con epicentro in Liguria (vicino da Imperia) – <i>Collapse</i> .....	113
Figura 4-91: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 4.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – <i>No damage</i> .....	114
Figura 4-92: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 4.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – <i>Slight</i> .....	115
Figura 4-93: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 4.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – <i>Moderate</i> .....	115
Figura 4-94: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 4.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – <i>Collapse</i> .....	116
Figura 4-95: Perdite economiche del centro storico di Moncalieri considerando un terremoto di magnitudo 4.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia).....	116
Figura 4-96: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.0 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – <i>No damage</i> .....	117
Figura 4-97: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.0 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – <i>Slight</i> .....	118
Figura 4-98: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.0 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – <i>Moderate</i> .....	118
Figura 4-99: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.0 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – <i>Collapse</i> .....	119
Figura 4-100: Perdite economiche del centro storico di Moncalieri considerando un terremoto di magnitudo 5.0 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia).....	119

Figura 4-101: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – <i>No damage</i> .....	120
Figura 4-102: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – <i>Slight</i> .....	121
Figura 4-103: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – <i>Moderate</i> .....	121
Figura 4-104: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 5.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – <i>Collapse</i> .....	122
Figura 4-105: Perdite economiche del centro storico di Moncalieri considerando un terremoto di magnitudo 5.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia).....	122
Figura 4-106: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.0 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – <i>No damage</i> .....	123
Figura 4-107: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.0 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – <i>Slight</i> .....	124
Figura 4-108: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.0 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – <i>Moderate</i> .....	124
Figura 4-109: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.0 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – <i>Collapse</i> .....	125
Figura 4-110: Perdite economiche del centro storico di Moncalieri considerando un terremoto di magnitudo 6.0 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia).....	125
Figura 4-111: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – <i>No damage</i> .....	126
Figura 4-112: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – <i>Slight</i> .....	127
Figura 4-113: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – <i>Moderate</i> .....	127
Figura 4-114: Distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia) – <i>Collapse</i> .....	128
Figura 4-115: Perdite economiche del centro storico di Moncalieri considerando un terremoto di magnitudo 6.5 con epicentro in Liguria (vicino ad Imperia).....	128
Figura 4-116: Confronto delle mappe di pericolosità sismica del centro storico di Moncalieri considerando una probabilità di eccedenza dell'1% (sinistra) e del 50% (destra).....	130
Figura 4-117: Distribuzione delle perdite economiche nella città di Moncalieri con una probabilità di eccedenza dell'1% in 50 anni .....	131
Figura 4-118: Visualizzazione 3D del rischio sismico del centro storico di Moncalieri con probabilità di eccedenza dell'1% in 50 anni (ArcScene).....	131

Figura 4-119: Distribuzione delle perdite economiche nella città di Moncalieri con una probabilità di eccedenza del 50% in 50 anni .....	132
Figura 4-120: Visualizzazione 3D del rischio sismico del centro storico di Moncalieri con probabilità di eccedenza del 50% in 50 anni (ArcScene).....	132
Figura 4-121: Distribuzione del numero di edifici nelle varie fasce di perdita per probabilità di eccedenza dell'1% e del 50% .....	133
Figura 4-122: Comparazione delle mappe di distribuzione del danno del centro storico di Moncalieri considerando una magnitudo di 6.5 ed epicentro in Liguria (sinistra) e Val Pellice (destra).....	134
Figura 4-123: Istogramma che mostra il numero di edifici con <i>no damage</i> , danno <i>slight</i> , <i>moderate</i> e <i>complete</i> per un terremoto con epicentro in Liguria e magnitudo 6.5.....	135
Figura 4-124: Istogramma che mostra il numero di edifici con <i>no damage</i> , danno <i>slight</i> , <i>moderate</i> e <i>complete</i> per un terremoto con epicentro in Val Pellice e magnitudo 6.5.....	136
Figura 4-125: Distribuzione delle perdite economiche nel centro storico di Moncalieri causate da terremoto di magnitudo 6.5 con epicentro in Liguria (in alto) e in Val Pellice (in basso).....	137