NUVOLE DI PUNTI PER LA MODELLAZIONE MULTISCALA DI BENI CULTURALI SOGGETTI A RISCHIO SISMICO

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di ingegneria Edile
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Tesi di Laurea Magistrale

Relatore:

prof. Andrea Maria Lingua

……

Correlatori:

Elisabetta Colucci

……

Francesca Matrone

……..…...

Candidata:

Gloria Rizzo

Luglio 2019

“Estraggo un foglio nella risma nascosto,

scrivo e non riesco forse perché il sisma mi ha scosso.

Ogni vita che salvi, ogni pietra che poggi,

fa pensare a domani, ma puoi farlo solo oggi.

E la vita la vita.. si fa grande così

e comincia domani.

Tra le nuvole e il mare si può fare e rifare,

con un po’ di fortuna si può dimenticare.

Dove sarò domani? Dove sarò?”

Domani 21/04/09, Artisti uniti per l’Abruzzo.

A mia sorella,

perché volere è potere!

ABSTRACT

Il patrimonio culturale rappresenta un aspetto della nostra memoria storica che nell'ultimo decennio ha subito trasformazioni, riduzioni o distruzioni a causa di diversi fattori umani o naturali.[1] Ne è un esempio la città di Norcia, che il 30 ottobre 2016 è stata coinvolta nella sequenza delle scosse di terremoto che ha colpito il Centro Italia e ha visto la distruzione di numerosi monumenti architettonici simbolo della città. In collaborazione con il dipartimento della Protezione Civile e l'Ente nazionale dei Vigili del Fuoco, il Team DIRECT[2], un gruppo del Politecnico di Torino che opera nel campo della Geomatica, ha messo a disposizione il proprio lavoro in occasione di emergenze ambientali come questa, dovute a eventi naturali catastrofici. In particolare, il presente lavoro di tesi vuole approfondire il caso studio della chiesa di San Lorenzo (Norcia) solo in parte colpita dal sisma, e usarlo a titolo esemplificativo per individuare una metodologia che permetta di far dialogare gli strumenti di modellazione tridimensionale legati all'edilizia (BIM[3]) con i moderni sistemi informativi territoriali tridimensionali (GIS[4]) al fine di migliorare le strategie di intervento e manutenzione in caso di catastrofi, attraverso l'analisi e la definizione di relazioni.

Cultural Heritage represents an aspect of our historical memory that had to undergo transformations, reductions or destruction in the last decade due to various human or natural factors. An example is represented by the City of Norcia, which was involved on October 30, 2016 in the earthquake sequence that damaged the centre of Italy and faced the destruction of numerous architectural monuments that symbolized the city. In collaboration with the Department of Civil Protection and the National Fire Brigade, the DIRECT Team, a group of the Polytechnic of Turin, which operates in the field of Geomatics, shared its skills in environmental emergencies like these, caused by catastrophic natural events. In particular, the present thesis work aims to investigate the case study of San Lorenzo's Church, only partially affected by the earthquake, and use it as an example to identify a methodology that allows the tools of three-dimensional modeling linked to the building (BIM) "talk" to modern three-dimensional territorial information systems (GIS), to improve intervention and maintenance strategies in case of disasters, through the analysis and the definition of relationships.

[1] GABRIELE GUIDI, MICHELE RUSSO, "*Reality-Based and Reconstructive models: Digital Media for Cultural Heritage Valorization*".
[2] DIsaster RECovery Team.
[3] *Building Infotmation Model/Modeling/Manage.*
[4] *Geographic Information System.*

Sommario

ABSTRACT I
INTRODUZIONE 1
1. Resilienza per i beni culturali e rischio sismico 3
1.1. Terremoto in Centro Italia 5
1.1.1. Sequenza delle scosse 5
1.1.2. La scossa del 30 ottobre 2016 8
1.1.3. Interventi per il monitoraggio del territorio 10
1.1.4. Report settimanali sulle possibili nuove scosse 12
1.1.5. Gestione dell'emergenza e della ricostruzione 13
1.1.6. Team DIRECT 13
1.1.7. Danni riscontrati nella città di Norcia 14
2. Acquisizione dati 17
2.1. Caso studio 18
2.2. Realizzazione degli eidotipi 21
2.3. Rilievo 22
2.3.1. Scelta delle tecniche di rilievo 22
2.3.2. Procedure operative 24
2.3.2.1. Rilievo topografico 25
2.3.2.2. Rilievo LiDAR 28
2.3.2.3. Fotogrammetria aerea 30
2.3.2.4. Fotogrammetria terrestre 38
3. Elaborazione dati 39
2.4. Compensazione rete 40
2.4.1. MicroSurveyStar*net 40
2.4.1.1. Impostazioni di base 40
2.4.1.2. File di input 42
2.4.1.3. File di output 42
2.5. Elaborazione dati fotogrammetrici 44
2.5.1. Agisoft Metashape 44
2.5.1.1. Impostazioni di base 44
2.5.1.2. Creazione Chunk 45
2.5.1.3. Caricamento foto 45

2.5.1.4. Orientamento relativo ... 46
2.5.1.5. Impostazione del sistema di riferimento ... 46
2.5.1.6. Posizionamento dei marker ... 47
2.5.1.7. Generazione della nuvola densa ... 49
2.5.1.8. Merge Chunck ... 51
2.5.1.9. Generazione della mesh 3D ... 51
2.5.1.10. Generazione della Texture ... 52
2.5.1.11. Generazione del Tiled Model ... 52
2.5.1.12. Generazione del Digital Elevation Model (DEM) ... 53
2.5.1.13. Generazione dell'ortofoto ... 54
2.6. Elaborazione scansioni laser ... 55
2.6.1. FARO Scene ... 55
2.6.1.1. Importazione dei dati di scansione ... 55
2.6.1.2. Caricamento dei dati di scansione ... 56
2.6.1.3. Pre-allineamento manuale delle scansioni ... 56
2.6.1.4. Collocazione delle scansioni da nuvola a nuvola ... 57
2.6.1.5. Inserimento marker ... 57
2.6.1.6. Collocazione delle scansioni per target ... 59
2.6.1.7. Colorazione delle scansioni ... 62
2.6.1.8. Creazione della nuvola di punti ... 63
2.6.1.9. Esportazione nuvola di punti ... 63
2.7. Creazione nuvola di punti definitiva ... 64
2.7.1. CloudCompare ... 64
2.7.1.1. Importazione nuvola di punti ... 64
2.7.1.2. Confronto cloud-to-cloud ... 66
2.7.1.3. Confronto della densità ... 68
2.7.1.4. Filtraggio ... 70
2.7.2. 3DReshaper ... 70
3. Modellazione 3D per analisi multiscala ... 73
3.1. LOD0 – Modello regionale ... 79
3.1.1. Schema CityGML ... 79
3.1.2. Realizzazione del LOD0 in ArcMap ... 79
3.1.2.1. Conversione delle coordinate ... 80
3.1.2.2. Definizione delle proiezioni ... 81

3.1.2.3. Creazione di tematismi ... 83
3.2. LOD1 – Modello della città ... 83
3.2.1. Schema CityGML ... 83
3.2.2. Realizzazione del LOD1 in ArcScene ... 84
3.3. LOD2 – Modello del sito ... 85
3.3.1. Schema CityGML ... 85
3.3.2. Realizzazione del LOD2 in Autodesk Revit ... 86
3.3.2.1. Realizzazione del modello BIM ... 87
3.4. LOD3 – Modello dell'edificio ... 88
3.4.1. Schema CityGML ... 88
3.4.2. Realizzazione del LOD3 in Autodesk Revit ... 91
3.4.2.1. Segmentazione della nuvola di punti: Autodesk ReCap Pro ... 91
3.4.2.2. Creazione dei workset ... 94
3.4.2.3. Importazione nuvola di punti ... 94
3.4.2.4. Modellazione della chiesa ... 97
3.4.2.5. Modellazione della messa in sicurezza ... 98
3.4.2.6. Assegnazione dei materiali ... 99
3.4.3. Analisi mediante Faro As-Built for Autodesk Revit ... 102
3.4.3.1. Calcolo dello scostamento del modello rispetto alla nuvola di punti ... 102
4. Interoperabilità BIM-GIS ... 107
4.1. Georeferenziazione modello HBIM ... 107
4.2. Interoperabilità tecnica in campo BIM-GIS ... 109
4.2.1. Inserimento del modello HBIM in ambiente GIS mediante ArcGIS Pro ... 110
4.2.1.1. Inserimento dei LOD2-3 ... 111
4.2.2. Interoperabilità concettuale tra standard IFC-CityGML ... 120
4.2.2.1. Entità comuni tra gli standard IFC e CityGML ai diversi livelli di dettaglio. 121
4.2.2.2. Parametri presenti nella struttura dell'IFC ma assenti in CityGML e viceversa 122
4.2.2.3. Creazione parametri condivisi ... 126
CONCLUSIONI ... 133
Bibliografia ... 136
Sitografia ... 137
Indice delle figure ... 140
Indice delle tabelle ... 145

Allegati 145
Allegato 1 – Export Starnet 145
Allegato 2 – Report Metashape 145
Ringraziamenti 146

INTRODUZIONE

I recenti eventi sismici che hanno colpito il Centro Italia hanno causato la sostanziale distruzione del patrimonio storico, artistico e monumentale di tali aree. Nell'ottica di tutela dei beni culturali, è stata ritenuta necessaria l'introduzione di tecnologie e metodologie adatte a ridurre i processi di degrado e a favorire l'analisi delle informazioni racchiuse nei beni culturali, portando allo sviluppo di strategie di intervento che permettano di preservarli.

In questa tesi, il caso studio preso in esame è la chiesa di San Lorenzo, sita in Norcia, una delle città maggiormente colpite dal terremoto. È stata utilizzata una metodologia operativa che consentisse l'integrazione di più discipline, al fine di giungere alla costruzione di un modello digitale tridimensionale inserito in un progetto multiscala. In questo contesto si è rivelato particolarmente utile l'utilizzo di modelli tridimensionali in grado di registrare un elevato numero di informazioni (storiche, tecnico-costruttive), pertanto si è deciso di impiegare la metodologia BIM applicandola al patrimonio costruito. Si parla pertanto di HBIM, acronimo di *Historic BIM*. Con tale termine si intende un procedimento di modellazione geometrica e d'informazione, secondo il quale gli edifici esistenti vengono rilevati tramite strumenti accurati, come laser scanner terrestri e dispositivi UAV, che portano alla generazione di una nuvola di punti, che viene utilizzata come base per la creazione di librerie di oggetti perlopiù parametrici, atti a rappresentare il bene.

Per ottenere il modello HBIM della chiesa di San Lorenzo, ci si è basati su alcune campagne di rilievo svolte nel 2018 dal Team DIRECT (*DIsaster RECovery Team*). Per mezzo delle moderne tecnologie di acquisizione ed elaborazione dei dati 3D, si è ottenuta una nuvola densa di punti georeferenziata, sulla base della quale è stato possibile generare il modello digitale 3D del manufatto reale. Tale modello può aumentare notevolmente la comprensione e la valorizzazione del monumento attraverso l'applicazione di diversi strumenti digitali per manipolare, esplorare, confrontare e spiegare un oggetto. Tramite lo stesso modello digitale possono anche essere realizzate l'analisi, la gestione e la conservazione riconfigurando modalità di interazione e tipologia di dati a esso collegati.[5]

Al fine di migliorare le strategie di intervento in caso di catastrofi, si è inoltre deciso di effettuare un'analisi multiscala secondo i livelli di dettaglio proposti dallo standard CityGML[6]. Esso è uno standard GIS di rappresentazione multiscala, adottato da OGC (*Open Geospatial Consortium*) come standard ufficiale per la modellazione e lo scambio di modelli 3D di città e paesaggi e che è stato rapidamente adottato a livello internazionale. Per realizzare il progetto multiscala è stato necessario inserire il modello HBIM in ambiente GIS. Questo ha consentito di affrontare il problema

[5] GABRIELE GUIDI, MICHELE RUSSO, "*Reality-Based and Reconstructive models: Digital Media for Cultural Heritage Valorization*".

[6] *City Geography Markup Language.*

dell'interoperabilità tra i domini BIM e GIS, dovuta al fatto che essi funzionano secondo due standard differenti, rispettivamente IFC e CityGML. Per superare il problema dell'interoperabilità tra software si è scelto di utilizzare ArcGIS Pro, un software GIS della Esri che ha permesso l'inserimento diretto del file *.rvt*. A questo punto è stata verificata l'eventuale perdita di informazioni durante l'importazione ed è stato valutato se fosse utile inserirne di nuove per facilitare l'interscambio di dati. Per fare ciò è stato necessario studiare la semantica che guida la classificazione dei due standard IFC e CityGML, verificandone l'eventuale corrispondenza o necessità di implementazione. Nello specifico, si è scelto di attribuire al modello l'informazione sugli interventi di manutenzione. Si mira in questo modo alla completezza del progetto, in quanto lo scambio di informazioni tra questi domini può essere conforme agli oggetti del modello della città:

- si può fare uso del modello 3D come trasportatore di informazioni;
- l'ontologia della città può anche essere considerata uno schema per l'organizzazione delle informazioni del dominio strutturate in modo simile.

Obiettivo finale è dunque lo sviluppo di un supporto alle strategie di intervento in caso di emergenza, al fine di tutelare i beni culturali e ridurre il rischio di catastrofi, e di conseguenza le perdite in vite umane, in mezzi di sussistenza e nelle attività economiche, fisiche, sociali, culturali e ambientali di persone, imprese, comunità e paesi. Come si può vedere in *Figura 1*, negli ultimi 10 anni sono stati infatti registrati dei valori molto preoccupanti sull'impatto che i disastri stanno avendo sulle persone e sull'economia. Si contano più di 700.000 vittime, 1,4 milioni di feriti e circa 23 milioni di senzatetto, con un totale di più di 1,5 miliardi di persone in qualche modo colpite da disastri, e perdite economiche che hanno superato 1.300 miliardi di dollari.

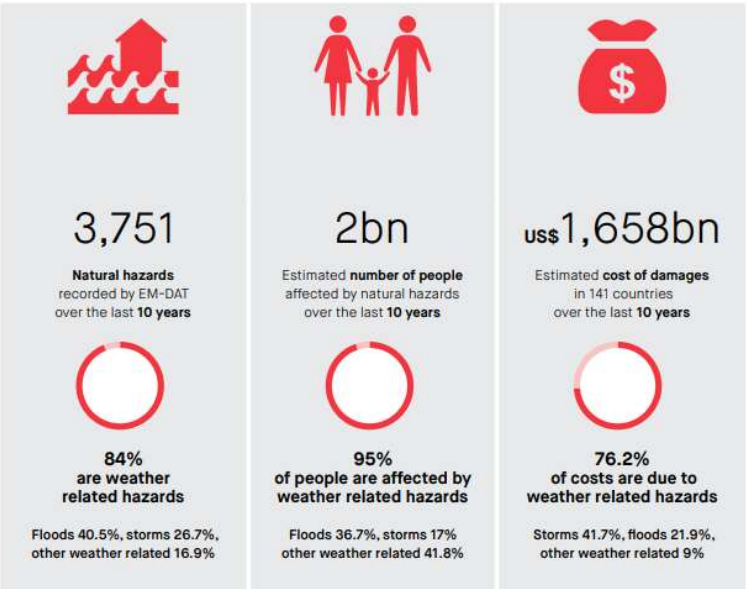


Figura 1 - Tipologia di disastri che stanno accadendo e con quale impatto (Fonte: World Disaster Report)

1.Resilienza per i beni culturali e rischio sismico

Il Patrimonio Culturale rappresenta un aspetto della nostra memoria storica che nell'ultimo decennio ha subito trasformazioni, riduzioni o distruzioni a causa di diversi fattori umani o naturali.[7] Per prevenire nuovi rischi di catastrofi e ridurre quelli esistenti, gli Stati membri dell'ONU, in occasione della Terza Conferenza mondiale delle Nazioni Unite sulla riduzione dei rischi di catastrofi (Sendai, Giappone, 18 marzo 2015), hanno adottato il *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030*. Si tratta di un documento internazionale che delinea sette obiettivi da raggiungere entro 15 anni, tra i quali ridurre i danni causati alle infrastrutture e l'interruzione dei servizi di base, come per esempio strutture sanitarie ed educative in caso di catastrofi, aumentare il numero di Paesi dotati di strategie nazionali e locali, consentire il rapido accesso ai sistemi di allarme multi-rischio e alle informazioni e valutare i rischi di catastrofi. A tale scopo il Quadro di Riferimento di Sendai definisce quattro priorità di azione:

(i) Comprendere il rischio di catastrofi;
(ii) Rafforzare la gestione del rischio di catastrofi;
(iii) Investire nella riduzione del rischio di catastrofi e nella resilienza;
(iv) Migliorare la preparazione alle catastrofi per una risposta efficace, e "ricostruire meglio" nella fase di recupero, ripristino e ricostruzione.

Inoltre, la Federazione internazionale delle società della Croce rossa e della Mezzaluna rossa (IFRC) nel *"World Disaster Report"* spingono affinché tutti i governi e le organizzazioni umanitarie investano nella raccolta dati e si impegna pertanto nella loro alfabetizzazione e in una migliore partecipazione ad approcci *open source* per la condivisione dei dati**.** L'IFRC mette in evidenza il valore della mappatura, in quanto spesso i luoghi non mappati sono quelli con bassi tassi di registrazione delle nascite o con una mancanza di dati sulla povertà. Allo stesso tempo, queste sono spesso le aree più colpite da un disastro (come un terremoto o una frana) a causa della mancanza di aderenza ai codici di costruzione. Anche quando sono presenti le mappe spesso mancano le informazioni chiave e i punti di riferimento necessari allo sviluppo del processo decisionale. È possibile che manchino dettagli essenziali a livello comunità e in termini di tempo per fornire una pianificazione dettagliata, come la posizione dei punti acqua, la posizione degli edifici danneggiati o collassati o l'esatta ubicazione delle strade o dei ponti fruibili. Questi dettagli possono aiutare a

[7] GABRIELE GUIDI, MICHELE RUSSO, "*Reality-Based and Reconstructive models: Digital Media for Cultural Heritage Valorization*".

fornire il giusto aiuto alle persone più velocemente e in modo più efficace. Ancora più importante, tali informazioni possono consentire alle persone di individuare i servizi stessi e valutare i propri rischi, ad esempio la propria vicinanza ai pericoli.

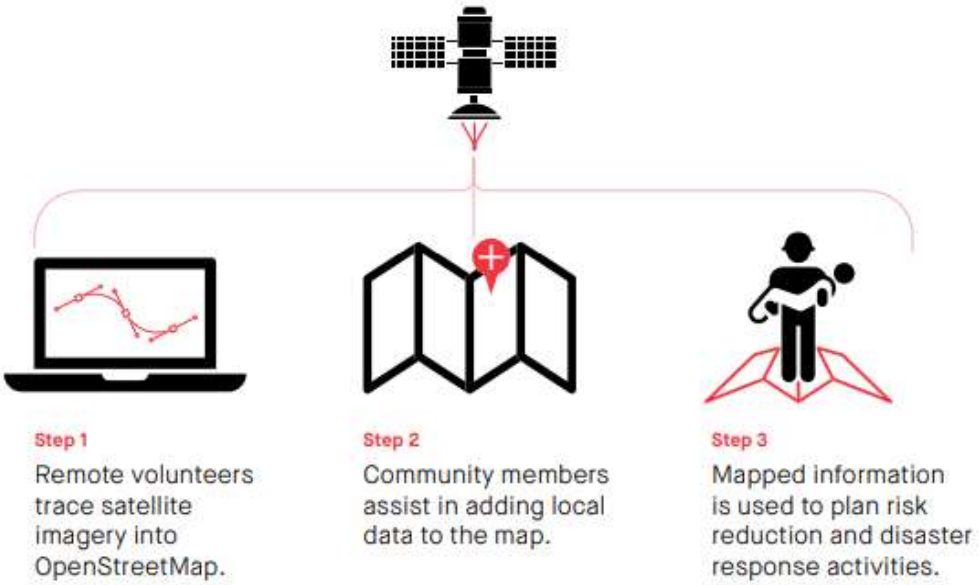


Figura 2 – Approccio open source per la condivisione dei dati.
(Fonte: World Disaster Report)

Bisogna assicurare che esista un accordo sugli standard dei database e sulla metodologia per garantire la compatibilità e l'interoperabilità, nonché il rispetto di un forte approccio a "non nuocere" della condivisione e protezione dei dati.

Nell'ottica della condivisione e sulla base dei principi del Sendai Framework, si inserisce il progetto *ResCult*[8] un progetto di Ricerca Europeo coordinato dall'Istituto Superiore sui Sistemi Territoriali (Siti) che si è concluso il 30/06/2018.

Figura 3 - Logo ResCult.

[8] *Increasing Resilience of Cultural heritage.*

L'obiettivo generale di RESCULT è quello di migliorare la capacità della Protezione Civile (CP) di prevenire e mitigare gli impatti dei disastri sui siti del patrimonio culturale. Per fare ciò è stata prevista la realizzazione di una banca dati europea interoperabile integrata (EID) del patrimonio culturale, progettata per fornire un quadro unico per la Protezione Civile, i ministeri nazionali del Patrimonio Culturale, l'Unione europea (UE), le autorità locali. Inoltre, RESCULT fornirà una strategia di riduzione del rischio di catastrofi identificando azioni e investimenti su misura per migliorare le capacità di prevenzione e resilienza.

Figura 4 - Partners del progetto ResCult:
Finanziamento totale: 593.919,83 euro; Finanziamento Polito: 117.196,66 euro.

1.1. Terremoto in Centro Italia

Nel 2016 il Centro Italia è stato interessato da degli eventi sismici, definiti dall'INGV[9] "Sequenza sismica Amatrice-Norcia-Visso", con epicentri situati tra l'alta valle del Tronto, i Monti Sibillini, i Monti della Laga e i Monti dell'Alto Aterno. In totale si contano circa 41.000 sfollati, 388 feriti e 303 morti, tre dei quali per via indiretta (causa infarto per lo spavento).

1.1.1. Sequenza delle scosse

La prima scossa, di magnitudo 6.0, si è verificata il 24 agosto 2016 alle ore 3:36, con epicentro situato lungo la Valle del Tronto, tra i comuni di Accumoli (RI) e Arquata del Tronto (AP). Successivamente il 26 ottobre 2016 si sono verificate altre due scosse, la prima alle 19:11 con magnitudo 5.4 e la

[9] INGV, acronimo di Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, è l'ente italiano di ricerca sui fenomeni geofisici e vulcanologici, che gestisce inoltre le reti nazionali di monitoraggio per i fenomeni sismici e vulcanici.

seconda alle 21:18 con magnitudo 5.9, con epicentri al confine umbro-marchigiano, tra i comuni della provincia di Macerata di Visso, Ussita e Castelsantangelo sul Nera.

Il 30 ottobre 2016 è stata registrata la scossa più forte, di magnitudo momento 6.5 con epicentro tra i comuni di Norcia e Preci, in provincia di Perugia.

Il 18 gennaio 2017 è avvenuta una nuova sequenza di quattro forti scosse di magnitudo tra 5 e 5.5 con epicentri localizzati tra i comuni aquilani di Montereale, Capitignano e Cagnano Amiterno.

Di seguito è riportata la lista dettagliata delle scosse telluriche registrate dal 24 agosto 2016, escludendo quelle di magnitudo inferiore a 4.5. Le scosse più forti (di magnitudo maggiore o uguale a 5.0) sono evidenziate in blu.

Data	Ora locale (CEST/CET)	Magnitudo momento	Profondità ipocentro	Epicentro		
				Comune	Latitudine	Longitudine
24 agosto 2016	03:36:32	6,0	8 km	Accumoli	42,70 N	13,23 E
24 agosto 2016	03:37:26	4,5	9 km	Accumoli	42,71 N	13,25 E
24 agosto 2016	04:33:28	5,3	8 km	Norcia	42,79 N	13,15 E
24 agosto 2016	13:50:30	4,5	10 km	Norcia	42,82 N	13,16 E
26 agosto 2016	06:28:25	4,8	9 km	Amatrice	42,61 N	13,29 E
26 ottobre 2016	19:10:36	5,4	9 km	Castelsantangelo sul Nera	42,88 N	13,13 E
26 ottobre 2016	21:18:05	5,9	8 km	Ussita	42,91 N	13,13 E
26 ottobre 2016	23:42:01	4,5	10 km	Castelsantangelo sul Nera	42,86 N	13,12 E
30 ottobre 2016	07:40:17	6,5	9 km	Norcia	42,83 N	13,11 E
30 ottobre 2016	07:44:00	4,6	10 km	Norcia	42,85 N	13,07 E
30 ottobre 2016	08:13:00	4,5	10,8 km	Accumoli	42,69 N	13,23 E
30 ottobre 2016	13:07:00	4,5	10 km	Preci	42,84 N	13,08 E
1º novembre 2016	08:56:40	4,8	8 km	Acquacanina	42,99 N	13,13 E
3 novembre 2016	01:35:01	4,7	8 km	Pieve Torina	43,03 N	13,05 E
18 gennaio 2017	10:25:40	5,1	10 km	Montereale	42,55 N	13,28 E
18 gennaio 2017	11:14:09	5,5	10 km	Capitignano	42,53 N	13,28 E
18 gennaio 2017	11:15:33	4,7	9 km	Capitignano	42,53 N	13,29 E
18 gennaio 2017	11:16:39	4,6	8 km	Capitignano	42,54 N	13,27 E
18 gennaio 2017	11:25:23	5,4	9 km	Pizzoli	42,50 N	13,28 E
18 gennaio 2017	14:33:36	5,0	10 km	Cagnano Amiterno	42,47 N	13,28 E
10 aprile 2018	05:11:30	4,6	9 km	Muccia	43,07 N	13,04 E

Tabella 1 - Lista delle scosse telluriche registrate dal 24 agosto 2016.

(Fonte: Wikipedia)

Gli eventi principali della sequenza hanno interessato un territorio che storicamente è caratterizzato da numerosi terremoti molto forti, alcuni dei quali sono avvenuti all'interno di sequenze complesse.

Nella Valnerina i terremoti storici si sono verificati nei giorni:

1 dicembre 1328 (Valnerina, Io 10 MCS, M W 6.5);

27 giugno 1719 (Valnerina, Io 8 MCS, M W 5.6);

12 maggio 1730 (Valnerina, Io 9 MCS, M W 6);

22 agosto 1859 (Valnerina, Io 8-9 MCS, M W 5.7).

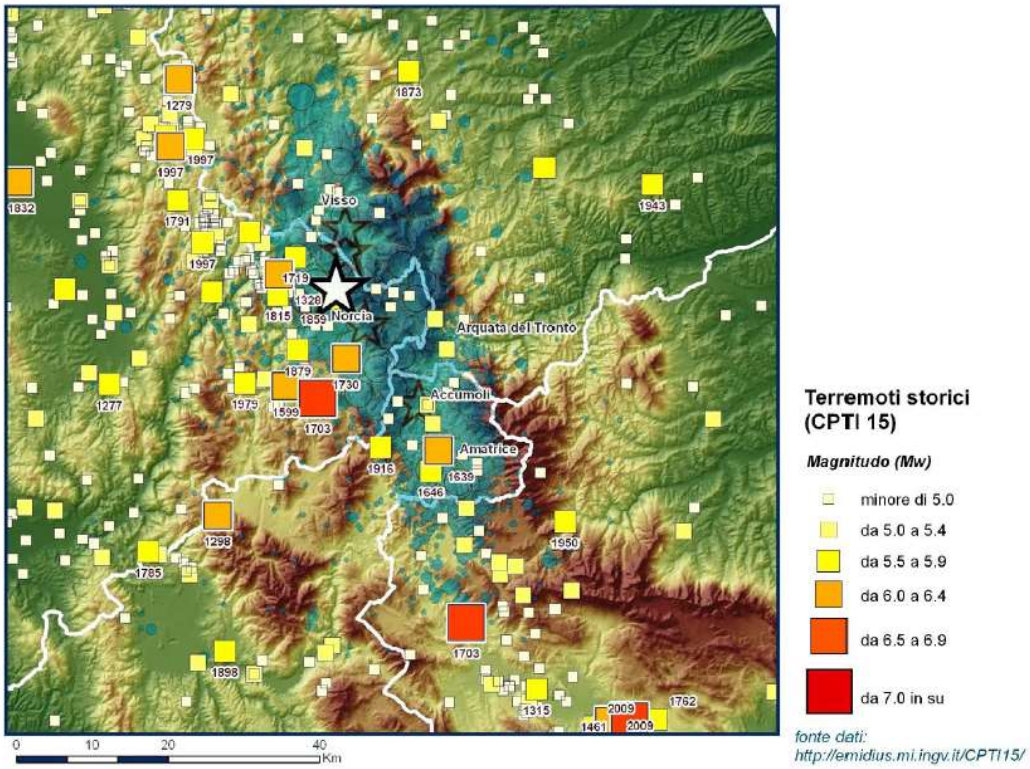


Figura 5 - Mappa dei terremoti storici della regione.
Le stelle rappresentano gli eventi più forti della sequenza sismica in atto.
(Fonte: Rapporto dell'INGV del terremoto del 30 ottobre 2016 delle 06:40:17 UTC)

Essi hanno localizzazioni prossime a quella dell'evento principale del 30 ottobre, tuttavia nessuna delle sequenze sismiche storiche presenta somiglianze con quella in corso. In particolare, la sequenza attuale non è confrontabile con la lunga e complessa sequenza del 1703 (14 gennaio, Valnerina, Io 11, M W 6.9; 2 febbraio, Aquilano, Io 10, M W 6.7) il cui impatto sul territorio fu sensibilmente più grave.

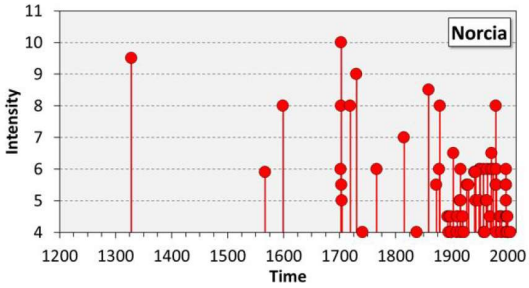


Figura 6 - Storia sismica di Norcia.

L'area colpita dalla sequenza sismica è caratterizzata da cinque sistemi di faglia attivi, come si vede in *Figura 7*:

1) Sistema di faglie del M. Vettore (MVF);
2) Sistema di faglie di Colfiorito (COF);
3) Sistema di faglie di Norcia (NF);
4) Sistema di Faglie della Laga (LMF);
5) Sistema di faglie di Montereale (MF).

Si ritiene che queste faglie (che raggiungono lunghezze dell'ordine di 20-30 km) costituiscano l'espressione superficiale di sorgenti sismogenetiche potenzialmente in grado di generare terremoti con magnitudo compresa tra 5.5 e 7.0.

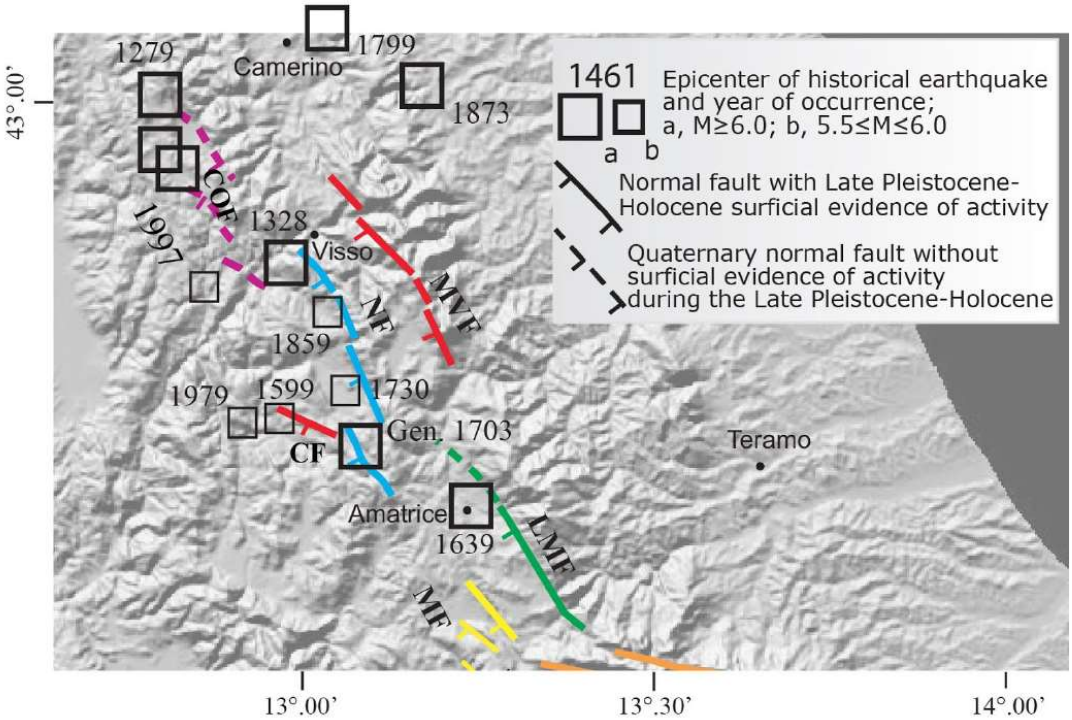


Figura 7 - Schema delle faglie quaternarie e/o attive nell'area compresa tra il bacino di Montereale (sud) e l'area di Colfiorito (nord).
(Fonte: Rapporto dell'INGV del terremoto del 30 ottobre 2016 delle 06:40:17 UTC)

L'attività recente, tranne che nel caso del sistema di faglia di Colfiorito, è riferibile alla dislocazione di depositi attribuiti al Pleistocene superiore (post-LGM)-Olocene (da circa 125.000 anni) e in molti casi è confermata dai risultati di indagini paleosismologiche.

1.1.2. La scossa del 30 ottobre 2016

L'INGV ha dichiarato nel suo rapporto del terremoto del 30 ottobre 2016 delle 06:40:17 UTC (07:40:17 ora italiana) che si tratta dell'evento più forte non solo della sequenza sismica iniziata con

il terremoto del 24 agosto 2016, ma in generale avvenuto in Italia (dopo quello 6.9 M W del 1980 dell'Irpinia).

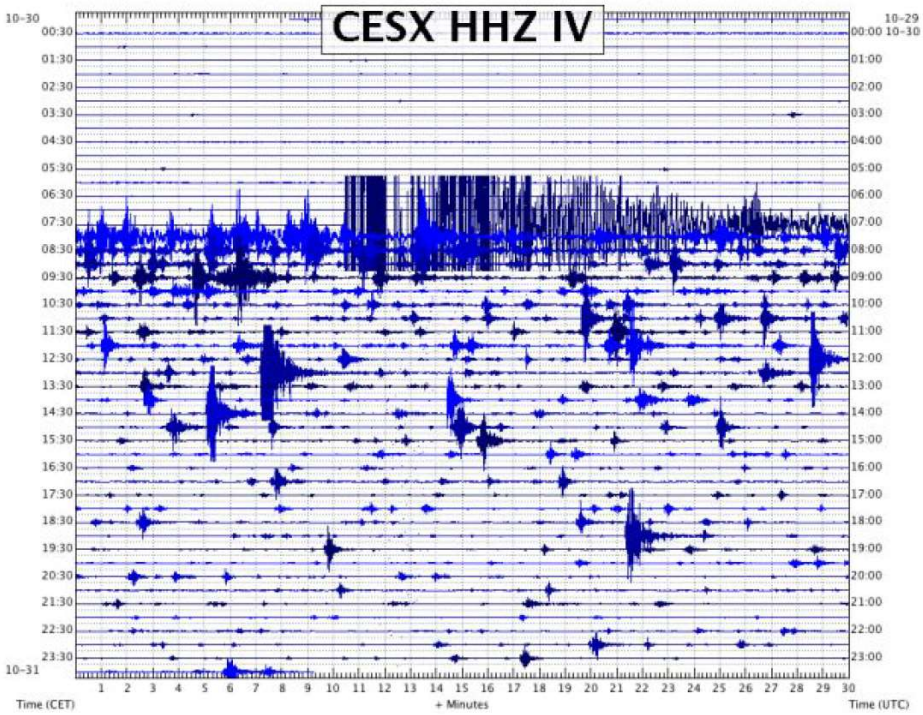


Figura 8 - Sismogramma giornaliero della stazione sismica CESX (a Cesi, Terni) della Rete Sismica Nazionale dell'INGV. Ogni riga rappresenta 30 minuti; è ben visibile il terremoto principale delle 6:40 UTC.
(Fonte: Rapporto dell'INGV del terremoto del 30 ottobre 2016 delle 06:40:17 UTC)

Le coordinate dell'*ipocentro* sono state individuate a 42.84 latitudine nord, 13.11 longitudine est, ad una profondità di 9 km. L'*epicentro* corrispondente è ubicato a 5 km da Norcia, 7 da Castelsantangelo sul Nera e Preci, 10 da Visso. La *magnitudo* calcolata nella sala di monitoraggio INGV è 6.1 M L e 6.5 M W e ha fatto sì che il terremoto di propagasse in tutto il centro Italia. L'area interessata dagli *aftershocks* si estende per circa 40 km, da Accumoli a sud fino a Visso a nord, riprendendo quindi la parte settentrionale del sistema di faglie che si era attivato con il terremoto del 24 agosto e interessando anche la parte meridionale della struttura attivata il 26 ottobre.

Il Sistema di faglie di Norcia, situato tra gli abitati di Cittareale a sud e Preci a nord, è costituito da quattro segmenti, di cui tre (Norcia, Campi, Preci) al margine di depressioni che hanno ospitato sedimentazione nel corso del Quaternario e uno (Cittareale-Castel Santa Maria) in un settore di catena privo di bacino intermontano e caratterizzato da evidenze geomorfologiche di deformazioni gravitative profonde di versante. Questo sistema di faglia è considerato la sorgente che ha generato il terremoto del 14 gennaio 1703, come evidenziato dai risultati delle indagini paleosismologiche.

1.1.3. Interventi per il monitoraggio del territorio

A seguito del terremoto del 24 agosto 2016 (magnitudo M W 6.0, ore 01:36 UTC) l'INGV, in collaborazione con l'Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico del Dipartimento Protezione Civile (DPC) e l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), ha iniziato un più dettagliato monitoraggio delle deformazioni del suolo nell'area epicentrale attraverso la tecnica *Global Positioning System* (GPS/GNSS). Sono state installate diverse stazioni GPS/GNSS su alcuni caposaldi appartenenti alla rete CaGeoNet dell'INGV (Galvani et al., 2012 e riferimenti) e alla rete dell'Istituto Geografico Militare (IGM). È stata inoltre realizzata e resa operativa una nuova stazione permanente della rete RING-INGV ad Arquata del Tronto (ARQT).

Inoltre, il gruppo operativo SISMIKO ha predisposto l'installazione di una rete sismica temporanea, a integrazione delle stazioni permanenti già presenti sul territorio, costituita da 19 stazioni di cui 15 acquisite in tempo reale al centro operativo dell'INGV di Roma e 4 in acquisizione locale. In registrazione locale è stata installata anche una rete di 20 stazioni del *British Geological Survey*. I dati SISMIKO si integrano con i dati della Rete Sismica Nazionale dell'INGV.

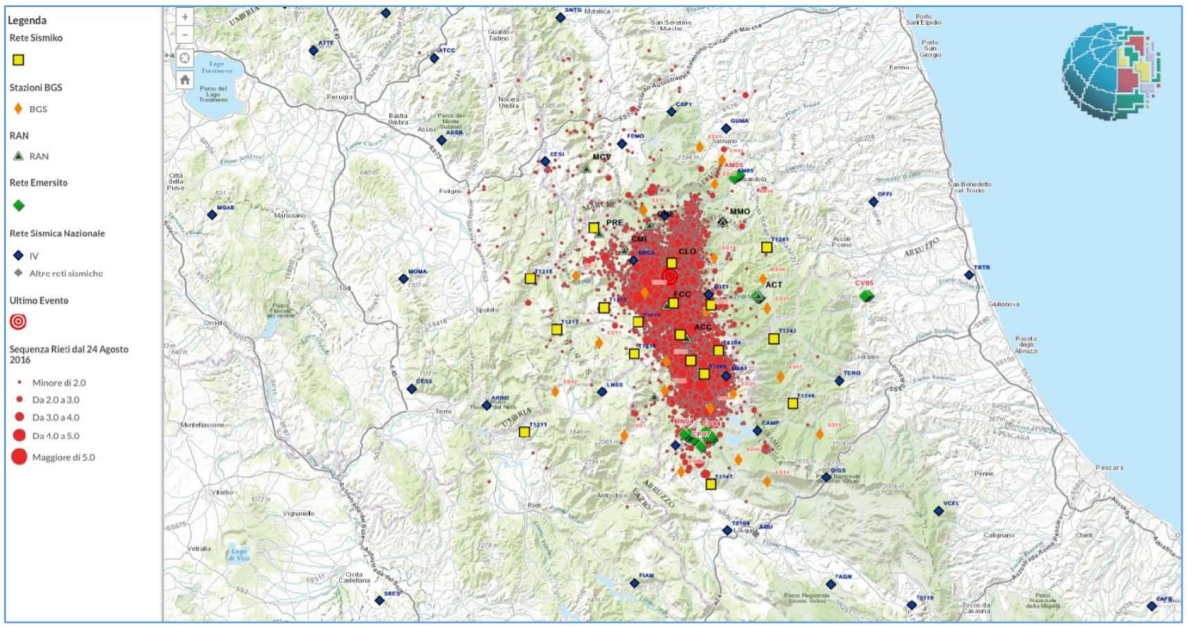


Figura 9 - Mappa della rete sismica temporanea installata da SISMIKO (quadrati gialli) tra il 24 e 30 agosto 2016 ad integrazione della Rete sismica nazionale (RSN; rombi blu).
Sono inoltre presenti le 22 stazioni di EMERSITO (rombi verdi) e le 25 stazioni BB del British Geological Survey (BGS; rombi arancioni) e le 10 RAN-DPC temporanee (triangoli verdi). La sismicità (in rosso) è aggiornata al 23 settembre 2016.

Il 26 ottobre due forti scosse di ML 5.4 e 5.9 hanno interessato la zona a nord della sequenza, estendendo l'area attiva di circa 10 km. Per questo motivo si è disposto di densificare la rete sismica verso nord con l'installazione di 3 stazioni temporanee di cui una (T1256) in trasmissione dati in

tempo reale, che è anche stata inserita nel sistema di sorveglianza sismica, ed altre due (T1219 e T1220) in locale.

Il 30 ottobre, dopo il terremoto di M W 6.5, si è predisposto una ulteriore installazione di una stazione in tempo reale nella zona ad ovest della sequenza (nei pressi di Campello del Clitunno in provincia di Perugia). Inoltre è stata equipaggiata con un router UMTS anche una delle stazioni (T1220) installate il 27 settembre.

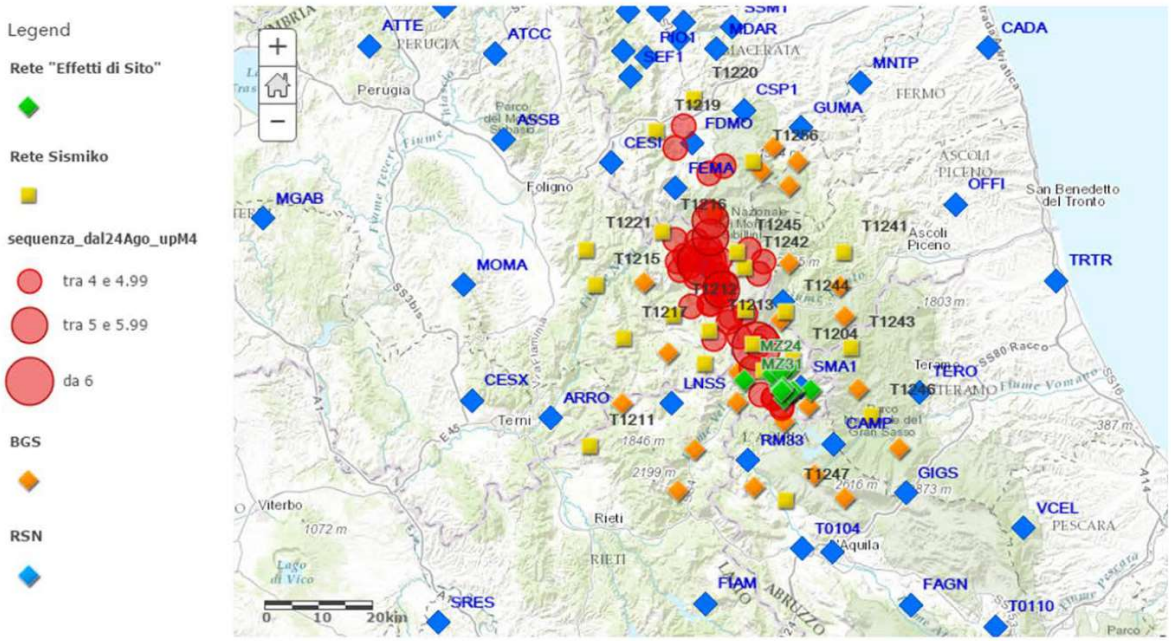


Figura 10 - Mappa delle reti di monitoraggio sismico installate nell'area colpita dalla sequenza sismica.

Queste stazioni hanno registrato gli spostamenti co-sismici legati agli eventi del 26 e del 30 Ottobre. I dati delle stazioni GPS/GNSS permanenti e non-permanenti attive sono stati scaricati ed elaborati utilizzando tre differenti *software* scientifici (GAMIT/GLOBK, GIPSY e BERNESE), e successivamente combinati con lo scopo di minimizzare errori sistematici eventualmente presenti nelle singole soluzioni indipendenti.

La *Figura 11* mostra gli spostamenti co-sismici osservati per l'evento del 30 Ottobre. Gli spostamenti sono stati calcolati dai tre centri di analisi a partire dalle serie temporali delle posizioni giornaliere, come media delle posizioni dal giorno 27/10/2016 al giorno 29/10/2016 e la posizione al giorno 30/10/2016. Gli spostamenti co-sismici orizzontali massimi sono stati osservati alle stazioni VETT (Monte Vettore) e MSAN, con uno spostamento di 38.3 cm verso nord-est e di 26 cm verso sud-ovest, rispettivamente, mentre gli spostamenti verticali massimi sono stati osservati per le stazioni ARQT, RIFP e MSAN, con un abbassamento di 44.6, 26.1 e 17.1 cm. La stazione sul Monte Vettore (VETT), invece, ha registrato un sollevamento di 5.5. cm.

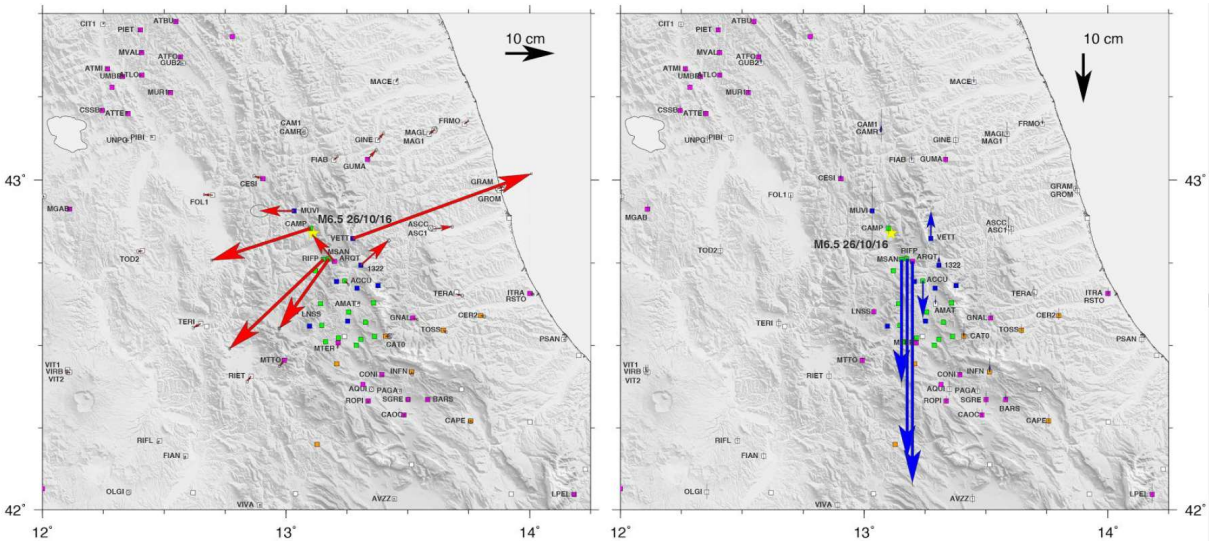


Figura 11 - Mappa degli spostamenti co-sismici GPS orizzontali (frecce rosse) e verticali (frecce blu) ottenuti dalla combinazione di tre soluzioni geodetiche indipendenti per l'evento del 30 Ottobre 2016. I quadrati bianchi mostrano la posizione delle stazioni GPS permanenti e quelle magenta delle stazioni RINGING (doi: 10.13127/RING). I quadrati arancioni mostrano le stazioni GPS gestite da DPC e ISPRA. I quadrati verdi e blu mostrano le stazioni della rete CaGeoNet e della rete IGM, rispettivamente, ri-occupati dopo il 24 Agosto.

1.1.4. Report settimanali sulle possibili nuove scosse

A seguito del terremoto M6 di Amatrice del 24 agosto 2016, il Centro di Pericolosità Sismica (CPS) fornisce in fase sperimentale dei *forecast* settimanali per un'area di 50 km di raggio intorno all'epicentro (lat. 42.71, lon. 13.22). Dal 26 ottobre il raggio è stato aumentato a 70 km, e dal 30 ottobre si è usata un'area compresa tra le coordinate 42.4N-43.4N, 12.5E- 13.9E. La procedura utilizzata è basata sul modello OEF_Italy basato su un ensemble di 3 diversi modelli di *earhquake clustering*.

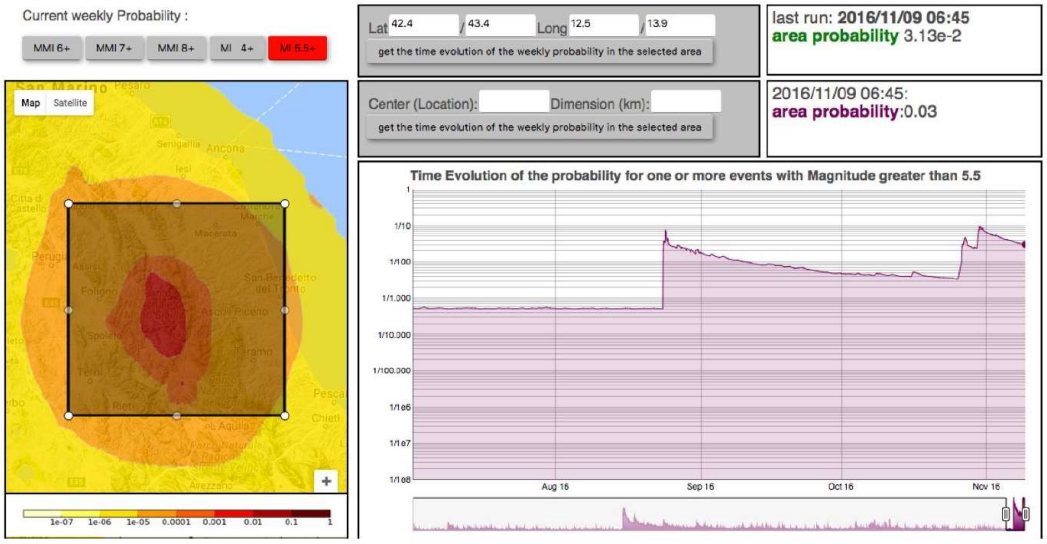


Figura 12 - Andamento delle probabilità settimanali per terremoti superiori a magnitudo 5.5 nell'area delimitata nel riquadro a sinistra.
(Fonte: Rapporto dell'INGV del terremoto del 30 ottobre 2016 delle 06:40:17 UTC).

Dalla *Figura 12* si nota che il terremoto del 24 agosto non è stato anticipato da nessun incremento di probabilità (la probabilità settimanale di *background* è 0.0005), mentre la probabilità settimanale prima dell'evento di magnitudo 6.5 era circa 0.03. Proprio pochi giorni prima del terremoto del 30 ottobre la Commissione grandi rischi aveva allertato rispetto all'ipotesi di nuovi forti terremoti.

1.1.5. Gestione dell'emergenza e della ricostruzione

I primi soccorsi sono arrivati sui luoghi del sisma già a poche ore dalla scossa del 24 agosto, seppur con un certo ritardo nel raggiungere le frazioni più isolate a causa dei numerosi ponti crollati e delle strade ostruite dalle macerie. Il giorno seguente il numero totale di soccorritori messi in campo ammontava a 5.400 unità. Il coordinamento nazionale della Protezione Civile è avvenuto inizialmente a Roma tramite il Comitato Operativo e dal 28 agosto tramite la Direzione di comando e controllo (DI.COMA.C) istituita a Rieti, nell'edificio dell'INPS adiacente alla Questura.
Il 1º settembre il presidente del Consiglio Matteo Renzi ha nominato commissario straordinario per la ricostruzione Vasco Errani, che aveva già ricoperto questo incarico a seguito del terremoto dell'Emilia del 2012. A metà novembre il commissariato è diventato operativo con sede a Rieti, nel palazzo dell'ex Banca d'Italia. Ad aprile del 2017 la DI.COMA.C. ha terminato le proprie attività, passando la gestione del post-terremoto alle quattro amministrazioni regionali. Nella gestione della ricostruzione, il governo italiano ha scelto sin dall'inizio di allontanarsi dal cosiddetto "modello Bertolaso" (impiegato nel precedente terremoto dell'Aquila, caratterizzato da una gestione centralizzata e dal frequente ricorso a poteri straordinari), e di fare ricorso alle ordinarie procedure amministrative, decentrando le decisioni nei territori. Un'altra decisione, presa dietro forte richiesta dei sindaci del cratere, è stata quella di ricostruire i centri abitati dove erano, evitando la costruzione di *new town* per l'alloggiamento degli sfollati.

1.1.6. Team DIRECT

Il Team DIRECT[10] è un gruppo del Politecnico di Torino che si inserisce nel campo della Geomatica, approfondendone quegli aspetti legati alle tecniche del Rilievo Metrico 3D e del Telerilevamento, non solo nei suoi aspetti metodologici, ma anche dal punto di vista prettamente applicativo. L'acronimo DIRECT sta infatti per **DIsaster RECovery Team**, in quanto mette a disposizione il proprio lavoro in occasione di emergenze ambientali, dovute ad eventi naturali catastrofici o destinate a beni soggetti a emergenze anche ordinarie continue, in collaborazione con il dipartimento della Protezione Civile e l'Ente nazionale dei Vigili del Fuoco.

[10] https://www.polito.it/direct/ direct.polito@gmail.com
m.me/direct.polito teamdirectpolito

Figura 13 - Logo del Team DIRECT.

Vengono approfondite tutte le fasi del *Disaster Management* (DM), dall'analisi della vulnerabilità ambientale, alla risposta immediata alle emergenze, al rilievo post disastro, passando attraverso la fase di *Capacity Building* (CB), ossia della formazione degli operatori all'intervento diretto.
I recenti eventi sismici che hanno colpito il centro Italia hanno condotto il team in alcuni dei luoghi simbolo di tale disastro come Amatrice, Tolentino, Accumoli e Norcia. In particolare, in questa tesi verrà approfondito e sviluppato il lavoro effettuato a Norcia.

1.1.7. Danni riscontrati nella città di Norcia

La città sabina di Norcia si trova nella parte più montuosa dell'Umbria, nell'area del Parco Nazionale dei Monti Sibillini, ed è nota per le testimonianze del suo passato romano e medievale, a cominciare dalle mura di cinta dalla caratteristica forma a cuore.
Il terremoto del 2016 ha colpito in modo devastante la città di Norcia, causando ingenti danni alle strutture. Simbolo di tale disastro sono la Basilica di San Benedetto e la concattedrale di Santa Maria Argentea, quasi interamente crollate. Inoltre, la frazione Castelluccio di Norcia è stata ampliamente distrutta, con circa il 60% delle case crollate.

Figura 14 - Vigili del Fuoco a Norcia in seguito alla scossa del 30 ottobre 2016.

Il sisma ha provocato uno spostamento di due lobi: uno verso est di 40 cm nell'area di Montegallo e l'altro verso ovest di 30 cm nella zona di Norcia. La scossa del 30 ottobre ha prodotto non trascurabili effetti idrogeologici nella zona: la portata del fiume Nera è notevolmente aumentata mentre nei pressi di Norcia il torrente Torbidone è riemerso, tornando a scorrere dopo decenni di assenza nella piana di Santa Scolastica. Nel fermano si sono formati dei vulcanelli di fango. Sul Monte Vettore si è aperta un'enorme spaccatura causando una frana.

2.Acquisizione dati

Sono state svolte due campagne di rilievo per l'acquisizione dati:

- la prima a luglio 2018 (16-20/07/2018) e ha riguardato l'intera città di Norcia e le chiese di San Francesco e di Santa Maria Argentea;
- la seconda a settembre 2018 (3-7/09/2018) e ha avuto come oggetto di studio la chiesa di San Lorenzo, il castello, la piazza e le mura.

Si è deciso di mappare la città attraverso acquisizione aerofotogrammetrica.

Figura 15 - Mappa di Norcia, scaricata da Google maps, utilizzata per le operazioni di acquisizione tramite dispositivo UAV (eBee). In essa l'indicazione manuale dei marker.

Si è deciso poi di analizzare a una scala maggiore alcuni monumenti architettonici.

Tra la prima e la seconda campagna di rilievo sono state rilevate le seguenti aree:

- San Francesco;
- Santa Maria Argentea;
- San Lorenzo;
- Castello;
- Piazza;
- Mura.

Nel dettaglio in questa tesi verrà focalizzata l'attenzione sul caso studio della Chiesa di San Lorenzo. Altri ragazzi del Team DIRECT si stanno invece occupando delle altre porzioni di città.

Figura 16 - Aree rilevate con ingrandimento sul caso studio della Chiesa di San Lorenzo.

2.1. Caso studio

La chiesa di San Lorenzo, nel centro cittadino di Norcia, è una costruzione antica, probabilmente edificata sui resti di un tempio pagano. Si pensa sia la chiesa dove San Benedetto e Scolastica furono battezzati. Non è più usata come una chiesa, e viene aperta solo pochi giorni all'anno. È in condizioni migliori rispetto a molte altre chiese di Norcia che sono state chiuse dopo precedenti terremoti e mai più riaperte.

Nella facciata si apre un semplice portale con semicolonne sorreggenti un timpano realizzato alla fine del Cinquecento. Numerosi sono i materiali di spoglio inseriti nella muratura esterna. Sono state individuate alcune iscrizioni e un bassorilievo.

Il campanile, incluso nel perimetro della struttura ha aspetto sette-ottocentesco.

Gli interni appaiono disadorni e in cattivo stato di conservazione. L'interno ha un impianto a navata unica priva di abside. Conserva ancora lungo il coro gli stalli lignei opera di maestranze locali realizzati agli inizi del XVII secolo e le scritte commemorative poste sulle pareti per ricordare i restauri del XIX secolo, voluti dalle maggiori famiglie della città. L'altare dell'Assunta, rifatto nel XIX secolo, conserva una mostra lignea del Seicento.

Il soffitto, in parte crollato negli anni '50, era a riquadri lignei con rosoni, borchie e trecce.

Il soffitto ligneo finemente intagliato cedette nel 1950 e fu smantellato.

Figura 17 - Chiesa di San Lorenzo prima del terremoto: in altro a sinistra vista dall'ingresso; in alto a destra vista dal retro; in basso vista degli interni.

In seguito al terremoto che il 30 ottobre 2016 ha colpito il Centro Italia la chiesa ha subito il crollo del campanile ed è stata necessaria una messa in sicurezza della struttura. Tale intervento è stato eseguito dal Comune di Norcia che si è affidato ad alcuni professionisti. In particolare, della parte architettonica si è occupato l'Architetto Walter Maneri, che ha gentilmente fornito la documentazione grafica aggiornata che è stata utilizzata come base per la realizzazione del modello HBIM della chiesa.

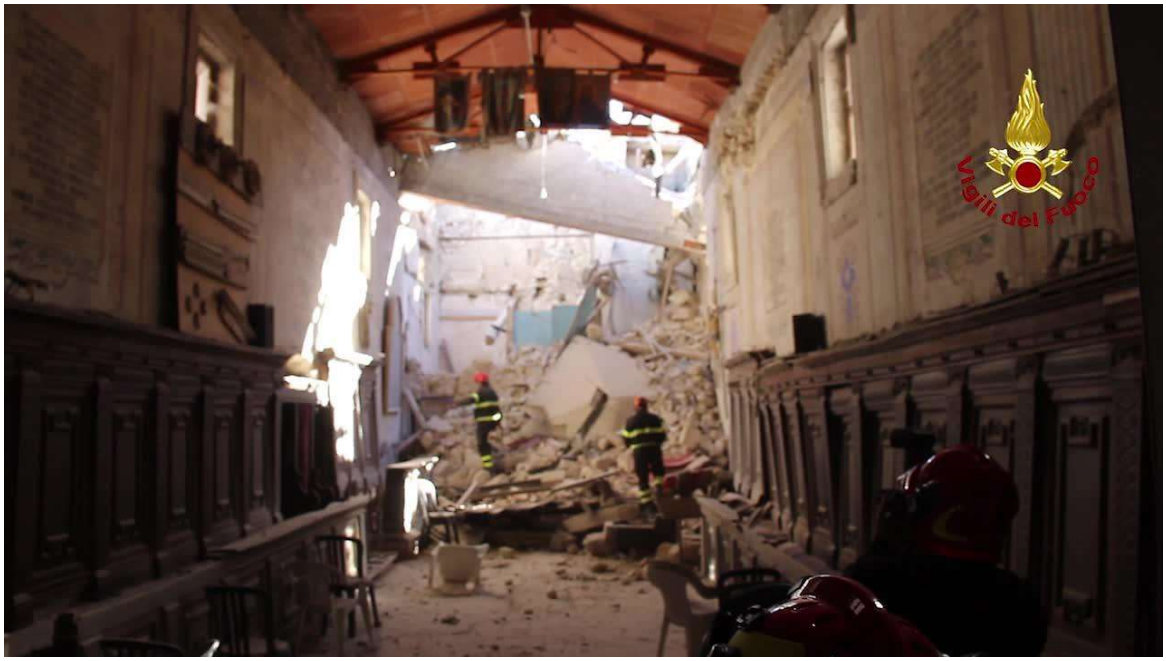


Figura 18 - Chiesa di San Lorenzo dopo il terremoto: in altro a sinistra vista dall'ingresso; in alto a destra vista dal retro; in basso vista degli interni.

2.2. Realizzazione degli eidotipi

Il Team DIRECT si è recato nei pressi della Chiesa di San Lorenzo e ha realizzato gli eidotipi, ovvero degli schizzi nei quali viene rappresentata l'area in esame e la posizione approssimata dei punti da rilevare. Tali punti sono stati materializzati tramite chiodi e target e documentati attraverso delle fotografie che permettano di individuare la posizione reale dei vertici della rete e delle scansioni.

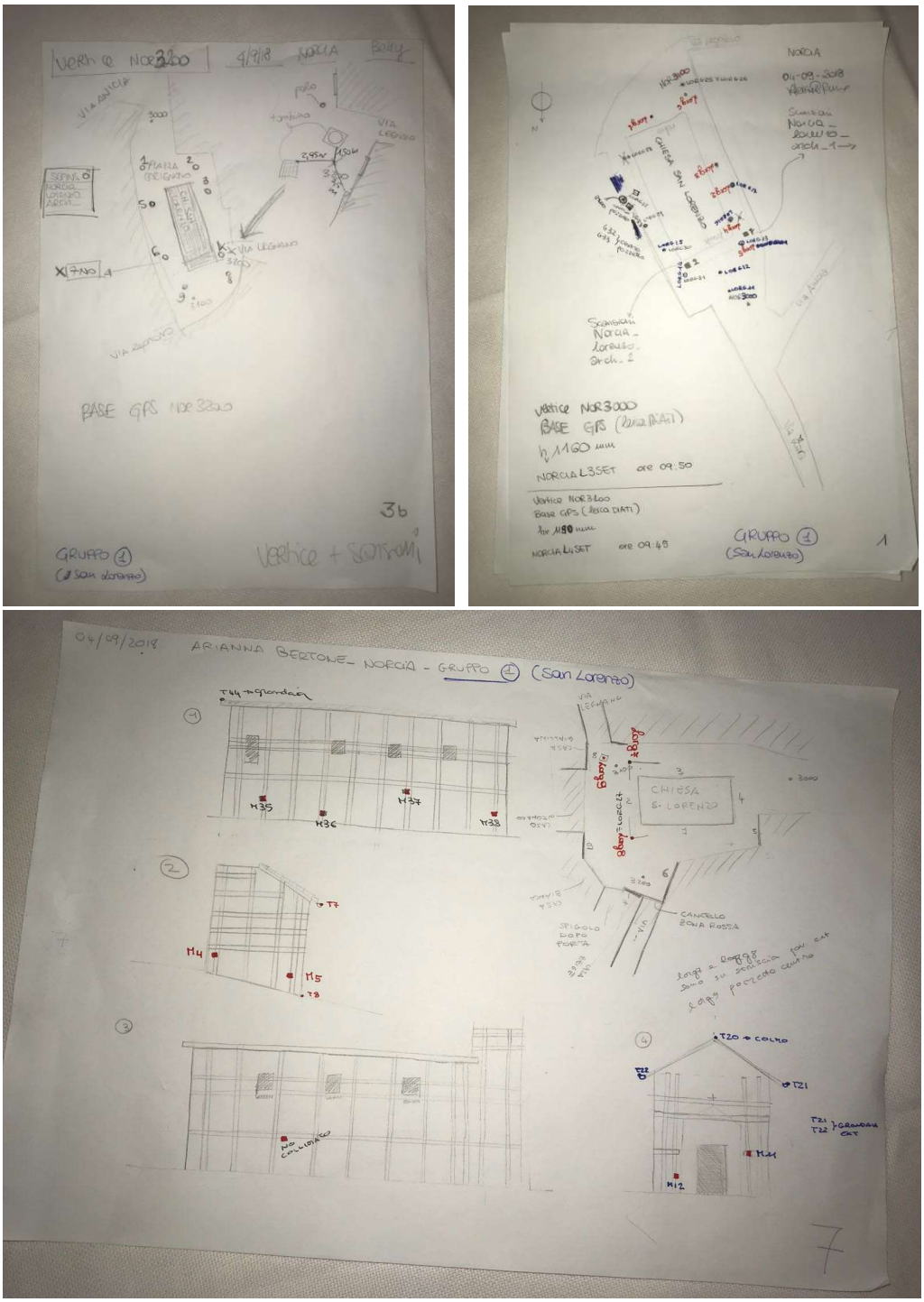


Figura 19 - In alto a sinistra eidotipi dei vertici della rete di inquadramento; in alto a destra e in basso eidotipi delle scansioni.

2.3. Rilievo

La documentazione e la rappresentazione dei Beni Culturali sono da sempre tra i principali argomenti di studio nel campo delle possibili applicazioni della Geomatica. Le attività di ricerca sono indirizzate sia verso lo studio delle possibili applicazioni di strumenti laser dalle prestazioni sempre più avanzate dal punto di vista della velocità di acquisizione, dell'accuratezza metrica e delle portate, sia verso lo sviluppo di procedure fotogrammetriche terrestri che consentono un elevato livello di automazione. Quest'ultimo aspetto è stato analizzato per lo sviluppo di procedure fotogrammetriche *close-range* capaci di eseguire in modalità automatica l'intero processo di modellazione tridimensionale. In particolare, le varie fasi di modellazione tridimensionale con tecniche fotogrammetriche possono essere suddivise in: processo di calibrazione della camera, orientamento delle immagini, calcolo della nuvola di punti, ricostruzione e modellazione (anche tramite applicazione della t*exture*) delle superfici dell'oggetto (Barazzetti et. al., 2011a).[11]

2.3.1. Scelta delle tecniche di rilievo

l migliore approccio per il rilievo consiste nella combinazione di differenti strumenti e tecniche di modellazione. Infatti, l'uso di una sola tecnologia di rilievo 3D non permette, al momento, di arrivare ancora ad un risultato soddisfacente in tutte le condizioni di lavoro e in termini di accuratezza geometrica, portabilità, automatismo, fotorealismo e bassi costi, a parità di efficienza e flessibilità.[12] Per scegliere la corretta tecnica di rilievo da adoperare è necessario definire la scala di lavoro. Questa si determina in base all'ampiezza dell'area o degli oggetti da rilevare.

Rilievo archeologico	Oggetti da rilevare	Dati e tecniche di rilievo
Scala regionale	Territorio Topografia Sito	Immagini satellitari Immagini aeree a piccola scala Radar Lidar GPS
Scala locale	Sito Architetture Scavo Strati	Immagini satellitari ad alta risoluzione Immagini aeree a grande scala Radar Lidar Laser scanner TOF/CW Immagini terrestri Stazione totale GPS/GNSS
Scala oggetto	Ritrovamenti Oggetti museali	Immagini terrestri Laser scanner a triangolazione Sistemi a luce strutturata

Tabella 2 - Scale di lavoro archeologiche e possibili dati o tecniche per il rilievo 3D digitale e non invasivo. (Fonte: Guidi et al.2003; Stumpfel et al. 2003; El-Hakim et al. 2004; Guarnieri, Remondino, Vettore 2006; Guidi et al.2009)

[11] FONTE: MAURO LO BRUTTO, MARIA GRAZIA SPERA, *"Sperimentazione di procedure automatiche in fotogrammetria close-range per il rilievo di Beni Culturali*", p.1427.

[12] FONTE: Guidi et al. 2003; Stumpfel et al. 2003; El-Hakim et al. 2004; Guarnieri, Remondino, Vettore 2006; Guidi et al. 2009).

In questo caso, dovendo rilevare la città di Norcia e in particolare la chiesa di San Lorenzo, ci inseriamo nella scala locale. Tra le varie tecniche a disposizione si è scelto di utilizzare tecniche LiDAR (con laser scanner), fotogrammetria terrestre (con immagini terrestri), fotogrammetria aerea (con UAV), tecnica topografica (con stazione totale e GPS/GNSS). Questo approccio che integra i dati provenienti da immagini e laser scanner permette di sfruttare appieno le potenzialità di ogni singola tecnica di misura per rilevare al meglio le complesse informazioni geometriche e materiche presenti nei manufatti archeologici.

Questo modo di agire è definito multirisoluzione e multisensore, in quanto gli strumenti utilizzati consentono di ottenere dati progressivamente più dettagliati a seconda della scala a cui si è fatto riferimento. Sfruttare tecniche che raggiungono diverse scale di dettaglio permette di soddisfare i principi su cui si basa la rappresentazione multiscala prevista da CityGML.

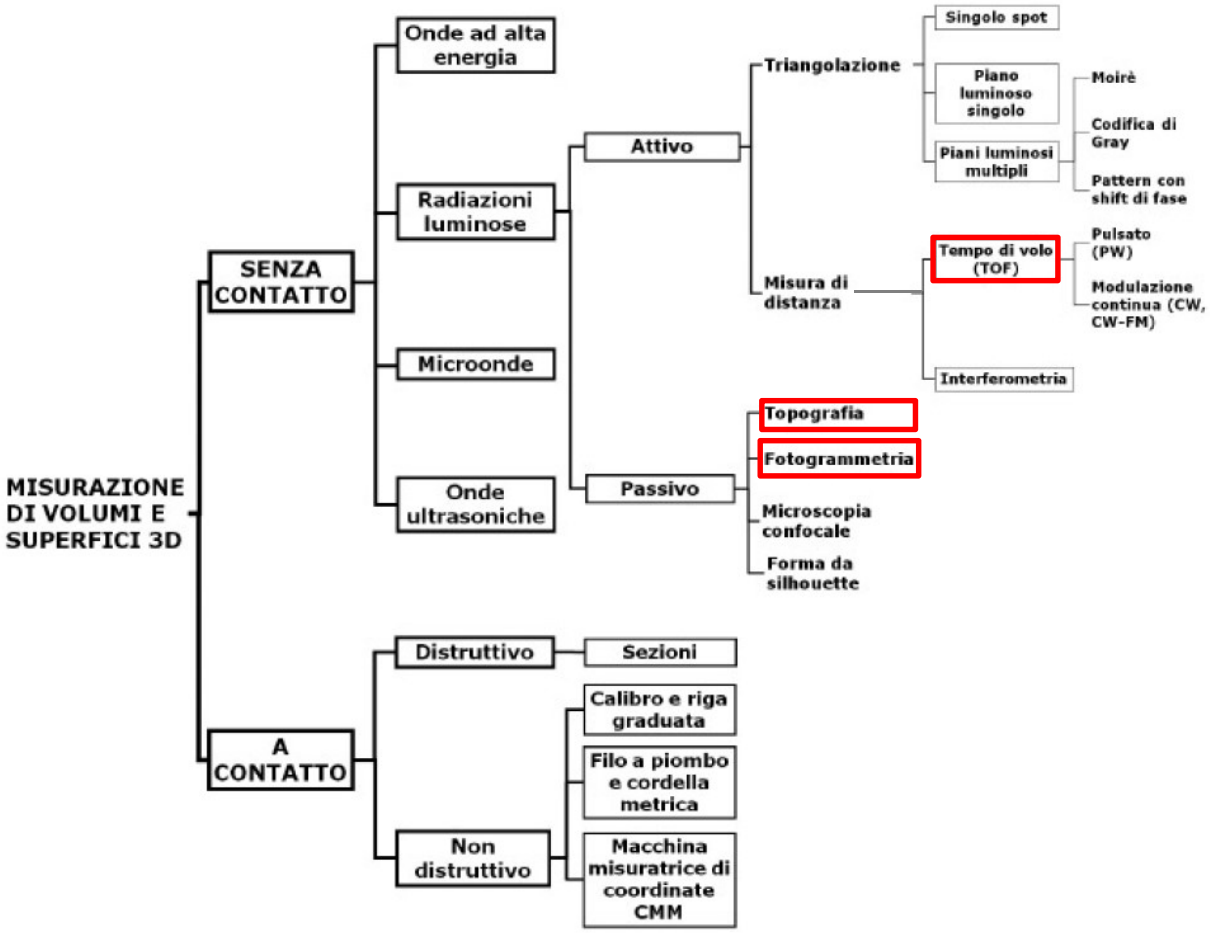


Figura 20 - Schema di tutti gli strumenti per l'acquisizione 3D.[13]

[13] GUIDI ET AL. 2003; Stumpfel et al. 2003; El-Hakim et al. 2004; Guarnieri, Remondino, Vettore 2006; Guidi et al. 2009.

Gli strumenti di misura utilizzati possiedono sensori tridimensionali che consentono di generare un'immagine 3D della scena che inquadrano. In particolare, si è scelta una classe di sensori che effettuano misurazioni senza contatto attraverso l'uso della radiazione luminosa. In funzione della natura della luce che viene impiegata per effettuare la misura, si distinguono sensori passivi e attivi:

- I sensori passivi utilizzano la luce naturale (fotogrammetria, teodoliti, ecc);
- I sensori attivi codificano la luce in modo che essa svolga un ruolo nel processo di misura (laser scanner, strumenti a proiezione di luce strutturata, radar, stazione totale, ecc).

2.3.2. Procedure operative

Di seguito si riporta uno schema riassuntivo delle procedure operative utilizzate data la scelta delle tecniche di rilievo precedentemente illustrata.

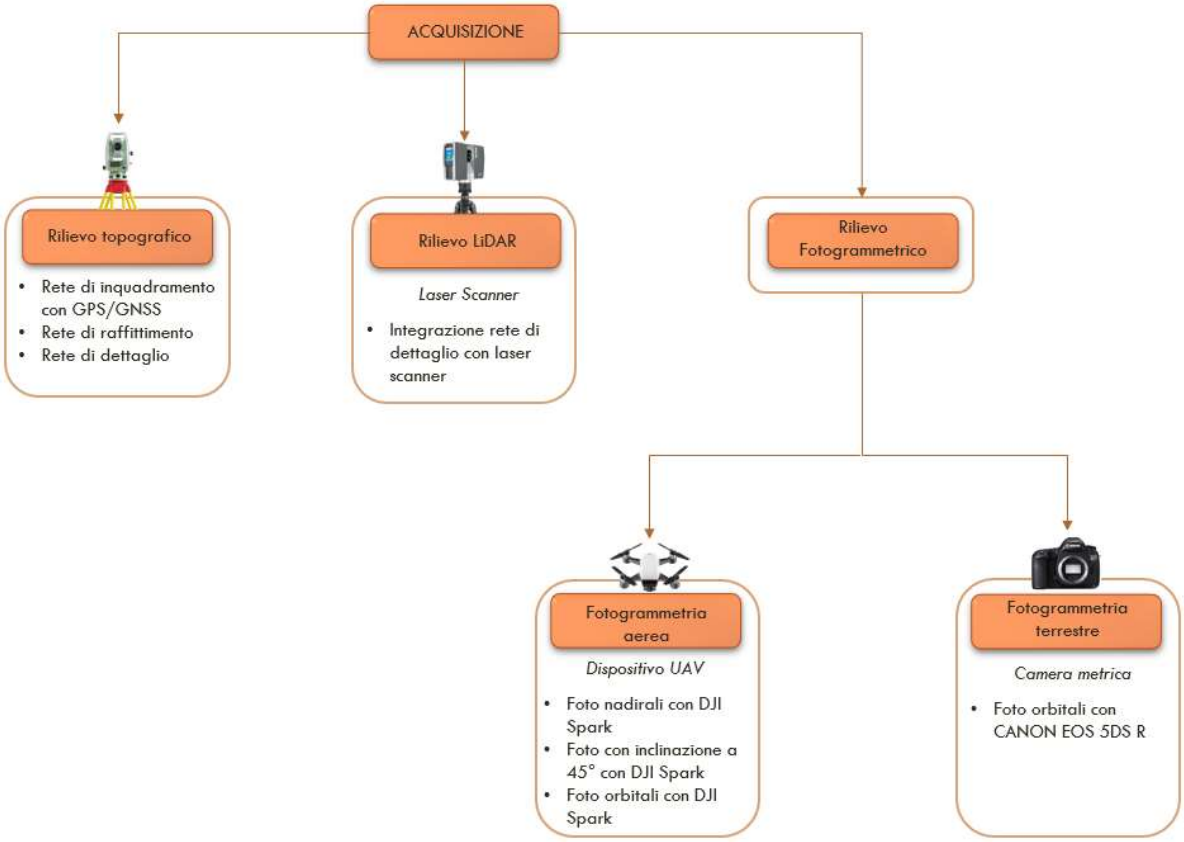


Figura 21 - Modalità operative riguardanti la fase di acquisizione dati.

Sono state realizzate le tre reti topografiche di inquadramento, raffittimento e dettaglio (rilievo topografico) mediante diverse strumentazioni. Le reti sono state poi integrate con le tecniche LiDAR (rilievo LiDAR). Si è proceduto quindi con i voli dei diversi dispositivi UAV (fotogrammetria aerea) e con l'acquisizione tramite camera metrica (fotogrammetria terrestre).

2.3.2.1. Rilievo topografico

L'organizzazione delle operazioni di rilievo è strutturata secondo tre fasi successive:

1) Rilievo di inquadramento
2) Rilievo di raffittimento
3) Rilievo di dettaglio

Passando dalla prima alla terza fase aumenta il numero dei punti rilevati e diminuisce l'accuratezza fino a un certo valore compatibile con lo scopo del rilievo (es. cartografia ad una certa scala, monitoraggio deformazioni, ecc.).

Di seguito si riporta il **rilievo di inquadramento**. Esso prevede l'istituzione e la misura di una rete di inquadramento costituita da un numero limitato di punti, detti vertici, opportunamente distribuiti sul territorio. Per la realizzazione di tale rete sono stati utilizzati tre vertici, "NOR3000", "NOR3100" e "NOR3200". Questi sono stati materializzati tramite chiodi in acciaio con rondella in modo da poter essere utilizzati come riferimento per i rilievi successivi. Le informazioni riguardanti i vertici sono inoltre state documentate tramite la stesura di monografie.

Figura 22 - Rete di inquadramento.

Figura 23 - Monografie dei vertici NOR3000, NOR3100 e NOR3200.

Si riporta di seguito, a titolo esemplificativo, la monografia realizzata per il vertice NOR3000 [*Figura 24*].

Indagini geomatiche e geofisiche

Luogo: Norcia, 04-09-2018

Politecnico di Torino

Operatori: Gruppo 1

MONOGRAFIA DI VERTICE DELLA RETE PRINCIPALE DI INQUADRAMENTO	VERTICE NOR3000
Planimetria di base	*Dettaglio*

Tipo di materializzazione: chiodo in acciaio con rondella

Acquisizione foto (dispositivo e proprietario): cellulare Valeria

Strumento di rilievo: Leica - 4

Altezza strumentale: 1,160 m

Strumento misura (uncino/rotella...): uncino

Tipo di antenna:

Data: 4 settembre 2018

Ora inizio acquisizione: 09:50 *Operatore:*

Ora fine acquisizione: *Operatore:*

Problemi eventuali:

*Note:*_____

Coordinate [m]	Sistema	Fuso
x= 344055,28200; y=4739415,04000; z(ellissoidica)=___,___; z(orto)= 602,88800	UTM WGS84	33

Figura 24 - Esempio di compilazione del vertice NOR3000.

Per rilevare i vertici su ciascuno di essi sono stati posizionati dei ricevitori GPS/GNSS Leica muniti di antenne geodetiche multicostellazione con i quali sono state fatte delle acquisizioni in modalità statica con epoche da 5s.

Figura 25 - Ricevitore satellitare GPS/GNSS in acquisizione: a sinistra acquisizione del vertice NOR3000; a destra ricevitore Leica.

Per garantire poi un collegamento tra le varie stazioni posizionate sui capisaldi, è stata eseguita una poligonale attraverso un mini prisma Leica 360.

Figura 26 - Procedura di triangolazione mediante mini prisma Leica 360.

Per densificare localmente la rete è stato effettuato il **rilievo di raffittimento**, che prevede la realizzazione di una rete mediante la tecnica RTK (*Real Time Kinematic*).

È stato infine effettuato il **rilievo di dettaglio**, posizionando la stazione totale sul punto di stazione e orientandola su un vertice di inquadramento. Si sono quindi collimati i *target* sulla parete e a terra, misurando le loro coordinate sferiche.

Figura 27 - Acquisizione target a parete.

2.3.2.2. Rilievo LiDAR

Per la realizzazione del rilievo di dettaglio, a integrazione del rilievo topografico è stato effettuato un rilievo LiDAR, acronimo inglese di *"Light Detection and Ranging"* o *"Laser Imaging Detection and Ranging"*. È una tecnica di rilevamento che permette di determinare la distanza di un oggetto o di una superficie utilizzando un impulso laser.[14] Pertanto permette di acquisire informazioni sulla geometria di determinate regioni dello spazio o di uno specifico oggetto, in modo accurato, veloce e non invasivo. Il grande vantaggio è costituito dalla possibilità di modellare oggetti con una densità di informazioni geometriche che non può essere raggiunta, in tempi ragionevoli, con nessun metodo di rilevamento di tipo tradizionale. Infatti permette di ottenere una nuvola di punti ad alta densità (in rapporto al modello di strumento utilizzato e alla distanza di acquisizione) per ognuno dei quali sono note le coordinate relative a un sistema di riferimento intrinseco allo strumento, e in alcuni casi, la riflettanza indicativa delle caratteristiche fisiche della superficie scandita. Gli oggetti rilevabili possono avere dimensioni variabili, dai piccoli manufatti alle sculture fino a edifici di grandi

[14] FONTE: Wikipedia.

dimensioni, con alcuni limiti legati al campo visivo dello strumento dovuti in generale alla geometria delle superfici da rilevare. [15]

Il rilievo LiDAR è stato eseguito mediante lo strumento FARO Focus 3D multisensore 120. Esso è dotato di un sensore attivo, definito a "misura diretta" fisso o terrestre, in grado di captare i *target* che costituiscono i punti della rete di dettaglio. Trattandosi di un distanziometro privo di prisma, il funzionamento dello strumento si basa sulla emissione ripetuta di impulsi, mediante i quali viene stimata la distanza in relazione al tempo di volo, in inglese denominato con l'acronimo TOF, *"Time Of Flight"*.

Specifiche di prestazione Focus^{3D}S

Ranging unit

Unambiguity interval:	153,49 m
Range Focus^{3D}S 120[1]:	0,6 m - 120 m indoor o outdoor con poca luce ambientale e incidenza normale su superficie riflettente (90%)
Range Focus^{3D}S 20:	0,6 m - 20 m con incidenza normale su superfici opache riflettenti >10%
Velocità di misura (punti/sec.):	122.000 / 244.000 / 488.000 / 976.000
Errore di distanza lineare[2]:	±2 mm a 10 m e 25 m, con una riflettività del 90% e 10%

Rumore[3]	@10 m	@10 m - filtrato[4]	@25 m	@25 m - filtrato[4]
@ 90% refl.	0,6 mm	0,3 mm	0,95 mm	0,5 mm
@ 10% refl.	1,2 mm	0,6 mm	2,2 mm	1,1 mm

Unità colore

Risoluzione:	fino a 70 megapixel a colori
Funzionalità colore dinamica:	adeguamento automatico della luminosità

Unità di deflessione

Campo visivo (vert./orizz.):	300 ° / 360 °
Risoluzione (vert./orizz.):	0,009 ° (40.960 3D-pixel a 360 °) / 0,009 ° (40.960 3D-pixel a 360 °)
Max. velocità di scansione vert.:	5.820 rpm o 97 Hz

Laser (trasmettitore ottico)

Potenza laser (CW):	20 mW (laser classe 3R)
Lunghezza d'onda:	905 nm
Divergenza del raggio:	0,19 mrad (0,011 °)
Diametro del raggio (in uscita)	3,0 mm, circolare

Gestione dati e controllo

Memorizzazione die dati:	SD, SDHC™, SDXC™; scheda da 32 GB inclusa nella fornitura
Controllo dello scanner:	tramite touchscreen e WLAN
Nuovo accesso WLAN:	il comando a distanza dello scanner, la visualizzazione e il download delle scansioni sono possibili su dispositivi mobile con Flash®.

Multisensore

Compensatore biassiale:	fornisce per ogni scansione informazioni relative al livello: precisione 0,015 °; range di misurazione ± 5 °
Sensore di altezza:	grazie ad un barometro elettronico è possibile determinare per ogni scansione l'altezza relativa rispetto a un punto di riferimento.
Bussola:	la bussola elettronica individua l'orientamento della scansione. È inoltre disponibile una funzione di

Figura 28 - FARO Focus 3D MS120: specifiche tecniche.
(Fonte: https://www.diemmestrumenti.it/documenti/FARO-Laserscanner-Focus3D.pdf)

[15] FONTE: Peloso, D. (2005) Tecniche laser scanner per il rilievo dei beni culturali. Archeologia e Calcolatori (XVI). pp. 199-224. ISSN 1120-6861.

Di seguito si riporta un'indicazione della posizione delle scansioni effettuate attorno alla chiesa.

Figura 29 - A sinistra monografie delle scansioni, a destra eidotipi delle scansioni.

2.3.2.3. Fotogrammetria aerea

Il rilievo fotogrammetrico aereo è stato eseguito per mezzo di dispositivi UAV.

UAV è l'acronimo inglese di "*Unmanned Aerial Vehicle*", letteralmente "velivolo senza pilota", noto anche con l'acronimo APR, "Aeromobile a Pilotaggio Remoto", per utilizzare un termine più comune stiamo parlando dei cosiddetti droni.[16]

Il drone utilizzato è lo Spark, un minidrone dotato di tutte le tecnologie DJI, con funzioni intelligenti per il controllo del volo, stabilizzazione meccanica e ottima qualità delle immagini.

Figura 30 - DJI Spark

[16] FONTE: Wikipedia, Enciclopedia Treccani.

Si riporta di seguito la scheda tecnica del drone DJI Spark:

VELIVOLO	
Peso al decollo	300 g
Dimensioni	143x143x55 mm
Diagonale (senza eliche)	170 mm
Massima velocità ascensionale	3 m/s in modalità Sport e in assenza di vento
Massima velocità di discesa	3 m/s in modalità Auto Landing (atterraggio automatico)
Velocità massima	50 km/h in modalità Sport e senza vento
Quota massima tangenza operativa sul livello del mare	4000 m
Autonomia di volo	16 minuti (a 20 km/h costanti e senza vento)
Autonomia in volo stazionario	15 minuti (in assenza di vento)
Temperatura operativa	0°-40°C
Sistemi di posizionamento satellitare	GPS/GLONASS
Accuratezza di stazionamento in volo	Verticale: +/-0,1 m (con posizionamento visivo) o +/-0,5 m Orizzontale:+/-0,3 m (con posizionamento visivo) o +/-1,5 m
Potenza del trasmettitore (EIRP)	2.4 GHz FCC: 27 bBm; CE: 18 dBm; SRRC: 18 dBm; MIC:18 dBm 5.8 GHz FCC: 27 dBm; CE:14 dBm; SRRC: 27 dBm; MIC: -
Frequenza operativa	2.400 - 2.483 GHz 5.725 - 5.825 GHz
SISTEMA DI VISIONE	
Intervallo di velocità	<36km/h a 2m di altezza
Intervallo di quota	0-8 m
Distanza operativa	0-30 m
Ambiente operativo	Superfici definite in condizioni di luce adeguata (lux>15) e riflettività diffusa (>20%)
GIMBAL	
Intervallo di controllo	Inclinazione: da -85° a 0°
Stabilizzazione	Meccanica 2 assi (inclinazione, rollo)
Distanza di rilevamento ostacoli	0,2 - 5 m
Ambiente operativo	Superfici con riflettività diffusa (>20%) e dimensioni superiori a 20x20 cm(muri, alberi, persone, ecc.)
FOTOCAMERA	
Sensore	CMOS 1/2.3"
	Pixel effettivi: 12 MP
Obiettivo	FOV 81,9° 25mm (35mm equivalenti) f/2.8
	(Distanza di scatto: da 2m a infinito)
Intervallo ISO	Video: 100-3200; foto 100-1600
Velocità dell'otturatore elettronico	2-1/8000 s
Dimensione dell'immagine	3968x2976 1440x1080 con ShallowFocus 2300x1280 in modalità Pano (orizzontale) 2300x1280 in modalità Pano (verticale)
Modalità fotografiche	Scatto singolo, HDR, Scatto raffica (3 fotogrammi), Bracketing automatico dell'esposizione (AEB) 3 fotogrammi con esposizione variata a 0.7 EV bias, intervallo: 2/3/5/7/10/15/20/30/60 s
Risoluzione video	Full HD: 1920x1080 30p
Bit-rate massimo del video	24 Mbps
File system supportati	FAT32
Formato foto	JPEG
Formato video	MP4 (MPEG-4 AVC/H.264)

Tabella 3 - Scheda tecnica DJI Spark.
(Fonte: https://www.dji.com/it/spark/info#specs)

Piano di volo

I voli effettuati con il drone DJI Spark sono stati pianificati e in particolare sono stati previsti:

- 2 voli nadirali (uno longitudinale e uno trasversale alla chiesa);
- 2 voli con inclinazione 45° dal fronte e dal retro della chiesa);
- 1 volo orbitale (attorno alla chiesa).

Geometria della camera DJI Spark			
c	**lx**	**ly**	
4,51	6,17	4,55	mm
	3968	2976	pixel
	1,6	1,5	micron

Tabella 4 - Geometria della camera.

Figura 31 - Dimensioni sensori.

Fonte:
https://www.nadir.it/tecnica/DIMENSIONI_SENSORI/dimensioni-sensori.htm

1) Volo nadirale longitudinale

Figura 32 - Piano di volo 1.

Dati dell'area			
Dlongit.	40	m	
Dtrasv.	17	m	

Dati iniziali del volo		
Ricoprimento long.	0,7	
Ricoprimento trasv.	0,6	
Scala restituzione	50	
Velocità	5	m/s
Velocità decollo	1	m/s
Velocità atterraggio	1	m/s
Precisione	**10**	**mm**
Tolleranza	**20**	**mm**
GSD massimo	**5**	**mm**

Altezza relativa di volo								
H max	33333,33	mm	33	m	limite da formula di progetto per Z			
mblim	3215,559				da regole empiriche in XY			
H max	14,50909							
Hpro	30000	mm	**30**	m	altezza relativa di progetto			
mb	**6648,711**				scala media dei fotogrammi			
GSD	**10,33834**	mm			**OK!**			

Abbracciamento al suolo e interassi							
Lx	41,02255	m	Ly			30,2516352	m
Base	9,075491	m	temp tra scatti successivi			1,81509811	s
Sovrapp. Trasv.	24,61353		interasse			16,4090189	m
Num strisciate	1,036016		**strisciate progetto**			**4**	

Verifica trascinamento							
Esposizione	1/	**480**		tempo	0,002083	s	
Velocità		2	m/s		mb	6648,71104	
Trascinamento		0,62669	micron	0,409895	pixel		

Tempo di volo						
Decollo				30	s	
Atterraggio				30	s	
Verso l'inizio dela prima strisciata		21,73131	m	4,346263	s	1/2 area
Ritorno a casa da fine volo		21,73131	m	4,346263	s	1/2 area
Strisciate	4	40	m	32	s	
Spostamenti tra strisciate	4	16,40902	m	65,63608	s	
Strisciate di bordo	2	17	m	34	s	
Durata		3,3	minuti	200,3286	s	
Durata sicurezza	0,1	0,333881	minuti			
Tempo complessivo		**3,7**	**minuti**			

Tabella 5 - Pianificazione del tempo di volo.

2) Volo nadirale trasversale

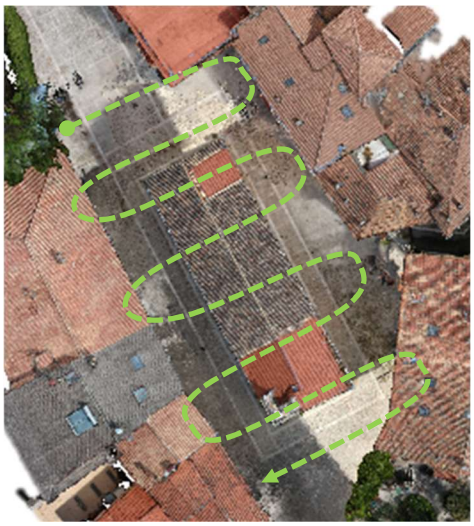


Figura 33 - Piano di volo 2.

Dati dell'area			
Dlongit.	40	m	
Dtrasv.	17	m	

Dati iniziali del volo		
Ricoprimento long.	0,7	
Ricoprimento trasv.	0,6	
Scala restituzione	50	
Velocità	5	m/s
Velocità decollo	1	m/s
Velocità atterraggio	1	m/s
Precisione	**10**	**mm**
Tolleranza	**20**	**mm**
GSD massimo	**5**	**mm**

Altezza relativa di volo								
H max	33333,33	mm	33	m	limite da formula di progetto per Z			
mblim	3215,559				da regole empiriche in XY			
H max	14,50909							
Hpro	30000	mm	**30**	m	altezza relativa di progetto			
mb	**6648,711**				scala media dei fotogrammi			
GSD	**10,33834**	mm			**OK!**			

Abbracciamento al suolo e interassi							
Lx	41,02255	m	Ly			30,2516352	m
Base	9,075491	m	temp tra scatti successivi			1,81509811	s
Sovrapp. Trasv.	24,61353		interasse			16,4090189	m
Num strisciate	1,036016		**strisciate progetto**			**9**	

Verifica trascinamento							
Esposizione	1/	**480**		tempo	0,002083	s	
Velocità		2	m/s		mb	6648,71104	
Trascinamento		0,62669	micron	0,409895	pixel		

Tempo di volo						
Decollo				30	s	
Atterraggio				30	s	
Verso l'inizio dela prima strisciata		21,73131	m	4,346263	s	1/2 area
Ritorno a casa da fine volo		21,73131	m	4,346263	s	1/2 area
Strisciate	9	40	m	72	s	
Spostamenti tra strisciate	9	16,40902	m	147,6812	s	
Strisciate di bordo	2	17	m	34	s	
Durata		5,4	minuti	322,3737	s	
Durata sicurezza	0,1	0,537289	minuti			
Tempo complessivo		**5,9**	**minuti**			

3) Volo con inclinazione 45° fronte

Figura 34 - Piano di volo 3.

Dati dell'area		
Dlongit.	40	m
Dtrasv.	17	m

Dati iniziali del volo		
Ricoprimento long.	0,7	
Ricoprimento trasv.	0,6	
Scala restituzione	50	
Velocità	5	m/s
Velocità decollo	1	m/s
Velocità atterraggio	1	m/s
Precisione	**10**	**mm**
Tolleranza	**20**	**mm**
GSD massimo	**5**	**mm**

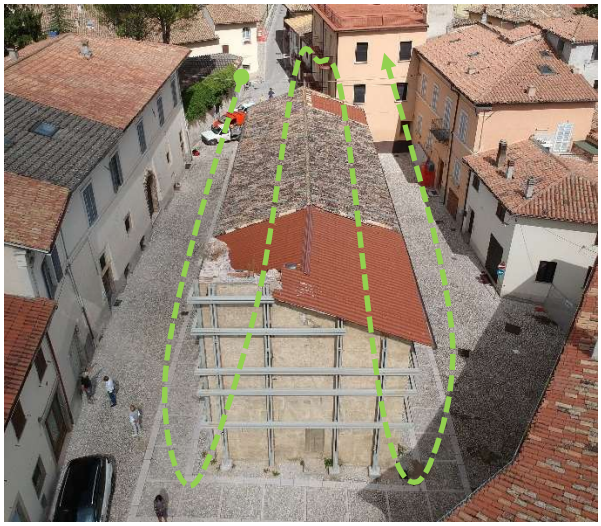
Altezza relativa di volo								
H max	33333,33	mm	33	m	limite da formula di progetto per Z			
mblim	3215,559				da regole empiriche in XY			
H max	14,50909							
Hpro	30000	mm	**30**	m	altezza relativa di progetto			
mb	**6648,711**				scala media dei fotogrammi			
GSD	**10,33834**	mm			**OK!**			

Abbracciamento al suolo e interassi							
Lx	41,02255	m	Ly			30,2516352	m
Base	9,075491	m	temp tra scatti successivi			1,81509811	s
Sovrapp. Trasv.	24,61353		interasse			16,4090189	m
Num strisciate	1,036016		**strisciate progetto**			**4**	

Verifica trascinamento							
Esposizione	1/	**480**		tempo	0,002083	s	
Velocità		2	m/s		mb	6648,71104	
Trascinamento		0,62669	micron	0,409895	pixel		

Tempo di volo						
Decollo				30	s	
Atterraggio				30	s	
Verso l'inizio dela prima strisciata		21,73131	m	4,346263	s	1/2 area
Ritorno a casa da fine volo		21,73131	m	4,346263	s	1/2 area
Strisciate	4	40	m	32	s	
Spostamenti tra strisciate	4	16,40902	m	65,63608	s	
Strisciate di bordo	2	17	m	34	s	
Durata		3,3	minuti	200,3286	s	
Durata sicurezza	0,1	0,333881	minuti			
Tempo complessivo		**3,7**	**minuti**			

4) Volo con inclinazione 45° retro



Dati dell'area			
Dlongit.	40	m	
Dtrasv.	17	m	

Dati iniziali del volo		
Ricoprimento long.	0,7	
Ricoprimento trasv.	0,6	
Scala restituzione	50	
Velocità	5	m/s
Velocità decollo	1	m/s
Velocità atterraggio	1	m/s
Precisione	**10**	**mm**
Tolleranza	**20**	**mm**
GSD massimo	**5**	**mm**

Figura 35 - Piano di volo 4.

Altezza relativa di volo								
H max	33333,33	mm	33	m	limite da formula di progetto per Z			
mblim	3215,559				da regole empiriche in XY			
H max	14,50909							
Hpro	30000	mm	**30**	m	altezza relativa di progetto			
mb	**6648,711**				scala media dei fotogrammi			
GSD	**10,33834**	mm			**OK!**			

Abbracciamento al suolo e interassi							
Lx	41,02255	m	Ly			30,2516352	m
Base	9,075491	m	temp tra scatti successivi			1,81509811	s
Sovrapp. Trasv.	24,61353		interasse			16,4090189	m
Num strisciate	1,036016		**strisciate progetto**			**4**	

Verifica trascinamento							
Esposizione	1/	**480**		tempo	0,002083	s	
Velocità		2	m/s		mb	6648,71104	
Trascinamento		0,62669	micron	0,409895	pixel		

Tempo di volo						
Decollo				30	s	
Atterraggio				30	s	
Verso l'inizio dela prima strisciata		21,73131	m	4,346263	s	1/2 area
Ritorno a casa da fine volo		21,73131	m	4,346263	s	1/2 area
Strisciate	4	40	m	32	s	
Spostamenti tra strisciate	4	16,40902	m	65,63608	s	
Strisciate di bordo	2	17	m	34	s	
Durata		3,3	minuti	200,3286	s	
Durata sicurezza	0,1	0,333881	minuti			
Tempo complessivo		**3,7**	**minuti**			

5) Volo orbitale

Figura 36 - Piano di volo 5.

Dati dell'area			
Dlongit.	40	m	
Dtrasv.	17	m	

Dati iniziali del volo		
Ricoprimento long.	0,7	
Ricoprimento trasv.	0,6	
Scala restituzione	50	
Velocità	5	m/s
Velocità decollo	1	m/s
Velocità atterraggio	1	m/s
Precisione	**10**	**mm**
Tolleranza	**20**	**mm**
GSD massimo	**5**	**mm**

Altezza relativa di volo								
H max	33333,33	mm	33	m	limite da formula di progetto per Z			
mblim	3215,559				da regole empiriche in XY			
H max	14,50909							
Hpro	30000	mm	**30**	m	altezza relativa di progetto			
mb	**6648,711**				scala media dei fotogrammi			
GSD	**10,33834**	mm			**OK!**			

Abbracciamento al suolo e interassi							
Lx	41,02255	m	Ly			30,2516352	m
Base	9,075491	m	temp tra scatti successivi			1,81509811	s
Sovrapp. Trasv.	24,61353		interasse			16,4090189	m
Num strisciate	1,036016		**strisciate progetto**			**1**	

Verifica trascinamento							
Esposizione	1/	**480**		tempo	0,002083	s	
Velocità		2	m/s		mb	6648,71104	
Trascinamento		0,62669	micron	0,409895	pixel		

Tempo di volo						
Decollo				30	s	
Atterraggio				30	s	
Verso l'inizio dela prima strisciata		21,73131	m	4,346263	s	1/2 area
Ritorno a casa da fine volo		21,73131	m	4,346263	s	1/2 area
Strisciate	1	40	m	8	s	
Spostamenti tra strisciate	1	16,40902	m	16,40902	s	
Strisciate di bordo	2	17	m	34	s	
Durata		2,1	minuti	127,1015	s	
Durata sicurezza	0,1	0,211836	minuti			
Tempo complessivo		**2,3**	**minuti**			

2.3.2.4. Fotogrammetria terrestre

Per il rilievo fotogrammetrico terrestre è stata utilizzata una CANON EOS 5DS R.

Figura 37 - CANON EOS 5DS R

SENSORE IMMAGINE	
Tipo	CMOS da 36x24 mm
Pixel effettivi	5,6 MP
Pixel totali	circa 53 MP
Rapporto di aspetto	3:2
Pulizia sensore	sistema integrato di pulizia EOS
PROCESSORE DI IMMAGINI	
Tipo	Doppio "DIGIC 6"
OBIETTIVO	
Lunghezza focale	Equivalente a 1 volta la lunghezza focale dell'obiettivo
MESSA A FUOCO	
Tipo	TTL-CT-SIR con sensore CMOS dedicato
Sistema AF/punti	61 punti/41 punti AF a croce f/4 inclusi 5 a croce doppia a f/2,8 e 1 a croce a f/8[11] il numero di punti AF a croce varia in base all'obiettivo.
Intervallo di utilizzo AF	EV-2-18 (a20°C e ISO 100)
Raggio ausiliario AF	Emesso da Speedlite dedicato opzionale
Messa a fuoco manuale	Selezionata sull'obiettivo, predefinita in modalità Live View.

Figura 38 - Caratteristiche della camera.
(Fonte: https://www.canon.it/for_home/product_finder/cameras/digital_slr/eos_5ds_r/specifications.html)

3. Elaborazione dati

I dati acquisiti in campo sono stati elaborati secondo lo schema di *Figura 39* in modo da ottenere una nuvola di punti finale. L'uso del software Star*net ha permesso di ottenere le coordinate dei *target* costituenti la rete di dettaglio. Tali coordinate sono state utilizzate come dati di input per le elaborazioni dei dati ottenuti tramite rilievo LiDAR e rilievo fotogrammetrico, effettuate rispettivamente con i software Scene e Metashape. Sono state quindi ottenute in parallelo due nuvole di punti e dopo un confronto si è deciso di proseguire con la nuvola ottenuta tramite fotogrammetria. Questa è stata alleggerita tramite CloudCompare, ridotta al manufatto architettonico oggetto di studio e filtrata per ridurre il rumore attraverso 3DReshaper.

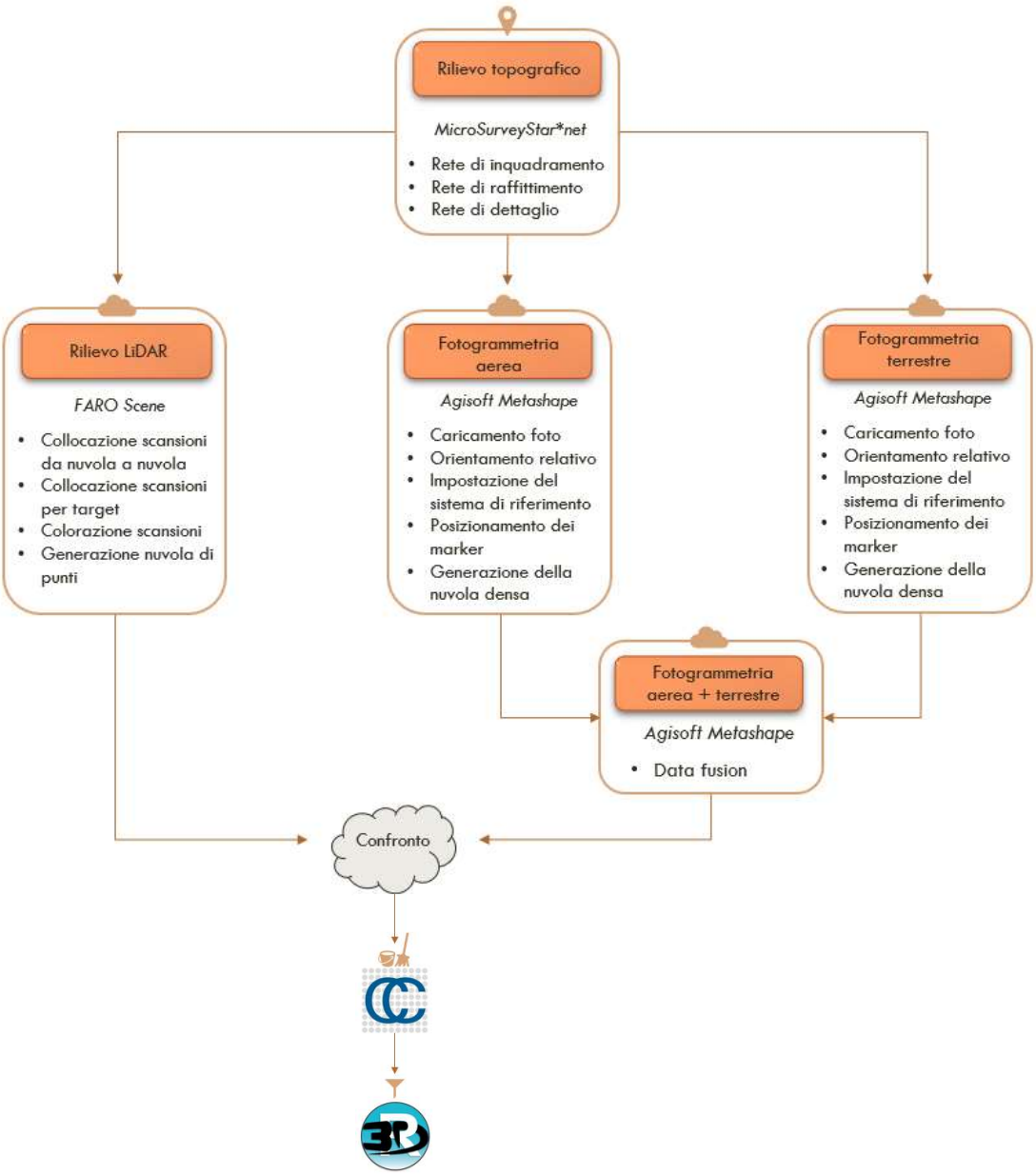


Figura 39 - Schema dei software utilizzati per l'elaborazione dei dati.

2.4. Compensazione rete

Per l'elaborazione dei dati acquisiti tramite rilievo topografico è stato utilizzato il software Starnet.

2.4.1. MicroSurveyStar*net

STARNET è un software che permette di:

- Simulare il rilievo di una rete e di valutare a priori la precisione ottenibile;
- Compensare ai minimi quadrati la più generale rete topografica (planimetrica, plano-altimetrica o GPS/GNSS).

È stato utilizzato per calcolare la rete di dettaglio e quindi fornire i dati di input per le elaborazioni successive.

2.4.1.1. Impostazioni di base

Prima di elaborare i dati occorre impostare alcuni parametri del progetto, come la precisione dello strumento, le convenzioni degli angoli, le unità di misura e il tipo di *output*.

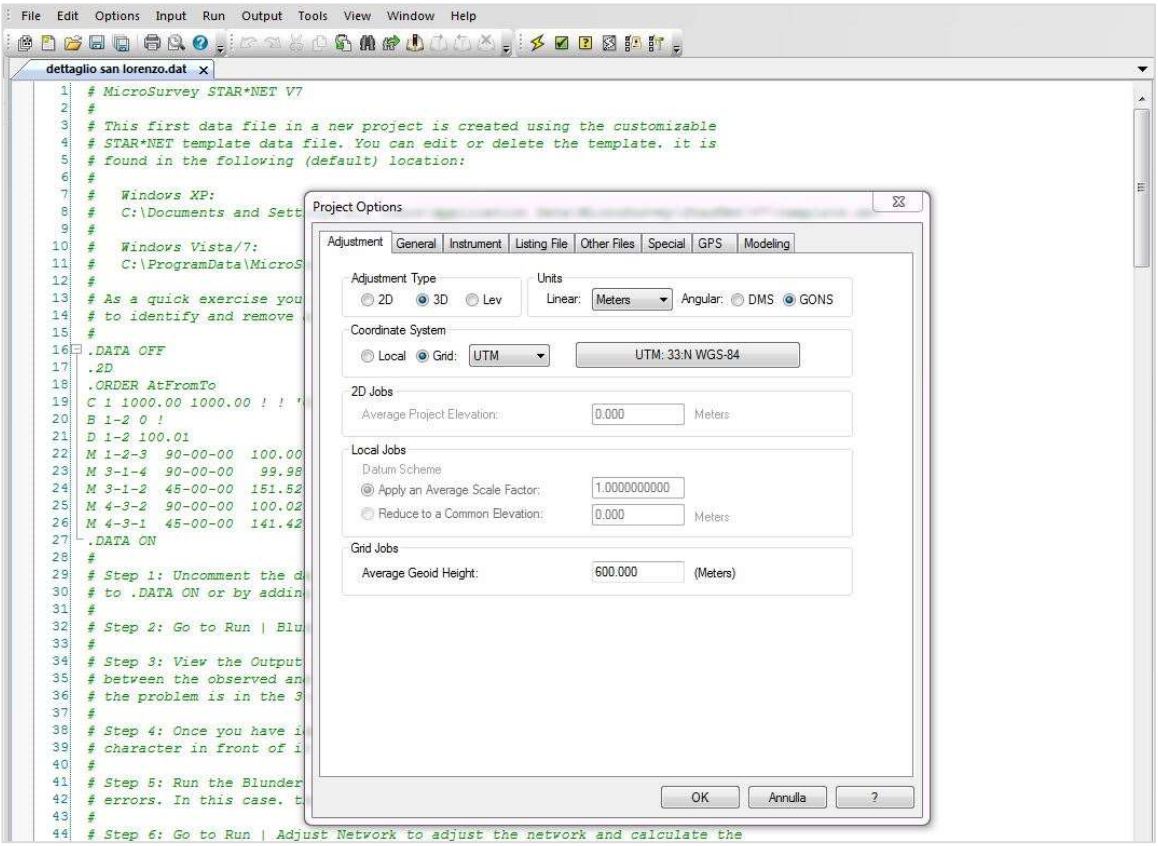


Figura 40 - Impostazione parametri di progetto "Adjustment"

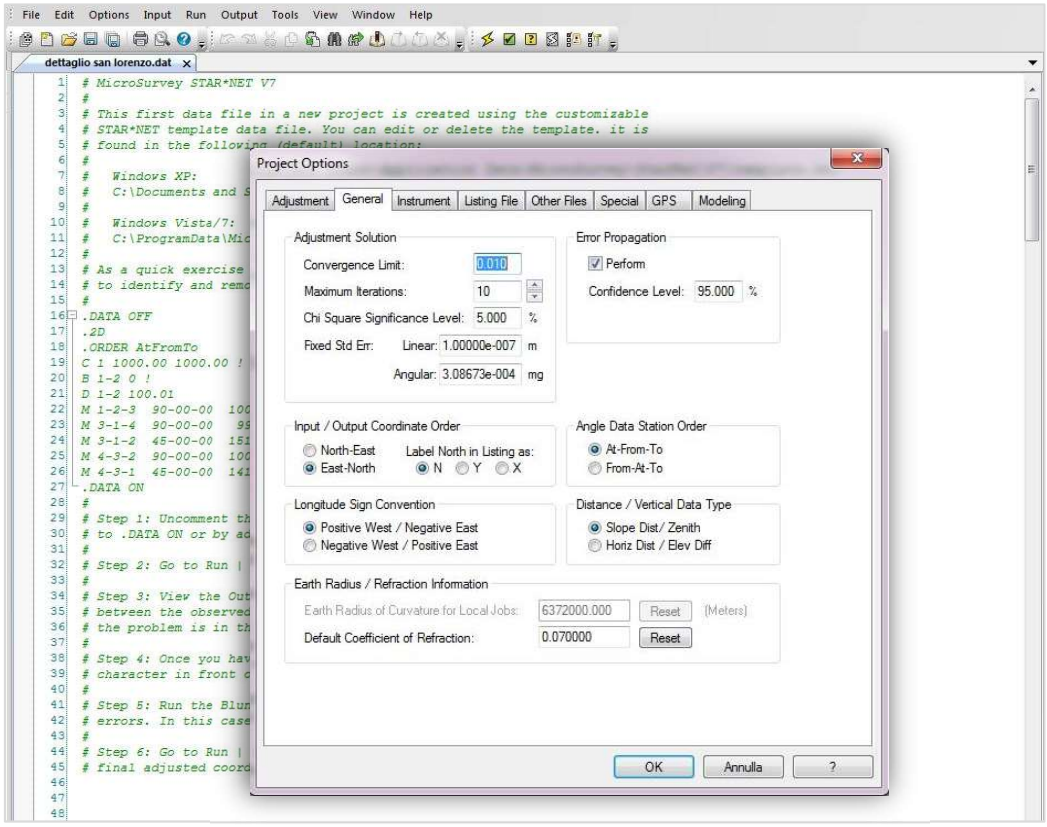


Figura 41 - Impostazione parametri di progetto "General".

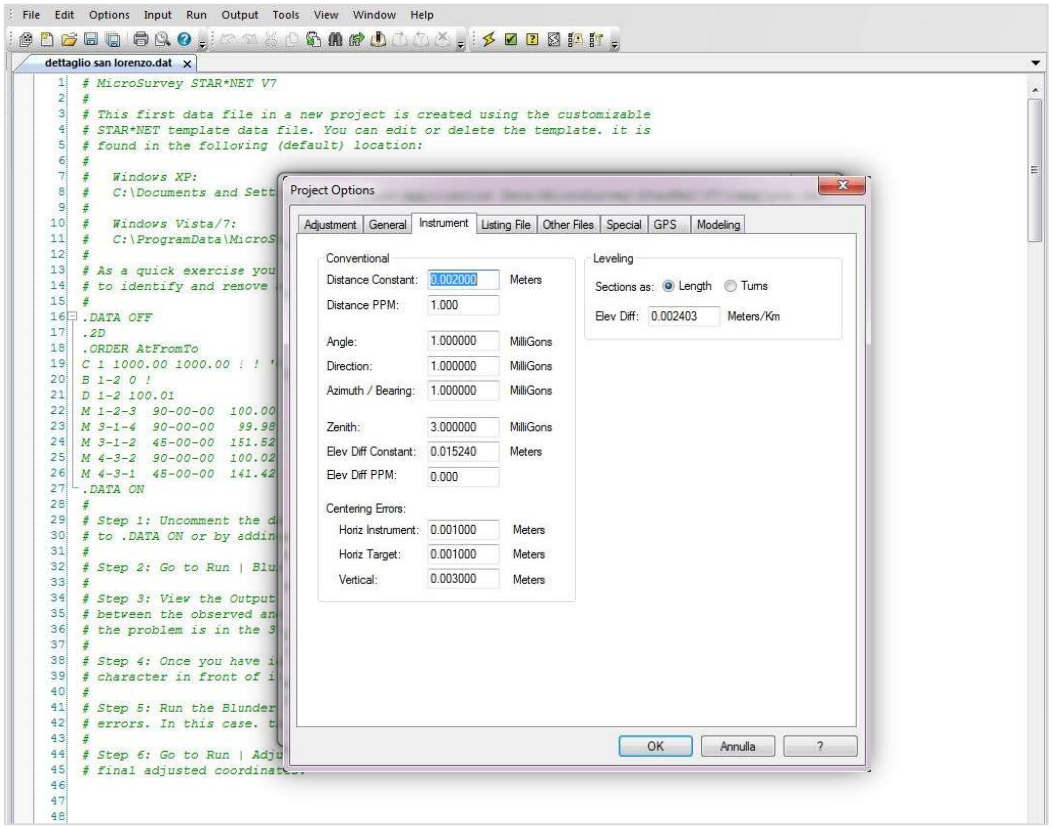


Figura 42 - Impostazione parametri di progetto "Instrument".

2.4.1.2. *File di input*

Nel file di input vengono inserite le varie misure secondo la seguente sequenza:

CODICEMISURA TIPOMISURA MISURA INFO_AGGIUNTIVE

I codici misura utilizzati sono:

C = codice coordinate;

D = codice distanze;

V = codice angoli zenitali;

B = codice angoli azimutali. Nel caso però di una sequenza di misure di angoli effettuate dalla stessa stazione si scrive DB per iniziare la sequenza, seguito dal nome della stazione, DN seguito dai vari punti collimati, e DE per terminare la sequenza.

Per vincolare una misura occorre scrivere alla fine della stringa un "!" per ogni componente.

Per prendere visione di tutte le misure che sono state utilizzate come file di input per la creazione della rete topografica è possibile consultare l'*Allegato*.

2.4.1.3. *File di output*

Al termine dell'elaborazione il software fornisce le coordinate dei punti collimati a partire dai vertici di stazione, le loro distanze reciproche e le ellissi di errore.

```
                MicroSurvey STAR*NET-PRO Version 7, 2, 2, 7
                     Run Date: Wed May 08 2019 16:04:56


                 Summary of Files Used and Option Settings
                 =========================================

                       Project Folder and Data Files

Project Name        DETTAGLIO SAN LORENZO
Project Folder      H:\TESI\RILIEVO NORCIA\5. ELABORAZIONI\STARNET
Data File List  1. dettaglio san lorenzo.dat

                          Project Option Settings

STAR*NET Run Mode                    : Adjust with Error Propagation
Type of Adjustment                   : 3D
Project Units                        : Meters; GONS
Coordinate System                    : UTM; Zone 33
Ellipsoid                            : WGS-84
  Major Axis; 1 / Flattening         :   6378137.000; 298.257223563000
Geoid Height                         : 600.0000 (Default, Meters)
Longitude Sign Convention            : Positive West
Input/Output Coordinate Order        : East-North
Angle Data Station Order             : At-From-To
Distance/Vertical Data Type          : Slope/Zenith
Convergence Limit; Max Iterations    : 0.010000; 10
Default Coefficient of Refraction    : 0.070000
Create Coordinate File               : Yes
Create Geodetic Position File        : No
Create Ground Scale Coordinate File  : No
Create Dump File                     : No

                   Instrument Standard Error Settings

Project Default Instrument
  Distances (Constant)               :    0.002000 Meters
  Distances (PPM)                    :    1.000000
  Angles                             :    1.000000 MilliGons
  Directions                         :    1.000000 MilliGons
  Azimuths & Bearings                :    1.000000 MilliGons
  Zeniths                            :    3.000000 MilliGons
  Elevation Differences (Constant)   :    0.015240 Meters
  Elevation Differences (PPM)        :    0.000000
  Differential Levels                :    0.002403 Meters / Km
  Centering Error Instrument         :    0.001000 Meters
  Centering Error Target             :    0.001000 Meters
  Centering Error Vertical           :    0.003000 Meters
```

Figura 43 - Listing.

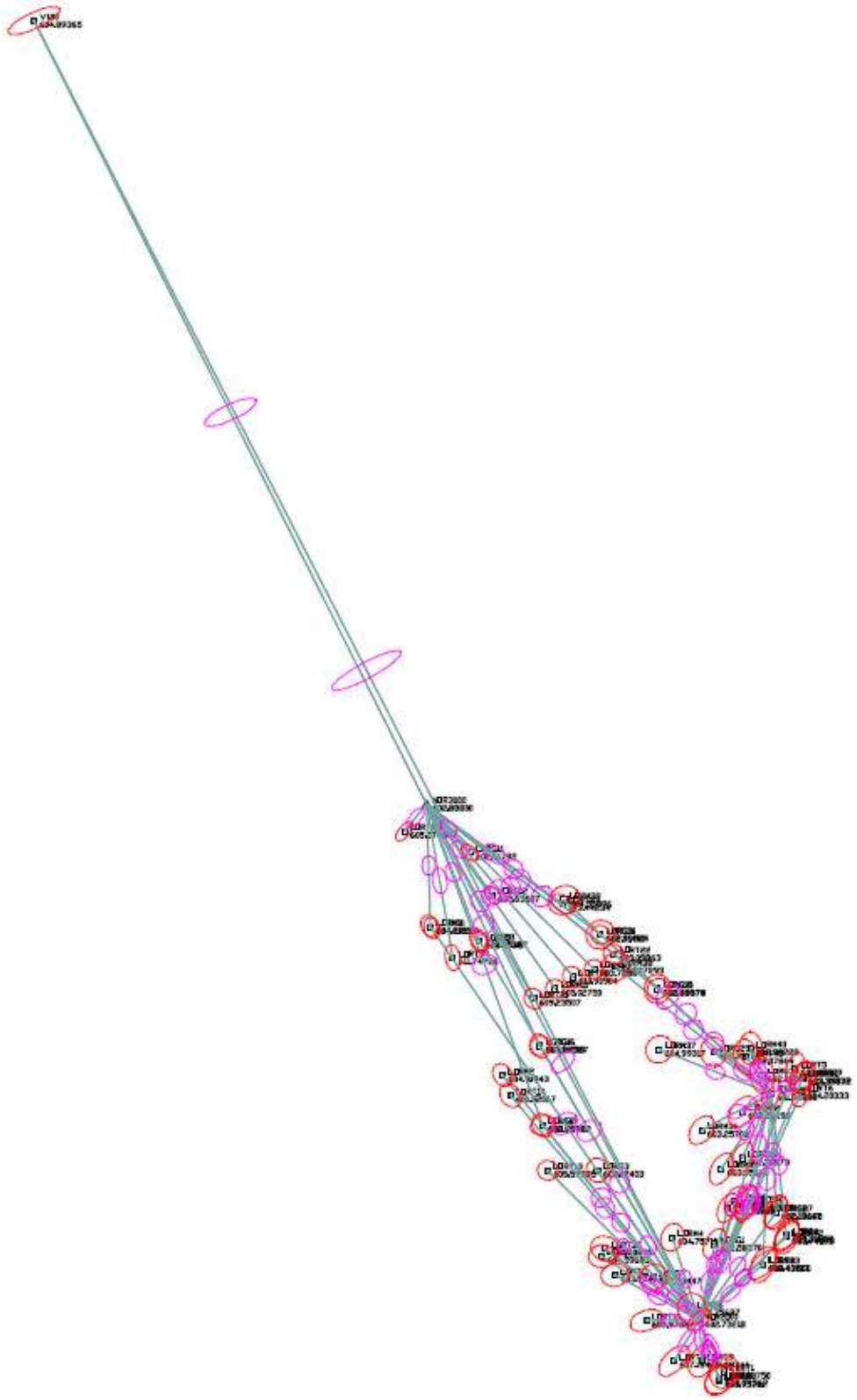


Figura 44 - Rete di dettaglio.

2.5. Elaborazione dati fotogrammetrici

Per l'elaborazione dei dati acquisiti tramite fotogrammetria aerea e terrestre è stato utilizzato il software Metashape.

2.5.1. Agisoft Metashape

Metashape è la nuova versione aggiornata del software della Agisoft "Photoscan". Si tratta di un software di elaborazione di immagini che permette di ricostruire il modello 3D, il DTM e l'ortofoto di un'area attraverso un processo fotogrammetrico.

Il software individua automaticamente i punti comuni nei fotogrammi costituenti il blocco fotogrammetrico e ricava i parametri di calibrazione della fotocamera e la posizione di presa per ogni fotogramma.

2.5.1.1. Impostazioni di base

Prima di cominciare l'elaborazione dei dati è possibile modificare le impostazioni di base tramite il comando da menu "Tools – Preferences settings".

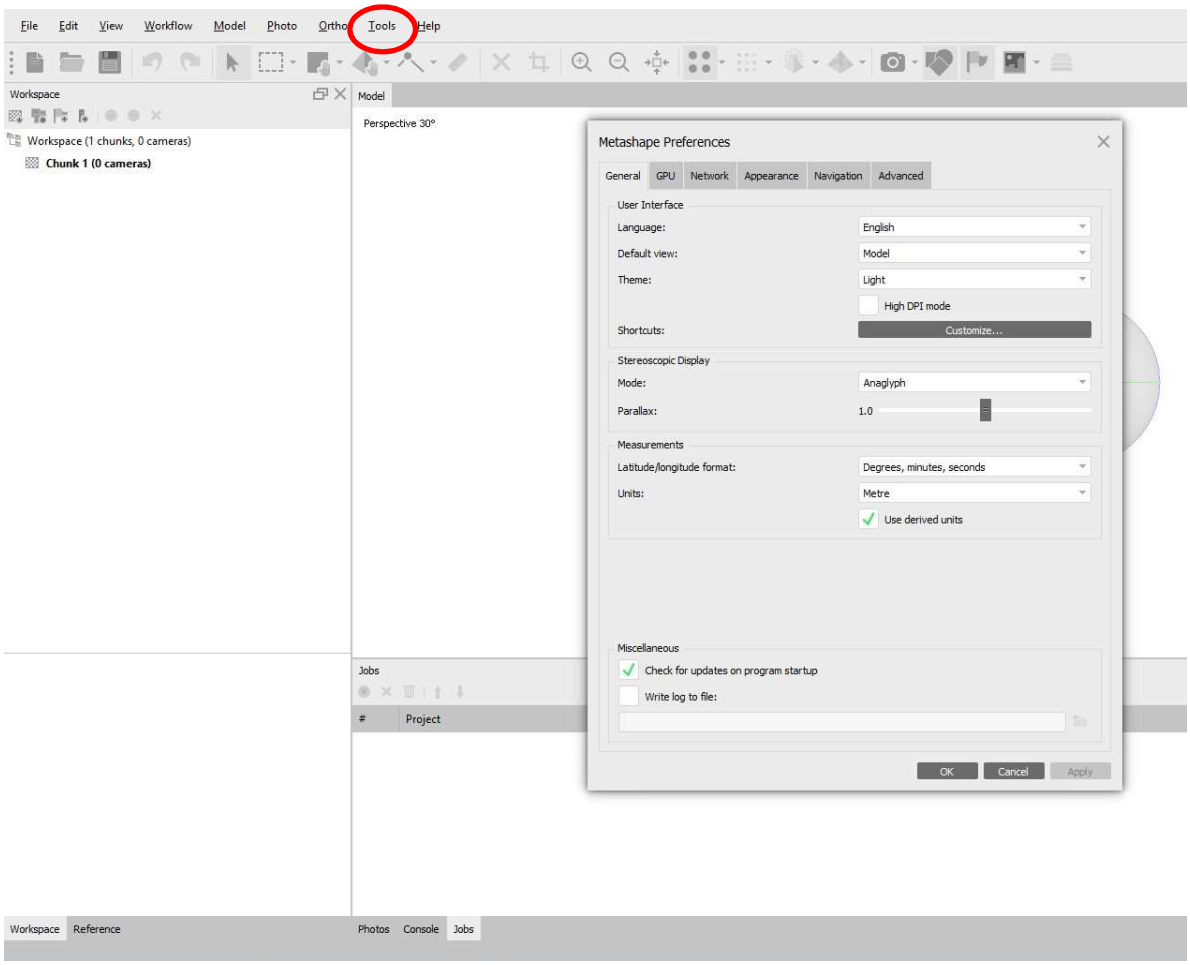


Figura 45 - Impostazioni delle preferenze.

2.5.1.2. Creazione Chunk

All'interno dello stesso progetto è possibile lavorare parallelamente sia alla fotogrammetria aerea sia a quella terrestre, inserendo le immagini provenienti dai voli con lo Spark e dalle fotografie scattate con la Canon in due *chunk* diversi del *workspace*. È possibile spostarsi da un *chunk* all'altro semplicemente con un doppio click del mouse.

2.5.1.3. Caricamento foto

Il caricamento delle immagini desiderate nel nuovo progetto avviene attraverso il comando **"Workflow – Add Photos"** o attraverso l'icona nella barra di comando del Workspace. È importante selezionare i fotogrammi che abbiano una sovrapposizione minima del 60%.

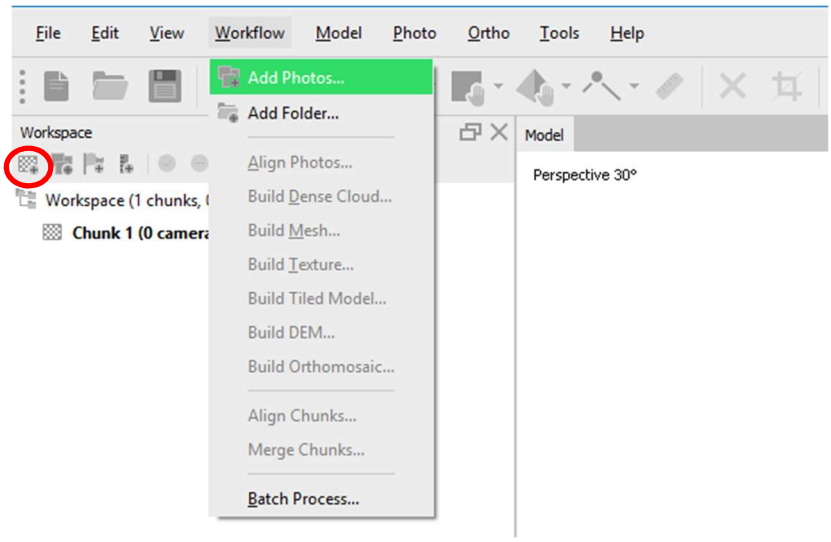


Figura 46 - Caricamento foto.

Una volta inserite le immagini nel progetto, accanto al loro nome possono apparire due acronimi:

NC (Not Calibrated = non calibrata): sta ad indicare che i dati Exif [17] disponibili non sono sufficienti a stimare la lunghezza focale. In questo caso Metashape assume che la foto corrispondente sia stata scattata con obiettivo da 50 mm. Se la lunghezza focale effettiva differisce significativamente da questo valore, può essere necessario eseguire la calibrazione manuale.

NA (Not Aligned = non allineata): sta ad indicare che i parametri di orientamento esterno non sono stati ancora valutati per la foto corrente. Le immagini caricate non saranno allineate finché non si esegue il passo successivo (*photo alignment*).

[17] *Exchangeable image file format.*

2.5.1.4. Orientamento relativo

In questa fase il software individua e associa tra loro i punti omologhi in ogni fotogramma, ricavando in automatico i parametri di calibrazione della fotocamera e la posizione di presa per ogni fotogramma, elaborando una prima nuvola di punti sparsa (*Point Cloud*).

L'allineamento viene eseguito digitando il comando **"Workflow – Align Photos"**.

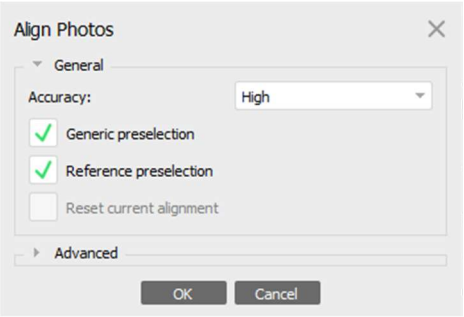


Figura 47 - Allineamento foto.

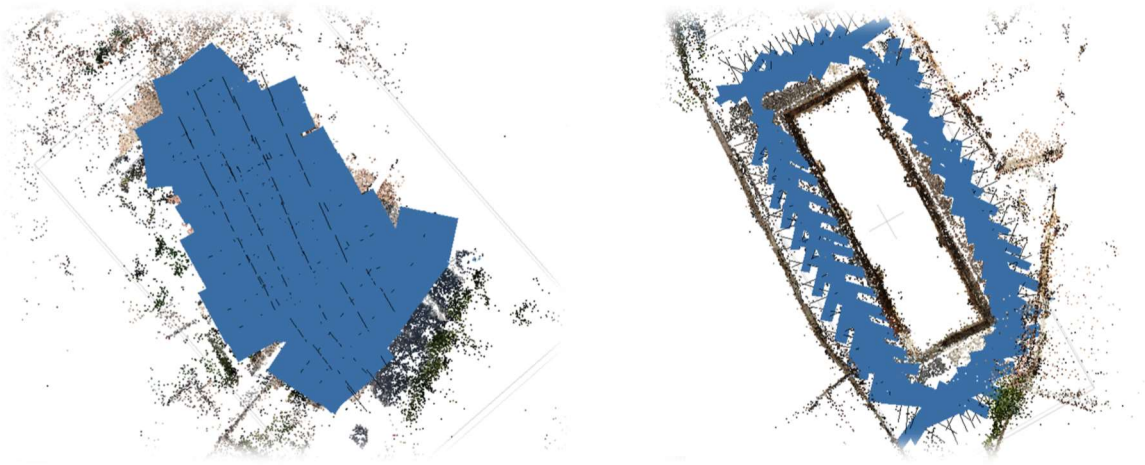


Figura 48 - Posizionamento camere: a sinistra presa aerea tramite drone; a destra presa fotogrammetrica da terra.

2.5.1.5. Impostazione del sistema di riferimento

Per orientare il modello è necessario specificare le coordinate georiferite di almeno 3 punti. A seconda delle esigenze, il modello può essere georiferito utilizzando le coordinate dei *marker*, le coordinate di presa o entrambe.

2.5.1.6. Posizionamento dei marker

Per migliorare l'allineamento delle foto e la localizzazione vengono collimati dei punti presenti in più fotogrammi, ovvero i punti di appoggio.

È possibile caricare le coordinate dei *marker* da un file di testo. Questo viene importato spostandosi nella finestra "Reference" e selezionando il tasto "Import".

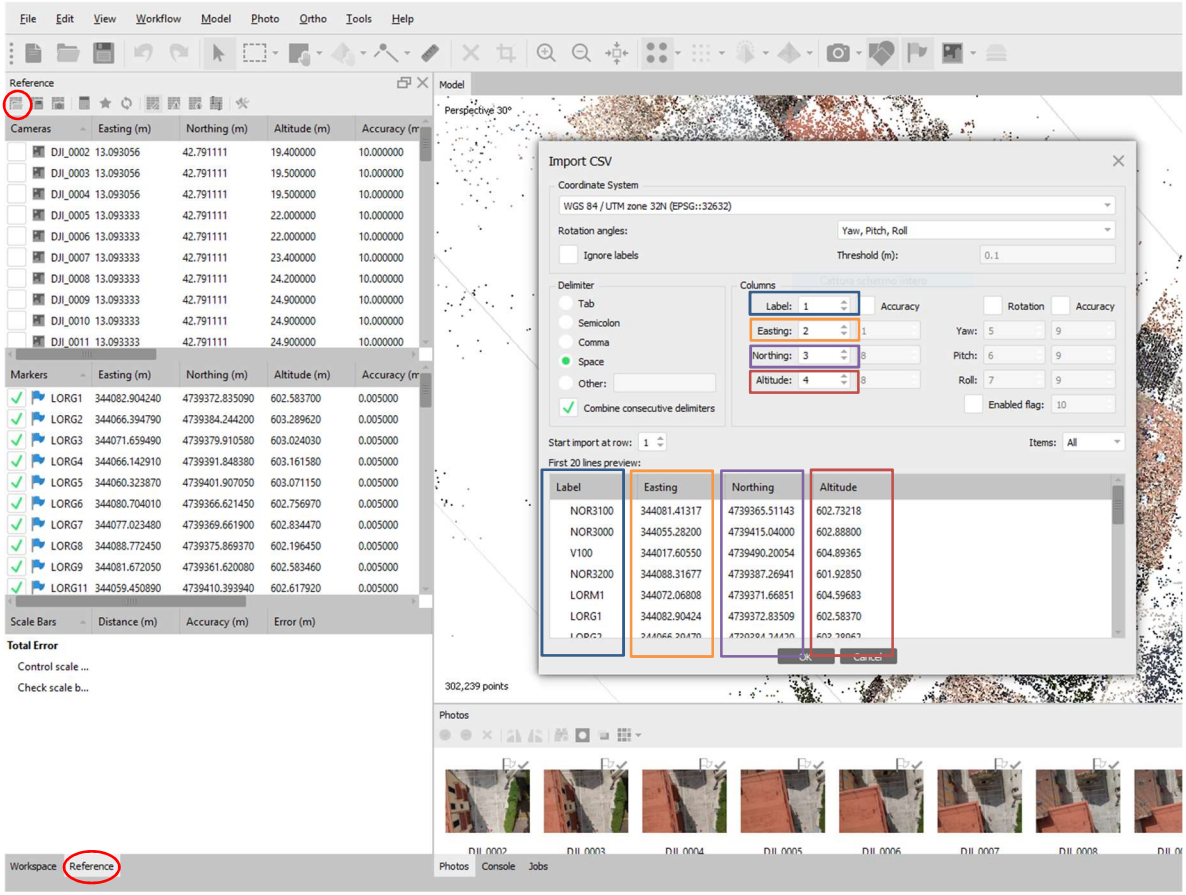


Figura 49 - Importazione delle coordinate dei marker da un file di testo.

Per posizionare i marker è possibile seguire due approcci: il posizionamento manuale e quello guidato. In questo caso è stato seguito l'approccio manuale. Sono state quindi aperte le foto in cui i marker erano visibili e, una volta individuati, sono state aggiunte le proiezioni di tali punti selezionando con il tasto destro del mouse il comando "Place marker". Quando un marker è stato posizionato in almeno due foto allineate Metashape in automatico troverà le sue proiezioni in tutte le altre foto e le indicherà con una bandierina bianca. Queste posizioni dei marker possono essere poi rifinite manualmente spostando la proiezione assegnata in modo automatico nel punto desiderato. A questo punto l'icona cambierà colore, da bianca a verde .

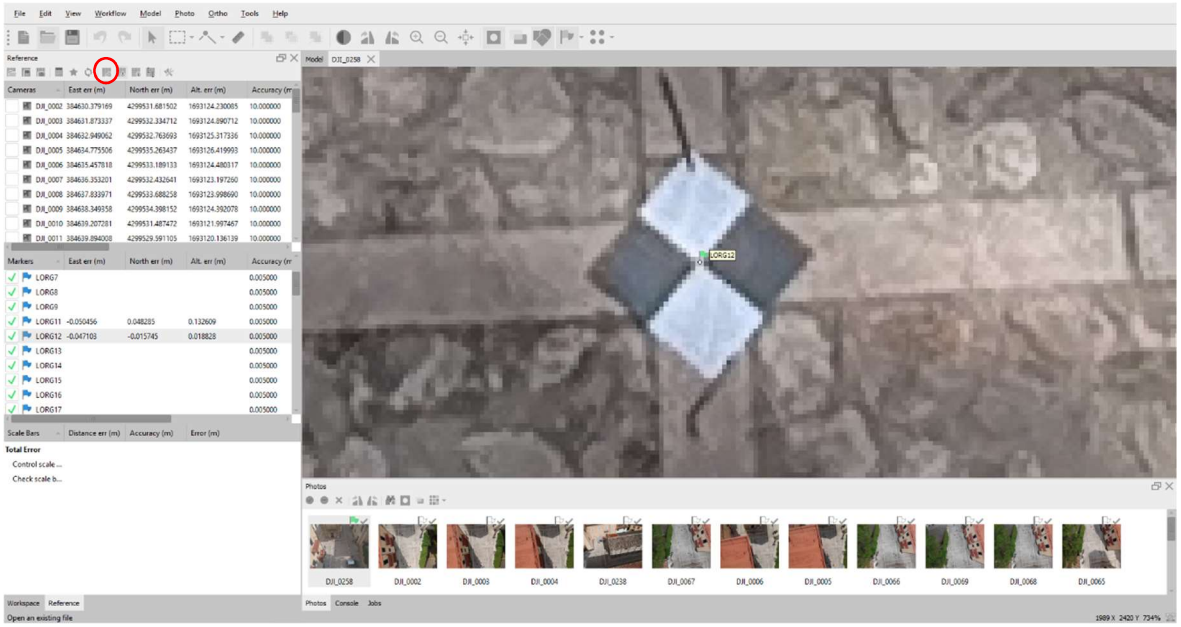


Figura 50 - Posizionamento di un marker.

Una volta terminato l'inserimento delle proiezioni dei marker è stato selezionato il comando "Optimize Cameras" , ottenendo gli errori di georeferenziazione, che corrispondono a circa 2,4 cm per la fotogrammetria aerea e a circa 1,5 cm per la fotogrammetria terrestre. Nelle *Figure 51 – 52* è possibile vedere gli errori in x, in y, in z e quelli totali.

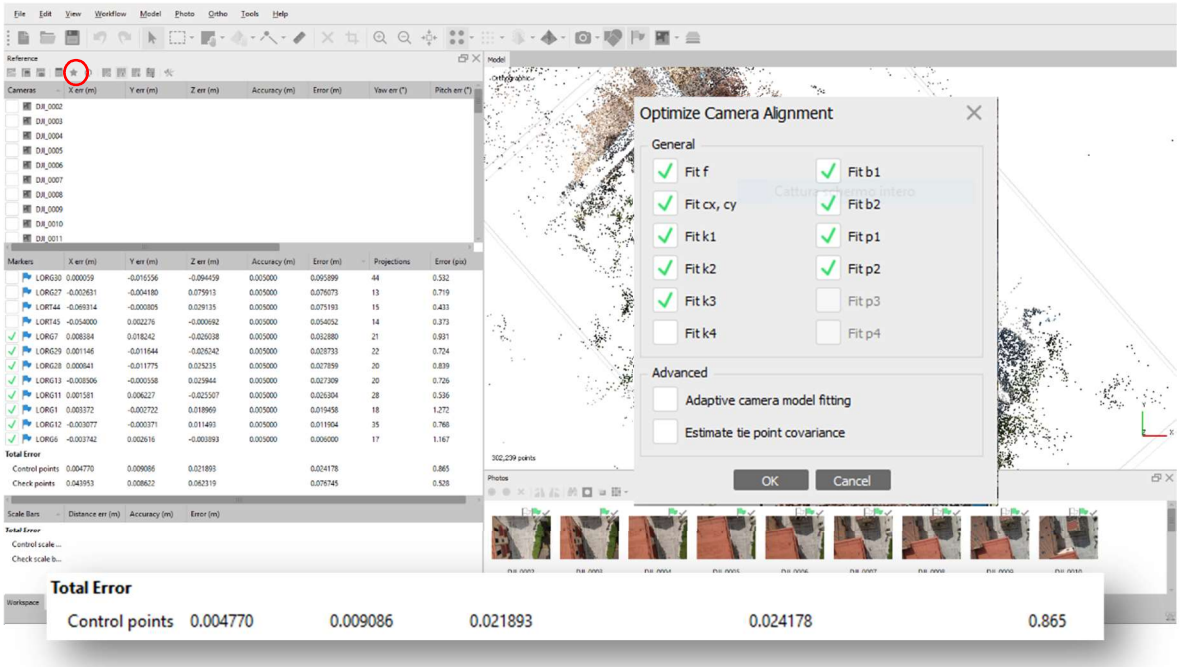


Figura 51 - Errore totale Chunck volo.

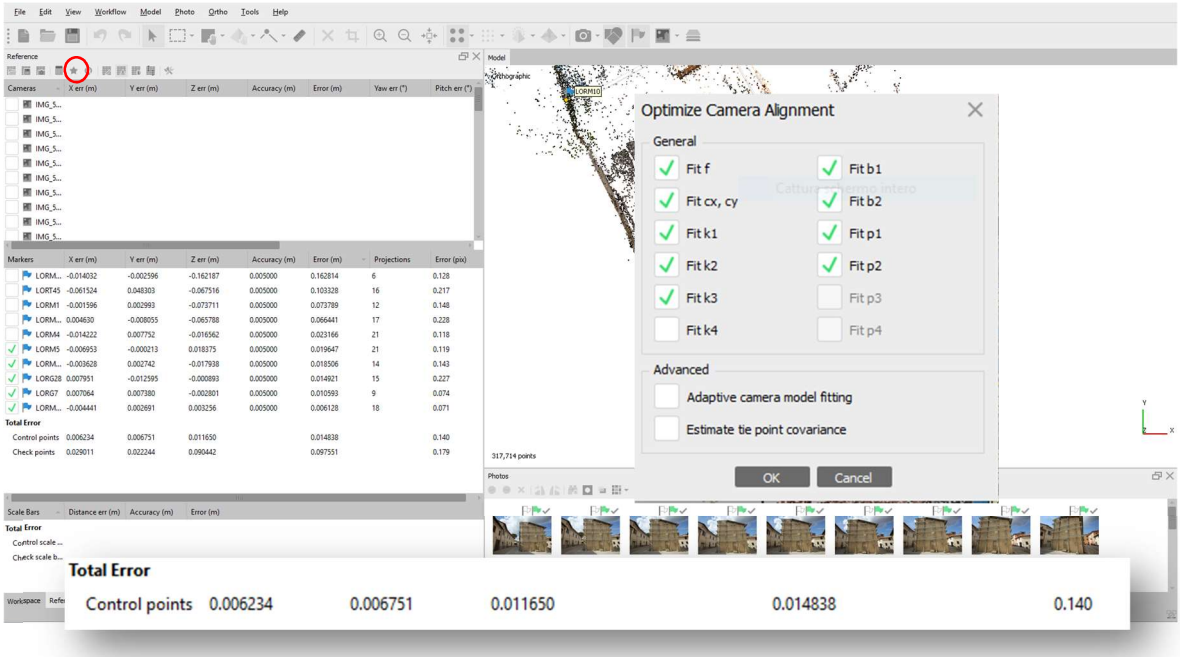


Figura 52 - Errore totale Chunk fotogrammetria terrestre.

2.5.1.7. Generazione della nuvola densa

Prima di generare la nuvola densa è importante definire la regione in cui si desidera effettuare tale operazione tramite i comandi “Resize region” e “Rotate region”. Solo i punti contenuti all’interno di tale volume verranno processati quindi è suggerito assicurarsi tramite le viste laterali e dall’alto che non siano stati dimenticati punti utili ed escludere dalla regione le parti non necessarie. Questo permetterà di diminuire notevolmente i tempi di elaborazione di tutte le fasi successive.

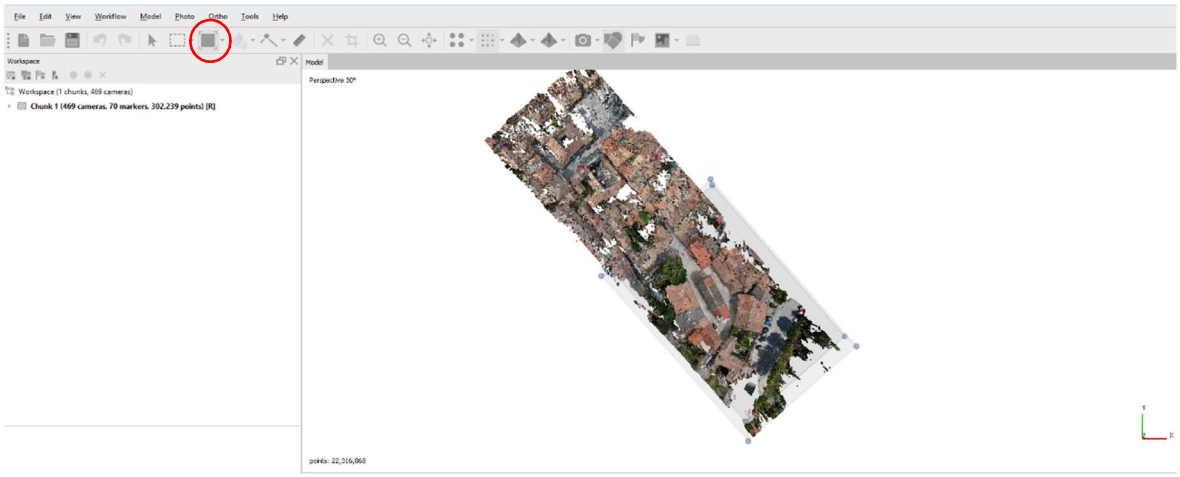


Figura 53 - Resize region, vista xy.

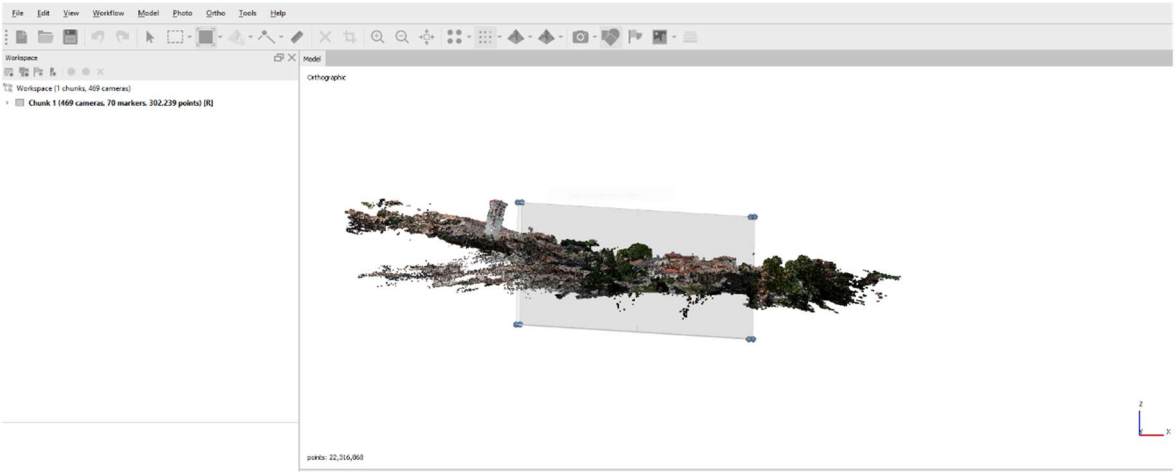


Figura 54 - Resize region, vista xz.

A questo punto è possibile lanciare la densa tramite il comando "Workflow – Build dense cloud". Come prevedibile, la nuvola densa ottenuta tramite fotogrammetria aerea ha fornito informazioni più dettagliate sulla copertura, mentre quella ottenuta dalla fotogrammetria terrestre ha messo in luce più dettagli delle pareti della chiesa.

Figura 55 - Nuvola densa ottenuta tramite fotogrammetria aerea: a sinistra vista dal fronte della chiesa; a destra vista dal retro.

Figura 56 - Nuvola densa ottenuta tramite fotogrammetria terrestre: a sinistra vista dal fronte della chiesa; a destra vista dal retro.

2.5.1.8. Merge Chunck

Per ottenere un modello completo di informazioni, che contenesse dettagli sia della copertura che delle pareti, le due nuvole dense di punti, elaborate separatamente nei due *chunk* diversi, sono state unite. Questo passaggio è stato effettuato tramite il comando "Workflow – Merge chunk". Dall'unione delle due nuvole si è ottenuta una nuvola totale con un errore di circa 2 cm [*Figura 58*].

Figura 57 - Nuvola densa ottenuta dall'unione di fotogrammetria aerea e terrestre: a sinistra vista della copertura; a destra vista delle pareti.

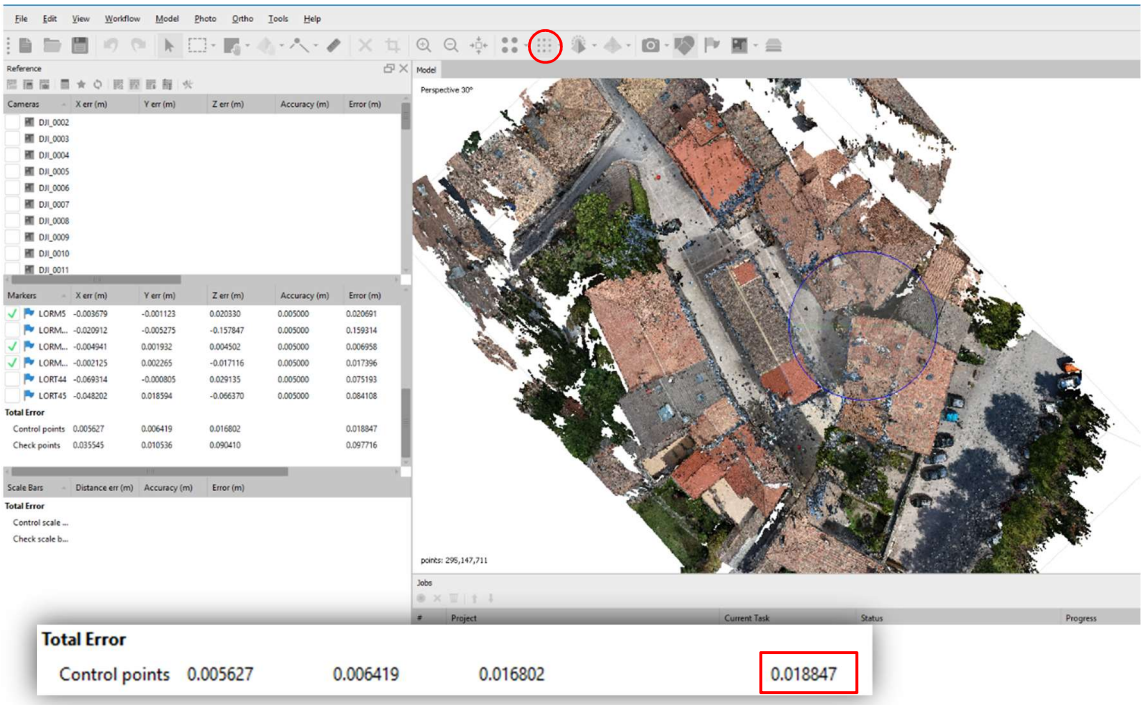


Figura 58 - Errore totale Merged chunk.

2.5.1.9. Generazione della mesh 3D

Una volta generata la nuvola di punti, il passo successivo dell'elaborazione fotogrammetrica è quello di creare una *mesh* triangolare tridimensionale, ovvero, a partire dalla nuvola di punti, si genera una

superficie unendo i punti a formare dei triangoli. Questa operazione viene effettuata attraverso il comando “Workflow – Build mesh”. Il parametro “tipo di superficie” è stato impostato in “3D”.

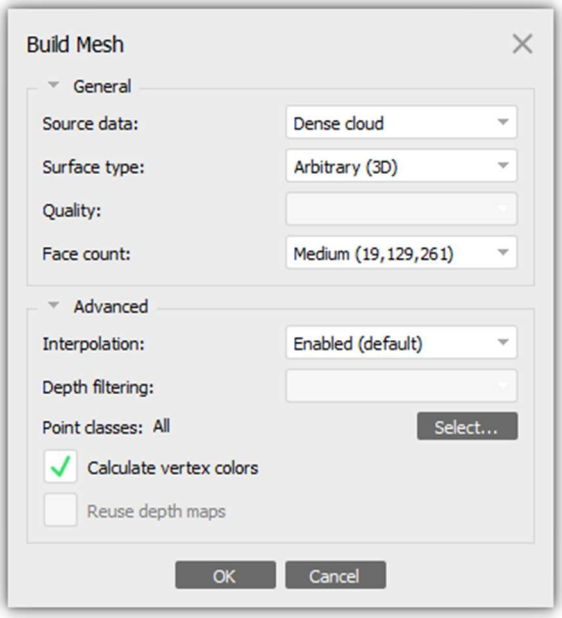


Figura 59 – Parametri generazione mesh.

2.5.1.10. Generazione della Texture

Texturizzare un modello significa applicare alla *mesh* un contenuto in colore, in questo caso sulla base delle immagini acquisite. Per costruire la *texture* del modello 3D è stato selezionato il comando “Workflow – Build Texture”. In questa fase è importante impostare correttamente i parametri per la generazione della *texture*. *“Mapping mode”* è stato impostato in *“Generic”*, che non fa alcuna ipotesi per quanto riguarda il tipo di scena da elaborare, e cerca di creare una *texture* più uniforme possibile. Il parametro *“Blending mode”* è stato invece impostato nella modalità *“Mosaic”* che, a differenza di *“Average”,* che utilizza il valore medio di tutti i pixel delle singole foto, non mescola i dettagli delle immagini sovrapposte bensì utilizza quelle più appropriate, permettendo di restituire un’ortofoto e una *texture* di maggiore qualità.

2.5.1.11. Generazione del Tiled Model

A questo punto è stato generato Tiled Model, sulla base della *mesh texturizzata*.

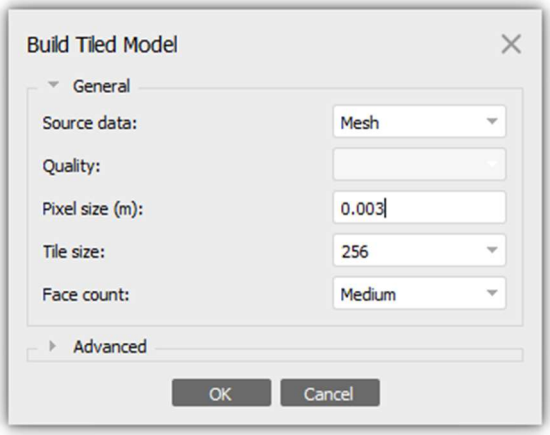


Figura 60 - Parametri generazione modello 3D.

Figura 61 - Tiled model

2.5.1.12. Generazione del Digital Elevation Model (DEM)

Metashape consente di generare e visualizzare il Modello Digitale di Elevazione tramite il comando "Workflow – Build DEM". Esso può essere *rasterizzato* a partire dalla nuvola di punti densi, dalla nuvola di punti sparsi o dalla *mesh*, si suggerisce però di calcolarlo basandosi sulla nuvola densa.

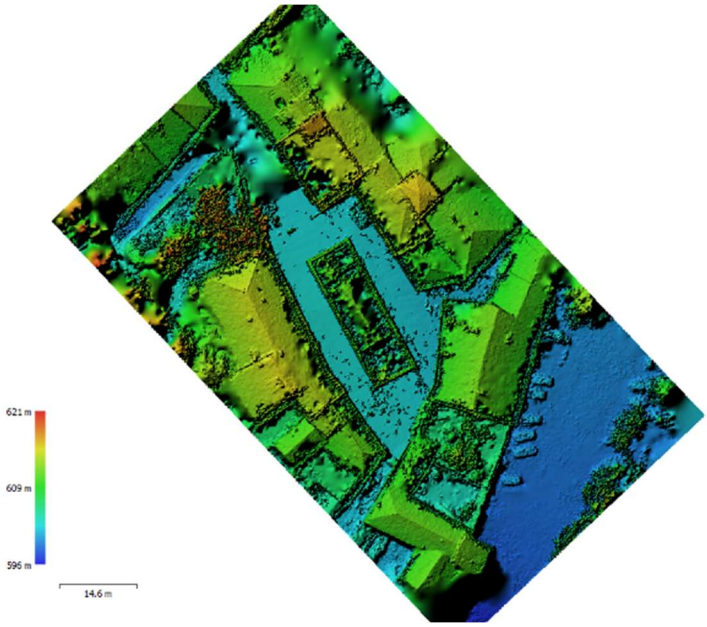


Figura 62 - DEM 5mm

2.5.1.13. Generazione dell'ortofoto

Una volta generato il DEM sulla base di esso è stato possibile generare l'ortofoto, mediante il comando "Workflow – Build Orthomosaic". Il tipo di proiezione è stata impostata in "Geografica" e il *Blending mode* è stato mantenuto in "Mosaic". La dimensione del pixel è stata impostata a 0.003m basandosi sull'errore ottenuto sulla nuvola densa.

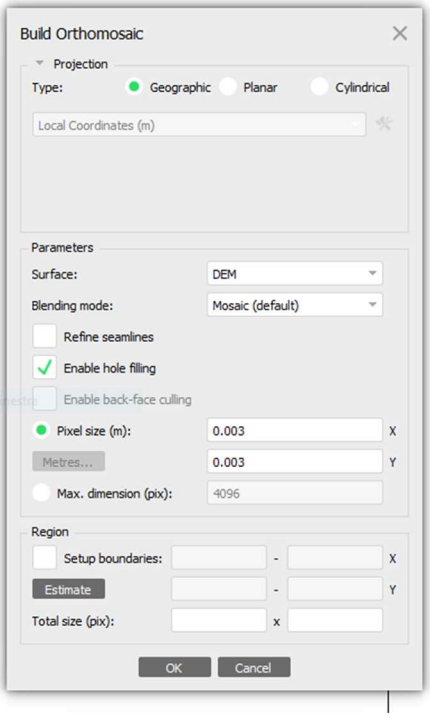


Figura 63 - Parametri per la generazione dell'otofoto.

Figura 64 – Ortofoto.

2.6. Elaborazione scansioni laser

Per l'elaborazione dei dati acquisiti tramite rilievo LiDAR è stato utilizzato il software Scene.

2.6.1. FARO Scene

SCENE è un software per l'elaborazione e la gestione di nuvole di punti 3D concepito principalmente per nuvole di grandi dimensioni ottenute con laser scanner 3D come FARO Focus.
Mette a disposizione numerose funzioni come la misurazione, la visualizzazione 3D, la creazione di mesh e fornisce la possibilità di esportare la nuvola di punti in vari formati. Offre inoltre un'ampia gamma di strumenti come i filtri, il riconoscimento automatico di oggetti e marker, la collocazione (registrazione) e la colorazione automatica delle scansioni.

2.6.1.1. Importazione dei dati di scansione

È possibile importare le varie scansioni in formato .fls attraverso il tasto nella Barra degli strumenti o semplicemente trascinando e rilasciando l'intera cartella della scansione nel Workspace. Una volta importate le scansioni appariranno nel Workspace con a fianco il simbolo di una nuvola. I dati però non saranno ancora caricati.
Il Workspace è organizzato secondo una struttura gerarchica per facilitare il reperimento di tutti gli oggetti. Al primo livello della gerarchia sono disposte le cartelle: documentazione, riferimenti, misurazioni, modelli.

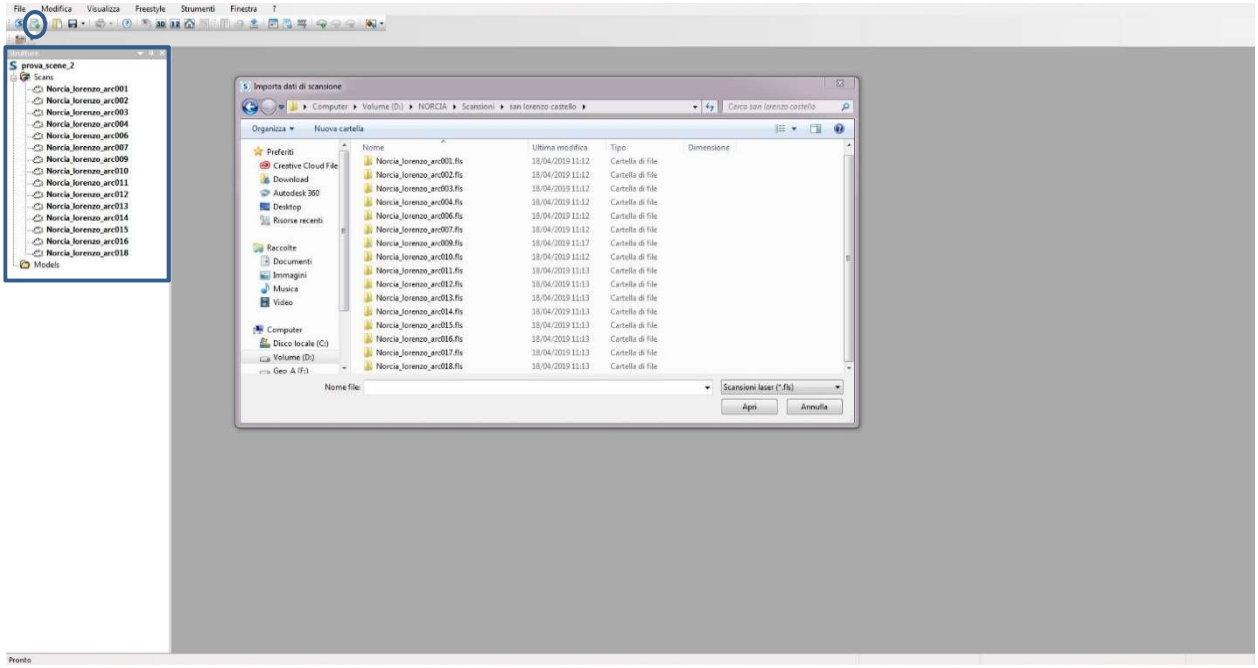


Figura 65 - Importa dati scansione.

2.6.1.2. Caricamento dei dati di scansione

Per visualizzare ed elaborare i punti di una scansione, questa deve essere caricata nella memoria. Per caricare i dati della scansione bisogna cliccare con il tasto destro del mouse sulla nuvola desiderata. Se il caricamento è andato a buon fine apparirà un quadratino verde.

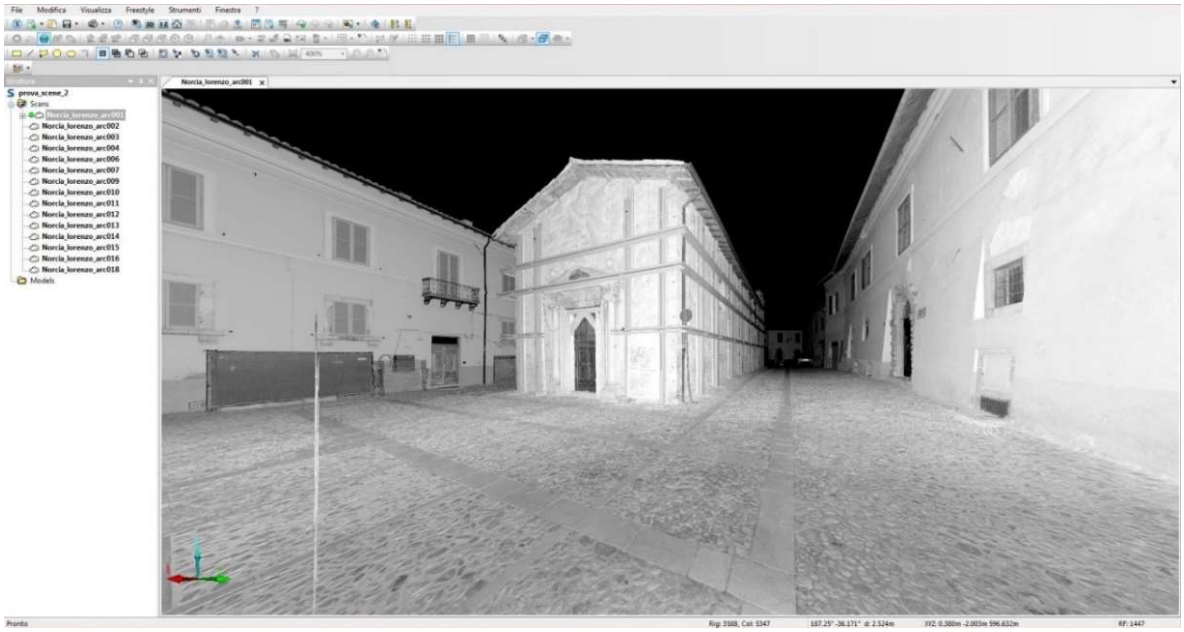


Figura 66 - Carica dati scansione.

2.6.1.3. Pre-allineamento manuale delle scansioni

Per facilitare la registrazione automatica delle varie nuvole è stato effettuato un primo posizionamento manuale approssimativo. A tal fine è stata utilizzata la Vista Corrispondenza, ovvero una vista che consente di visualizzare contemporaneamente più scansioni attraverso colorazioni diverse permettendone un più facile riconoscimento da parte dell'utente. È risultato utile, oltre alla vista dall'alto, l'uso della vista laterale per assicurarsi che le scansioni fossero sullo stesso piano.

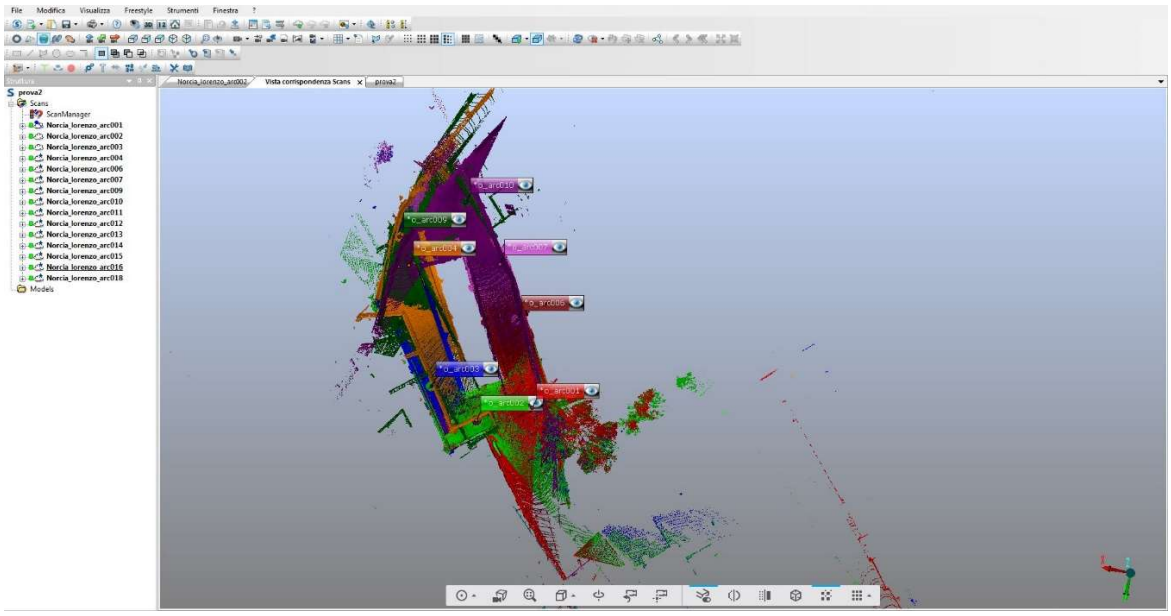


Figura 67 - Posizionamento manuale delle scansioni, vista "Corrispondenze".

2.6.1.4. Collocazione delle scansioni da nuvola a nuvola

Una volta posizionate in modo approssimativo le varie scansioni è possibile effettuare una prima registrazione, selezionando tutte le nuvole dal workspace e cliccando con il tasto destro del mouse. Si aprirà una finestra e selezionando i comandi "Operazioni – Registrazione – Colloca scansioni" sarà possibile impostare la modalità di collocazione in "da nuvola a nuvola". Questa sarà solo una collocazione iniziale delle scansioni, sarà possibile raffinarne il posizionamento in seguito con l'inserimento dei *target*.

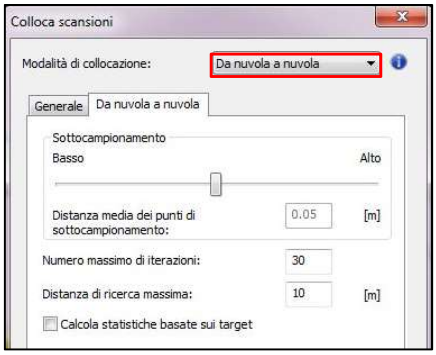


Figura 68 - Collocazione scansioni "da nuvola a nuvola".

2.6.1.5. Inserimento marker

Per georeferenziare le scansioni sono stati utilizzati i *marker*, le cui coordinate sono state inserite nel workspace attraverso un file in formato *.csv* contenente le coordinate ortometriche dei *target*. Si è proceduto quindi ad assegnare tali coordinate ai punti corrispondenti. Come primo tentativo si può

provare a far riconoscere in automatico i *target* al software, facendo un click con il tasto destro del mouse sulla scansione e selezionando il comando “Operazioni – Trova oggetti – Scacchiere”.

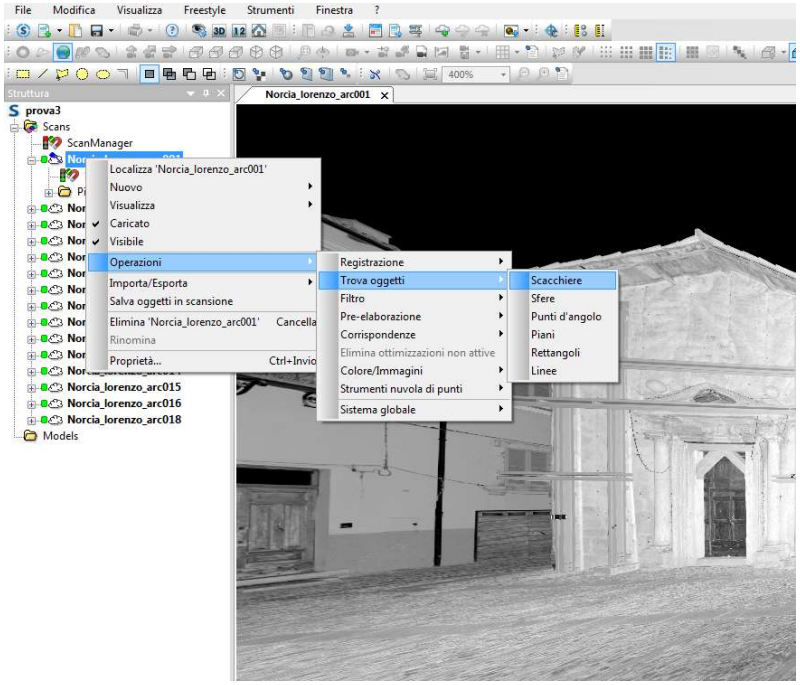


Figura 69 - Trova scacchiere.

I *target* che non sono stati trovati in automatico possono essere selezionati manualmente tramite il pulsante “Selezione rettangolare” . Una volta individuati, con un click del tasto destro del mouse si aprirà un menu a tendina. Selezionando “Crea oggetti – Punto medio di contrasto” verrà creato un punto al quale è possibile assegnare il nome, e quindi le coordinate, dei marker caricati nel progetto.

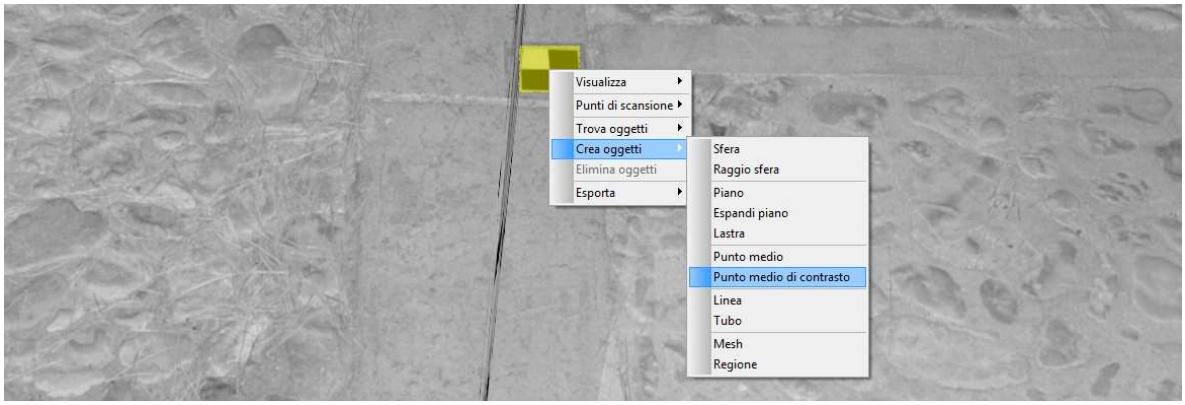


Figura 70 - Crea punto medio di contrasto.

2.6.1.6. Collocazione delle scansioni per target

Una volta assegnate a tutti i *target* le coordinate corrispondenti è stato possibile procedere alla collocazione delle scansioni per target tramite il comando "Operazioni – Registrazione – Colloca scansione".

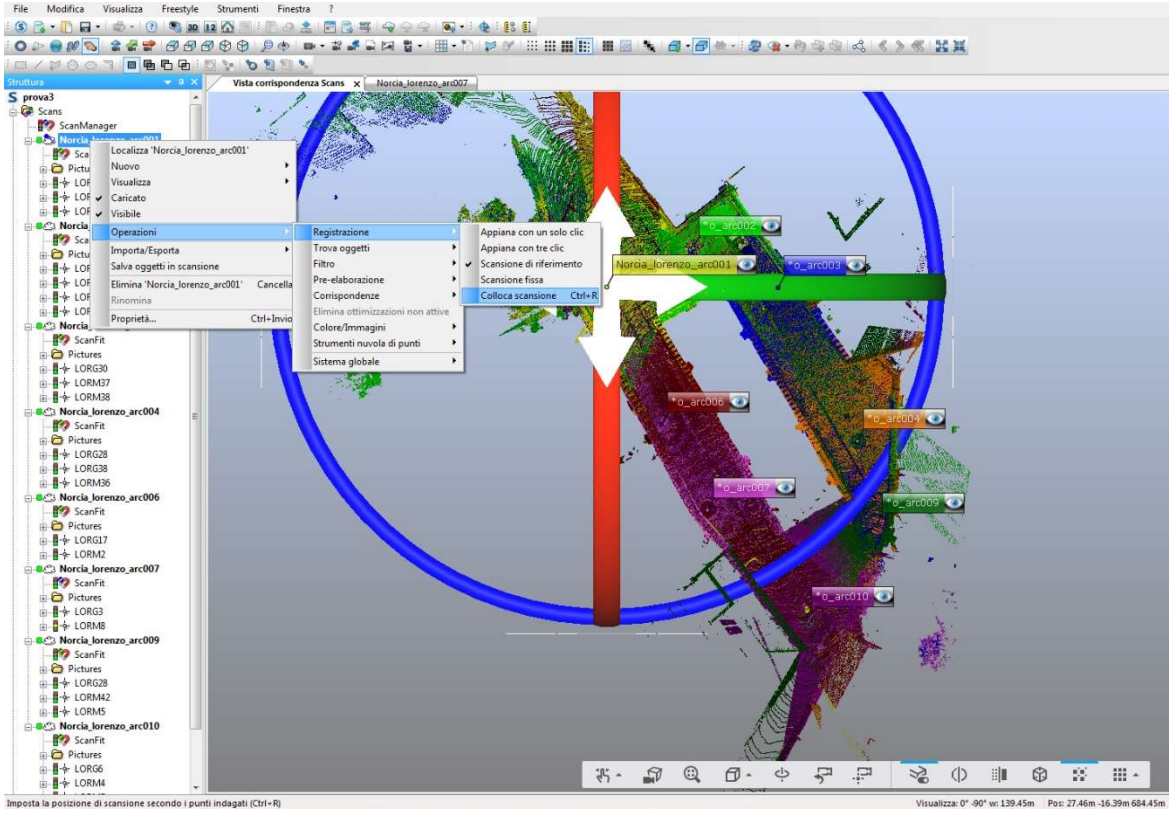


Figura 71 - Colloca scansione.

Bisogna a questo punto verificare la "tensione dei *target*", ovvero la discrepanza tra il centro del *target* individuato sulle immagini e le coordinate del centro del *target* misurate tramite stazione totale. Viene fissata la precisione entro la quale deve rimanere la tensione dei target in base alla scala di rappresentazione e alla tolleranza della carta. Nel nostro caso la scala è 1:100 (progetto architettonico definitivo) pertanto:

Precisione = 0,2 * fattore di scala = 2 cm = 20 mm.

Tolleranza = precisione * 2 = 4 cm = 40 mm.

Per verificare che tutti i valori rientrino in tale range è necessario cliccare con il tasto destro del mouse sullo *ScanFit* di ogni scansione. I *target* la cui tensione superava quella prefissata sono stati quindi riposizionati.

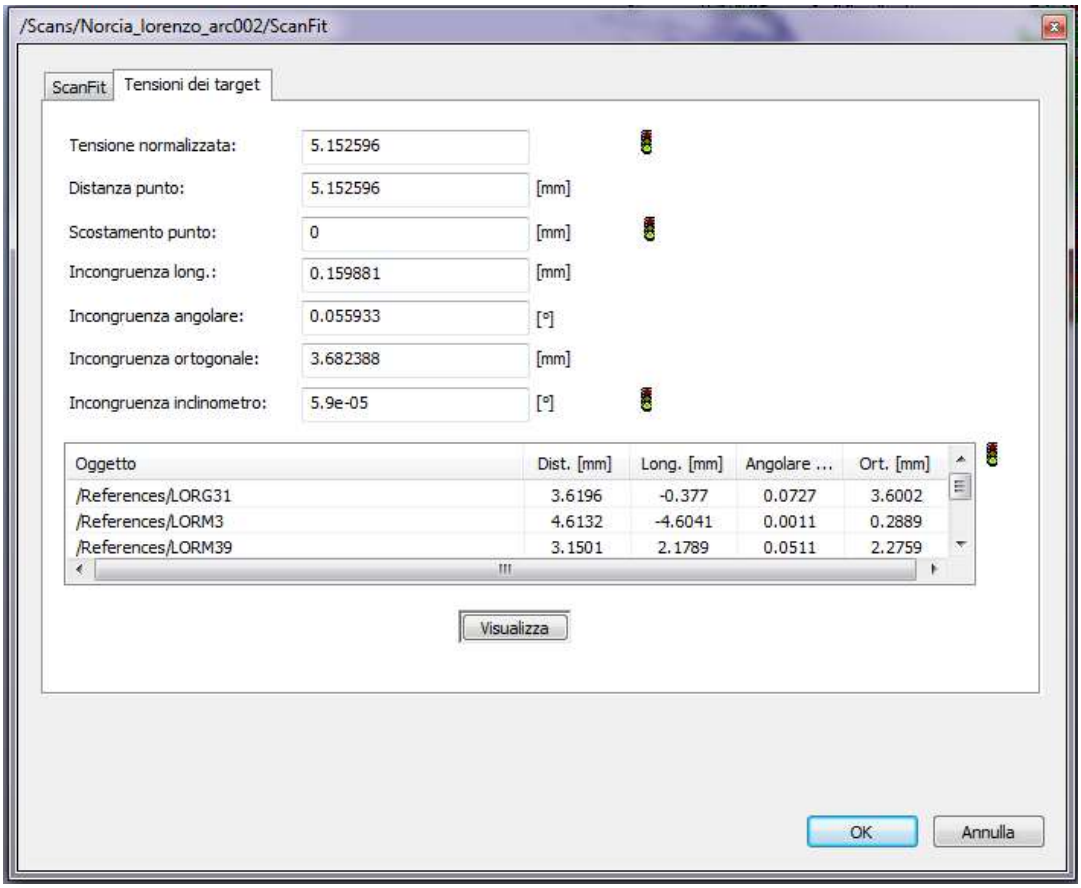


Figura 72 - Tensioni dei target.

Selezionando "Visualizza" apparirà la rete che collega lo strumento ai *target* di cui sono state acquisite le coordinate.

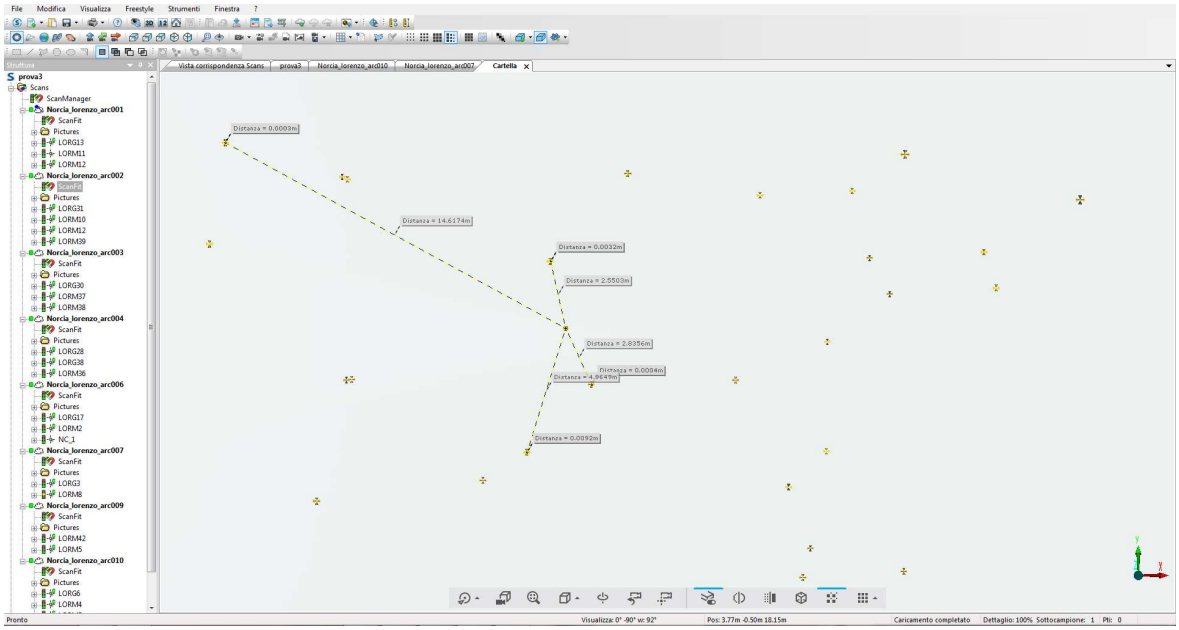


Figura 73 - Visualizzazione della disposizione spaziale dei target.

Si riporta di seguito una tabella riassuntiva con le tensioni dei *target*:

Scansione	Target	Dist [mm]	Long. [mm]	Angolare [°]	Ort. [mm]
Norcia_lorenzo_arc001	LORG5	1,32	-0,85	0,03	1,01
	LORM12	9,23	-8,20	0,02	4,23
Norcia_lorenzo_arc002	LORG31	3,62	-0,38	0,07	3,60
	LORM3	4,61	-4,60	0,00	0,29
	LORM39	3,15	2,18	0,05	2,28
	LORM12	9,23	3,44	0,10	8,56
Norcia_lorenzo_arc003	LORG30	1,16	-0,19	0,02	1,15
	LORM37	1,82	-0,64	0,01	1,71
	LORM38	2,74	-0,39	0,03	2,71
Norcia_lorenzo_arc004	LORG28	2,42	2,19	0,02	1,05
	LORM35	4,37	-1,09	0,06	4,23
	LORM36	4,22	2,22	0,04	3,59
Norcia_lorenzo_arc006	LORG28	3,66	-2,43	0,07	2,73
	LORM2	3,66	-3,62	0,01	0,49
Norcia_lorenzo_arc007	LORG3	5,35	-3,85	0,05	3,71
	LORM8	5,35	-4,04	0,01	3,51
Norcia_lorenzo_arc009	LORM42	1,98	-1,80	0,03	0,81
	LORM5	1,73	-1,55	0,01	0,78
Norcia_lorenzo_arc010	LORG6	7,38	3,11	0,14	6,70
	LORM4	6,65	0,67	0,04	6,62
	LORM5	10,36	-8,38	0,03	6,10
Max		10,36	3,44	0,14	8,56
Min		1,16	8,38	0,00	0,29
sqm		2,72	3,28	0,03	2,33

Tabella 6 - Tensioni dei target.

Una volta accettati i risultati della collocazione per target è possibile spostarsi sulla "Vista corrispondenze" e sulla "Vista 3D" dalla barra degli strumenti.

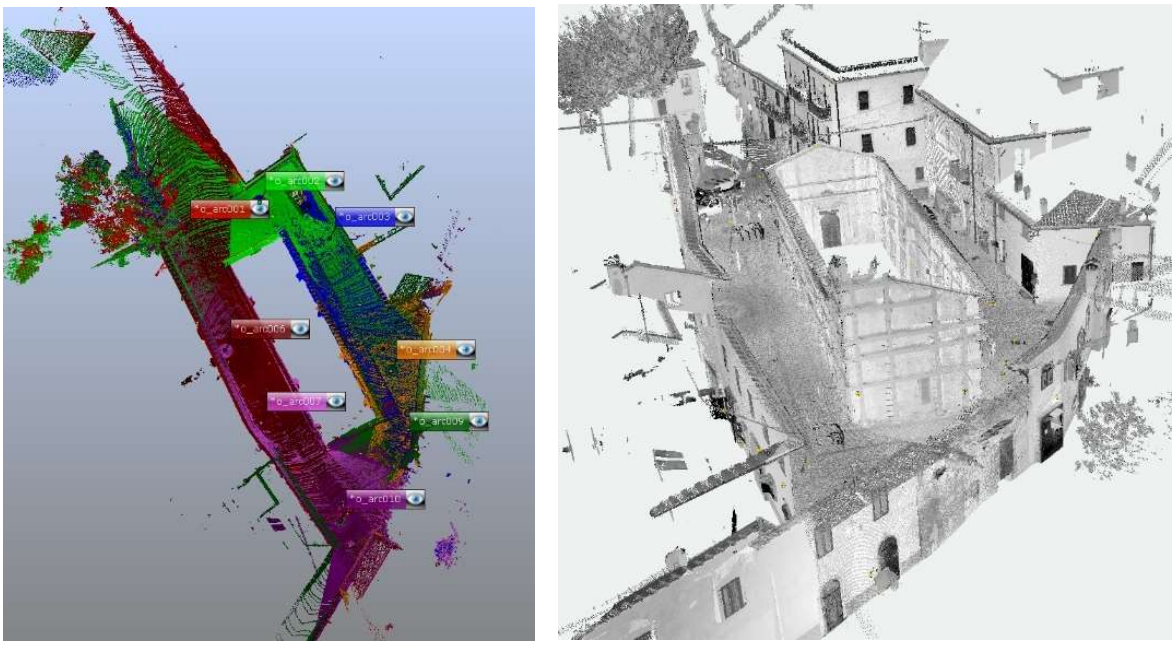


Figura 74 - Scansioni collocate per target: a sinistra Vista corrispondenze; a destra Vista 3D.

2.6.1.7. Colorazione delle scansioni

Le scansioni contengono le informazioni sul colore dei punti, è quindi possibile visualizzarle a colori oltre che in scala di grigi. Per farlo è sufficiente selezionare la singola scansione con il tasto destro del mouse e scegliere il comando "Operazioni – Colore/immagini – Applica immagini".

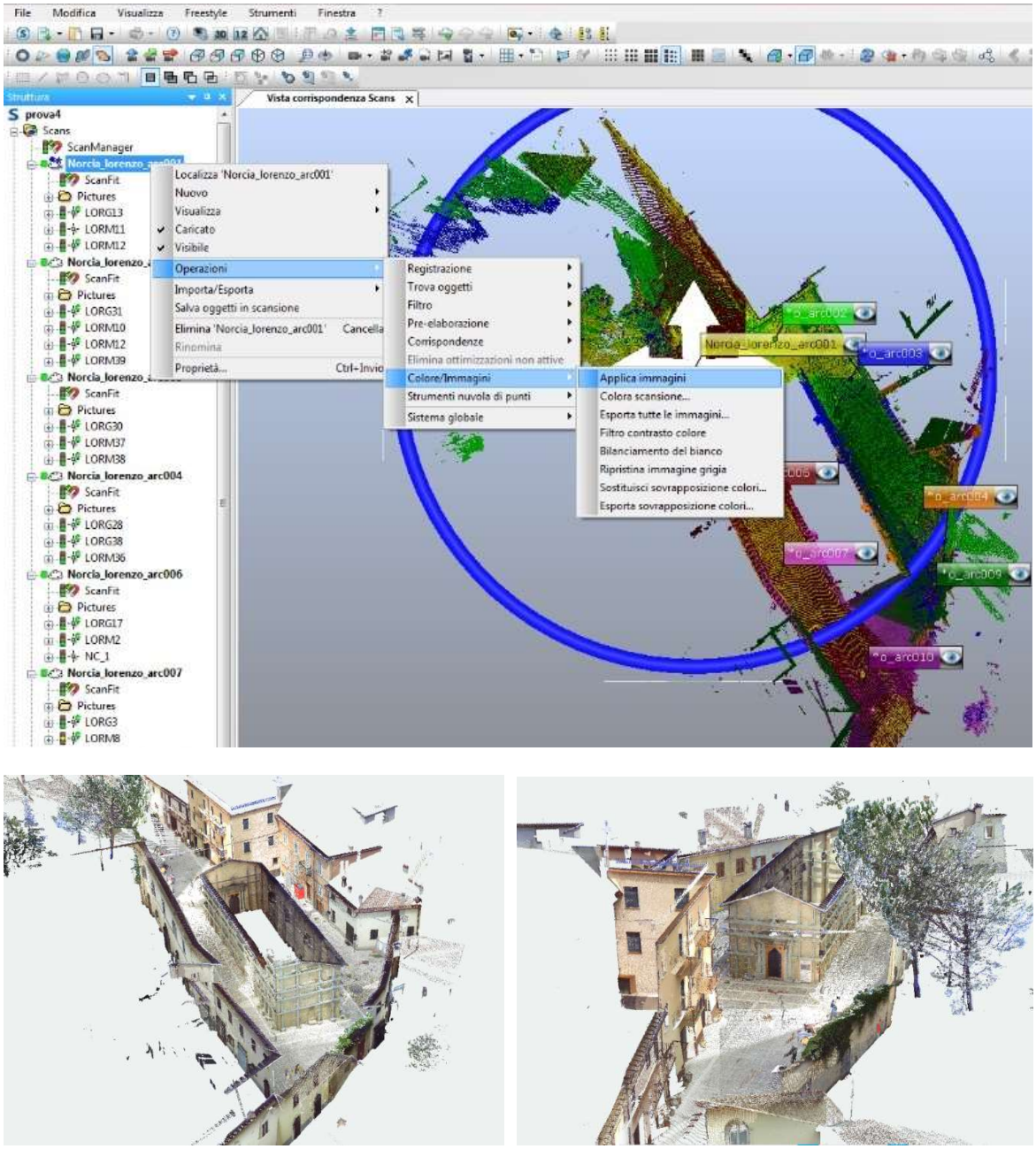


Figura 75 - Colorazione delle scansioni: in alto selezione comando "Applica immagini"; in basso a sinistra vista 3D dal retro della chiesa; in basso a destra vista 3D dall'ingresso della chiesa.

2.6.1.8. Creazione della nuvola di punti

Una volta colorate le scansioni si è proceduto alla creazione delle nuvole di punti. Sono state generate sia le nuvole di punti delle singole scansioni sia quella dell'intero progetto. Come è possibile vedere dalla *Figura 76*, nel primo caso è stato utilizzato il comando "Operazioni – Strumenti nuvola di punti – Crea nuvola di punti di scansione", mentre per la creazione della nuvola totale è stata selezionata l'icona "Crea nuvola di progetto" dalla barra degli strumenti.

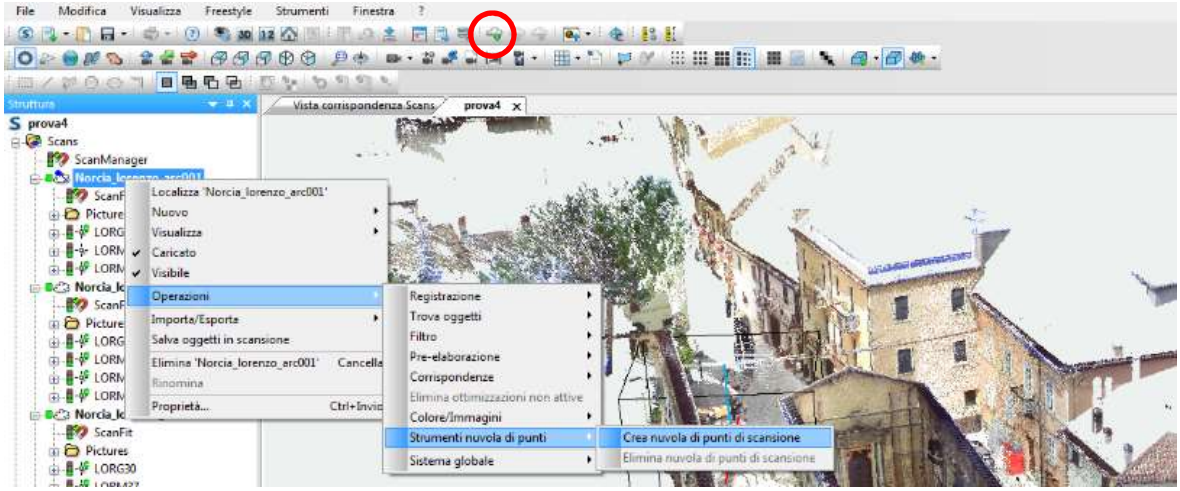


Figura 76 - Creazione nuvola di punti di scansione e di progetto.

2.6.1.9. Esportazione nuvola di punti

Le nuvole di punti sono state esportate cliccando con il tasto destro e selezionando "Importa/Esporta – Esporta nuvola di punti di scansione-Non ordinata".

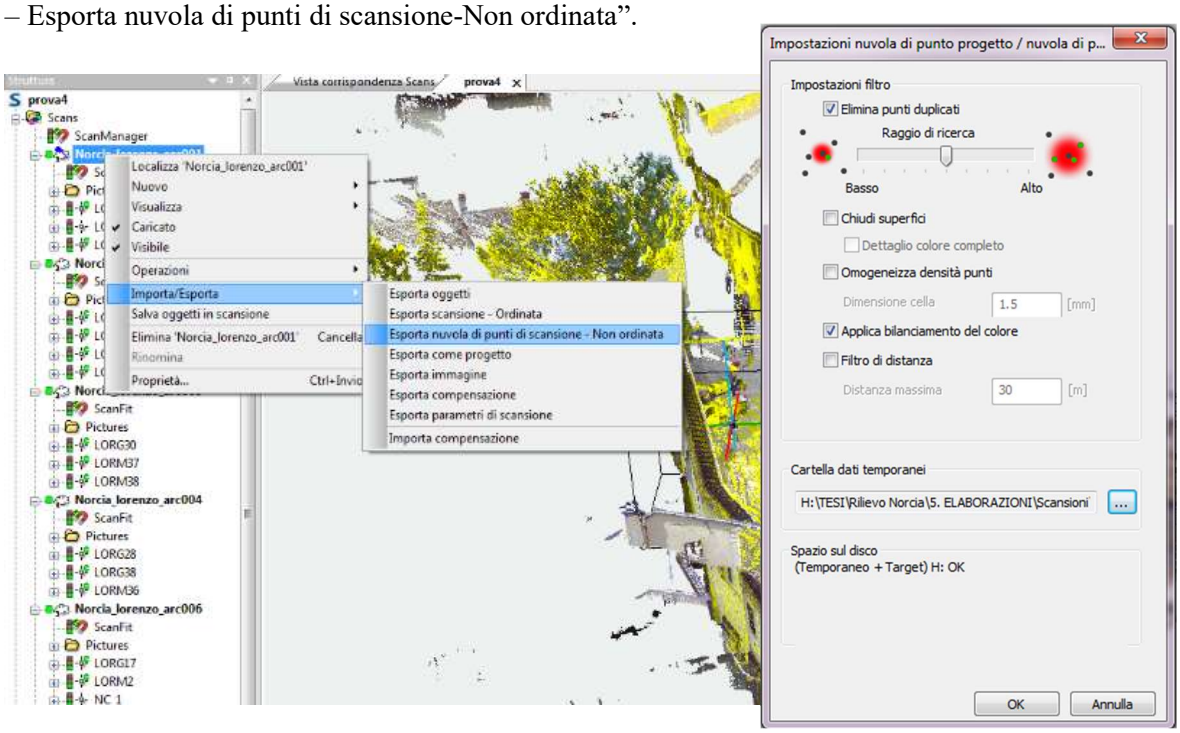


Figura 77 - Esportazione nuvola di punti.

2.7. Creazione nuvola di punti definitiva

In seguito alle elaborazioni mediante Metashape e Scene sono state ottenute in parallelo due nuvole di punti. È stato quindi utilizzato il software CloudCompare per scegliere con quale nuvola proseguire le elaborazioni.

2.7.1. CloudCompare

CloudCompare è un software open source per il processamento di nuvole di nuvole di punti e mesh triangolari. Nato per il confronto tra nuvole di punti, è stato poi implementato in un software di elaborazione di nuvole di punti che permette registrazione, ricampionamento, gestione del colore, calcolo delle statistiche, gestione dei sensori, segmentazione interattiva o automatica, miglioramento del display, ecc.

Tale software è stato utilizzato per effettuare un confronto *Cloud to cloud* e un confronto della densità tra le due nuvole ottenute tramite Laser scanner e fotogrammetria in modo da poter scegliere quale fosse più adatta per proseguire l'elaborazione e la modellazione.

2.7.1.1. Importazione nuvola di punti

È possibile importare una nuvola di punti in Cloud Compare semplicemente tramite *drag and drop*. Il software chiederà due conferme:

- La prima è per le informazioni da caricare insieme ai punti;
-

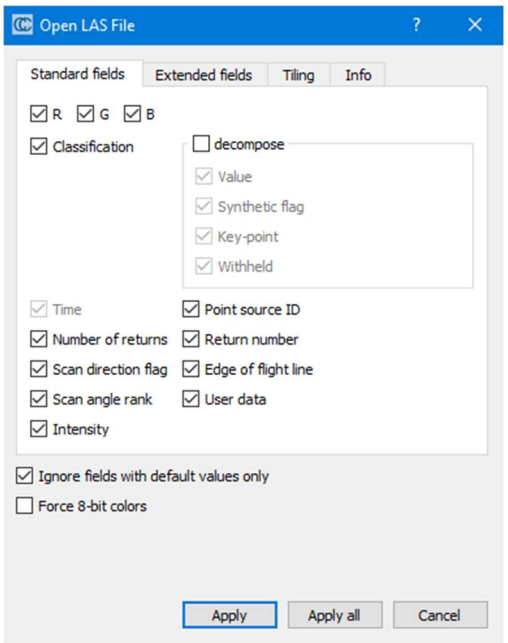


Figura 78 - importazione file.

- La seconda è relativa a una traslazione che consiglia di fare in modo da evitare errori nell'elaborazione di coordinate troppo grandi, come ad esempio succede in un rilievo georeferenziato. Non si tratta di una traslazione reale ma fittizia, esclusivamente funzionale al lavoro del software. Si può confermare tutto e in seguito ri-traslare le coordinate.

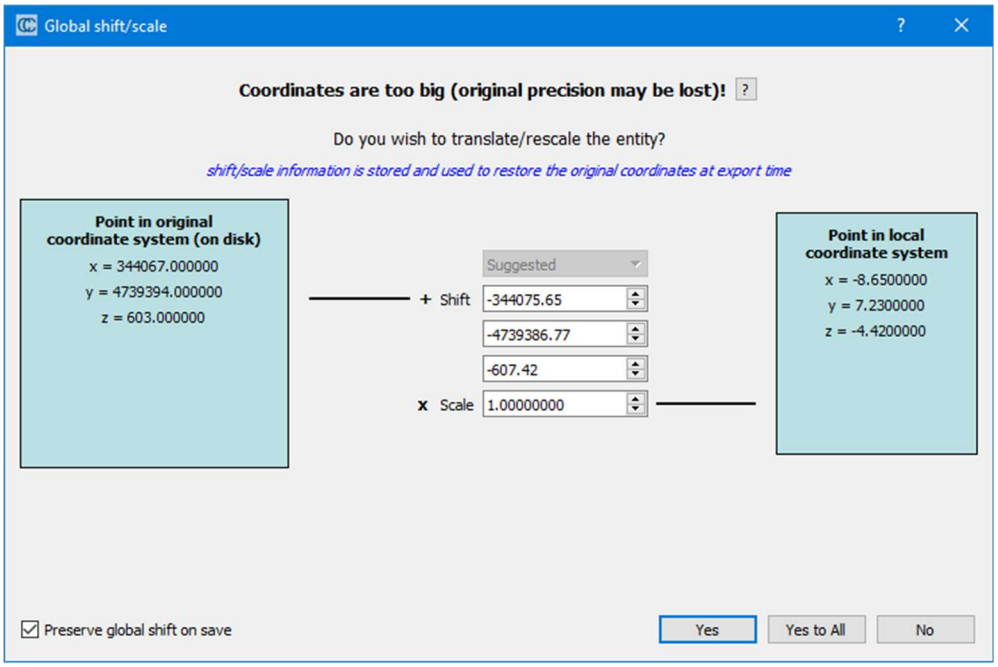


Tabella – Traslazione coordinate.

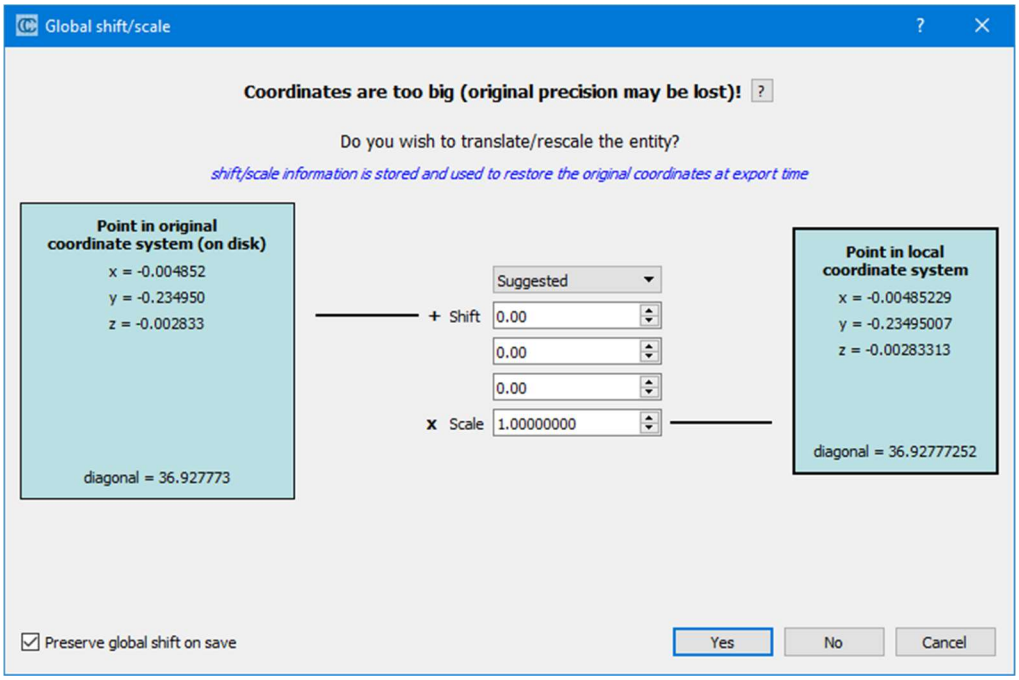


Tabella – Traslazione delle coordinate

2.7.1.2. Confronto cloud-to-cloud

Una volta inserite le due nuvole di punti, prima di procedere con il confronto cloud-to-cloud, poiché era nostro interesse analizzare solo una porzione della chiesa, è stato effettuato ancora un passaggio che ha permesso di ridurre i tempi di elaborazione. Sono state eliminate dalle due nuvole tutte le parti non interessate utilizzando lo strumento "Segment", associato all'icona di una forbice. È importante selezionare entrambe le nuvole in modo da effettuare questa operazione contemporaneamente e allo stesso modo su entrambe. Una volta lanciato il comando è già attivo lo strumento di selezione poligonale e in alto a destra appare un pannello di strumenti che offre due possibilità: "Segment in" o "Segment out". Il primo comando mantiene l'area all'interno della selezione poligonale e spegne tutto il resto, il secondo comando fa il contrario. Si è scelto di utilizzare "Segment in", pertanto è stata delimitata la porzione di parete con una polilinea e terminata l'operazione.

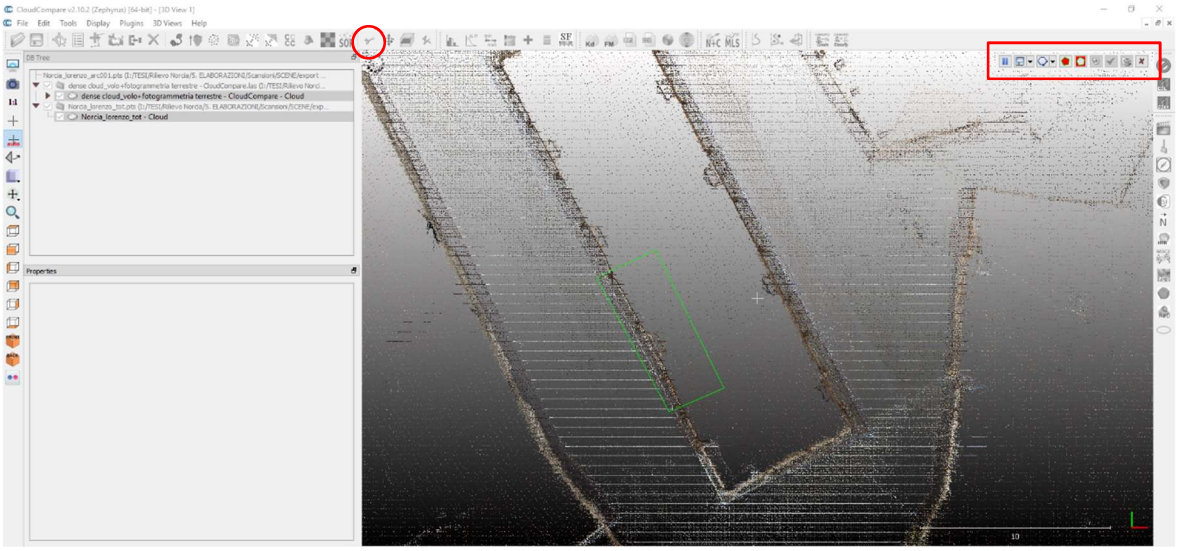


Figura 79 - Comando "Segment in".

A questo punto è stato effettuato il confronto cloud-to-cloud selezionando "Tools – Distances – Cloud/Cloud Dist." Questo comando permette di calcolare la distanza tra i punti delle due nuvole, quindi lo scostamento di una rispetto all'altra.

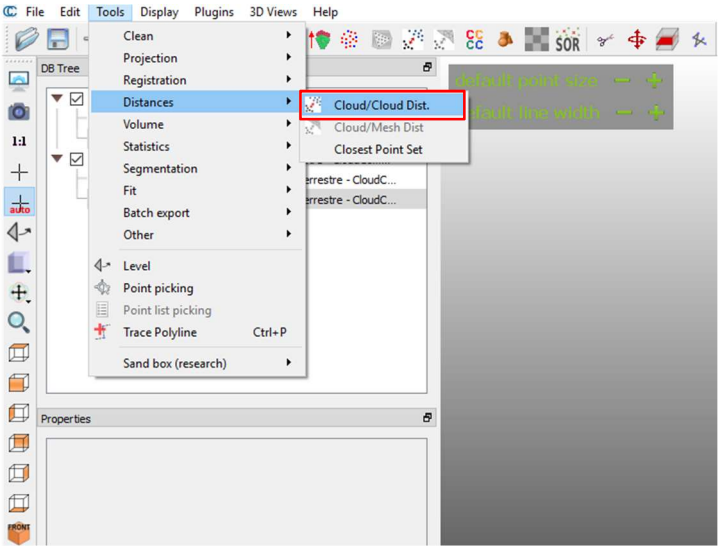


Figura 80 - Comando "Cloud/Cloud Dist.".

Il software chiederà quale nuvola utilizzare come riferimento e quale confrontare. Si è scelto di utilizzare come riferimento la nuvola ottenuta da laser scanner in quanto tale tecnologia è nota per la sua precisione.

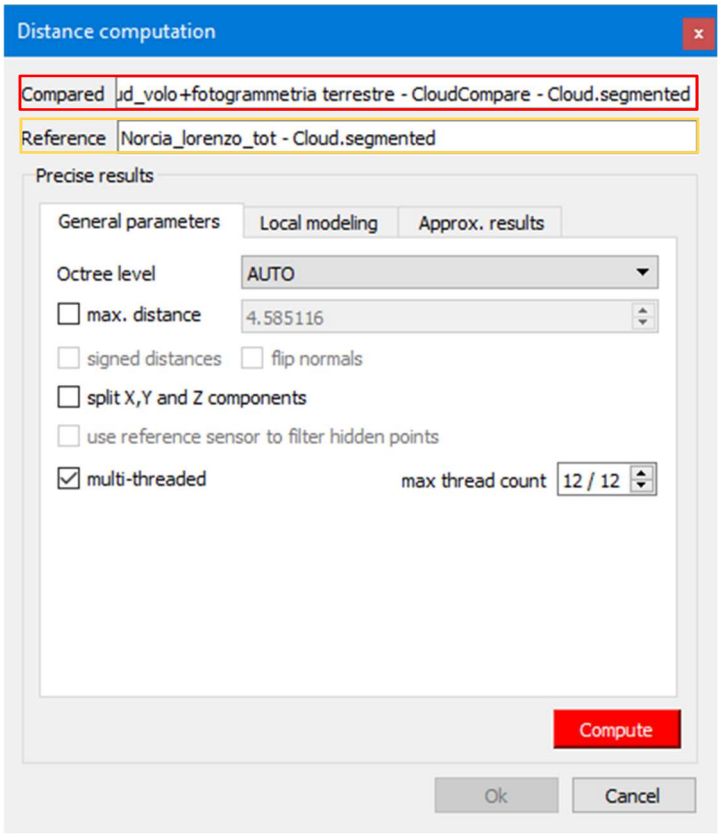


Figura 81 - Impostazione parametri per il confronto cloud-to cloud.

Inizialmente il software calcola delle distanze approssimative al fine di settare il miglior livello di *octree*, con cui calcola poi le distanze reali. Di seguito si riporta il risultato dell'analisi. Come si vede dal grafico (*Figura xx*), è possibile notare la mancanza di informazioni sulla copertura nella nuvola di punti ottenuta da scansioni laser.

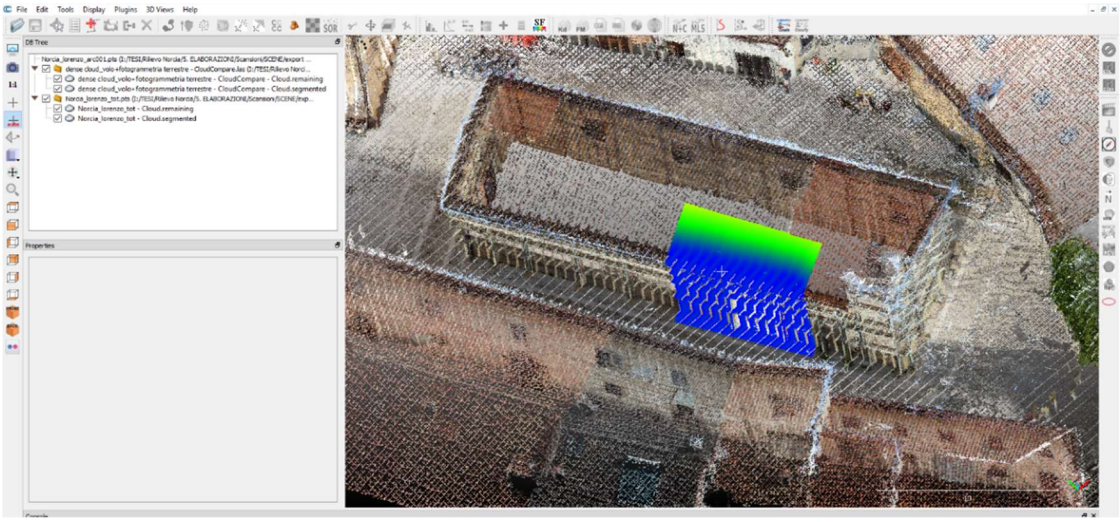


Figura 82 - Risultato analisi cloud-to-cloud: Distance.

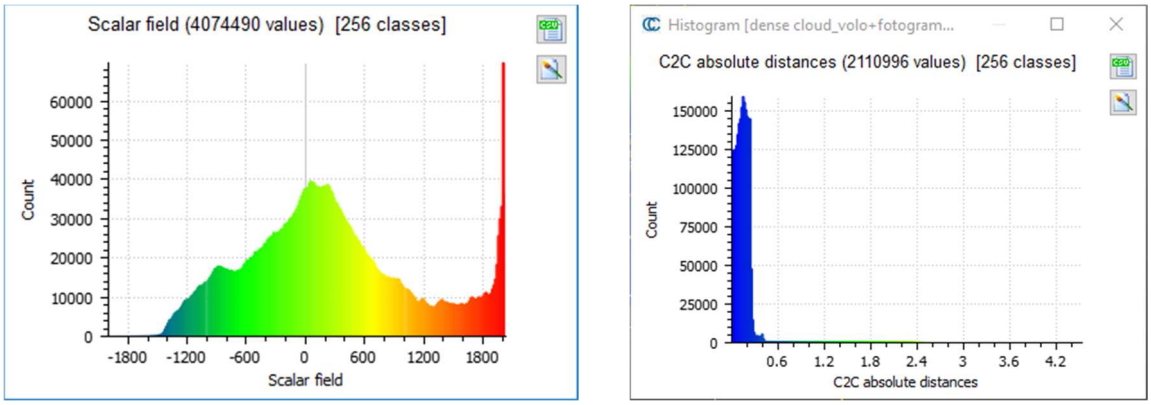


Figura 83 - Grafici risultato analisi cloud-to-cloud: Distance.

2.7.1.3. Confronto della densità

Cloud Compare permette anche il calcolo della densità di punti per mezzo del comando "Tools – Other – Density". La densità viene stimata contando per ogni punto il numero dei *neighbors*, ovvero i vicini, in una sfera di raggio R. Tale raggio è stato impostato pari a 0,01 m.

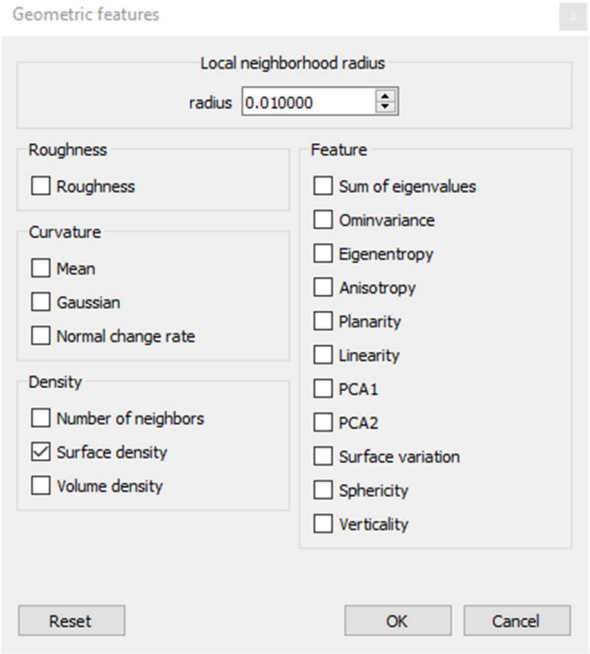


Figura 84 - Impostazione parametri per il calcolo della densità.

Come è possibile vedere dai grafici sottostanti, la densità di punti della nuvola ottenuta tramite laser scanner è maggiore di quella ottenuta da fotogrammetria.

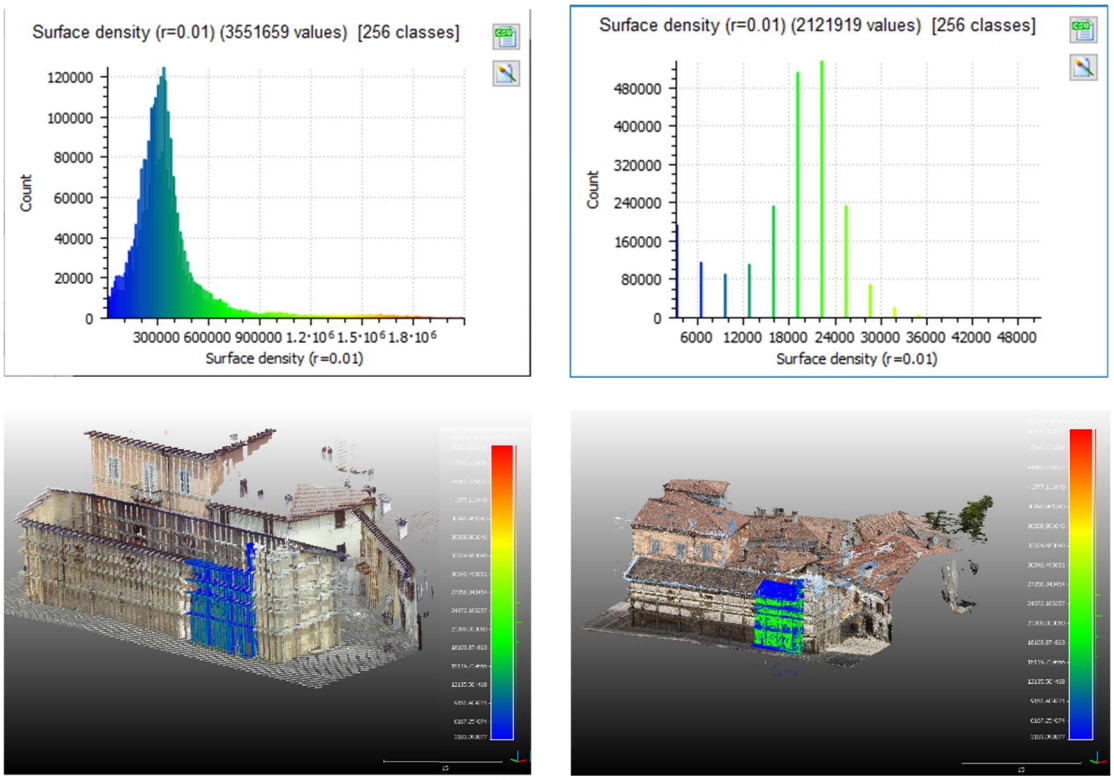


Figura 85 - Confronto della densità: a sinistra istogramma della nuvola di punti ottenuta da scansioni laser, a destra istogramma della nuvola di punti ottenuta da fotogrammetria.

Nonostante la maggiore densità di punti su parete della nuvola ottenuta da scansioni laser rispetto a quella ottenuta da fotogrammetria, si è deciso di proseguire con quella ottenuta da fotogrammetria, in quanto i voli eseguiti con i dispositivi UAV hanno permesso di acquisire immagini relative alla copertura che con le scansioni laser da terra non era possibile ottenere.

2.7.1.4. Filtraggio

La nuvola di punti selezionata è stata pertanto alleggerita per facilitare le elaborazioni future, mediante il comando "Subsample" [*Figura 86*].

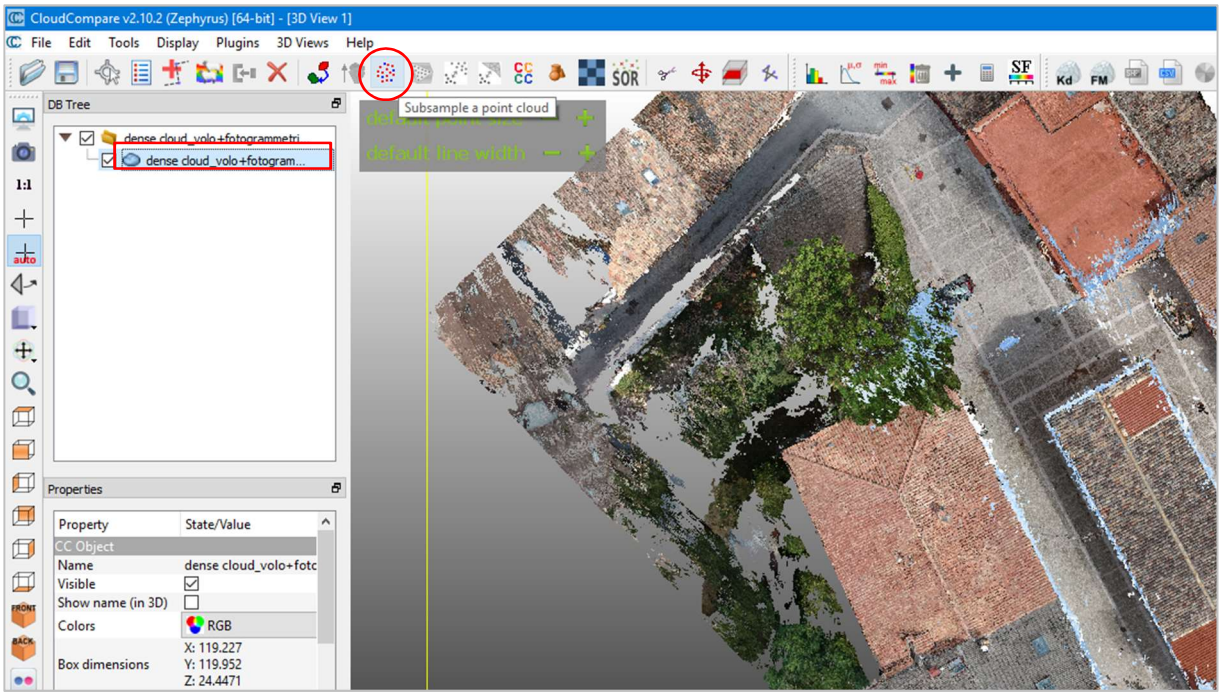


Figura 86 - Comando "Subsample".

2.7.2. 3DReshaper

3DReshaper è un software che consente di elaborare facilmente modelli 3D estremamente raffinati grazie a numerosi strumenti rapidi e semplici. I risultati vengono ottimizzati in funzione della qualità del dato, delle sue caratteristiche geometriche e morfologiche e delle finalità dell'utente. Infatti, grazie ad algoritmi molto performanti, vengono generati modelli poligonali accurati e leggeri.

Nel caso in esame l'uso di tale software è stato necessario per ripulire la nuvola di punti esportata da CloudCompare e ritagliare la sola area costituente la chiesa, in modo da poterla in seguito importare in Revit e utilizzare per costruire il modello HBIM. Sono stati pertanto utilizzati i comandi "Pulisci o scomponi nuvola" e "Filtra/divide nuvola" che è possibile trovare nella sezione "Nuvola" della barra del menu.

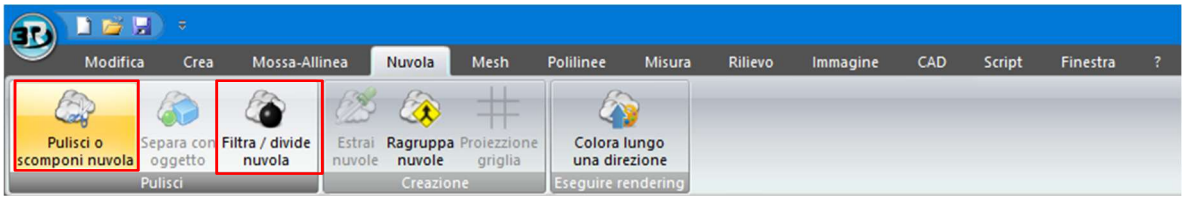


Figura 87 - Sezione" Nuvola" del menu: comandi "Pulisci" e "Filtra".

Il primo comando ha permesso di selezionare la sola area della chiesa di San Lorenzo e cancellare i punti che non ricadevano al suo interno. Per una pulizia più di precisione, finalizzata ad eliminare manualmente i punti non desiderati, è stato invece utilizzato il corrispettivo comando “Cancella i punti all’interno”.

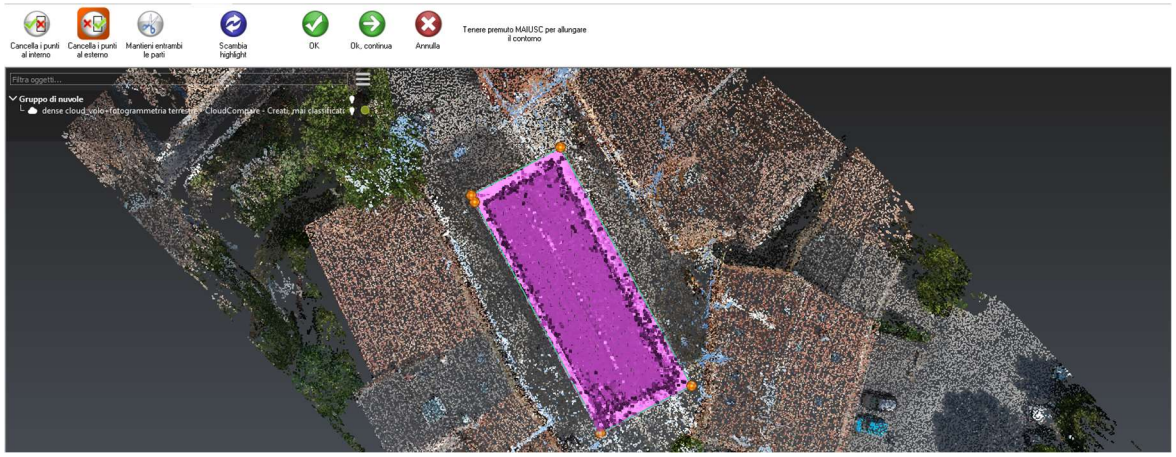


Figura 88 - Pulizia della nuvola.

Il secondo comando ha permesso invece di ridurre il rumore di un certo valore percentuale. Si è proceduto gradualmente per evitare di causare perdita di informazioni.

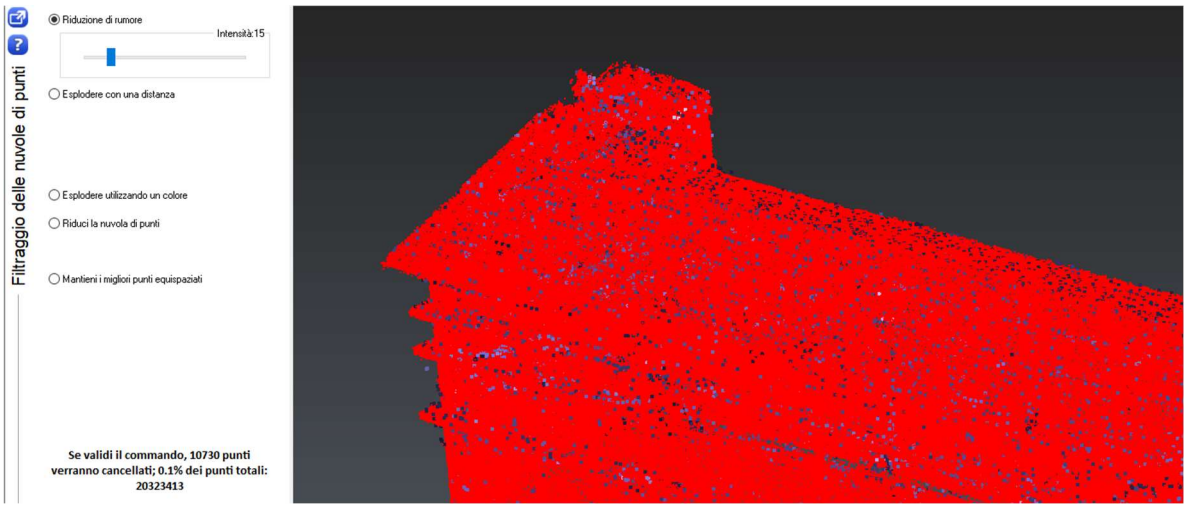


Figura 89 - Filtraggio della nuvola.

3.Modellazione 3D per analisi multiscala

Le attività di rilievo della chiesa di San Lorenzo hanno portato alla realizzazione di una nuvola di punti, che assume un ruolo fondamentale sia come registrazione dello stato di fatto, sia come supporto per delle analisi che possono essere realizzate. La precisione del rilievo, infatti, abbinata alle potenzialità visuali del modello tridimensionale, consentono la rappresentazione di un manufatto reale mediante un manufatto digitale, che può fungere da supporto sia per la visualizzazione che per la valutazione metrica, aprendo nuove potenzialità di studio dei beni culturali.
Pertanto, il caso studio della chiesa di San Lorenzo è stato usato a titolo esemplificativo per individuare una metodologia che permetta di far dialogare gli strumenti di modellazione tridimensionale legati all'edilizia (BIM[18]) con i moderni sistemi informativi territoriali tridimensionali (GIS[19]), al fine di migliorare le strategie di intervento e manutenzione in caso di catastrofi, attraverso l'analisi e la definizione di relazioni.
Se il BIM (*Building Information Modeling*) è il processo per creare, archiviare e gestire le informazioni relative agli edifici durante tutto il loro ciclo di vita, il GIS (*Geographic Information System*) è invece un sistema per acquisire, archiviare, manipolare, analizzare, gestire e presentare tutti i tipi di dati geografici.
Il dominio BIM e il dominio GIS condividono un bisogno reciproco di informazioni:

- le informazioni dal GIS possono facilitare le applicazioni BIM come la selezione del sito e la disposizione del materiale in loco;
- i modelli BIM possono aiutare a generare modelli dettagliati in GIS e ottenere una migliore gestione delle utenze.

Lo scambio di informazioni tra questi domini può essere conforme agli oggetti del modello della città:

- si può fare uso del modello 3D come trasportatore di informazioni;
- l'ontologia della città può anche essere considerata uno schema per l'organizzazione delle informazioni del dominio strutturate in modo simile.

[18] Building Infotmation Model/Modeling/Manage.
[19] Geographic Information System

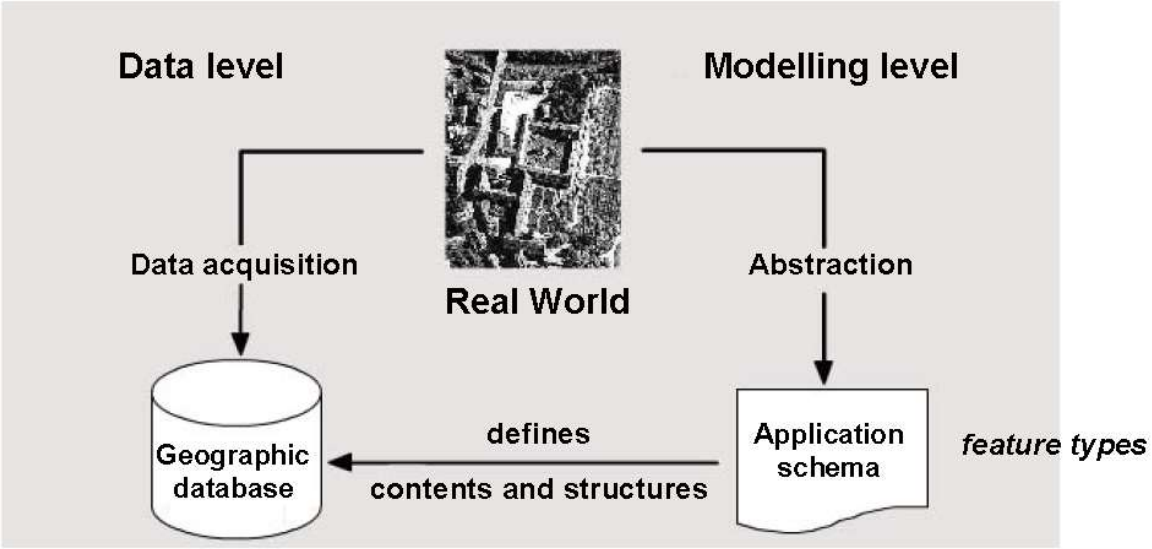


Figura 90 - Schema dell'applicazione di CityGML.

Un'opportunità di gestione integrata è offerta dai modelli multiscala, ovvero modelli che possono essere utilizzati a diverse scale nominali di rappresentazione. Il contenuto del modello, la struttura e i principi di modellazione impiegati dipendono dalla scala e dallo scopo del progetto.

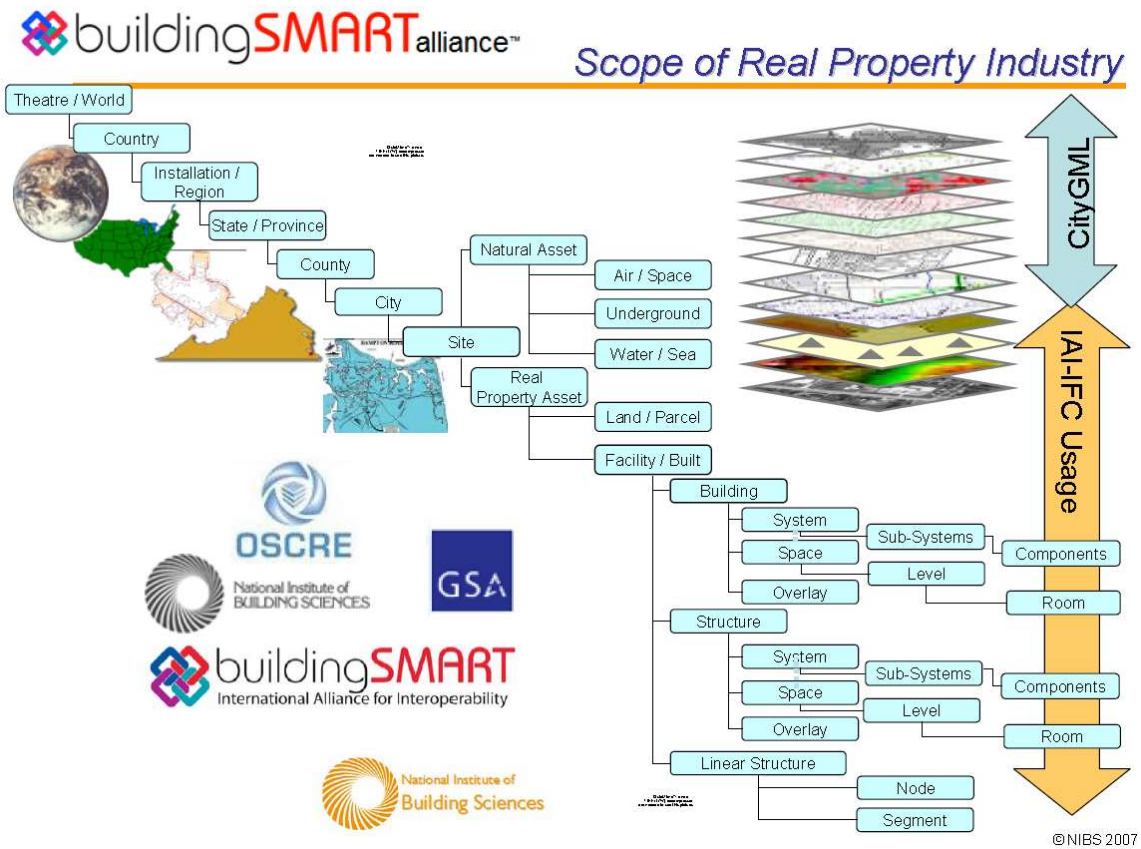


Figura 91 - Classificazione in base allo scopo e alla scala

Si è deciso di realizzare un progetto unico che permettesse di passare da una scala urbana ad una scala architettonica secondo i livelli di dettaglio proposti dallo standard CityGML. Pertanto, è stato necessario realizzare il modello BIM (o più correttamente HBIM, come vedremo più avanti) della chiesa e in seguito inserirlo in ambiente GIS.

La decisione di realizzare il modello BIM è dovuta al fatto che esso, come definito dal NIBS (*National Institute of Building Science*)[20], costituisce "una rappresentazione digitale delle caratteristiche fisiche e funzionali di una struttura"[21] che funge da "risorsa in quanto conoscenza condivisa di informazioni su una struttura che costituisce una base affidabile per le decisioni durante il suo ciclo di vita, dal principio in poi"[22]. Costituisce pertanto allo stesso tempo uno strumento e un processo e l'uno non può realisticamente esistere senza l'altro. All'acronimo BIM sono stati quindi assegnati vari significati:

B → Building

I → Information

M →
- Modeling = processo per la realizzazione del progetto;
- Model = semplice rappresentazione dell'oggetto;
- Management = organizzazione, controllo e gestione del processo.

Nell'ambito di questa tesi il BIM è stato inteso come Building Information Modeling, ovvero come modello di informazione di un edificio. Con tale terminologia si intende un approccio collaborativo e interdisciplinare incentrato su un modello-centrale integrato che contiene informazioni riguardo il suo intero ciclo di vita attraverso le fasi di progettazione, realizzazione, manutenzione e programmazione. Grazie alla condivisione delle informazioni si può ottenere una migliore integrazione e interoperabilità tra tutte le parti interessate del progetto. Per tale motivo una premessa di base del BIM consiste nella collaborazione tra le diverse figure interessate nelle varie fasi del ciclo di vita di una struttura, da cui deriva la possibilità di un'analisi integrata. In questo modo il BIM fornisce a progettisti, appaltatori e proprietari una metodologia per migliorare il processo decisionale, la qualità e le tempistiche.

Al centro di questo approccio ci sono i flussi di lavoro basati sul modello centrale. In un tradizionale flusso di lavoro basato su CAD ogni vista viene disegnata separatamente senza alcuna relazione intrinseca tra i disegni. Questo implica che ogni eventuale modifica deve essere coordinata

[20] www.nibs.org

[21] *"a digital representation of physical and functional characteristics of a facility"*

[22] *"shared knowledge resource for information about a facility forming a reliable basis for decisions during its lifecycle from inception onward".*

manualmente tra piante, prospetti e sezioni. In un flusso di lavoro basato sul BIM, invece, il team crea modelli parametrici 3D per generare i disegni necessari per la documentazione e l'analisi. Questo permette una riduzione degli errori in quanto piante, prospetti e sezioni sono semplici viste differenti dello stesso oggetto. Inoltre, si avrà un risparmio di tempi e costi, in quanto il progettista non dovrà più disegnare linee, polilinee e forme geometriche, bensì inserire semplicemente oggetti dotati di specifiche proprietà ed informazioni, quali materiali, costi, capacità termiche, manutenzione e così via. Questa metodologia avanzata di rappresentazione non solo permette una documentazione altamente coordinata, ma fornisce anche la geometria di base del modello necessaria per le analisi, come studi di illuminazione diurna, simulazioni energetiche, prelievi di materiale, e così via.

Quando si pensa all'industria AEC (*Architecture, Engineering and Construction*) le persone tendono a riferirsi a nuovi edifici, ma oggi il recupero di quelli esistenti è sempre più oggetto di ricerca. L'attuale contesto storico solleva questo problema al centro di numerose riflessioni dovute sia alle condizioni economiche che a quelle ambientali. L'Italia sta cercando di cambiare l'industria delle costruzioni attraverso il progetto nazionale InnovANCE, che mira a sviluppare il primo database nazionale in grado di condividere le informazioni tra i professionisti grazie all'aiuto del Building Information Modeling, attraverso l'ambiente dati comune CDE[23], lo strumento utilizzato per raccogliere, gestire e scambiare il modello, i dati non grafici e tutta la documentazione.[24] Si parla pertanto di HBIM, acronimo di *Historic BIM*, come definito per la prima volta nel 2009 da Maurice Murphy, professore del Politecnico di Dublino. Con tale termine si intende un procedimento di modellazione geometrica e d'informazione, secondo il quale gli edifici esistenti vengono rilevati tramite strumenti accurati, come laser scanner e dispositivi UAV, che portano alla generazione di una nuvola di punti, la quale viene utilizzata come base per la creazione di librerie di oggetti parametrici finché la somiglianza del modello non è soddisfacente. Tale processo mira pertanto ad astrarre le geometrie per avere modelli semplificati ai quali associare dati per la documentazione o per simulazioni numeriche. Ad esempio, l'uso di dati storici introduce l'opportunità di sviluppare i dettagli dell'oggetto riguardo i suoi metodi di costruzione e i materiali. Come schema chiave del dominio BIM viene generalmente utilizzato l'IFC (*Industry Foundation Classes*), in quanto esso rappresenta lo standard di riferimento per i beni culturali.

[23] *Common Data Environment.*

[24] M. DEL GIUDICE, A. OSELLO; *BIM for cultural Heritage,* International Archives of the Photogrammetry, Remote sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W2, 2013. (Data consultazione 12/06/2019).

Figura 92 - Logo ifc.

Il modello HBIM così realizzato è stato inserito in ambiente GIS, poiché esso rappresenta un sistema informativo computerizzato in grado di associare dei dati alla loro posizione geografica sulla superficie terrestre e di elaborarli per estrarne delle informazioni. L'acronimo GIS sta infatti per:

G → Geographic = geografico (o territoriale);

I → Information = informativo;

S → System = sistema.

Si è scelto di utilizzare CityGML (*Geography Markup Language*) come schema chiave del dominio GIS grazie alle sue ampie applicazioni.

Figura 93 - Logo CityGML

CityGML è l'acronimo di *City Geography Markup Language* ed è uno standard GIS sviluppato nel 2002 dal gruppo SIG3D (*Special InterestGroup 3D*)[25] dell'iniziativa "Geodata Infrastructure" nella Renania Settentrionale – Westphalia, in Germania. Nel 2008 è stato adottato da OGC (*Open Geospatial Consortium*) come standard ufficiale per la modellazione e lo scambio di modelli 3D di città e paesaggi ed è stato rapidamente adottato a livello internazionale. È realizzato come un modello di dati che può essere utilizzato gratuitamente, basato sul formato XML che utilizza lo schema XSD (*XML Schema Definition*) per definire le relazioni tra entità per l'archiviazione e lo scambio di modelli 3D di città virtuali. È implementato come schema applicativo per GML3 (*Geography*

[25] https://www.sig3d.org/

Markup Language versione 3.1.1), lo standard internazionale estensibile per lo scambio di dati spaziali rilasciato da OGC e ISO TC211. È uno standard ricco di dati semantici in cui a diversi componenti dell'edificio vengono assegnati ID, nomi e descrizioni univoci.

CityGML supporta **cinque livelli di dettaglio** (LOD[26]) di modellazione degli oggetti della città.

Figura 94 - Livelli di dettaglio di CityGML.
(Fonte: Biljecki et al. Redefining the level of detail for 3D models, 2014)

CityGML è uno standard di **rappresentazione multiscala**, dalla quale derivano i requisiti di precisione.

	LOD0	LOD1	LOD2	LOD3	LOD4
Model scale description	regional, landscape	city, region	city, city districts, projects	city districts, architectural models (exterior), landmark	architectural models (interior), landmark
Class of accuracy	lowest	low	middle	high	very high
Absolute 3D point accuracy (position / height)	lower than LOD1	5/5m	2/2m	0.5/0.5m	0.2/0.2m
Generalisation	maximal generalisation	object blocks as generalised features; > 6*6m/3m	objects as generalised features; > 4*4m/2m	object as real features; > 2*2m/1m	constructive elements and openings are represented
Building installations	no	no	yes	representative exterior features	real object form
Roof structure/representation	yes	flat	differentiated roof structures	real object form	real object form
Roof overhanging parts	yes	no	yes, if known	yes	yes
CityFurniture	no	important objects	prototypes, generalized objects	real object form	real object form
SolitaryVegetationObject	no	important objects	prototypes, higher 6m	prototypes, higher 2m	prototypes, real object form
PlantCover	no	>50*50m	>5*5m	< LOD2	<LOD2
…to be continued for the other feature themes					

Tabella 7 - LOD0-4 con i loro requisiti di precisione proposti.
(Fonte: Albert et al. 2003)

[26]Acronimo di *Level of Detail,* da non confondere con LOD inteso come *Level Of Development*, ovvero "livello di sviluppo".

Nel caso in esame i LOD0-1 della città di Norcia sono stati ottenuti in ambiente GIS. I LOD2-3 della chiesa di San Lorenzo sono stati invece ottenuti in ambiente BIM, sulla base di una nuvola di punti georeferenziata, e in seguito importati in ambiente GIS.

3.1. LOD0 – Modello regionale

Il LOD0 prevede la creazione di un Sistema Informativo Territoriale 2.5D.

3.1.1. Schema CityGML

Lo schema proposto da CityGML suddivide il modello della città in edifici, trasporti, topografia, idrografia e vegetazione. [*Figura 95*]

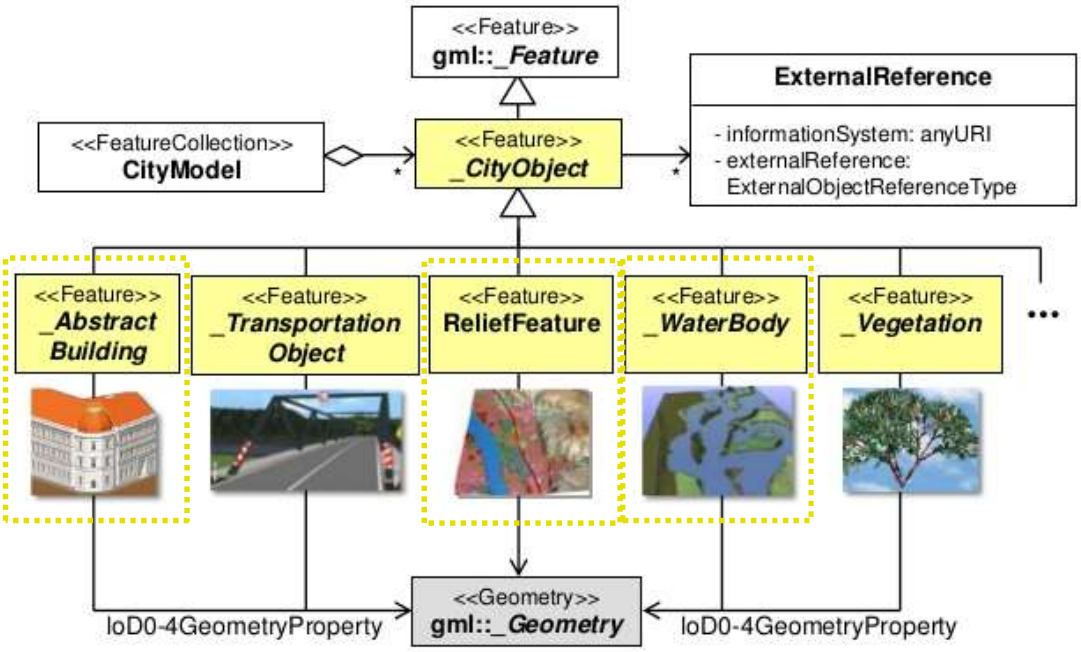


Figura 95 - Diagramma UML del modello in loD0.

Fonte: T. H. Kolbe - Semantic 3D City Models with CityGML for Urban Analytics.

3.1.2. Realizzazione del LOD0 in ArcMap

Per ottenere un progetto in LOD0 in ambiente GIS si è deciso di utilizzare il software ArcMap. Esso è l'ambiente grafico, dedicato alle funzioni GIS classiche: modifica, visualizzazione, interrogazione e tematizzazione del dato cartografico.

Sono stati scaricati dal Geoportale della regione Umbria[27] i seguenti dati:

- La Carta Tecnica Regionale (CTR) in scala 1:5000 dei quadranti 337024_G e 325143_G.
- Il Digital Terrain Model (DTM);
- Lo shapefile dei fabbricati del comune di Norcia;
- Lo shapefile dell'idrografia;
- Lo shapefile dell'indice di pericolosità sismica.

3.1.2.1. Conversione delle coordinate

I file forniti dal Geoportale della regione Umbria erano disponibili in coordinate Gauss-Boaga, pertanto è stato pertanto necessario convertire le coordinate in UTM – ETRF2000 prima di inserirle in ArcMap. In questa operazione si è fatto uso del software Convergo.

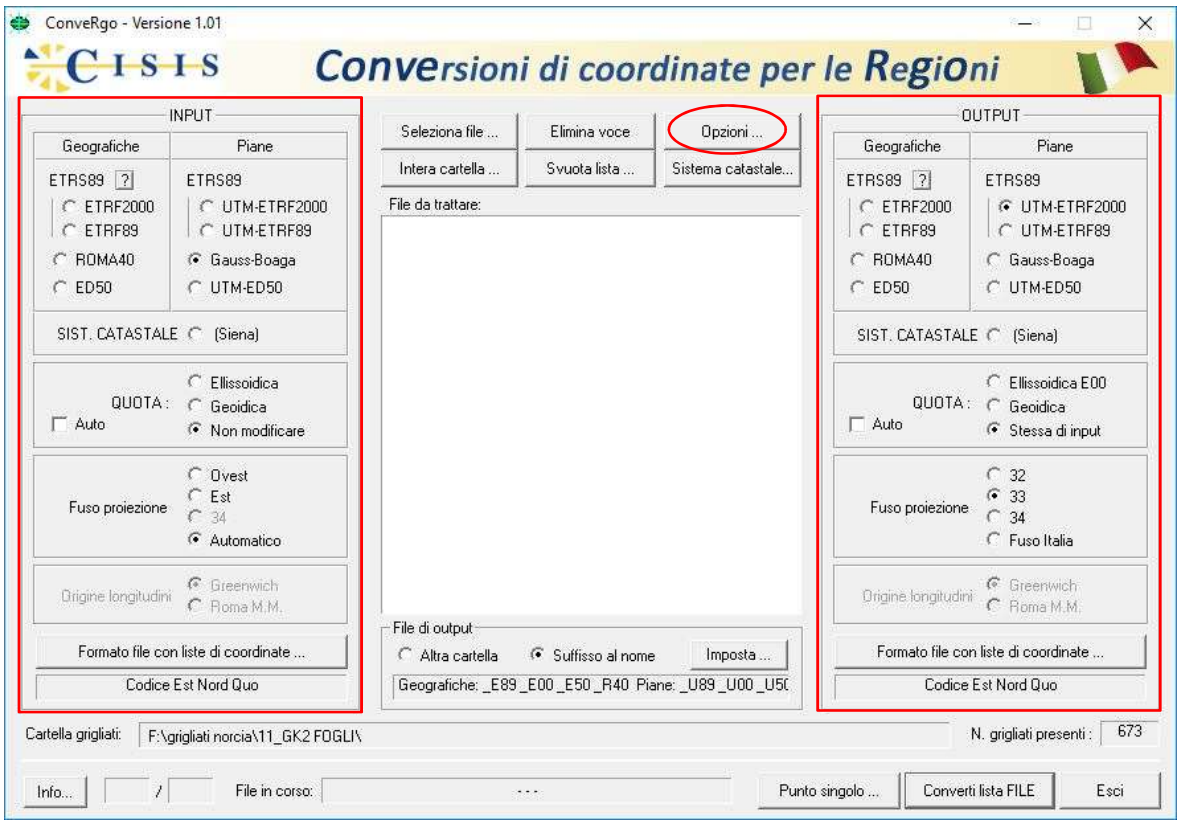


Figura 96 – Convengo: Impostazione dei parametri di conversione.

Per poter utilizzare il software è necessario essere in possesso dei grigliati. Questi vanno inseriti in "Opzioni – Utilizzo grigliati" [*Figura 97*].

[27] http://www.umbriageo.regione.umbria.it/pagine/geoportale-000.

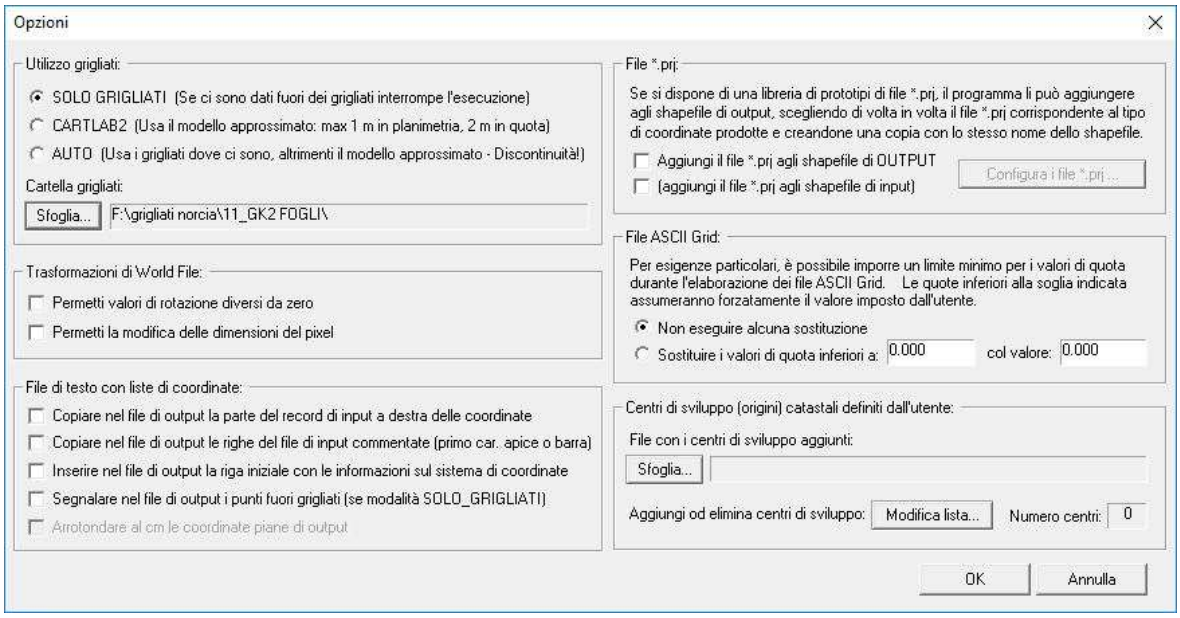


Figura 97 - Inserimento grigliati.

A questo punto è possibile selezionare il file da trasformare, impostare le coordinate di input e le coordinate di output ed eseguire la trasformazione. Una volta convertite le coordinate cartografiche da Gauss-Boaga a UTM-ETRF2000, i vari shapefile sono stati inseriti in ArcMap.

Poiché non è stato possibile trasformare le coordinate della CTR tramite il software Convergo, questa è stata georeferenziata all'interno di ArcMap mediante il comando "Georeferencing" attraverso l'assegnazione di *Control point*.

3.1.2.2. Definizione delle proiezioni

Attraverso il comando del toolbox "Projection and trasformation – Define projection" sono state definite le proiezioni in WGS 1984 UTM fuso 33N.

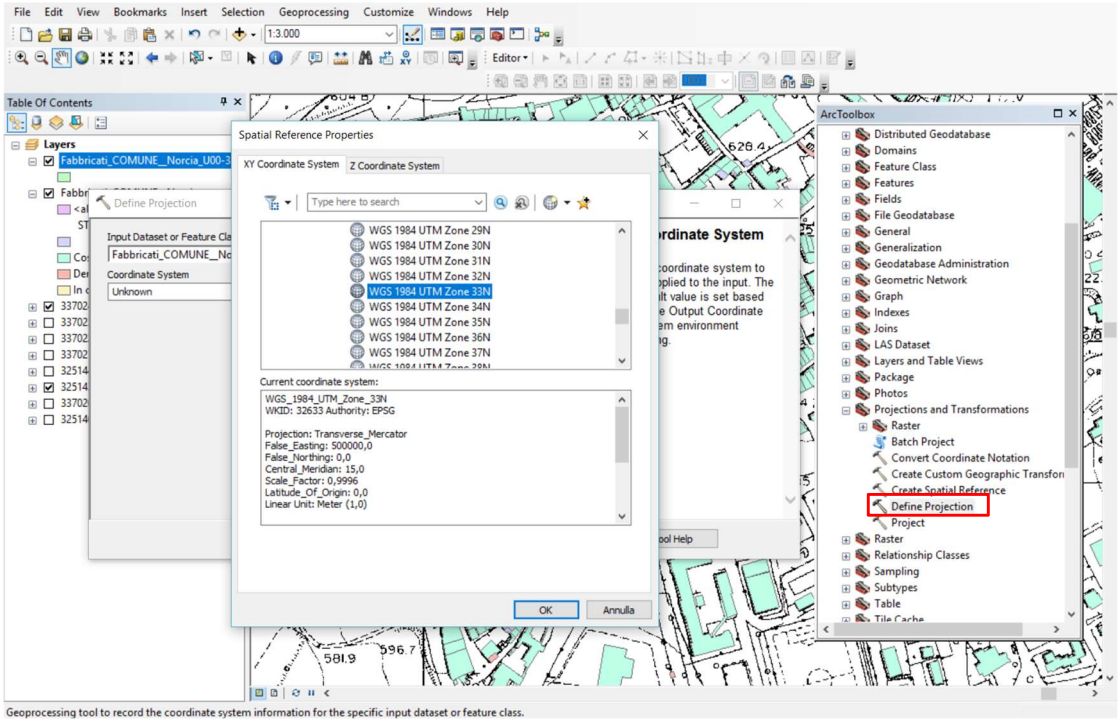


Figura 98 - Definizione delle proiezioni.

A questo punto in basso a destra apparirà l'indicazione corretta delle coordinate e l'unità di misura.

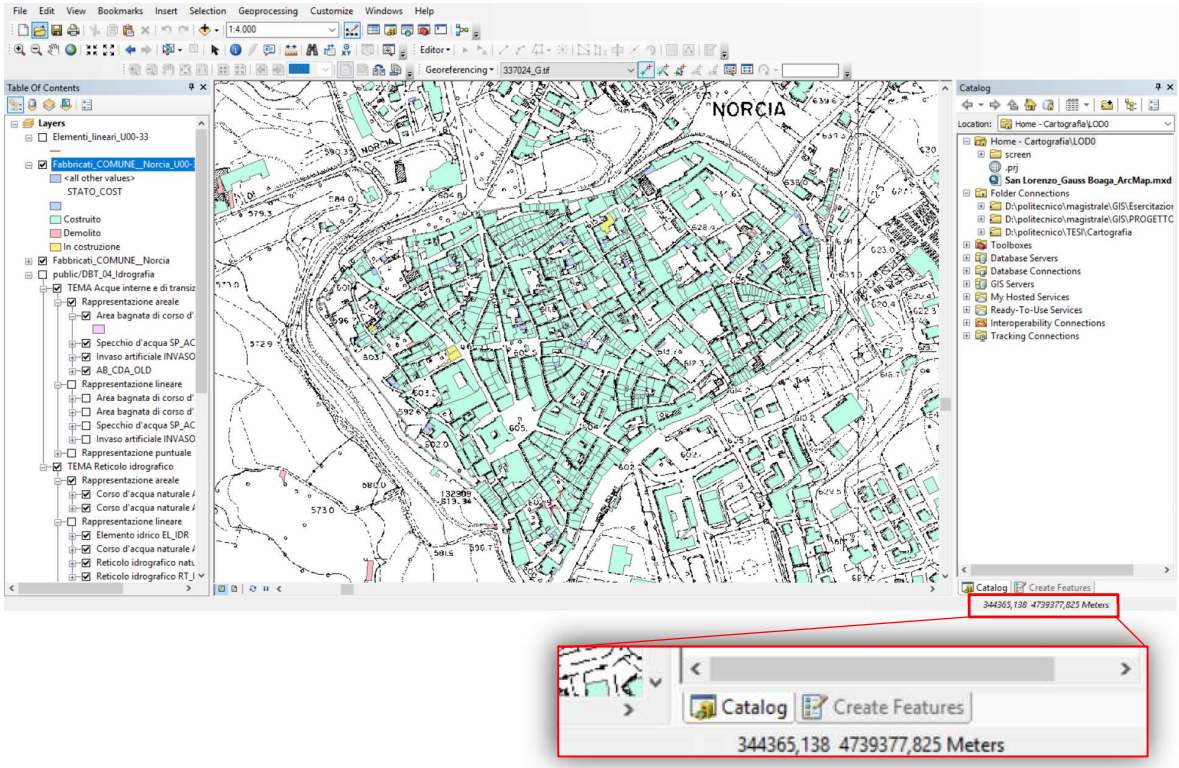


Figura 99 - Indicazione delle coordinate e dell'unità di misura.

3.1.2.3. Creazione di tematismi

È possibile assegnare agli *shapefile* delle informazioni, inserendole nella "Tabella degli attributi". In questo caso i file forniti dal geoportale possedevano già l'attributo "stato di costruzione" risalenti a un rilievo effettuato nel 2009. Modificando la "Simbologia" nelle proprietà del *layer*, gli edifici sono stati classificati in base a tale stato di costruzione: in rosso quelli demoliti, in verde quelli costruiti, in giallo quelli in costruzione.

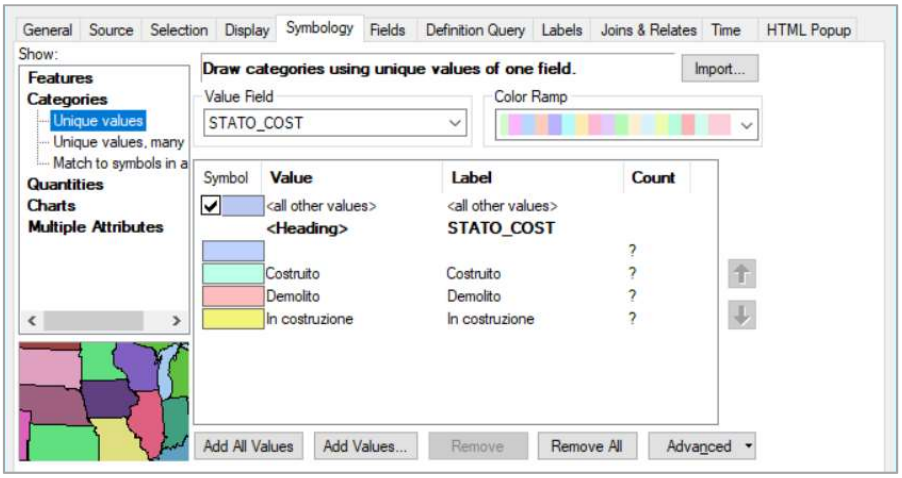


Figura 100 - Visualizzazione per Categorie.

3.2. LOD1 – Modello della città

Il LOD1 prevede la creazione di un Sistema Informativo Territoriale 3D. Con esso si intende un modello a blocchi, senza le strutture dei tetti.

3.2.1. Schema CityGML

Lo schema di CityGML [*Figura 101*] prevede l'introduzione di geometrie solide.

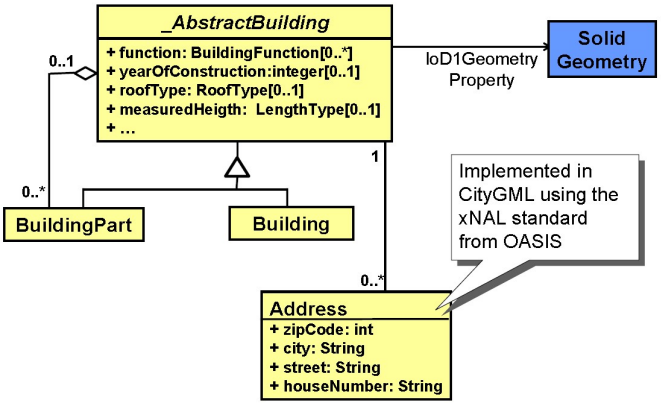


Figura 101 - Diagramma UML del modello in loD1. (Fonte: T. H. Kolbe - CityGML Tutorial)

3.2.2. Realizzazione del LOD1 in ArcScene

Il tipo di geometria proposto da CityGML per il LOD1 è stato ottenuto inserendo i dati scaricati dal Geoportale della regione Umbria in ArcScene. Esso è l'applicazione per la rappresentazione del dato in modalità 3D. L'elevazione degli edifici viene assegnata modificando "Estrusione" nelle proprietà del *layer*. Poiché lo *shapefile* era in possesso dell'attributo "numero di piani" per creare l'estrusione è stata utilizzata l'espressione:

Estrusione = numero di piani * 3 m

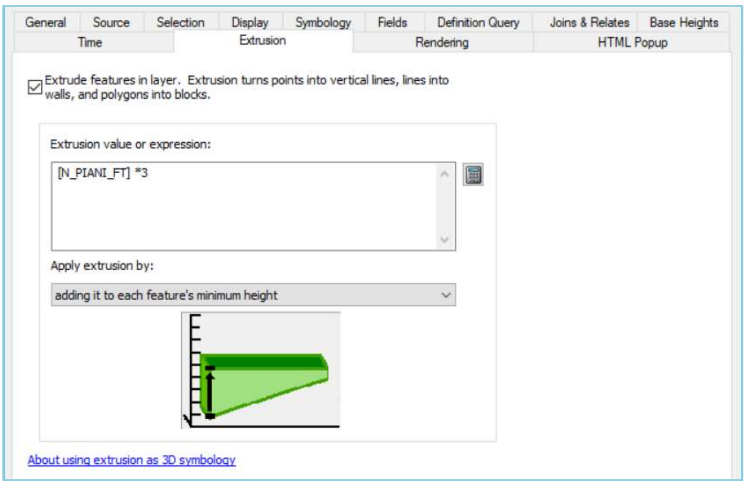


Figura 102 - Impostazione dell'estrusione degli edifici.

Si riporta di seguito una visualizzazione del modello tridimensionale ottenuto:

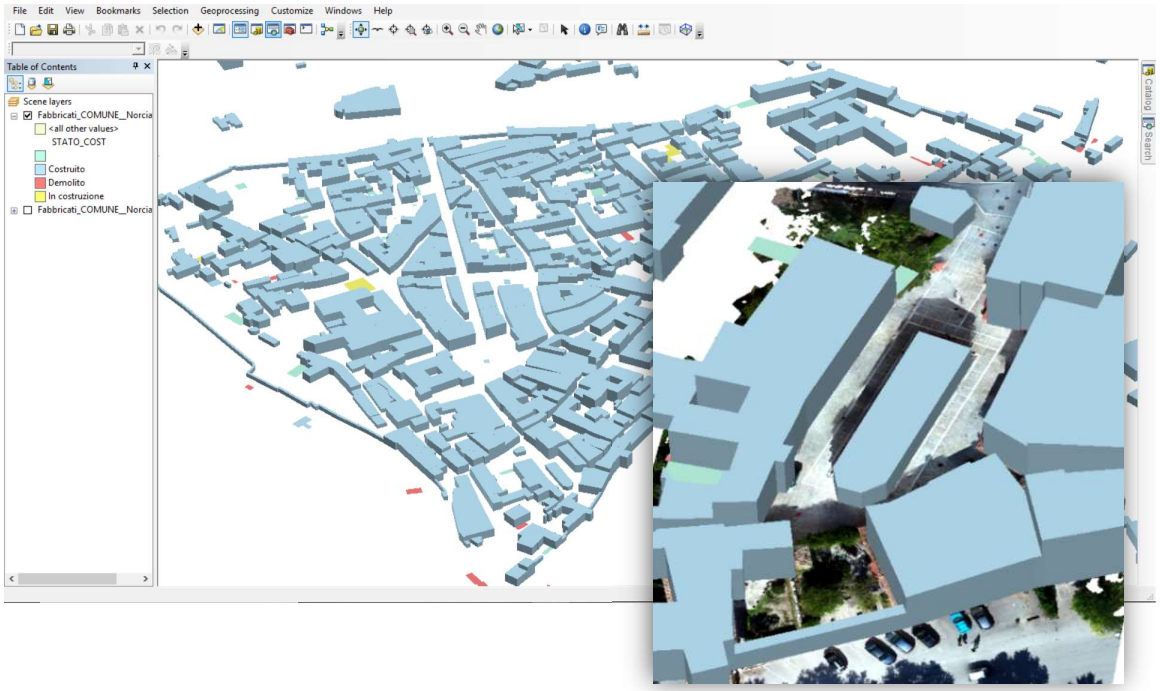


Figura 103 - LOD1 della città di Norcia. A destra zoom sulla chiesa di San Lorenzo.

3.3. LOD2 – Modello del sito

Il LOD2 prevede la realizzazione di un modello *texturizzato*, con strutture dei tetti differenziate. Nel caso in esame è stato sufficiente modellare la sola chiesa oggetto di studio senza estendersi alle strutture vicine.

3.3.1. Schema CityGML

Lo schema proposto da CityGML aggiunge alle informazioni sulle geometrie solide presenti nel LOD1, le informazioni riguardanti le superfici. Si ottiene così la suddivisione in tetti e muri.

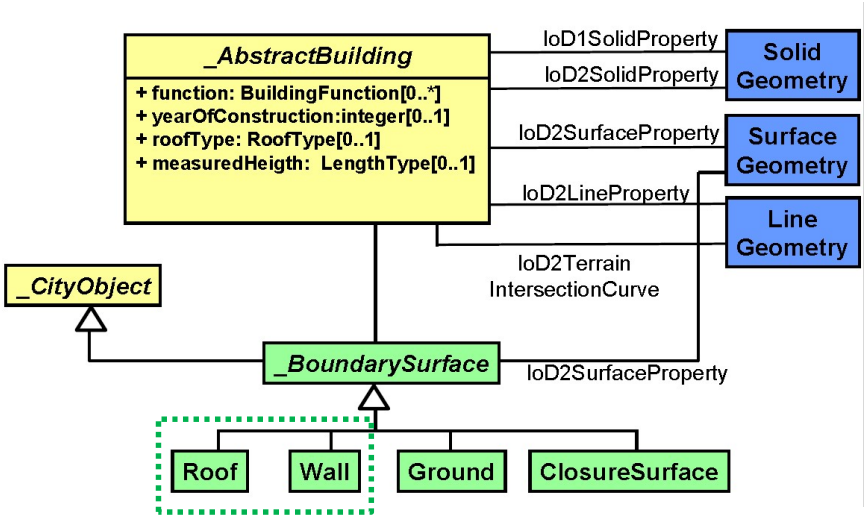


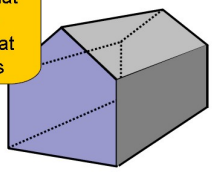
Figura 104 - Diagramma UML del modello in loD2: in giallo loD1, in verde loD2.
(Fonte: T. H. Kolbe - CityGML Tutorial)

Si riporta di seguito un esempio di scrittura secondo il codice CityGML:

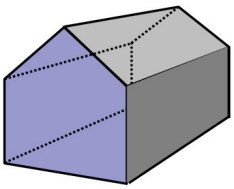
```
...
  <Building gml:id="Building0815">
      <gml:name>My nice building</gml:name>
      <externalReference>
          <informationSystem>http://www.adv-online.de</informationSystem>
          <externalObject>
              <uri>urn:adv:oid:DEHE123400007001</uri>
          </externalObject>
      </externalReference>
      <function>1012</function>
      <yearOfConstruction>1985</yearOfConstruction>
      <roofType>3100</roofType>
      <measuredHeight uom="m">8.0</measuredHeight>
      <lod2Solid>
          <!-- geometry (for Level of Detail 2) see next slide -->
      </lod2Solid>
  </Building>
...
```

```
<!– continued from previous slide –>
<lod2Solid>
    <gml:Solid gml:id="solid0815" >
        <gml:exterior>
            <gml:CompositeSurface>
                <gml:surfaceMember>
                    <gml:Polygon gml:id="polygon4711">
                        <gml:exterior>
                            <gml:LinearRing>
                                <gml:pos> 5660398.399  2562509.711  41.79 </gml:pos>
                                <gml:pos> 5660402.019  2562514.546  41.79 </gml:pos>
                                ..........................
                            </gml:LinearRing>
                        </gml:exterior>
                    </gml:Polygon>
                <gml:surfaceMember>
        <!– further surfaces of the solid; closing tags omitted due to limited space –>
</lod2Solid>
```

Please note that geometries are objects that can have IDs



```
<Building gml:id="Building0815">
  <lod2Solid>
      <gml:Solid>
          <gml:exterior>
              <gml:CompositeSurface>
                  <gml:surfaceMember>
                      <!– front surface as in
                          previous slide –>
                  </gml:surfaceMember>
                  <gml:surfaceMember>
                      <!– side surface –>
                  </gml:surfaceMember>
                      <!– here come side, back, roof, and ground surfaces –>
              </gml:CompositeSurface>
          </gml:exterior>
      </gml:Solid>
  </lod2Solid>
</Building>
```



3.3.2. Realizzazione del LOD2 in Autodesk Revit

Il tipo di geometria previsto per il LOD2 è stato ottenuto mediante l'uso di Autodesk Revit. Esso è un software *BIM oriented* per la creazione di modelli 3D parametrici che generano geometrie con informazioni incorporate per la progettazione di edifici e infrastrutture. Infatti, i disegni creati con Revit non sono una raccolta di linee e forme 2D da interpretare per creare un edificio, bensì viste estratte da modelli virtuali dell'edificio. Inoltre, questi modelli non contengono solo attributi geometrici ma anche dati che informano sulle decisioni prese sull'edificio in ogni fase del processo, inclusa l'occupazione. A partire da questi modelli intelligenti possono quindi essere derivati piante, sezioni, prospetti, prospettive, dettagli, abachi dei contenuti, informazioni sui costi e sui tempi e analisi delle strutture.

3.3.2.1. Realizzazione del modello BIM

Come base per la realizzazione del modello in Revit sono state utilizzate le planimetrie e i prospetti forniti gentilmente dall'ing. Walter Maneri, che si è occupato della messa in sicurezza della chiesa in seguito al terremoto del 2016.

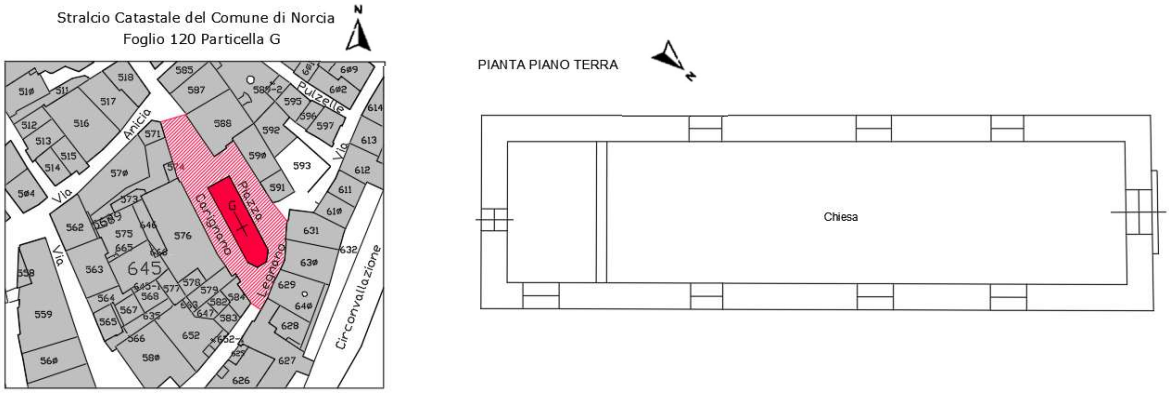


Figura 105 – Planimetrie: a sinistra stralcio catastale foglio 120 particella G, a destra pianta piano terra.

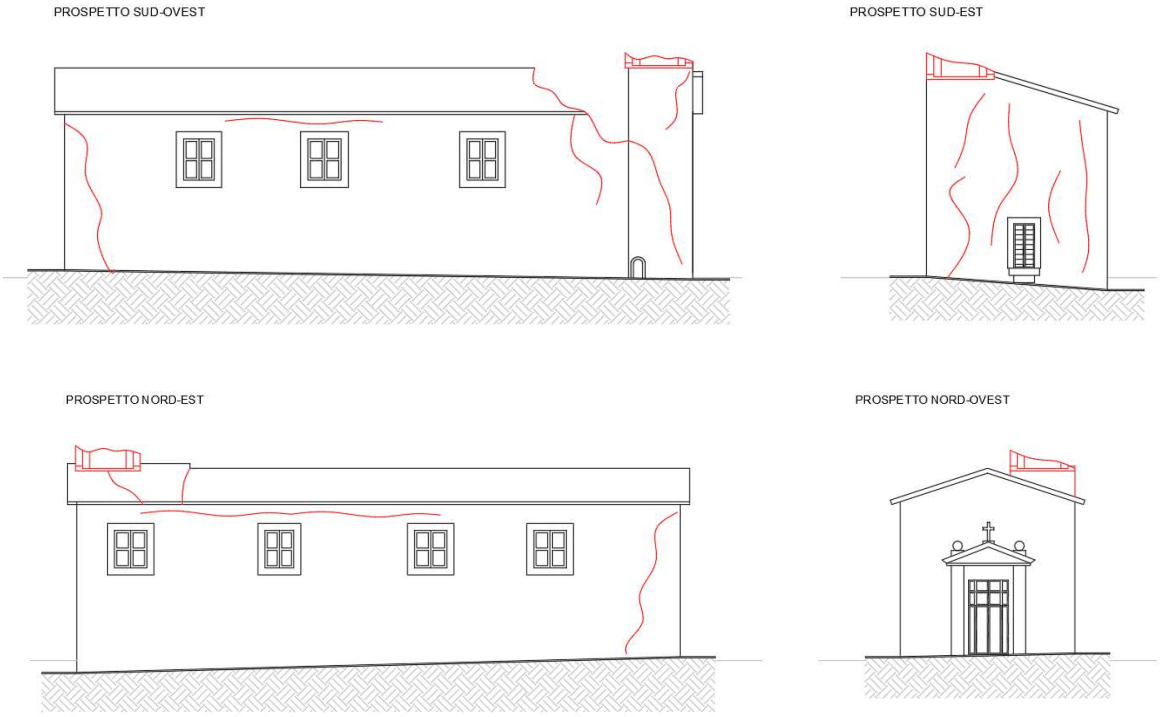


Figura 106 – Prospetti con quadro fessurativo:
in alto a sinistra prospetto S-O, in alto a destra prospetto S-E, in basso a sinistra prospetto N-E, in basso a destra prospetto N-O.

Una volta in possesso di piante e prospetti è stato sufficiente quotarle per avere un'indicazione sulle dimensioni dei volumi. Utilizzando le famiglie dei muri e dei tetti fornite da Revit è stato pertanto possibile realizzare un volume generico con le dimensioni della chiesa [*Figura 107*].

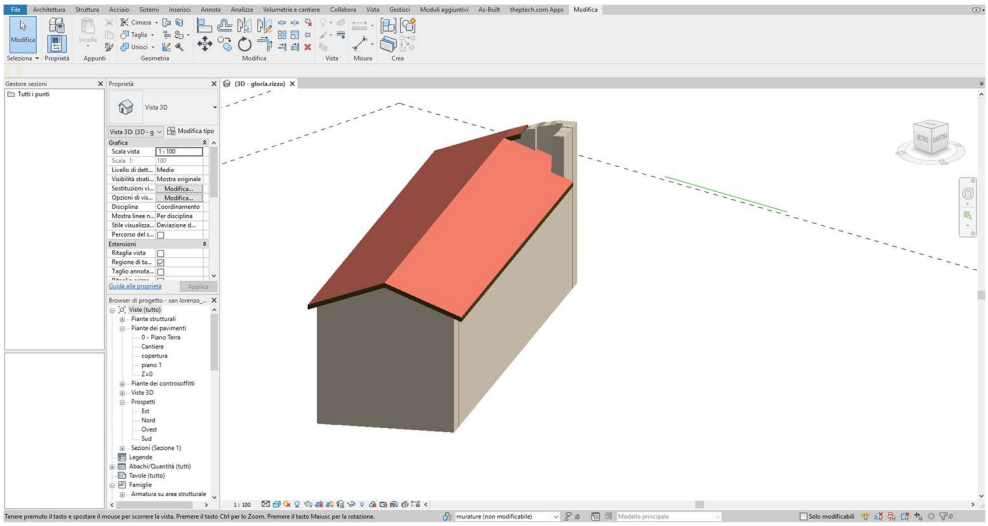


Figura 107 - Modello della chiesa di San Lorenzo in loD2.

3.4. LOD3 – Modello dell'edificio

Il LOD3 prevede la realizzazione di un modello architettonico dettagliato.

3.4.1. Schema CityGML

Lo schema di CityGML per il LOD3 prevede l'inserimento di oggetti, quali porte e finestre [*Figura 108*].

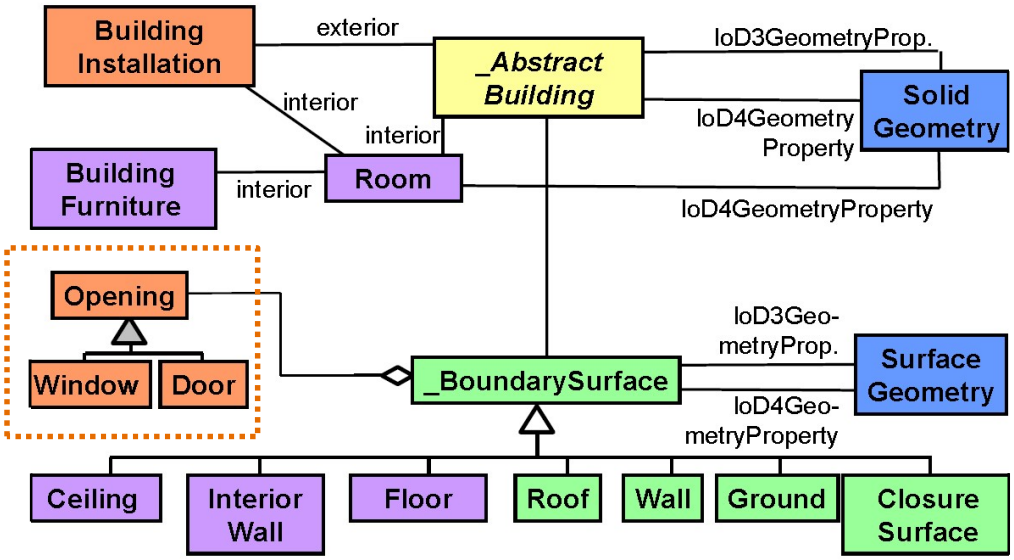


Figura 108 - Diagramma del LOD3: in giallo LOD0, in verde LOD2, in arancio LOD3, in viola LOD4.

Tutti gli oggetti, come porte e finestre, hanno una loro identità e possono essere scomposti in base alle loro caratteristiche geometriche in geometrie primitive, composte e aggregate.

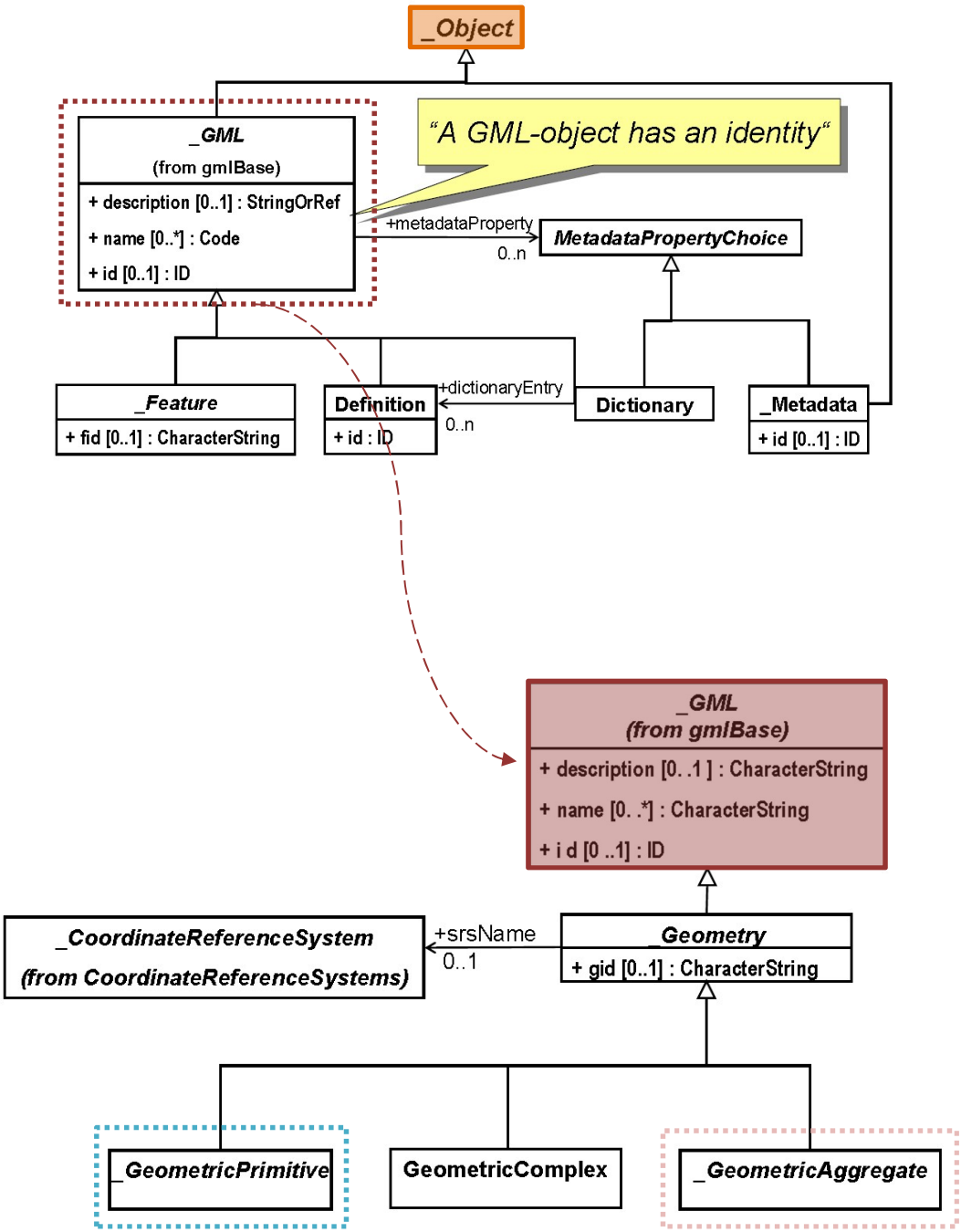


Figura 109 - Classificazione delle geometrie di un GML-Object.

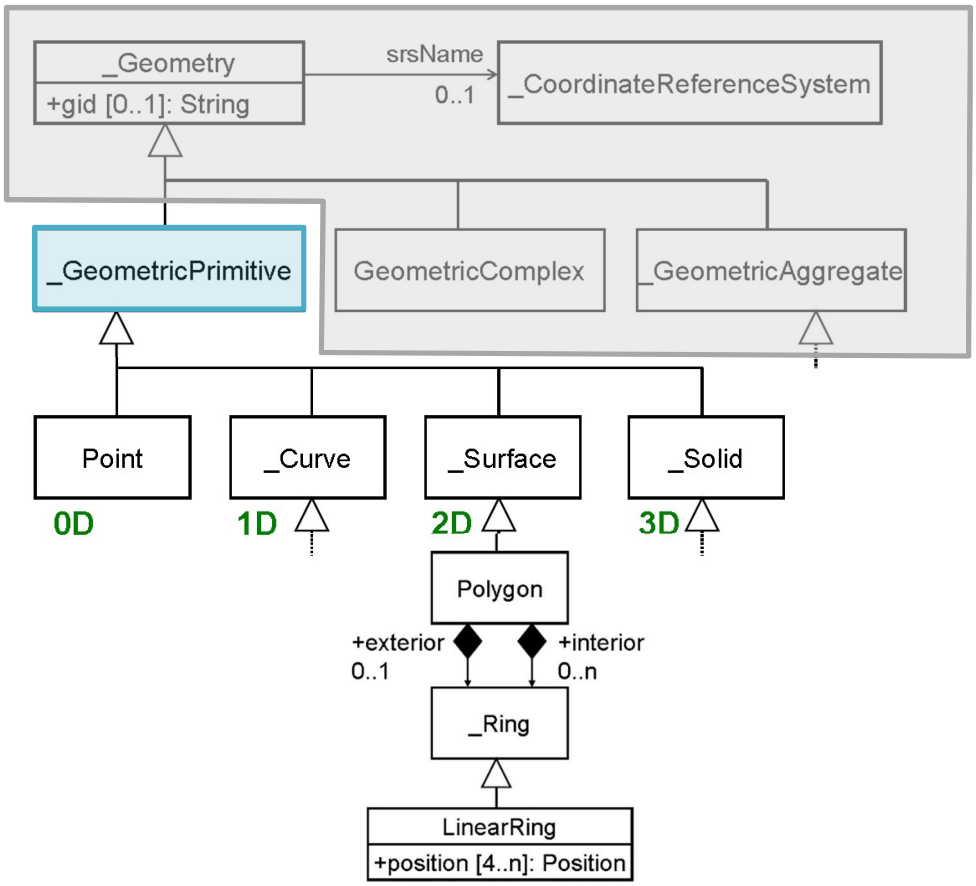


Figura 110 – Zoom su geometrie primitive.

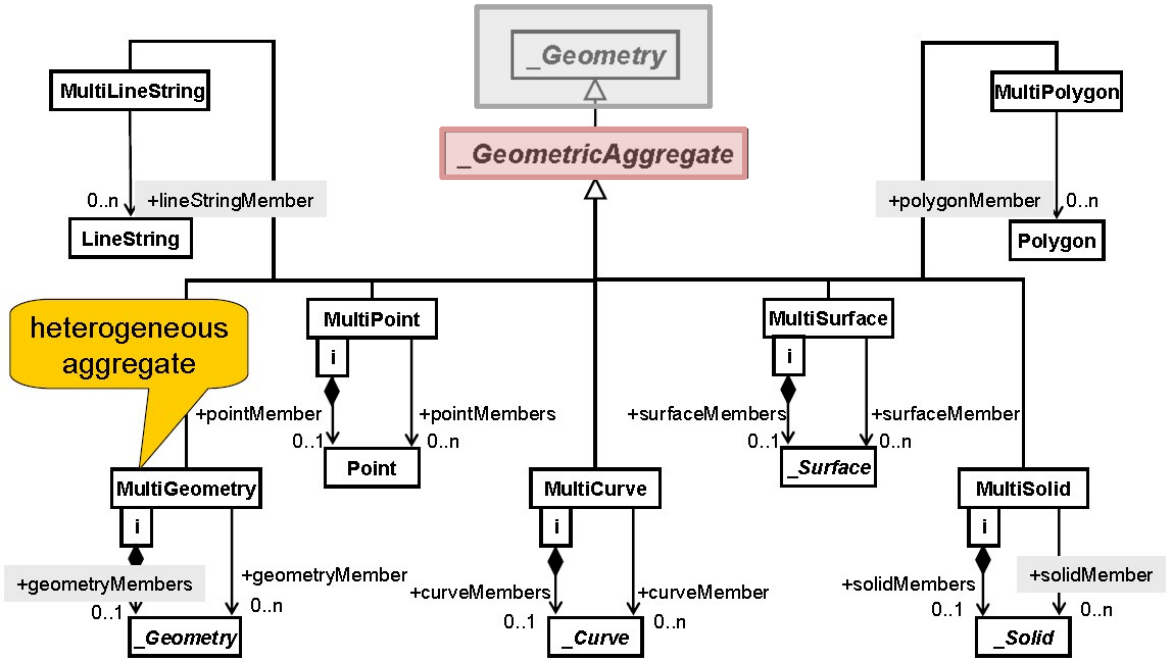


Figura 111 – Zoom su geometrie aggregate.

3.4.2. Realizzazione del LOD3 in Autodesk Revit

Il tipo di geometria previsto da CityGML per il LOD3 è stato ottenuto mediante il software *object oriented* Autodesk Revit (si veda *Cap.4.3.2: Autodesk Revit*). Inoltre, per realizzare un modello che rispettasse il manufatto reale, la modellazione in Revit è stata effettuata sulla base della nuvola di punti ottenuta tramite tecnica fotogrammetrica (Si veda *Cap.3: Elaborazione dei dati*).

3.4.2.1. Segmentazione della nuvola di punti: Autodesk ReCap Pro

Per facilitare la modellazione in Revit si è deciso di segmentare la nuvola di punti mediante l'uso di Autodesk ReCap Pro. Esso è un software che permette la segmentazione di nuvole di punti in regioni e la loro esportazione in vari formati. Si ottiene quindi un prodotto finale pronto per il BIM.

In questo caso, si è deciso di realizzare tre regioni: la copertura, le murature e la messa in sicurezza. Questa scelta è dovuta al fatto che lo spegnimento del tetto facilita la modellazione dei muri nel loro spessore, mentre spegnendo la messa in sicurezza si può visualizzare la chiesa senza ulteriori elementi estranei aggiunti.

Si riportano a titolo esemplificativo i passaggi che sono stati eseguiti per segmentare il tetto. Allo stesso modo la procedura è stata utilizzata anche per la messa in sicurezza e le murature.

Per prima cosa tramite il comando di selezione libera **"Fence"** è stato tracciato un poligono che racchiudesse al suo interno la copertura.

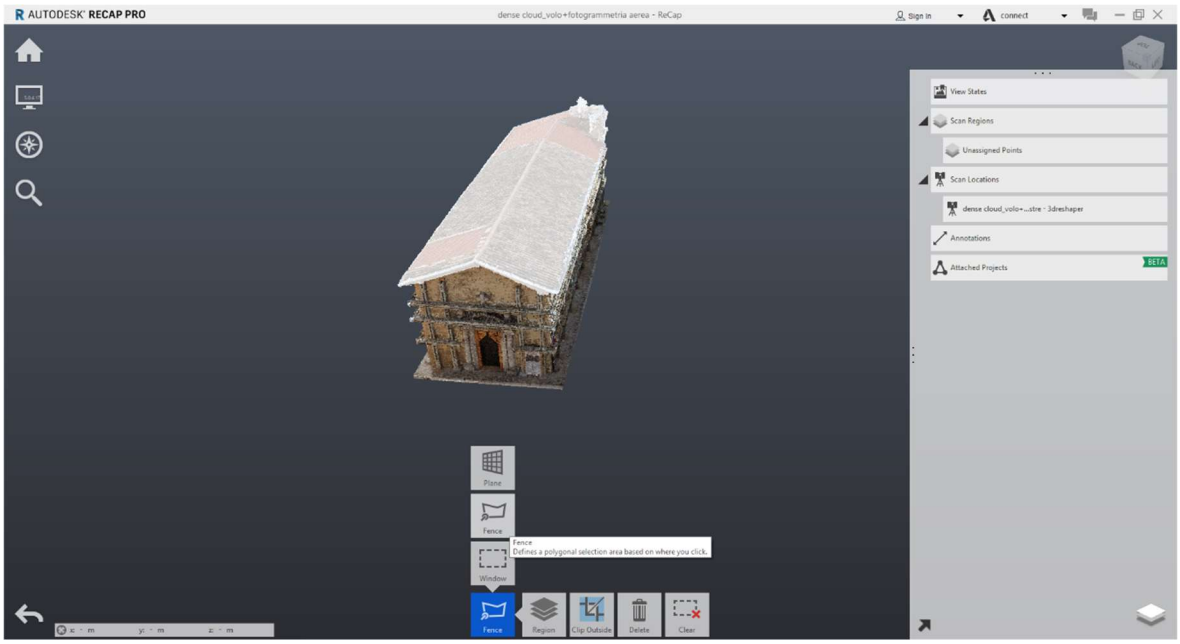


Figura 112 - Comando Fence.

Durante questa operazione però vengono inclusi nella selezione anche i punti che si trovano dietro, pertanto il passaggio successivo è stato quello di isolare l'area selezionata tramite il comando **"Clip outside"**.

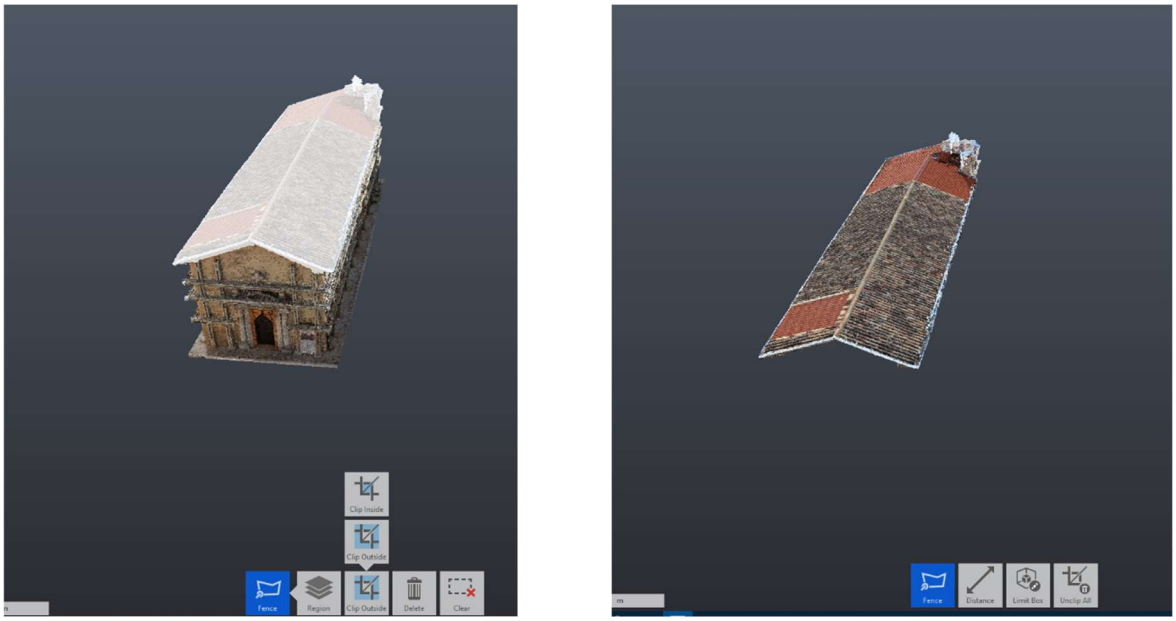


Figura 113 - Comando Clip Outside.

A questo punto ruotando l'elemento nella vista più comoda sono stati selezionati i punti da escludere dall'area isolata e sono stati reinseriti tra gli "Unassigned point", ovvero i punti non classificati ancora in nessuna regione, attraverso il comando **"Clip Inside"**.

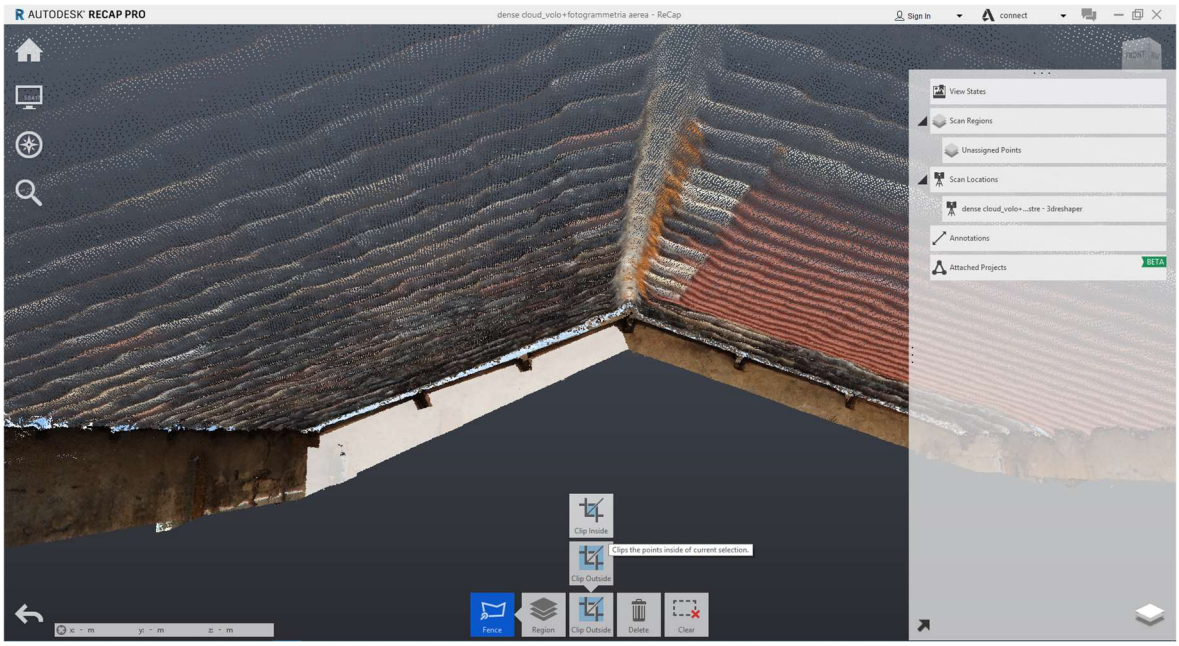


Figura 114 - Comando Clip Inside.

Una volta rimasti i soli punti desiderati, è possibile classificarli in una regione. Per farlo è necessario selezionarli tramite il comando "Fence/Window" e cliccare su **"Region – New region"**.

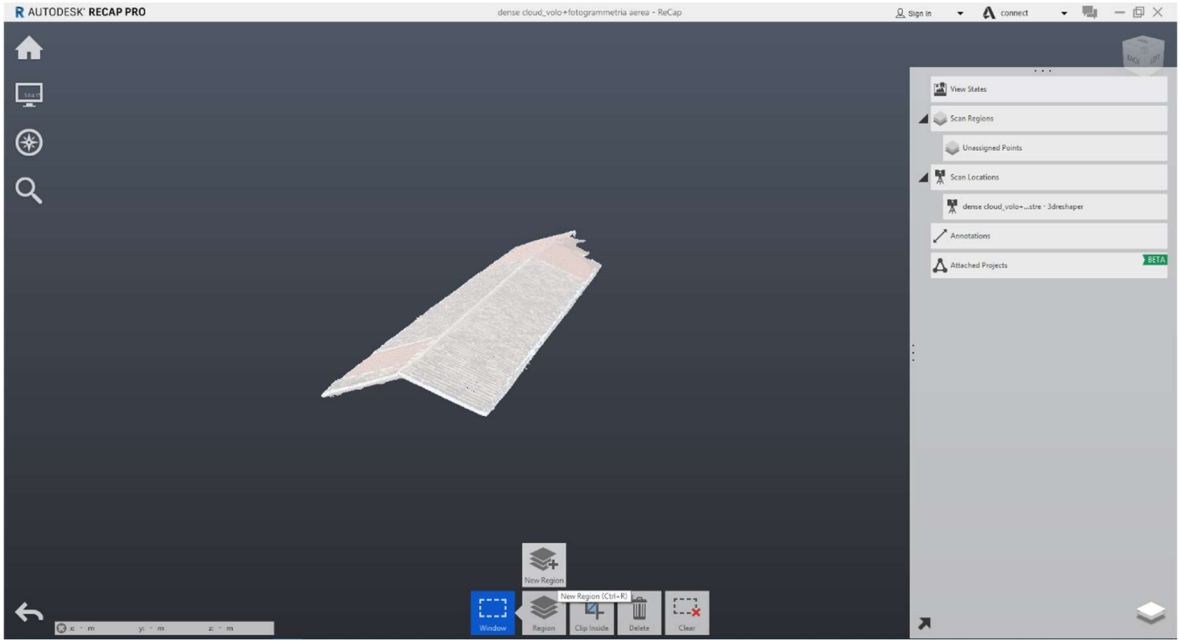


Figura 115 - Comando New Region.

Ritornando tra i punti non classificati e selezionando “Unclip all” è possibile ricominciare per ritagliare le altre regioni di punti.

Figura 116 - Regioni: Copertura, murature e messa in sicurezza.

Queste regioni sono state poi esportate come singole nuvole in formato .rcp in quanto supportato da Revit.

3.4.2.2. Creazione dei workset

In ambiente Revit si è deciso di creare un modello centrale e lavorare per *workset.* Questa metodologia, nel BIM, consente a più utenti di lavorare a un file condiviso, al quale collaborano individualmente mediante dei modelli locali.

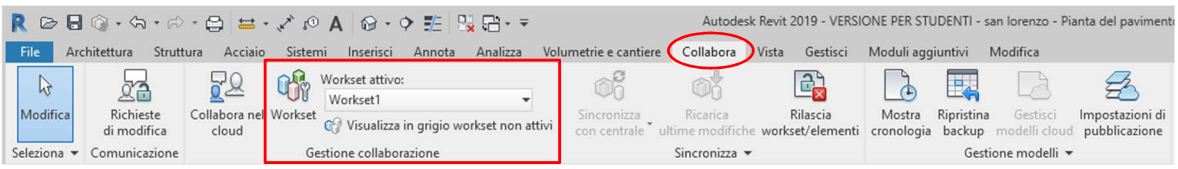


Figura 117 – Sezione "Collabora".

In questo caso però i *workset* sono stati utilizzati in modo differente, ovvero sono stati attivati durante la modellazione per suddividere le varie parti del modello in *layer*.

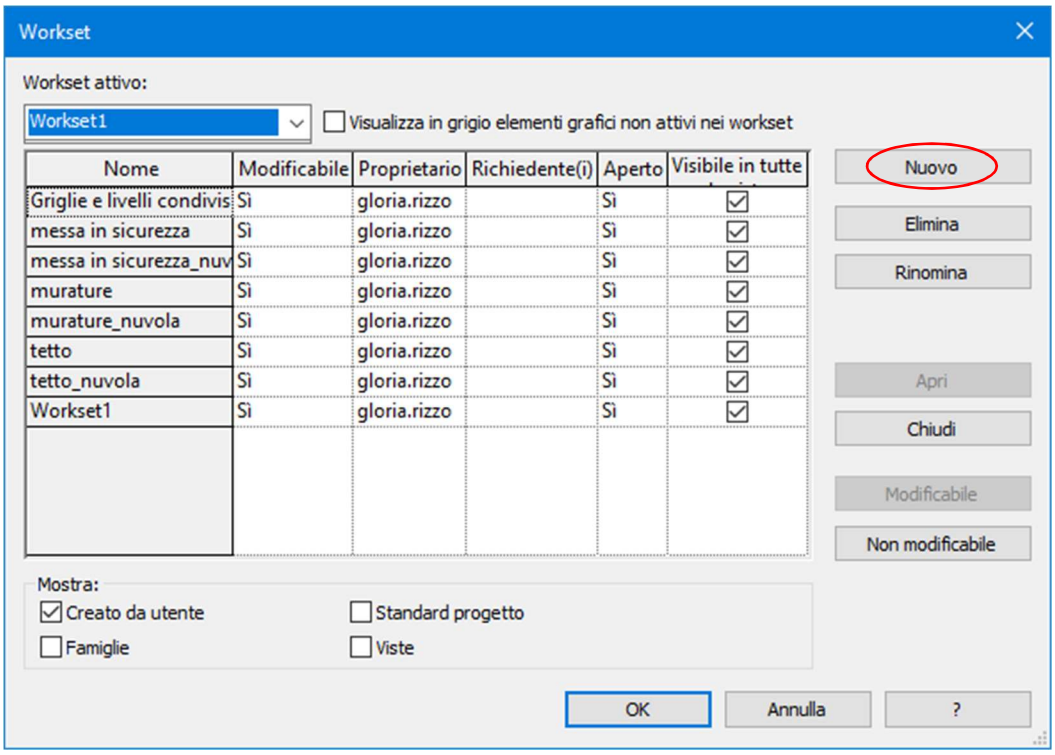


Figura 118 - Creazione workset.

3.4.2.3. Importazione nuvola di punti

Affinché il modello Revit della chiesa avesse precisione più alta possibile e fosse orientato in modo corretto, è stato costruito sulla base della nuvola di punti, precedentemente segmentata con Autodesk ReCap ed esportata in formato *.rcp*. Prima di inserire la nuvola di punti è stato inoltre necessario

troncare le coordinate (si veda *Cap.3.5.1.1*), altrimenti si è troppo lontani dal centro di progetto e non è possibile lavorare nel workspace.

Per inserire le nuvole di punti segmentate è stato utilizzato il comando "Inserisci – Nuvola di punti". Durante questa operazione è necessario impostare correttamente il parametro *Posizionamento*: per la prima nuvola va impostato in "da origine a origine", mentre per le successive in "da origine a ultimo posizionamento", in modo da mantenere un sistema di riferimento locale.

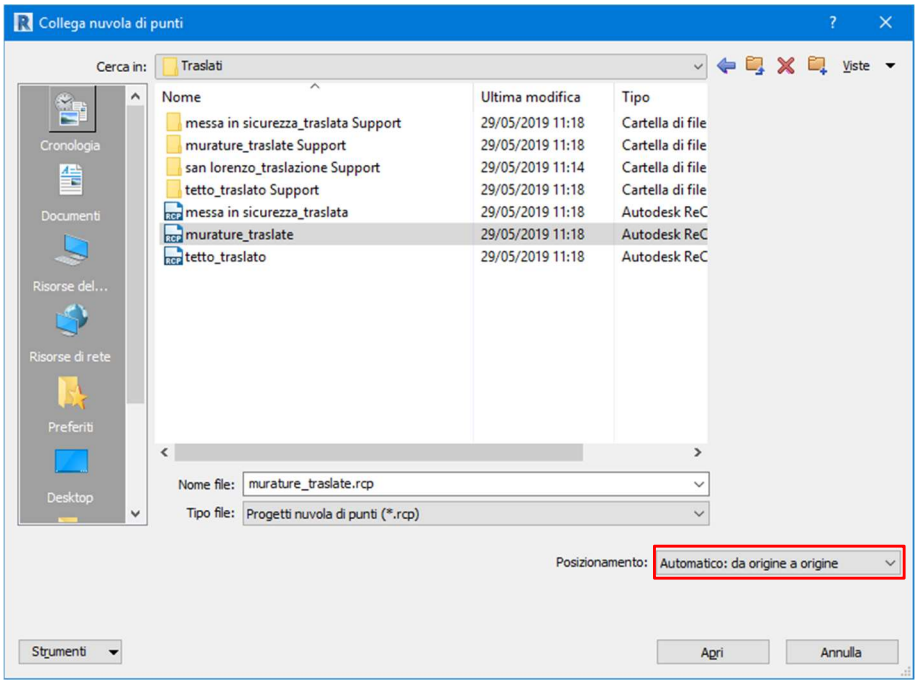


Figura 119 - Importazione della prima nuvola con posizionamento "da origine a origine".

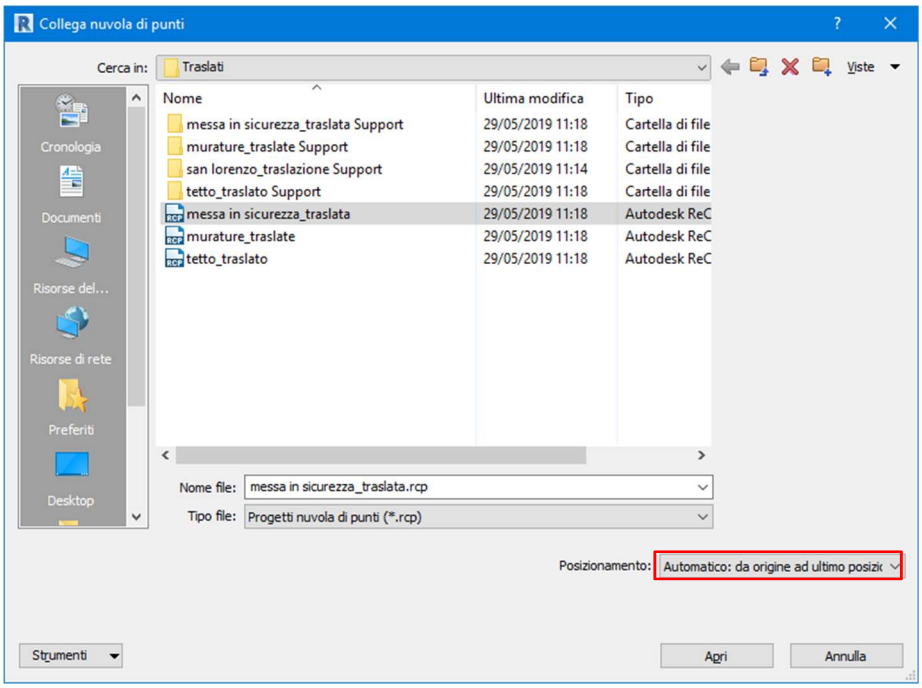


Figura 120 - Importazione delle altre nuvole con posizionamento "da origine a ultimo posizionamento"

Una volta inserita la nuvola, essa è stata utilizzata come base per la modellazione digitale della chiesa. In base alle esigenze può risultare utile disabilitare la visibilità di una particolare regione nella tabella "Sostituzioni visibilità grafica" sotto la sezione "Nuvole di punti".

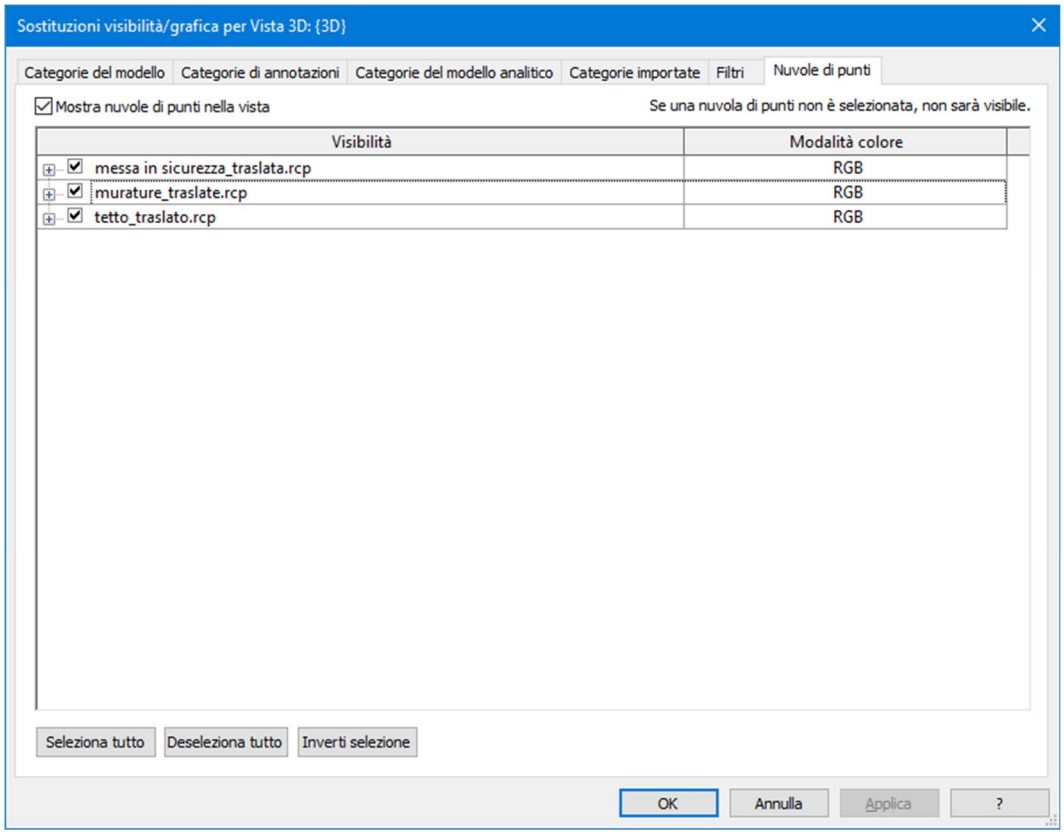


Figura 121 - Visibilità Grafica.

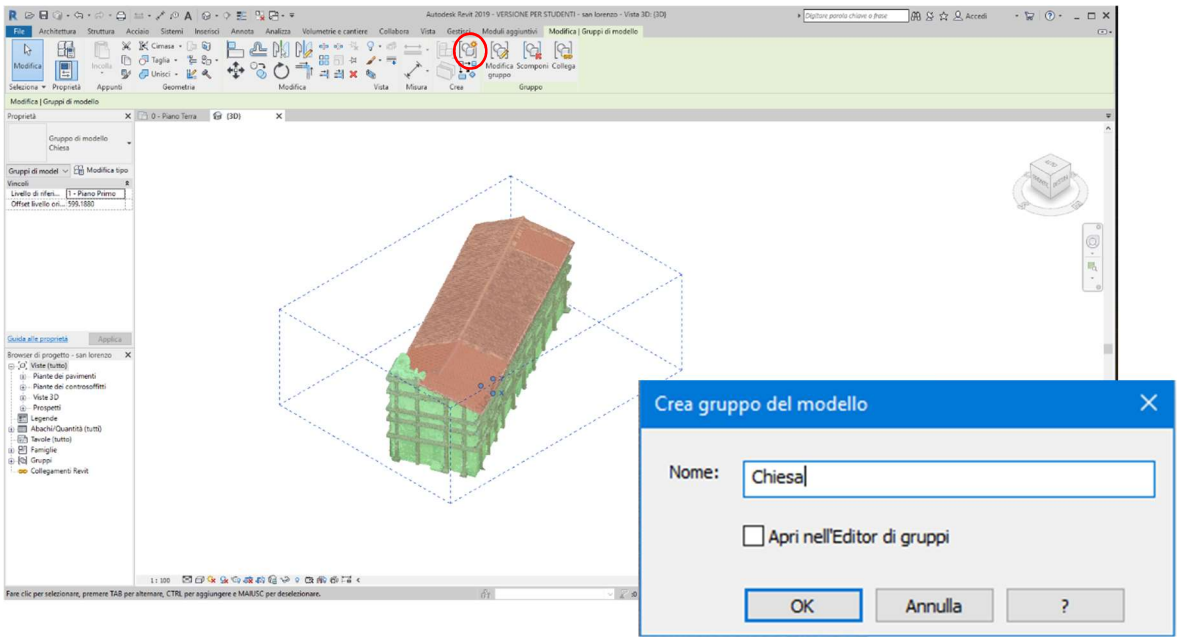


Figura 122 - Creazione Gruppo Chiesa.

3.4.2.4. Modellazione della chiesa

Prima di cominciare è necessario fare un'osservazione. La nuvola di punti che è stata inserita su Revit è georeferita, possiede quindi in modo intrinseco le coordinate x, y e z. Questo implica che il suo posizionamento non coincide con quello del Piano Terra, utilizzato come livello di riferimento per vincolare i muri e gli altri elementi. Pertanto si è ritenuto opportuno spostare il livello di riferimento all'altezza della nuvola e creare un livello z = 0 per poter misurare la quota oltre all'altezza rispetto al piano di campagna. Un'ulteriore difficoltà è sopraggiunta in quanto il piano di campagna era in realtà inclinato, dunque è stato creato un piano di riferimento inclinato in modo da potergli associare in seguito le murature.
Per modellare la copertura è necessario spostarsi nella vista 3D con visuale dall'alto. A questo punto tramite il comando "Architettura – tetto" è possibile tracciare il profilo e modificare gli elementi secondari per tracciare le falde e assegnare un'altezza ai punti.
Per modellare le murature è stato duplicato un muro generico per crearne uno personalizzato con le misure desiderate. Inoltre, essendo presente un campanile crollato, è stato necessario modificare il profilo del muro per modificarne l'andamento. Per effettuare questa operazione è sufficiente spostarsi in un prospetto e fare un doppio click sul muro. Apparirà quindi solo il profilo di colore rosa, come per il caso della copertura, che è possibile modificare grazie a linee, polilinee e spline.

La modellazione dei serramenti ha richiesto la creazione di "Famiglie" che sono state poi caricate nel progetto come componenti. Per realizzare le varie forme è possibile utilizzare i seguenti strumenti:

- *Estrusione*: permette di disegnare la faccia di un parallelepipedo che può essere allungato o accorciato in base alla misura necessaria;
- *Unione*: Permette di disegnare entrambe le basi del parallelepipedo, anche di forme diverse, e le unisce in modo automatico;
- *Rivoluzione*: consiste nel disegnare un profilo e ruotarlo di 360° rispetto ad un asse;
- *Estrusione su percorso*: Consiste nel tracciare la forma di un profilo da estrudere lungo un percorso desiderato. Probabilmente è stato il più utile tra tutti gli strumenti messi a disposizione dal software;
- *Vuoti*: consente di realizzare dei solidi di sottrazione utilizzando gli strumenti precedentemente illustrati.

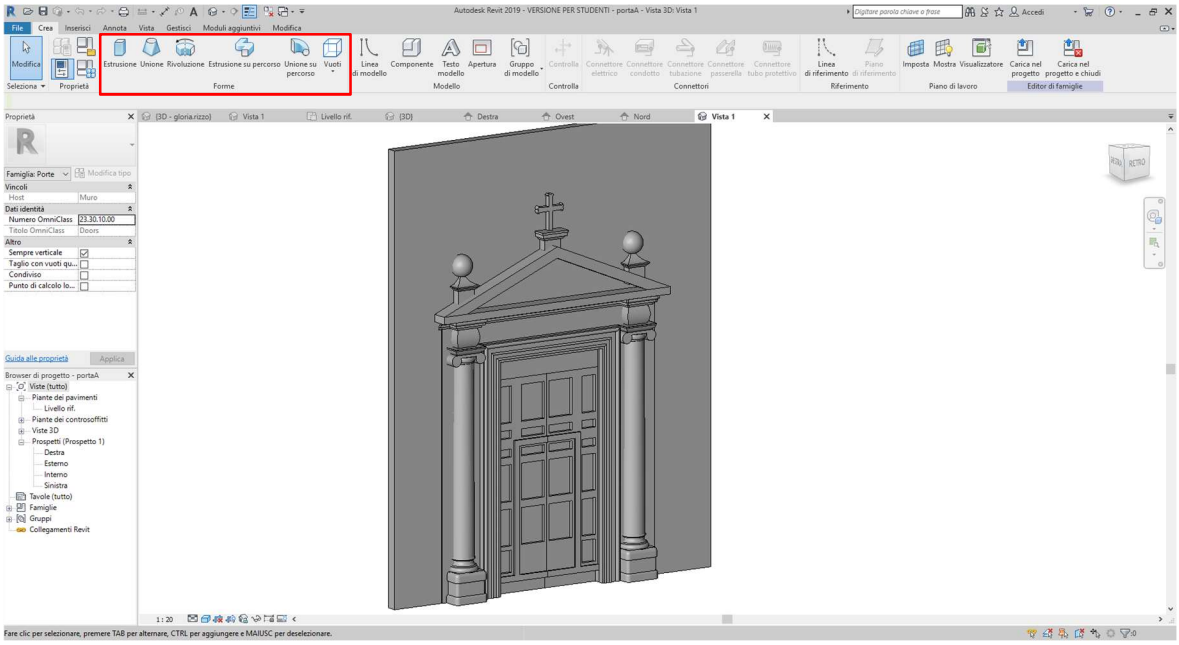


Figura 123 - Famiglia "Porta A", vista 3D.

3.4.2.5. Modellazione della messa in sicurezza

Per mostrare come si è intervenuti sulla chiesa, sono state modellate anche le messe in sicurezza di porte, finestre e murature. Anche in questo caso, come per i serramenti, sono state create separatamente delle famiglie che sono state poi caricate nel progetto.

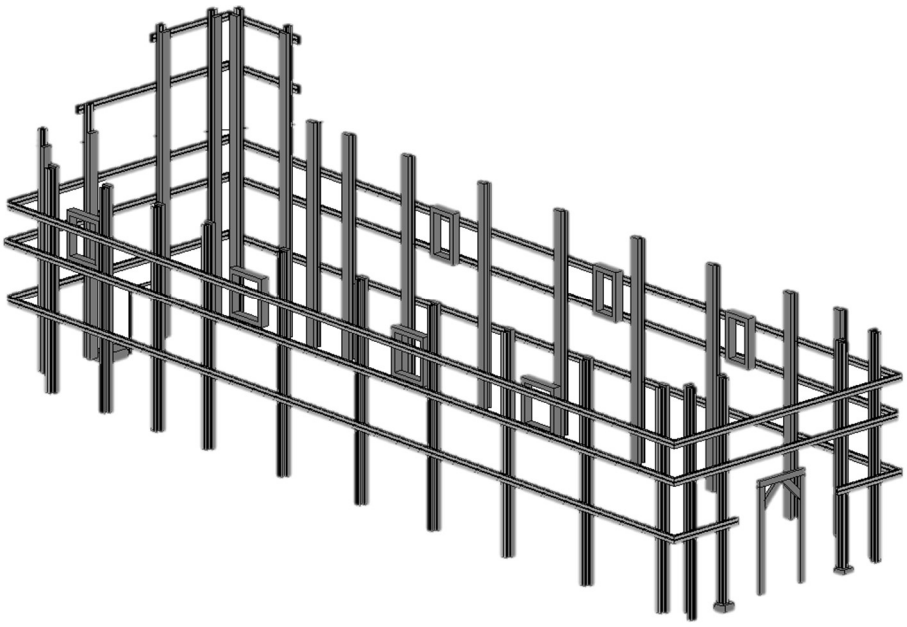


Figura 124 - Modellazione messa in sicurezza.

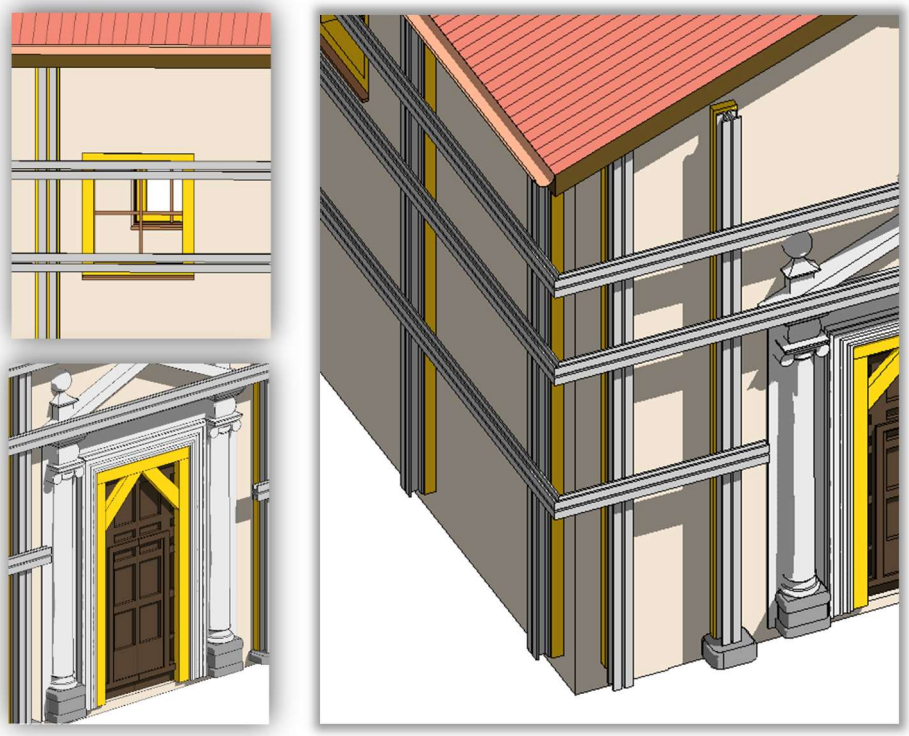


Figura 125 – Modellazione in alto a sinistra messa in sicurezza delle finestre, in basso a sinistra messa in sicurezza della porta, a destra messa in sicurezza delle pareti.

3.4.2.6. Assegnazione dei materiali

Alla fine della modellazione l'aspetto della struttura è quello che è possibile vedere in *Figura*. Questo è dovuto al fatto che quando si modella in Revit inizialmente si utilizzano degli elementi "Generici" ai quali sono assegnati dei materiali di default.

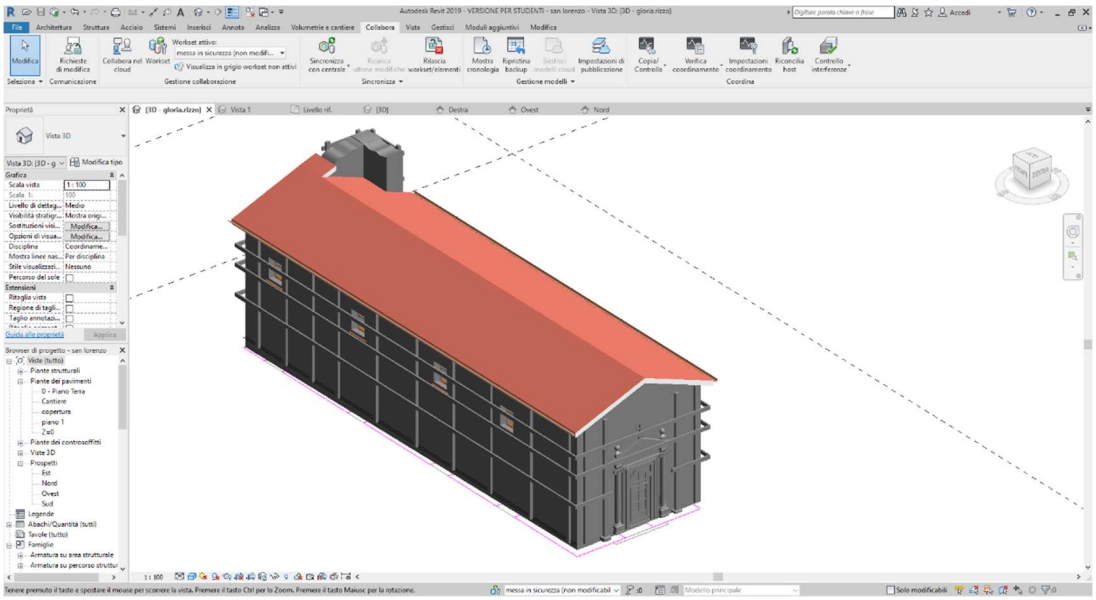


Figura 126 - Modello 3D della Chiesa di San Lorenzo con materiali di default, Vista 3D.

È possibile assegnare i materiali agli elementi del modello selezionando “Modifica tipo – Struttura - materiale”. Per le estrusioni invece si può cliccare su “Gestisci – Materiali” oppure più semplicemente è possibile selezionarle e sulla sinistra apparirà la voce “Materiali e finiture”.
In tutti i casi si aprirà il *Browser dei materiali*. È possibile assegnare uno dei materiali presenti nella libreria o crearne di nuovi. Se si sceglie la seconda opzione, come nel mio caso, si può assegnare un nome al nuovo materiale e caratteristiche di identità, grafica e aspetto.

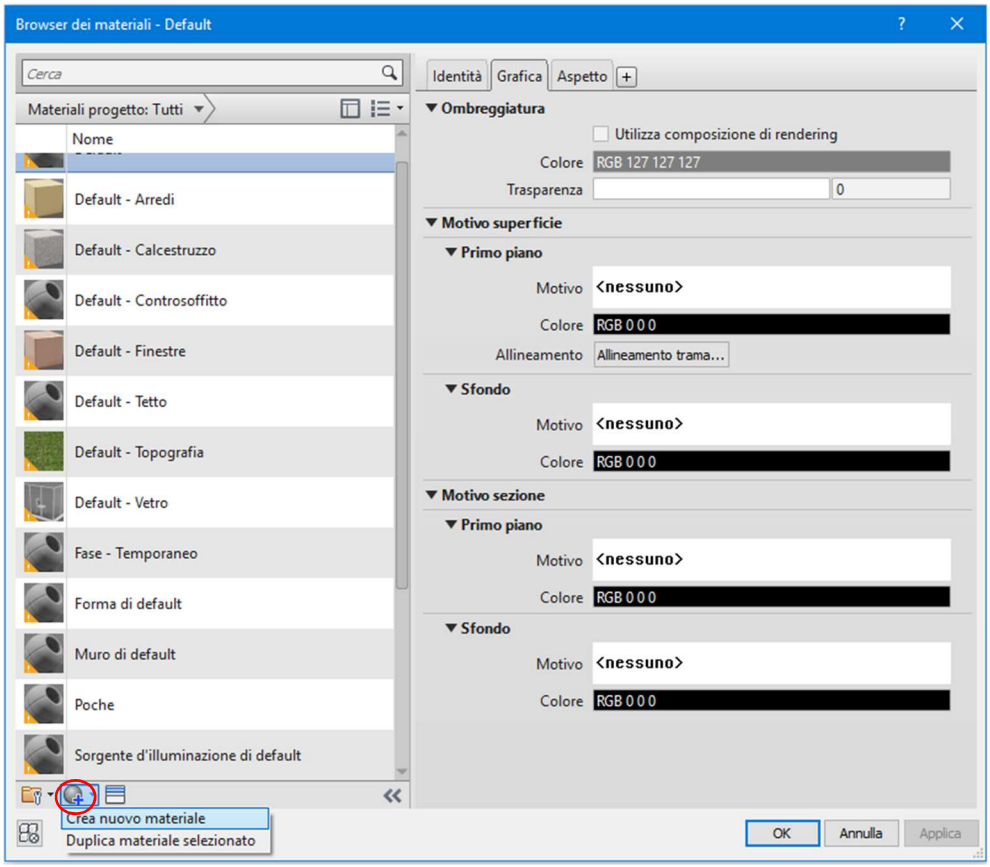


Figura 127 - Creazione nuovo materiale.

Le caratteristiche indicate in “Grafica” sono quelle che saranno visibili in una vista per colori omogenei o in una vista ombreggiata. Per la vista Realistica o Raytrace è invece importante impostare correttamente i parametri di visualizzazione nella sezione “Aspetto”, che permette di assegnare una *texture*.

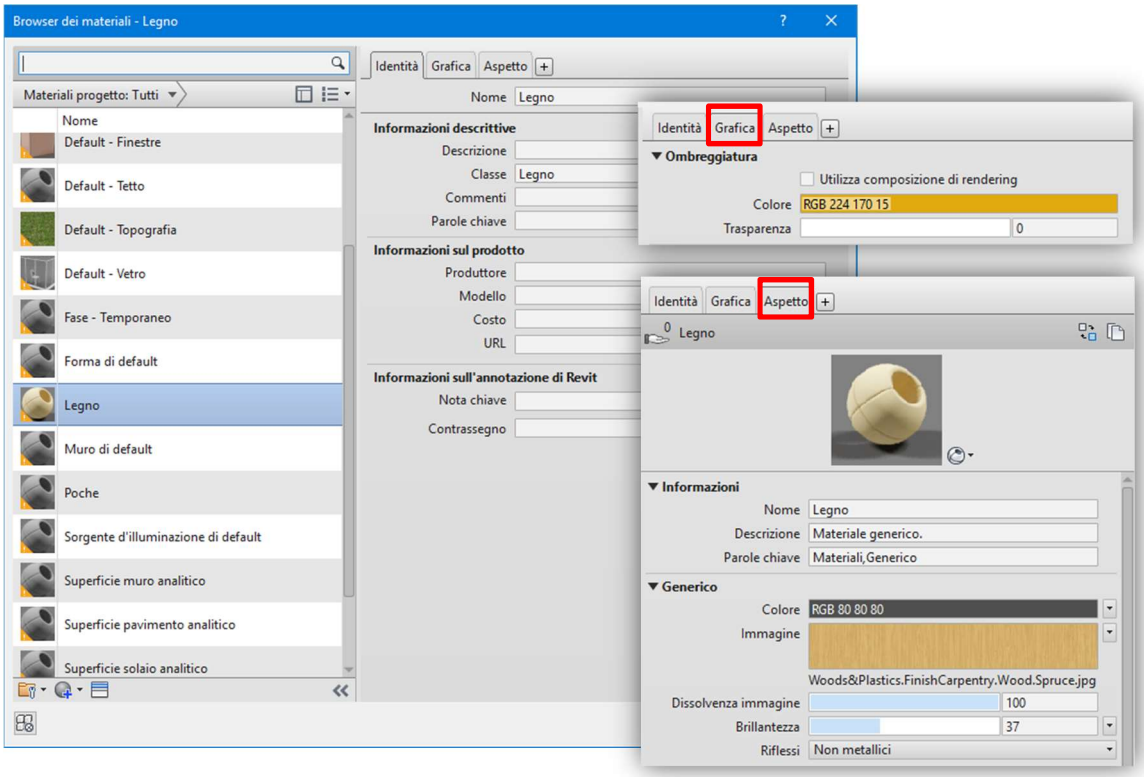


Figura 128 - Browser dei materiali.

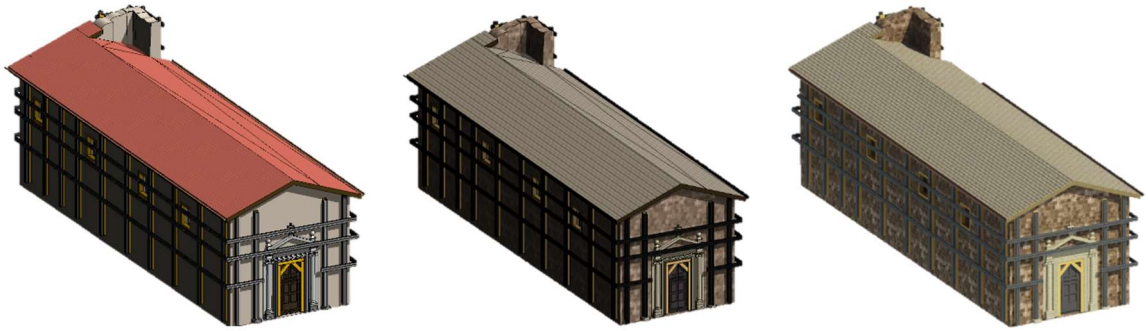


Figura 129 - Visualizzazione modello con l'assegnazione dei materiali: a sinistra visualizzazione per colori omogenei, al centro visualizzazione Realistica, a destra visualizzazione Raytrace.

3.4.3. Analisi mediante Faro As-Built for Autodesk Revit

As-Built è un'applicazione che estende le funzioni di Revit per la modellazione 3D sulla base di dati di nuvole di punti. Tramite tale *plug in* è stato valutato lo scostamento della nuvola di punti rispetto al modello Revit.

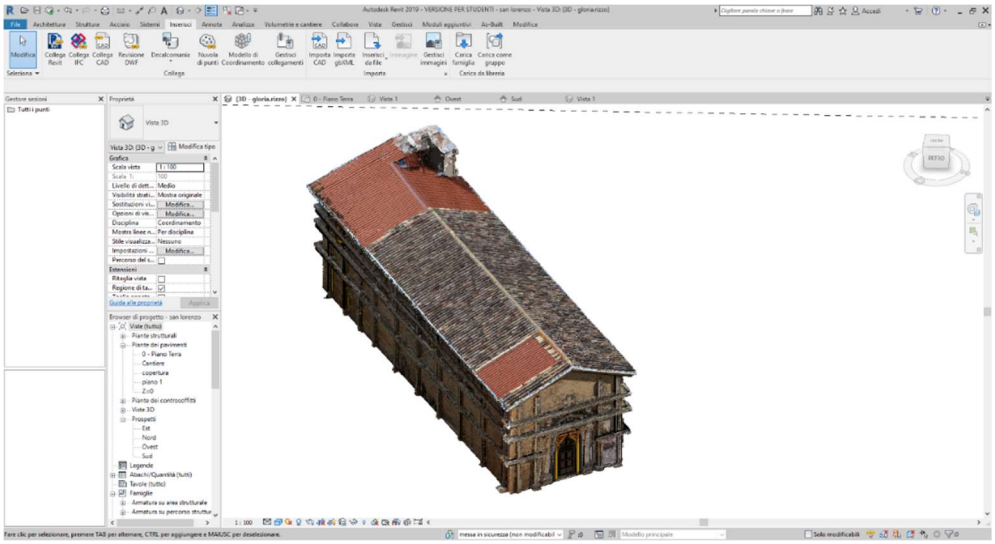


Figura 130 - Sovrapposizione modello e nuvola.

3.4.3.1. Calcolo dello scostamento del modello rispetto alla nuvola di punti

Per effettuare l'analisi è stato utilizzato il comando "Calcola". Il software a questo punto chiederà di selezionare le facce sulle quali effettuare l'analisi.

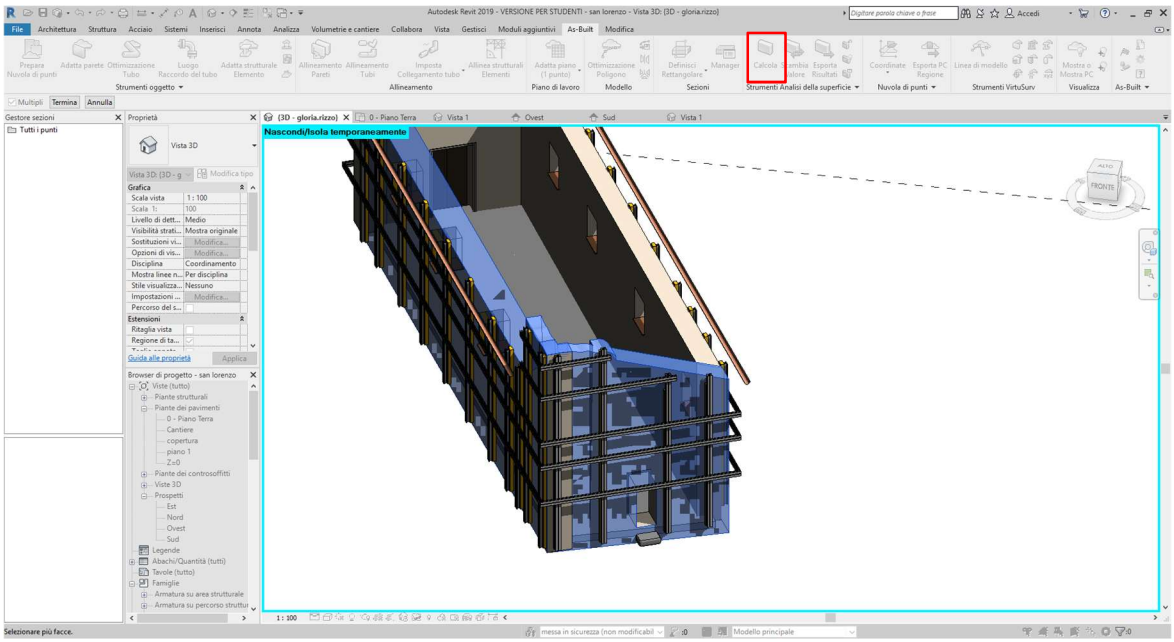


Figura 131 - Facce sulle quali è stata effettuata l'analisi.

Una volta dato il “Termina” il software chiederà ancora di impostare due parametri: la dimensione media della griglia e la distanza massima superficie. Trovandoci in una scala 1:100, si ha una precisione di 2 cm. Si è scelto pertanto di assumere la dimensione della griglia pari alla metà della precisione.

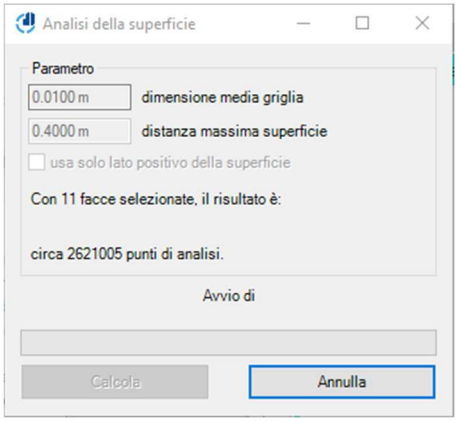


Figura 132 - Impostazione dei parametri di analisi.

Terminato il calcolo, è possibile modificare la visualizzazione dei risultati aggiungendo più intervalli di colori e impostando il fattore di arrotondamento.

La modellazione, nonostante sia basata sulla nuvola di punti, non permette di ottenere la precisione che si aveva nella nuvola di punti. È stato pertanto ritenuto buono il risultato ottenuto nelle pareti del modello che si adattano molto bene rientrando quasi interamente in un intervallo di 6 cm di distanza modello-nuvola nonostante non sia adatto alla scala 1:100 [*Figure 133-134*]. Come prevedibile si può vedere in rosso il tracciamento delle messe in sicurezza e la parte superiore dei muri, in quanto le messe in sicurezza e il tetto non sono stati utilizzati per effettuare l’analisi, quindi non risulta nessuna corrispondenza.

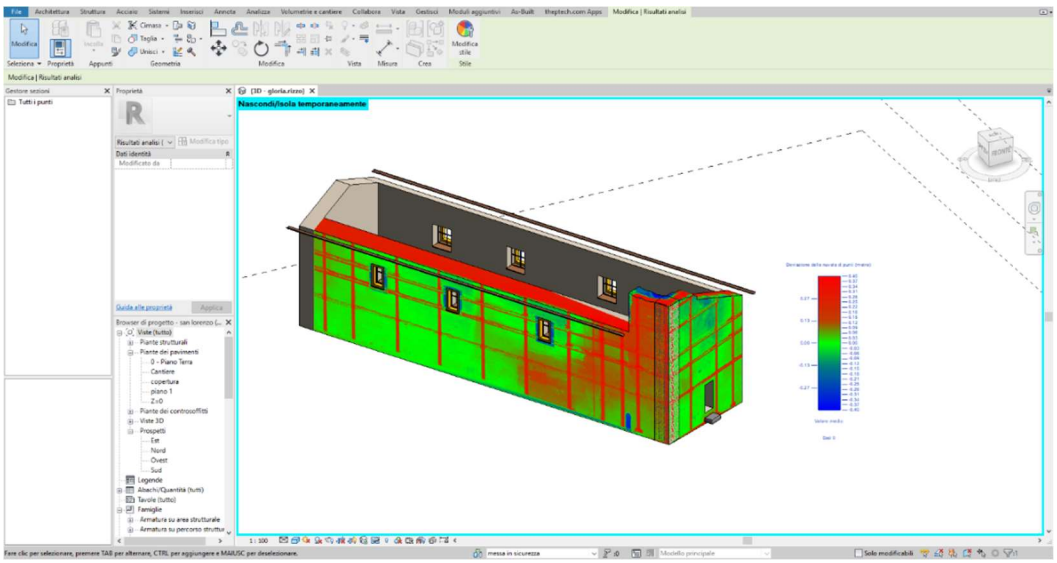


Figura 133 - Analisi scostamento del modello HBIM dalla nuvola di punti: vista 3D.

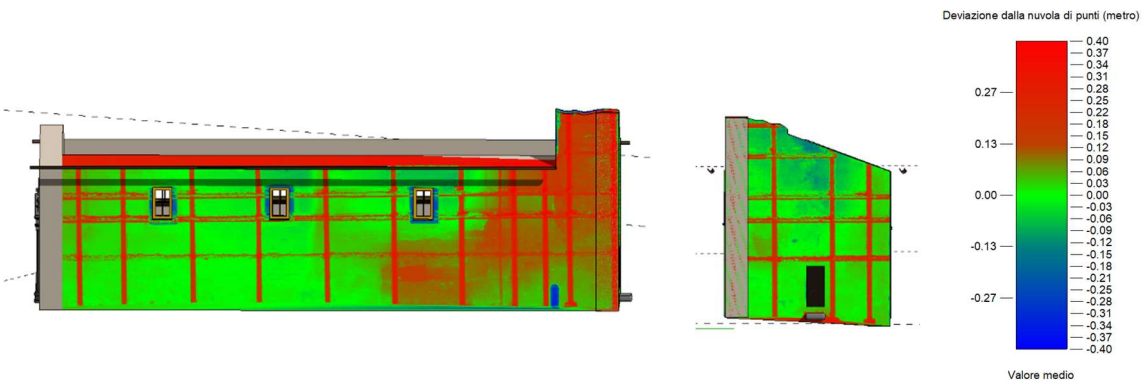


Figura 134 - Analisi dello scostamento del modello rispetto alla nuvola di punti.
a sinistra prospetto sud-ovest, al centro prospetto sud-est, a destra scala di visualizzazione grafica.

Per quanto riguarda il campanile è possibile notare degli scostamenti tra il modello e la nuvola di punti che vanno dai 20 cm ai 40 cm [*Figura 135*]. Questo perché i muri della chiesa nella realtà sono rastremati ma le famiglie dei muri fornite da Revit non permettono tale opzione.

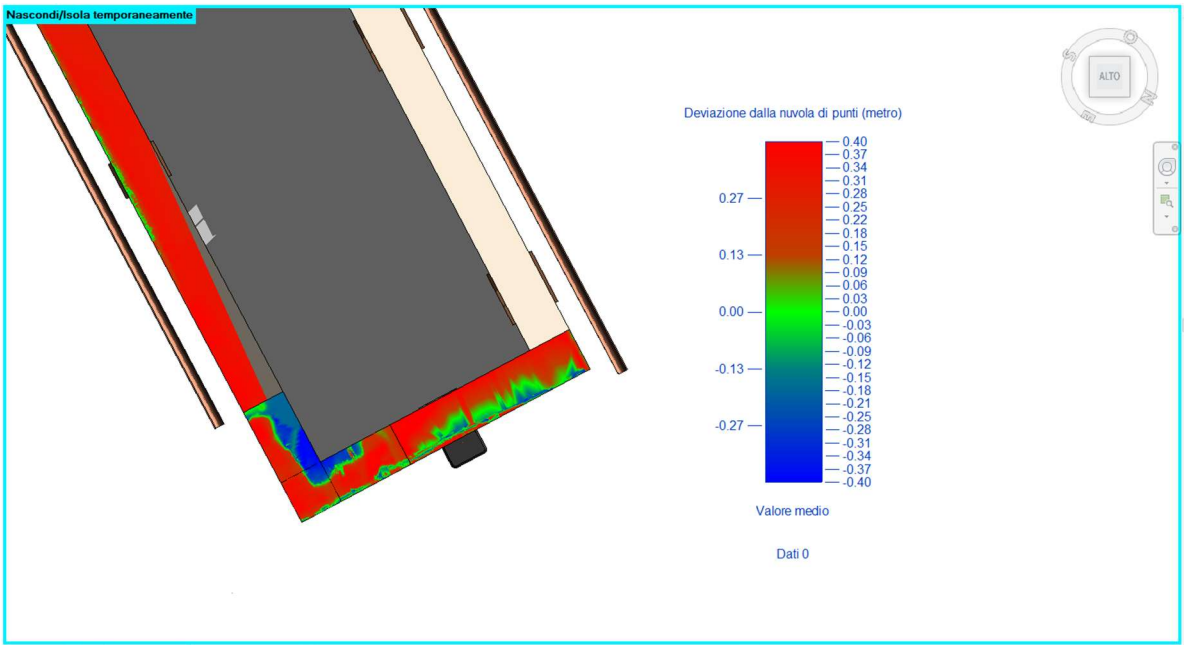


Figura 135 - Scostamento modello-nuvola nel campanile.

Si è pertanto deciso di rastremare il muro, per adattare il campanile alla nuvola di punti, mediante la creazione di un “Componente vuoto” del tipo “Modello locale: Muro”, che è possibile trovare sotto la sezione “Architettura”.

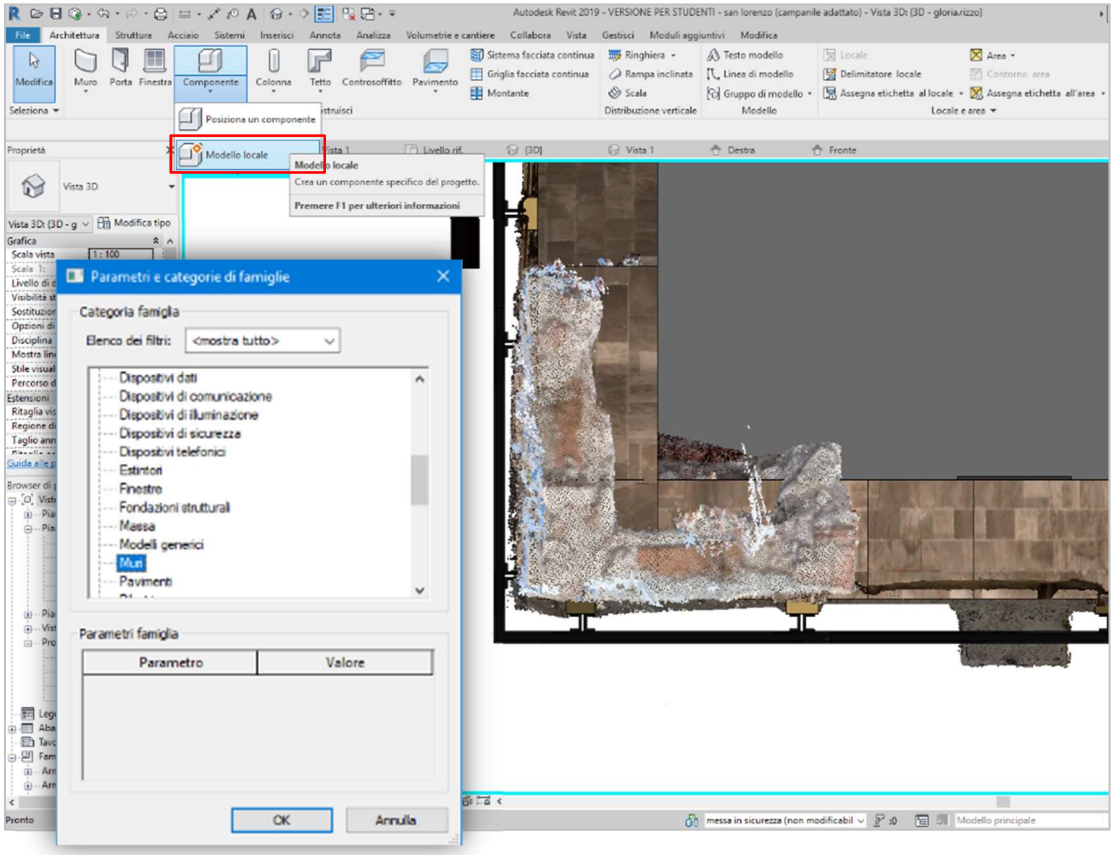


Figura 136 - Creazione di un modello locale.

È stato quindi creato un volume "vuoto" tramite un'estrusione su percorso e infine è stato utilizzato lo strumento "Taglia geometria" tra il muro solido e il volume vuoto.

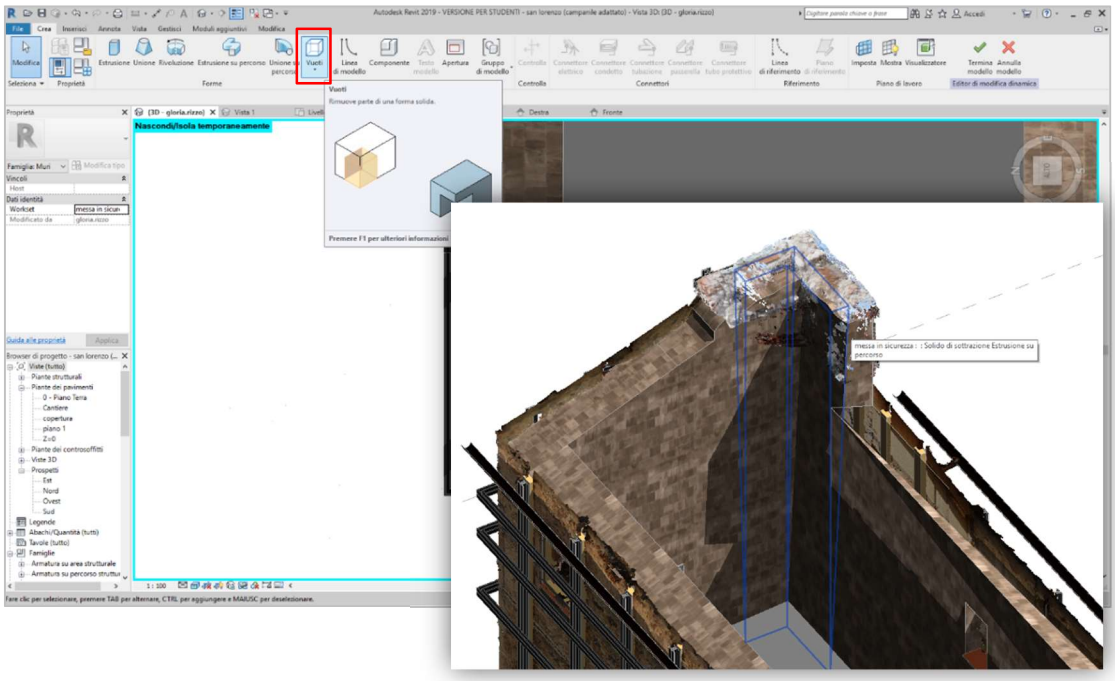


Figura 137 – Creazione di un volume vuoto tramite estrusione su percorso.

A questo punto è stata effettuata nuovamente l'analisi con la nuova geometria, ottenendo i risultati visibili in *Figura 138*.

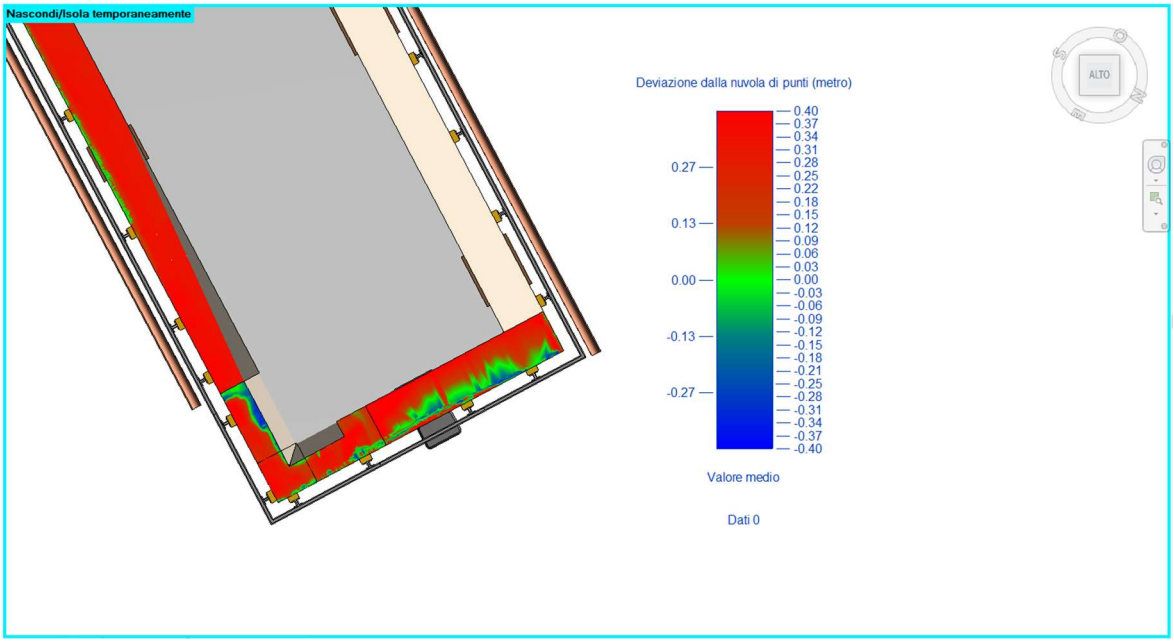


Figura 138 - Scostamento modello-nuvola nel campanile rastremato.

Alla fine di questa procedura il modello digitale del manufatto reale può ritenersi concluso. Si riporta di seguito la visualizzazione del modello HBIM che verrà utilizzato nelle operazioni successive per testare l'interoperabilità BIM-GIS:

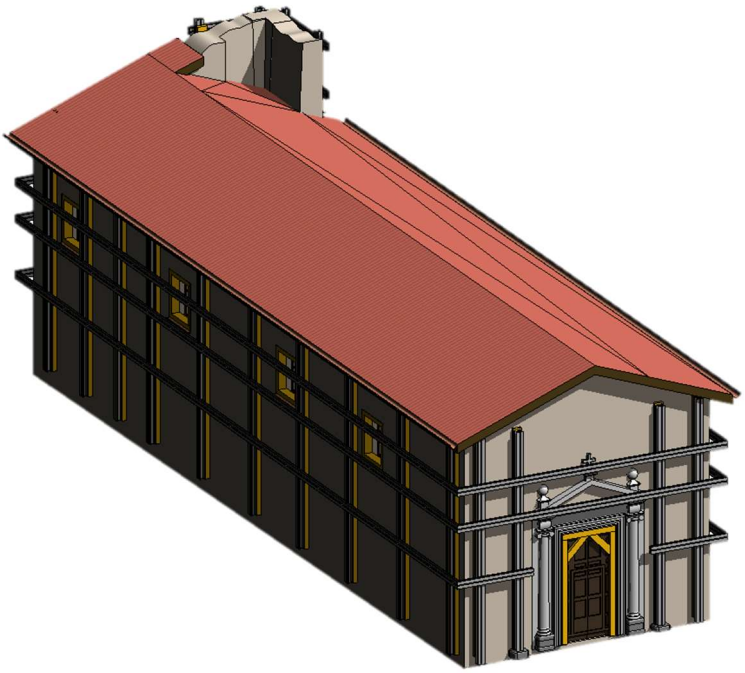


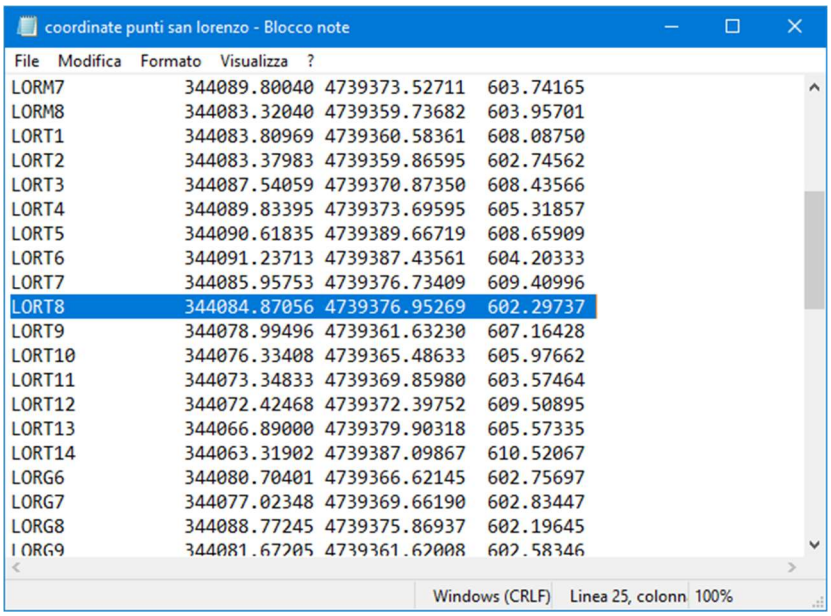
Figura 139 - Modello HBIM della chiesa di San Lorenzo, Norcia.

4.Interoperabilità BIM-GIS

I sistemi GIS sono in grado di fornire il contesto e la base cartografica di qualsiasi intervento sul territorio. Inoltre, estendono il valore dei dati di progettazione BIM attraverso la loro visualizzazione e le analisi geografiche che su questi dati si può effettuare.[28] È stato pertanto ritenuto utile l'inserimento del modello HBIM in ambiente GIS. Di conseguenza sono stati effettuati dei test sulla sovrapponibilità dei due domini (interoperabilità tecnica) e sulla loro capacità di dialogo senza perdita di informazioni (interoperabilità concettuale). Prima di provare a inserire il modello HBIM in ambiente GIS è stato necessario georeferenziarlo.

4.1. Georeferenziazione modello HBIM

Avendo inserito la nuvola di punti, il modello possiede già la rotazione rispetto al nord reale. È necessario invece posizionarlo in modo corretto nello spazio, in quanto, per poter lavorare nel workspace, erano state troncate le coordinate per non essere troppo lontani dal centro di progetto. Per risolvere tale problema sono state assegnate ad un punto le coordinate acquisite tramite rilievo topografico e pertanto non troncate. Si è scelto di utilizzare il punto a terra T8 a intersezione tra le due pareti della chiesa, in quanto il software riconosce punti del modello e non della nuvola, quindi non era possibile utilizzare i punti sui muri (*target*).


coordinate punti san lorenzo - Blocco note

File Modifica Formato Visualizza ?

LORM7	344089.80040	4739373.52711	603.74165
LORM8	344083.32040	4739359.73682	603.95701
LORT1	344083.80969	4739360.58361	608.08750
LORT2	344083.37983	4739359.86595	602.74562
LORT3	344087.54059	4739370.87350	608.43566
LORT4	344089.83395	4739373.69595	605.31857
LORT5	344090.61835	4739389.66719	608.65909
LORT6	344091.23713	4739387.43561	604.20333
LORT7	344085.95753	4739376.73409	609.40996
LORT8	344084.87056	4739376.95269	602.29737
LORT9	344078.99496	4739361.63230	607.16428
LORT10	344076.33408	4739365.48633	605.97662
LORT11	344073.34833	4739369.85980	603.57464
LORT12	344072.42468	4739372.39752	609.50895
LORT13	344066.89000	4739379.90318	605.57335
LORT14	344063.31902	4739387.09867	610.52067
LORG6	344080.70401	4739366.62145	602.75697
LORG7	344077.02348	4739369.66190	602.83447
LORG8	344088.77245	4739375.86937	602.19645
LORG9	344081.67205	4739361.62008	602.58346

Windows (CRLF) Linea 25, colonn 100%

Figura 140 - Coordinate punto T8.

[28] https://webthesis.biblio.polito.it/6410/

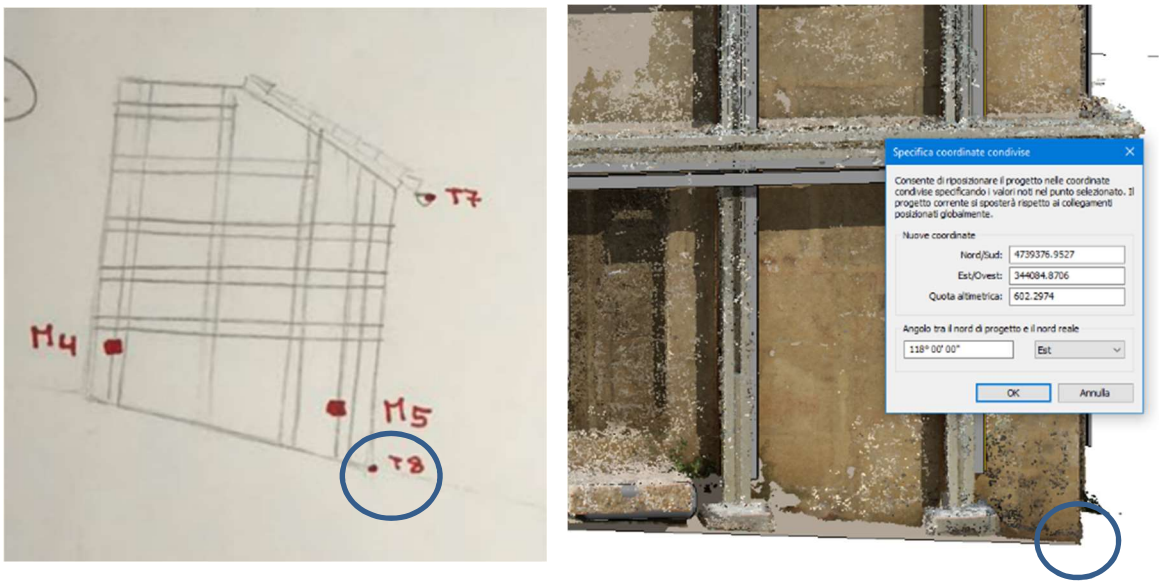


Figura 141 - Individuazione punto T8: a sinistra vista negli eidotipi; a destra vista nel modello.

Per prima cosa è necessario attivare dalla tabella "Visibilità Grafica" il punto base di progetto e il punto di rilevamento (a cui assegniamo le coordinate) e renderli modificabili. A questo punto apparirà una sbarra sulla graffetta.

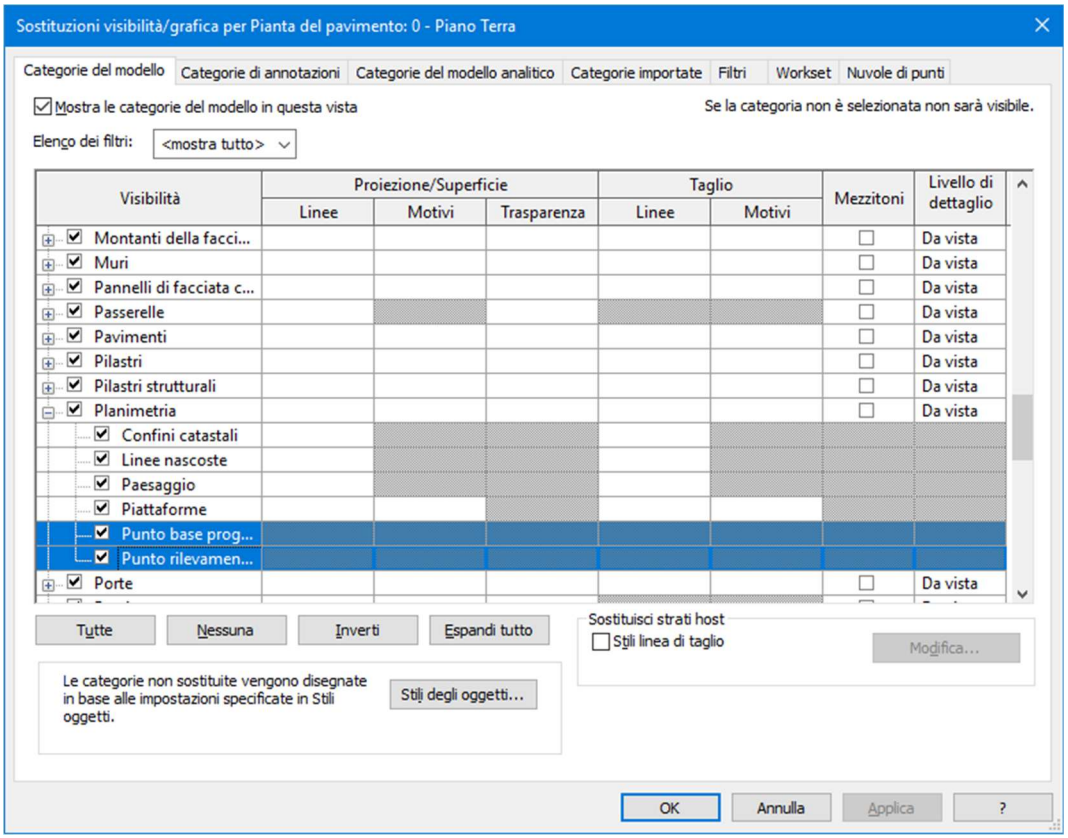


Figura 142 - Finestra "Visibilità grafica", attivazione punto base di progetto e punto rilevamento.

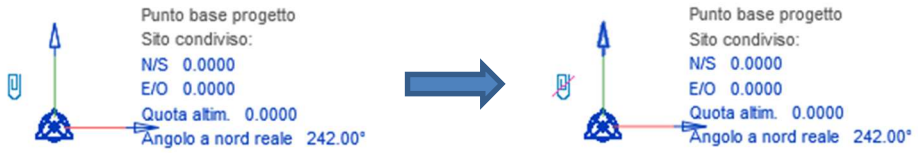


Figura 143 - Abilitazione delle modifiche del punto base di progetto e del punto di rilevamento.

Per assegnare le coordinate al punto T8 è stato utilizzato il comando "Gestisci – Coordinate – Specifica coordinate del punto".

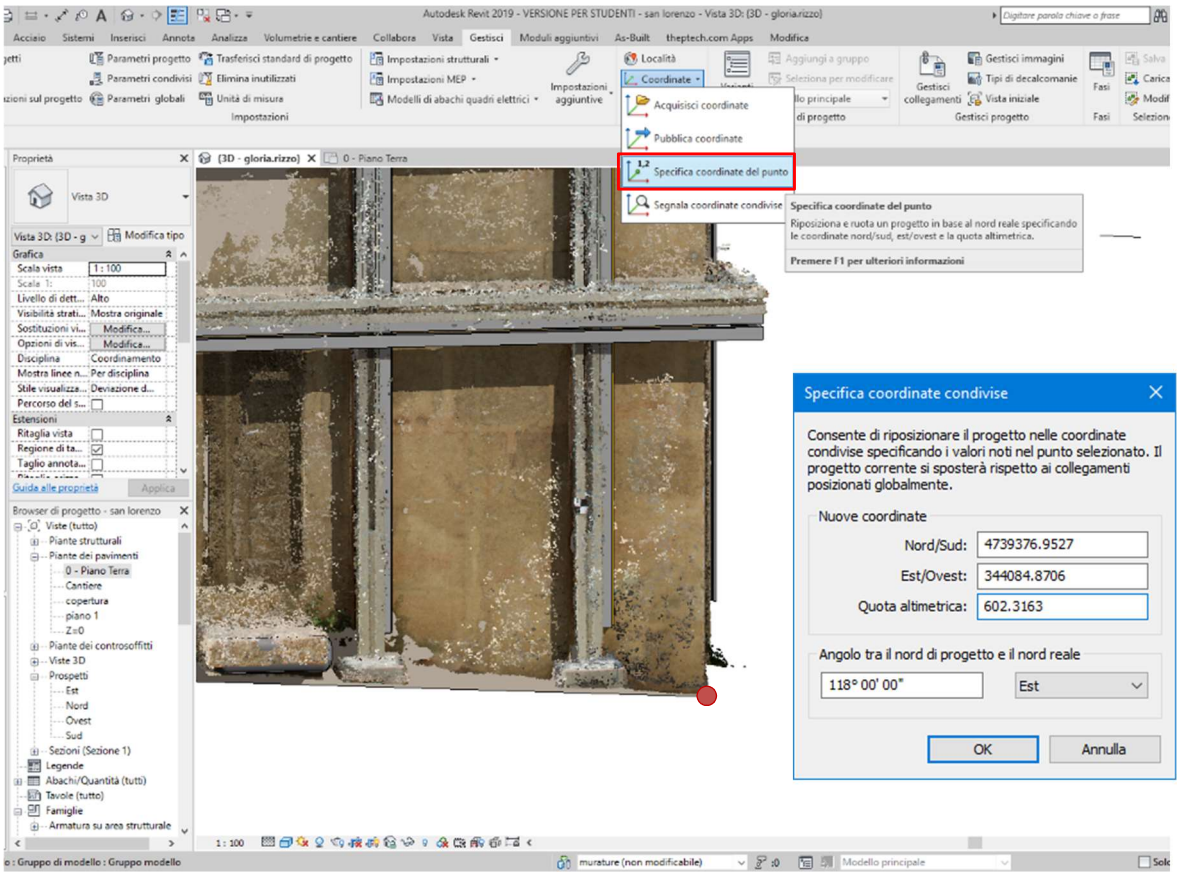


Figura 144 - Assegnazione coordinate (E,N,Q) del punto T8.

A questo punto il modello HBIM è georeferenziato e pronto per essere inserito in ambiente GIS.

4.2. Interoperabilità tecnica in campo BIM-GIS

L'associazione tra gli schemi chiave nel dominio BIM e nel dominio GIS è il passo più critico per l'interoperabilità tra i due domini. L'interoperabilità tecnica riguarda la compatibilità tra software.

Si stanno provando vari metodi per associare software dell'ambiente BIM, come Revit, a software dell'ambiente GIS, come ArcGIS e QGIS. Una via possibile consiste nell'esportare da Revit a IFC, convertire IFC in un geodatabase con geometria multi-patch, possibilmente utilizzando FME[29] e aggiungere il geodatabase alla scena in ArcGIS. Un altro consiste nell'uso del convertitore FME per ottenere un file .rvz da importare in QGIS. Questo approccio è stato approfondito da Valeria De Ruvo nella tesi dal titolo *"Indagini sull'interoperabilità HBIM-GIS in un database europeo per la resilienza dei beni culturali"*[30].

In questa tesi si propone l'uso di ArcGIS Pro. Con tale software è possibile non utilizzare l'IFC e inserire direttamente il modello .rvt in campo GIS senza trasformazioni intermedie.

4.2.1. Inserimento del modello HBIM in ambiente GIS mediante ArcGIS Pro

ArcGIS Pro è la potente applicazione GIS di Esri. Tecnologicamente all'avanguardia rispetto a tutti gli altri prodotti sul mercato, ArcGIS Pro supporta la visualizzazione, l'analisi avanzata e la conservazione dei dati sia in 2D che in 3D. È strettamente associato alla piattaforma ArcGIS Online e ArcGIS Enterprise tramite Web GIS.

Quando si crea un nuovo progetto in ArcGIS Pro è possibile scegliere se utilizzare un sistema di riferimento globale o locale. Nel caso in esame si è scelto di usare l'opzione "New Global Scene" come base di partenza, ma all'intero del progetto si possono aprire più finestre per avere una visualizzazione di una mappa 2D, di una scena globale 3D e di una scena locale 3D.

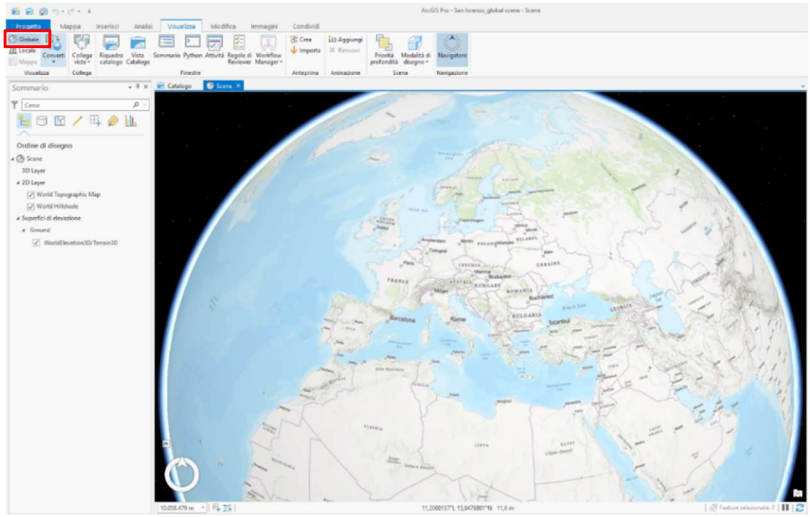


Figura 145 - Scena globale.

[29] *Feature Manipulation Engine.*
[30] https://webthesis.biblio.polito.it/10416/

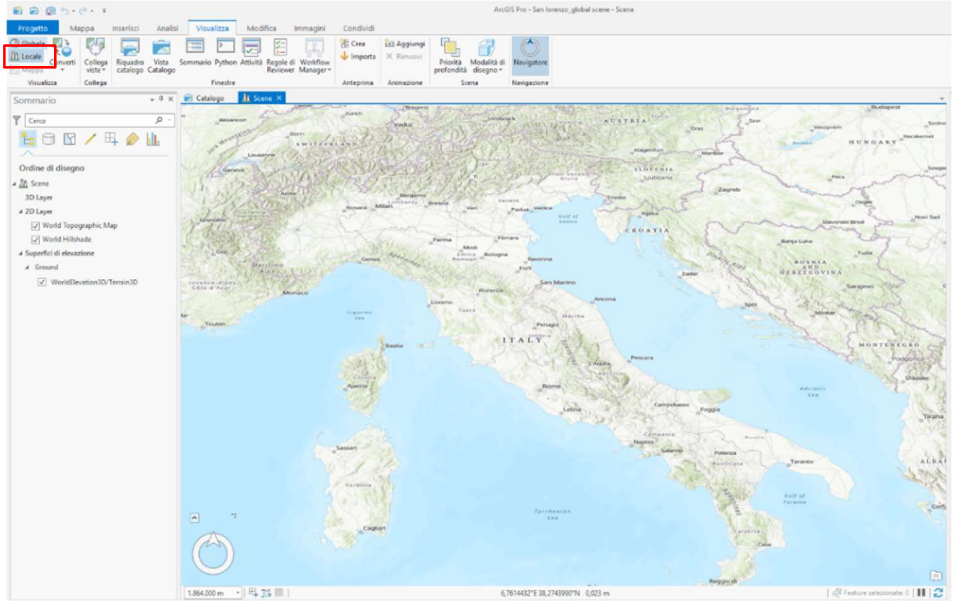


Figura 146 - Scena locale.

4.2.1.1. Inserimento dei LOD2-3

ArcGIS Pro 2.3.3 consente di inserire direttamente in ambiente GIS un file .rvt. Per importare il modello Revit si possono seguire più strade:

- la prima consiste nell'aggiungere il percorso del file .rvt da inserire andando su "Catalogo – Cartelle". A questo punto, selezionando con tasto destro del mouse il file .rvt, apparirà l'opzione "Aggiungi a Scena". Si può constatare che l'inserimento è avvenuto in quanto sulla sinistra sarà presente il nome del file tra i *layer*.
- La seconda consiste nell'entrare nella scena nella quale si desidera inserire il modello e selezionare "Aggiungi dati".
- la terza consiste nell'effettuare un semplice *Drag and drop* del file tra i *layer*. In questo caso si creerà in automatico la cartella del percorso del file.

Una volta inserito il modello, per visualizzarlo si seleziona con il tasto destro il file e si clicca su "zoom to layer". Inizialmente sono stati riscontrati due problemi: il primo è che appare solo la superficie esterna del modello; il secondo è che il modello non si trova dove dovrebbe, bensì spesso in mezzo all'oceano.

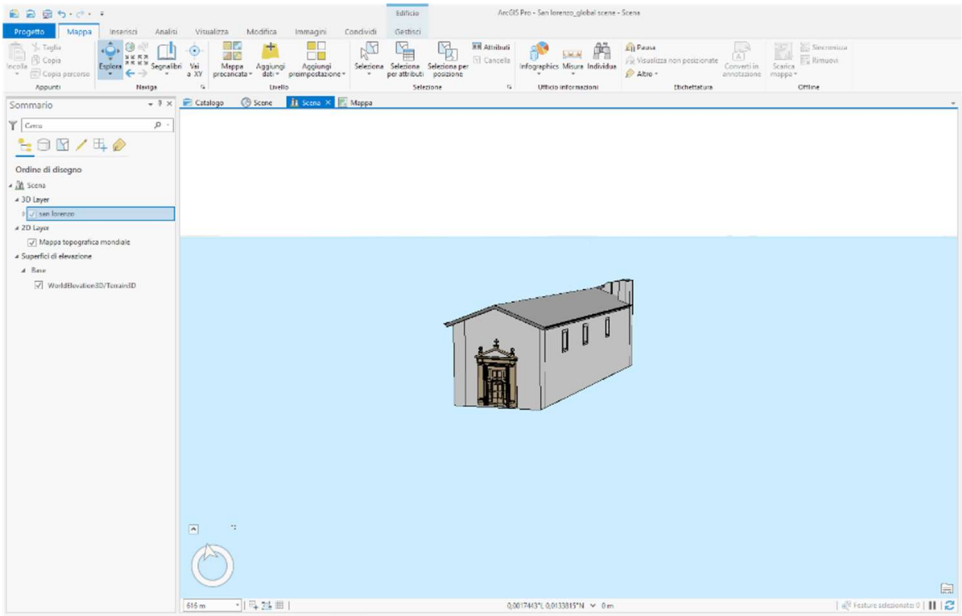


Figura 147 - Primo inserimento del modello Revit in ArcGIS Pro.

Il primo problema è facilmente risolvibile. È dovuto al fatto che ArcGIS suddivide il modello in *layer*, ovvero la Superficie, l'Architettonico, lo Strutturale, l'Elettrico, il Meccanico e l'Idraulico. Per alleggerire il file e velocizzare la visualizzazione inizialmente attiva solo la Superficie. È possibile però attivare anche le varie parti del modello semplicemente mettendo una spunta sul rispettivo *layer*. È possibile notare che quando si inserisce il modello Revit in ArcGIS Pro vengono mantenuti i materiali, ma si perde la *texture*.

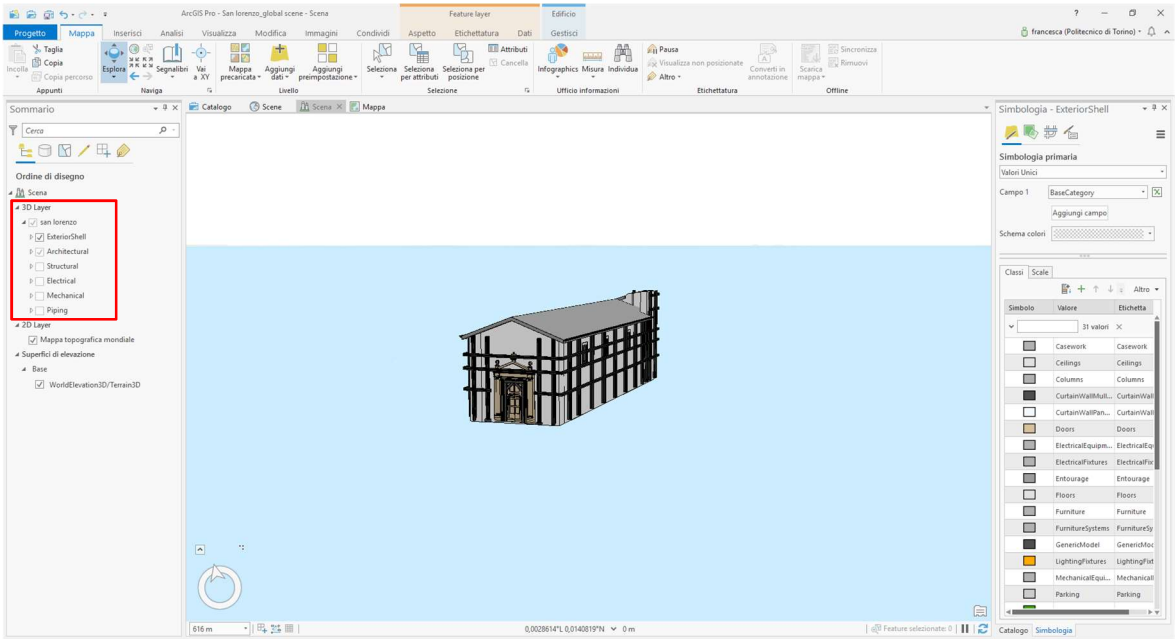


Figura 148 - Attivazione del layer "Architettonico".

Per quanto riguarda il secondo problema, l'errato posizionamento del modello è dovuto alla mancanza delle proiezioni. È possibile effettuare la georeferenziazione in modo manuale o in modo automatico. Nel caso in esame, avendo modellato in Revit sulla base di una nuvola di punti georiferita, è stato possibile posizionare il modello in modo automatico in ambiente GIS. È stato comunque illustrato di seguito come procedere per la georeferenziazione manuale: è necessario effettuare in ambiente GIS la proiezione di ogni singolo layer attraverso il comando "Definisci proiezione" che è possibile trovare in "Gestisci" o in "Analisi – Strumenti" che permette di impostare il riferimento spaziale.

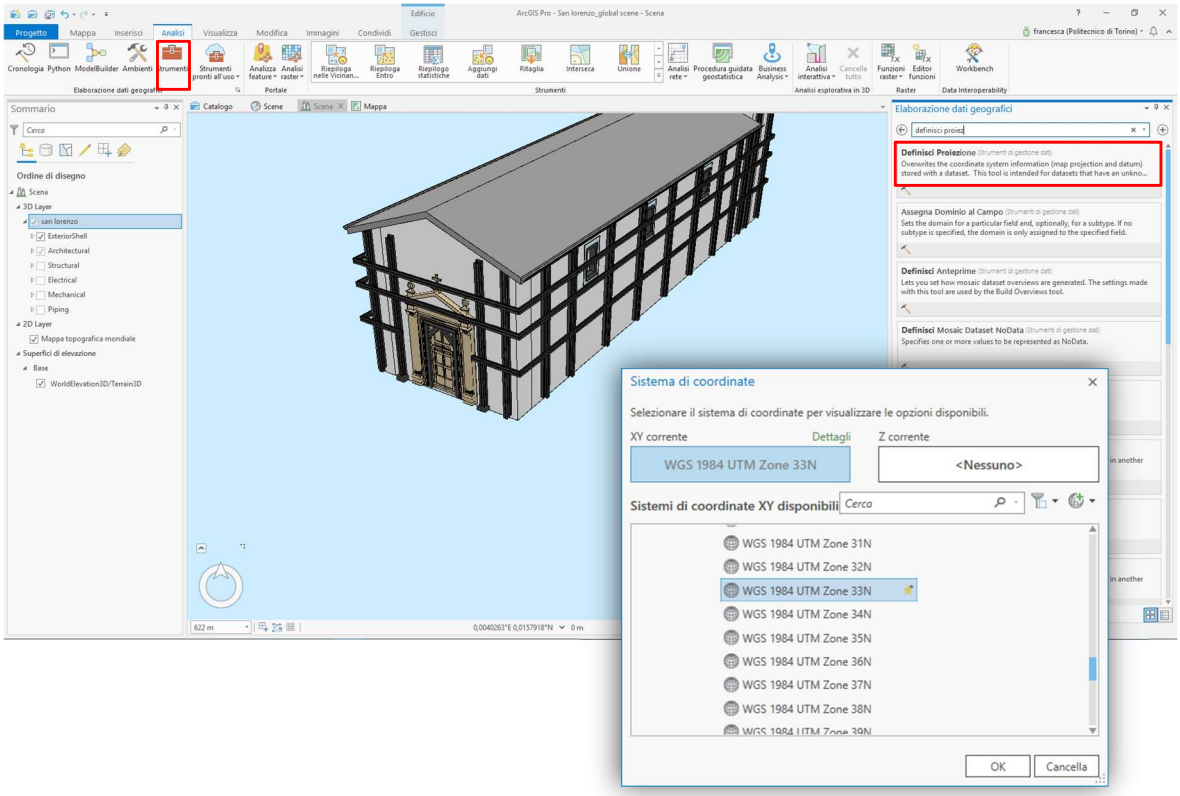


Figura 149 - Georeferenziazione manuale: assegnazione del sistema di proiezioni in ambiente GIS.

A questo punto va effettuata la georeferenziazione 3D del modello utilizzando il comando "Gestisci – Georiferimento". Mantenendo aperta la sessione di modifica, ci si sposta sulla scheda "Mappa – Individua" e viene selezionata la città di Norcia.

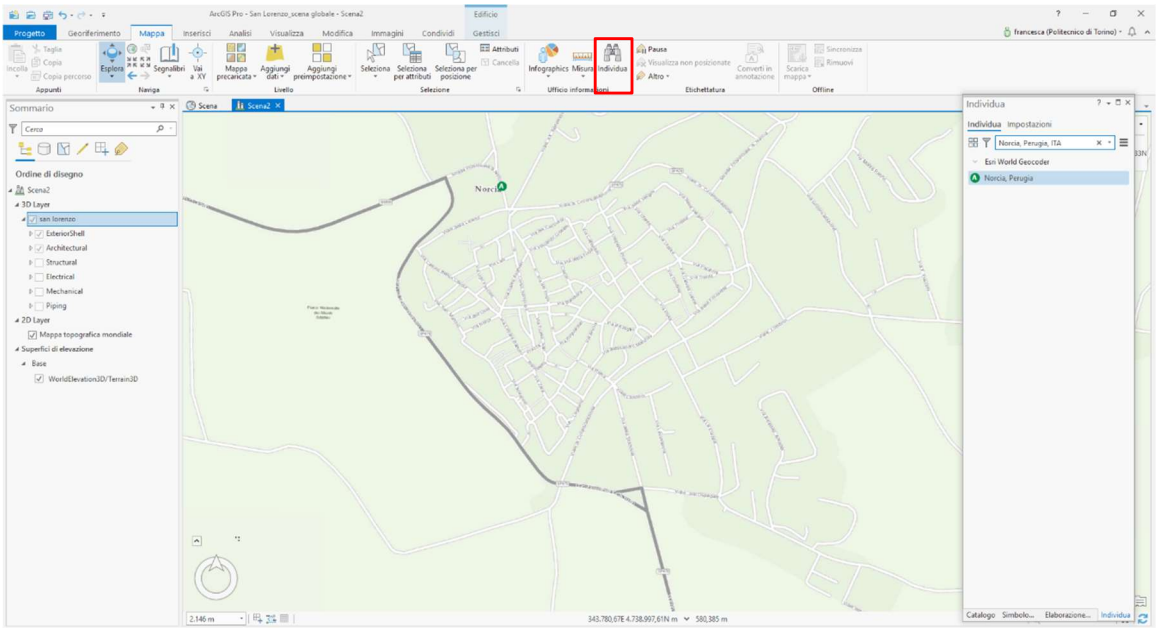


Figura 150 - Individuazione località.

È possibile modificare a questo punto la mappa precaricata per avere una visualizzazione tramite ortofoto e spostandosi sulla scheda "Georiferimento" viene utilizzata l'opzione "Sposta su display" e i vari comandi per spostare e ruotare il modello. Durante questa operazione può risultare utile attivare l'opzione "Esplora sottosuolo".

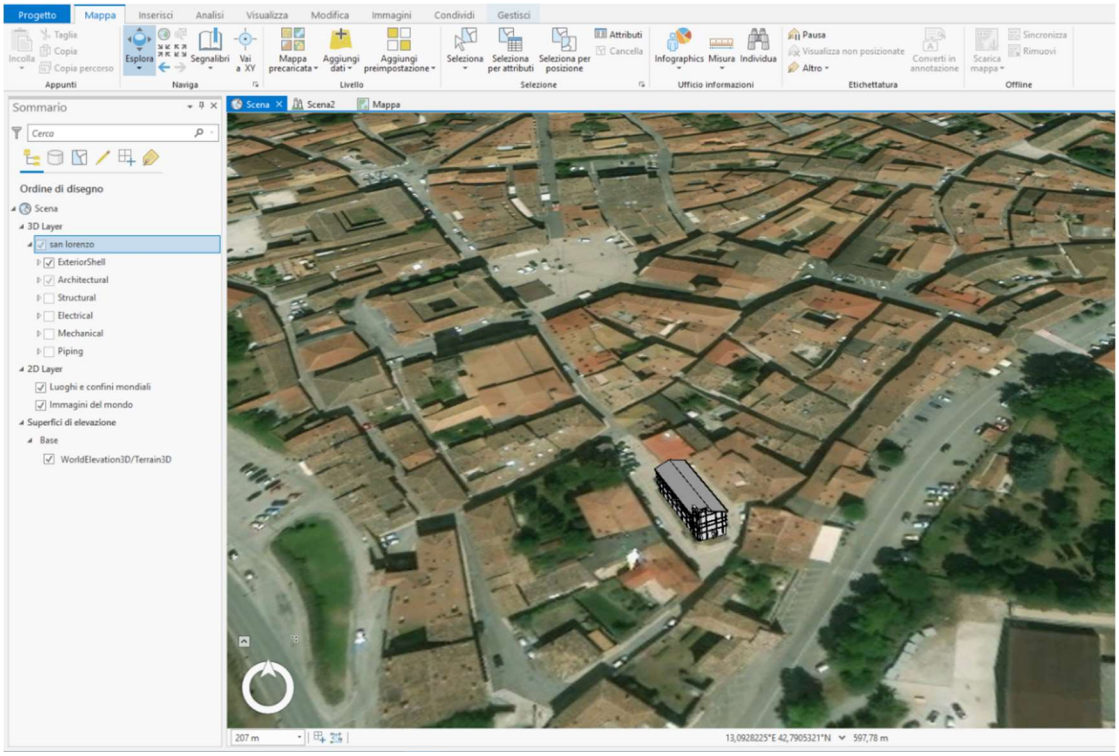


Figura 151 - Inserimento modello .rvt LOD3 in ArcGIS Pro.

Per la georeferenziazione automatica è stato necessario scaricare dal sito:

https://spatialreference.org/

il file .prj contenente le proiezioni in UTM - WGS84 33N.

Figura 152 - Sito per scaricare le proiezioni WGS84-UTM fuso 33N.

Il file .prj è stato spostato nella cartella contenente il modello da inserire in ArcGIS Pro e rinominato con lo stesso nome del progetto .rvt. In questo modo, quando verrà inserito il modello, verranno acquisite in automatico le sue proiezioni.

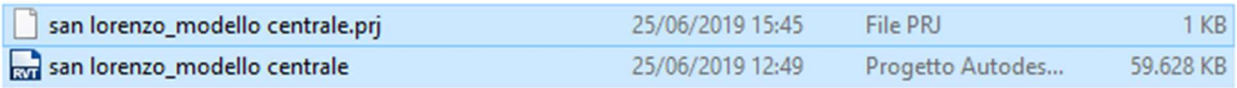


Figura 153 - Rinominazione file .prj

Allo stesso modo è possibile inserire in ArcGIS Pro il file .rvt del modello in LOD2. È stato inoltre inserito anche lo *shapefile* "Edifici" in modo da creare un intorno. Poiché tale shapefile possiede nella tabella degli attributi l'informazione "numero di piani", è stato possibile creare delle estrusioni sulla base dell'espressione "numero di piani * 3 m ".

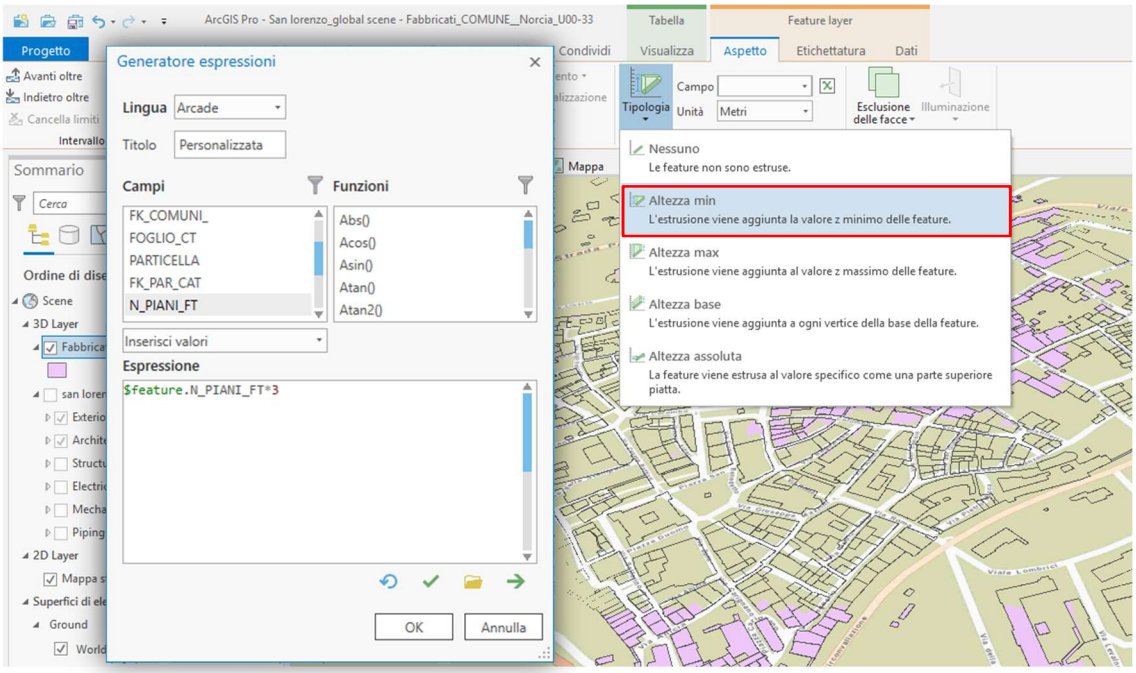


Figura 154 - Creazione estrusioni in ArcGIS Pro.

In questo modo nello spazio di lavoro di ArcGIS Pro è possibile avere più livelli di dettaglio all'interno di un solo progetto:

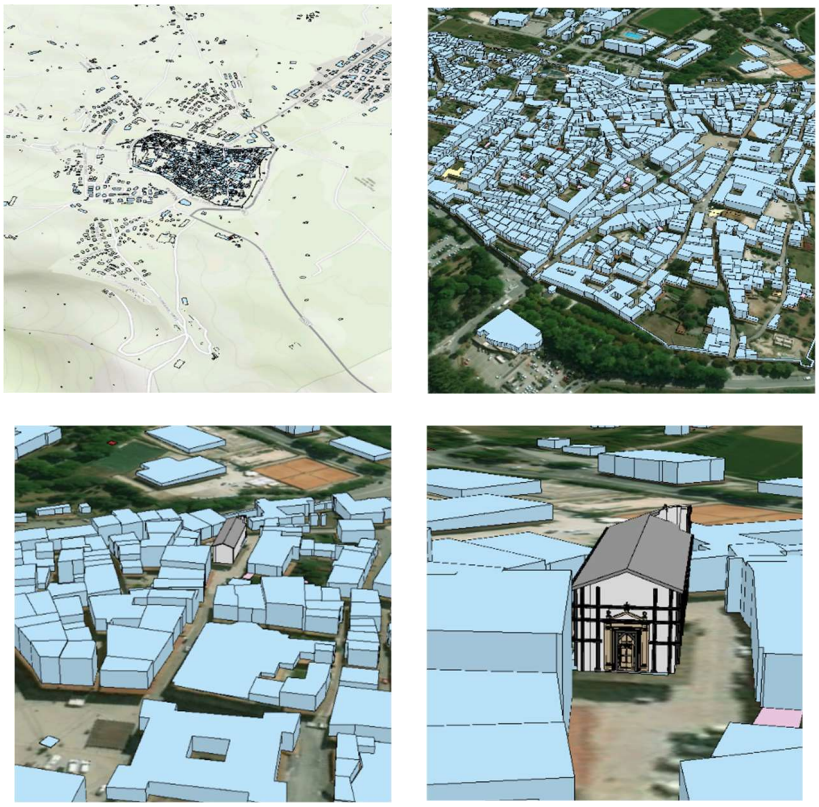


Figura 155 - Progetto multiscala: visualizzazione in LOD0 in alto a sinistra, LOD1 in alto a destra, LOD2 in basso a sinistra, LOD3 in basso a destra.

LOD0

Figura 156 - LOD0 in ArcGIS Pro.

LOD1:

Figura 157 - LOD1 in ArcGIS Pro.

LOD2

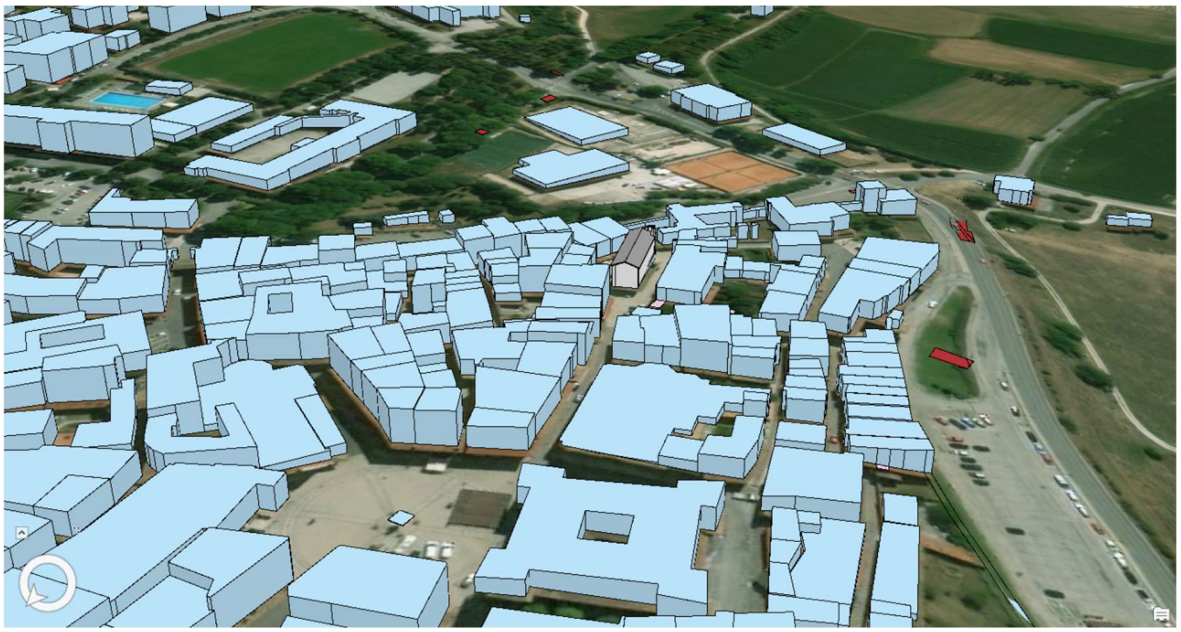


Figura 158 - LOD2 in ArcGIS Pro.

LOD3

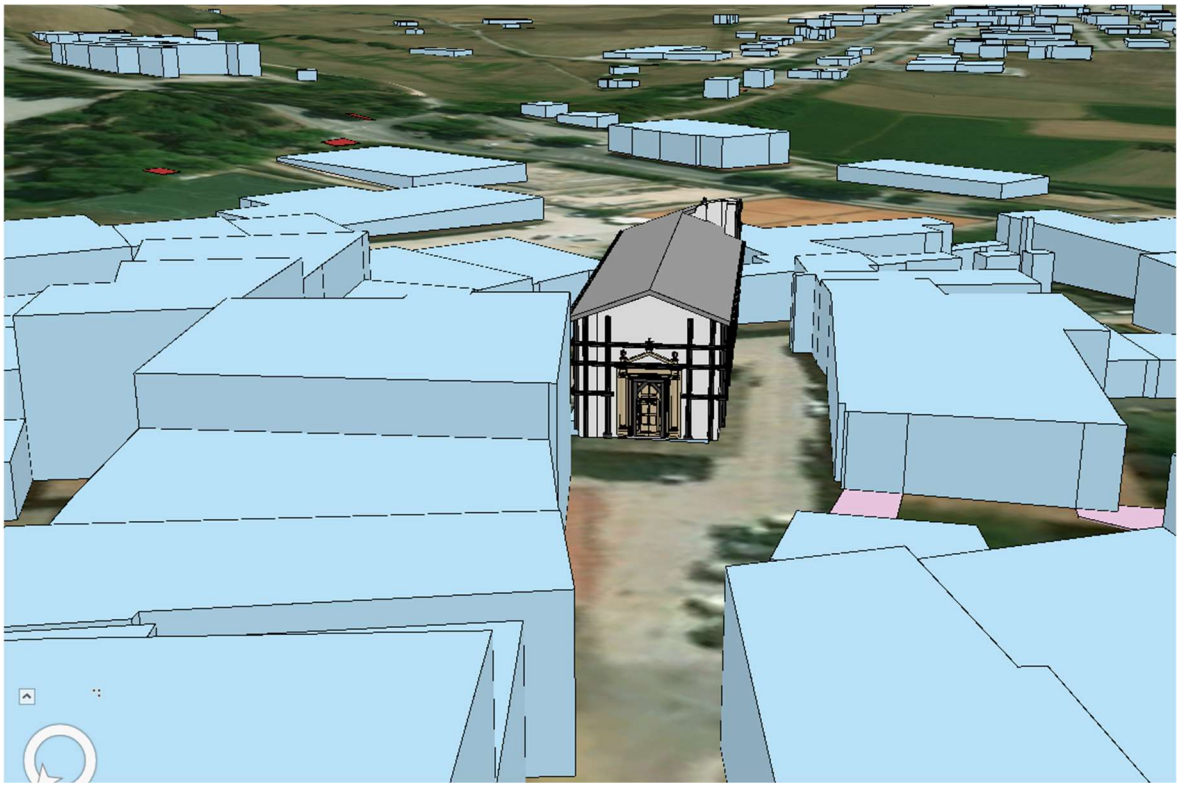


Figura 159 - LOD3 in ArcGIS Pro.

All'interno di questo progetto possono essere realizzati dei tematismi. Ad esempio, è possibile suddividere gli edifici in quattro classi (Costruito, demolito, in costruzione, non classificato) sfruttando l'attributo "stato di costruzione" dello *shapefile* Edifici.

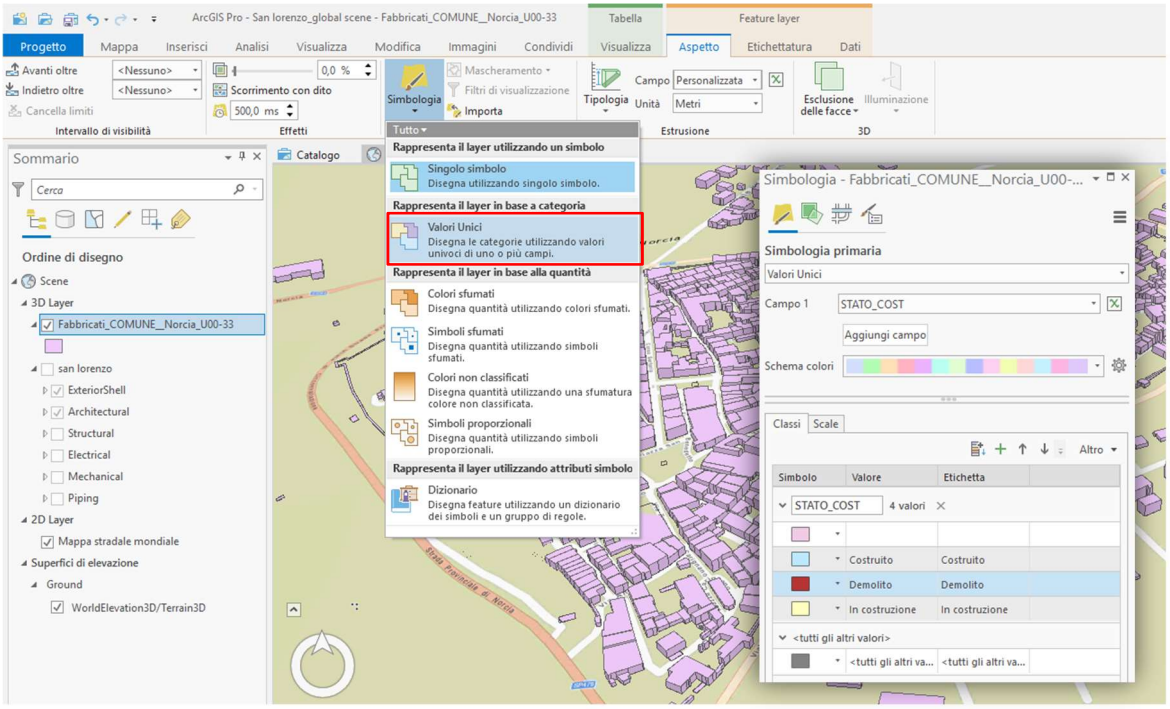


Figura 160 - Suddivisione in classi: in azzurro il costruito, in rosso il demolito, in giallo le opere in costruzione, in rosa il non classificato.

È possibile interrogare un particolare elemento per visualizzare le informazioni contenute nella tabella degli attributi.

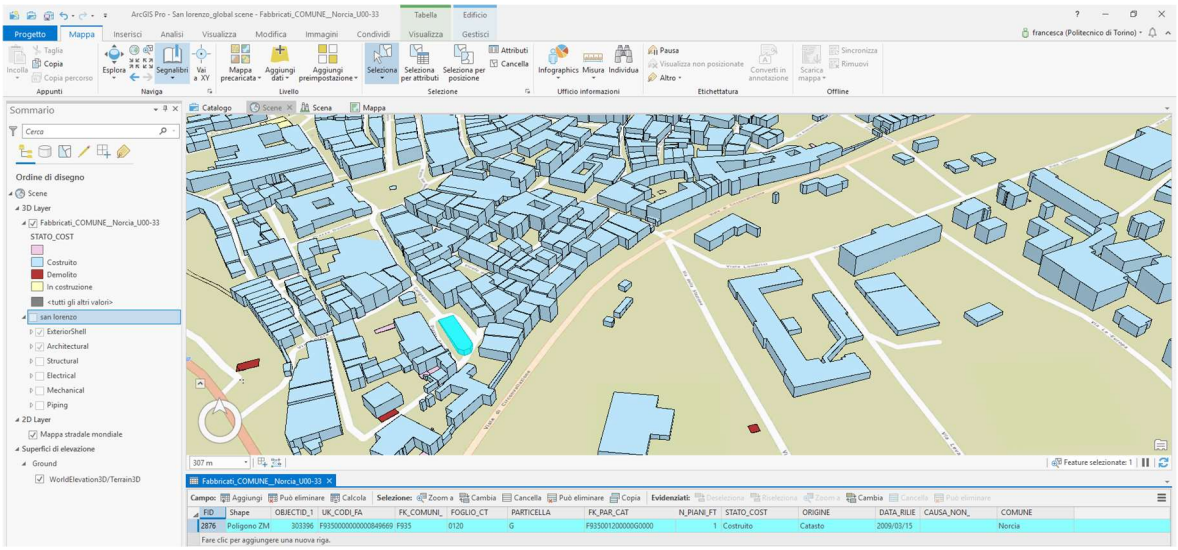


Figura 161 - Tabella degli attributi della chiesa di San Lorenzo.

4.2.2. Interoperabilità concettuale tra standard IFC-CityGML

Una volta superato il problema della compatibilità di formato per l'inserimento del modello HBIM in ambiente GIS, si è passati ad analizzare il problema successivo, ossia la corrispondenza dei dati per verificare se c'è stata una perdita di informazioni durante l'importazione e se è possibile associare al modello ulteriori informazioni. Con interoperabilità concettuale si intende pertanto la relazione a livello semantico tra, per esempio, banche dati.

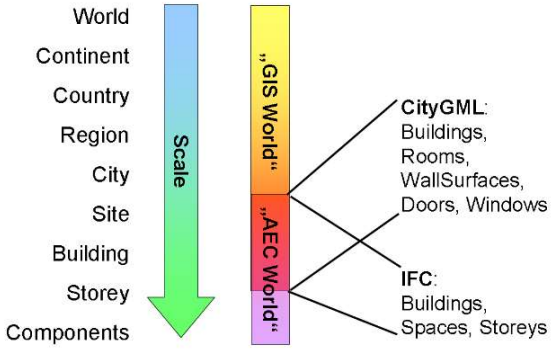


Figura 162 - Confronto IFC-CityGML classificazione in base alla scala

L'IFC causa una perdita di informazioni in ambiente GIS sulla *texture* [*Figura 163*], che si è riscontrato quando è stato inserito il modello HBIM in ArcGIS Pro (si veda *Cap 2.2.1.2: inserimento dei LOD2-3*). Inoltre, l'IFC è focalizzato soprattutto sugli edifici e poco sulle caratteristiche ambientali.

	X3D	U3D	KML	COLLADA	IFC	CityGML
geometry	+	+	0	+	++	+
georeferencing	+		+		(IFG) +	++
appearance	+	+	0	++	0	+
topology	0	0		0	+	+
semantics	0			0/+	++	++
linking / embedding	+		++	++		++

Legend: 0 = basic, + = sophisticated, ++ = comprehensive; empty = not supported

Figura 163 - Virtual Reality Exchange Formats.
(Fonte: T. H. Kolbe - CityGML Tutorial, p.89)

Importando il file .rvt in ArcGIS Pro si è notato che ArcGIS Pro utilizza una terminologia diversa per descrivere gli stessi elementi presenti in CityGML. Ad esempio, si riporta di seguito l'analisi effettuata per il caso della copertura:

IFC		CityGML	
Shape	Multipatch	Geometry	_GeometricAggregate
	x		IDs
Category	Roofs	BoundaySurface	Roof
	Gutters		x
Family	x	Object	description [0..1]
	Roof		name [0..*]
	id		id [0..1]
FamilyType	nome: Legno - 27 cm	name	name [0..*]
	x	roofType	roofType[0..1]
	x	measuredHeight	LengthType[0..1]
ObjectId	id	ID	BuildingId
ElementType	ProfileRoof	BoundaySurface	Roof
Discipline	Architectural	BuildingFunction	AbstractBuilding
Function	Exterior	ExternalReference	ExternalObject
BaseCategory	Roofs	CityObject	Roof

Tabella 8 - Confronto semantica tra file .rvt in ArcGIS Pro e classificazione CityGML.

Per generare le regole di associazione tra IFC e CityGML si utilizza un metodo basato sull'istanza, che consiste nell'ispezione delle entità che rappresentano lo stesso componente nel medesimo modello.

Per verificare le associazioni tra IFC e CityGML sono stati effettuati dei test:

1) Individuare le entità comuni tra gli standard IFC e CityGML ai diversi livelli di dettaglio.
2) Individuare quali informazioni sono presenti nella struttura dell'IFC, ma assenti in CityGML.
3) Individuare, viceversa, quali informazioni possiede CityGML ma mancano in IFC.

4.2.2.1. Entità comuni tra gli standard IFC e CityGML ai diversi livelli di dettaglio

Analizzando il caso dell'entità Roof si è potuto notare che CityGML racchiude sotto un unico oggetto (*RoofSurface*) due entità che in IFC sono distinte e separate (*ifcRoof* e *ifcSlab*). Allo stesso modo CityGML classifica i serramenti come sottocategorie dei muri, in quanto ne fanno parte ma vengono

visualizzati solo aumentando il livello di dettaglio almeno al LOD3. Per l'IFC invece porte e finestre sono entità indipendenti.

IFC	CityGML	
	LOD2	LOD3
IfcBeam	x	x
IfcColumn	x	x
IfcCurtainWall	x	x
IfcDoor	x	Door
IfcPile	x	x
IfcPlate	x	x
IfcRailing	x	x
IfcRamp	x	x
IfcRoof	RoofSurface	RoofSurface
IfcSite	x	x
IfcSlab	RoofSurface	RoofSurface
IfcStair	x	x
IfcWall	WallSurface	WallSurface
IfcWindow	x	Window

CityGML Object		IFC Object	LOD
RoofSurface		IfcRoof	LOD2
			LOD3
			LOD4
		IfcSlab	LOD2
			LOD3
			LOD4
WallSurface	WallSurface	IfcWall	LOD2
			LOD3
			LOD4
		IfcDoor	LOD3
			LOD4
		IfcWindow	LOD3
			LOD4
	Door	IfcDoor	LOD3
			LOD4
	Window	IfcWindow	LOD3
			LOD4

Tabella 9 - Confronto semantica ifc-CityGML ai diversi livelli di dettaglio.

4.2.2.2. Parametri presenti nella struttura dell'IFC ma assenti in CityGML e viceversa

Analizzando nel dettaglio l'elemento *"Roof"* (Copertura), è stata ricercata la sua classificazione all'interno degli standard IFC[31] e CityGML[32], per individuare l'eventuale presenza di parametri utili ai fini del nostro progetto, ma presenti solo in uno dei due codici e che pertanto potrebbero essere inseriti mediante la creazione di attributi all'interno del software *GIS* o mediante la creazione di parametri condivisi all'interno del software *BIM oriented*, in quanto parametri che permettono di implementare all'interno del progetto dei parametri che non sono presenti nella configurazione standard

La struttura dell'IFC è costituita da entità (elementi costruttivi, geometrici o di base), che possono essere radicate o non radicate, che i software BIM trasformano in layer e successivamente in parametri. Le entità radicate fanno parte della categoria *ifcRoot,* mentre quelle non radicate non hanno un'identità e devono essere collegate ad altri oggetti per esportare le loro istanze.

ifcRoot a sua volta si divide in:

- *ifcObjectDefinition*, che riguarda la presenza e i tipi di oggetti materiali;

[31] https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4/ADD2_TC1/HTML/
[32] https://www.opengeospatial.org/standards/citygml

- *ifcRelationship*, che riguarda le relazioni tra gli oggetti;
- *ifcPropertyDefinition*, che riguarda le proprietà dinamicamente estensibili sugli oggetti.

ifcObjectDefinition a sua volta si divide in:

- *ifcObject*, che riguarda la presenza dell'oggetto da un punto di vista fisico;
- *IfcTypeObject*, che riguarda le informazioni sulla tipologia dell'oggetto.

Entrambi si suddividono in sei categorie che rispondono alle domande *"Who?,Why? What? Where? When?"* e *"How?"*, ovvero *ifcActor*, *ifcControl*, *ifcGroup*, *ifcProduct*, *ifcProcess*. *ifcResource*. È poi compito di *ifcRelationship* individuare le relazioni tra più oggetti.

In particolare *ifcProduct* rappresenta le entità fornendo informazioni sulla descrizione, sulla rappresentazione e sulle disposizioni spaziali degli elementi. Si suddivide infatti in: *ifcAnnotation*, *ifcElement*, *ifcGrid*, *ifcPort*, *ifcProxy*, *ifcSpatialElement*, *ifcStructuralActivity e ifcStructuralItem*. *ifcElement* classifica gli elementi in 10 categorie, tra le quali *ifcBuildingElement*, *ifcCivilElement*, *ifcElementComponent*, e così via.[33]

La mappatura IFC posiziona *ifcRoof* sotto la categoria *ifcBuildingElement* [*Figura 164*], ovvero gli elementi primari per la costruzione di un edificio, cioè il suo sistema di suddivisione strutturale e spaziale.

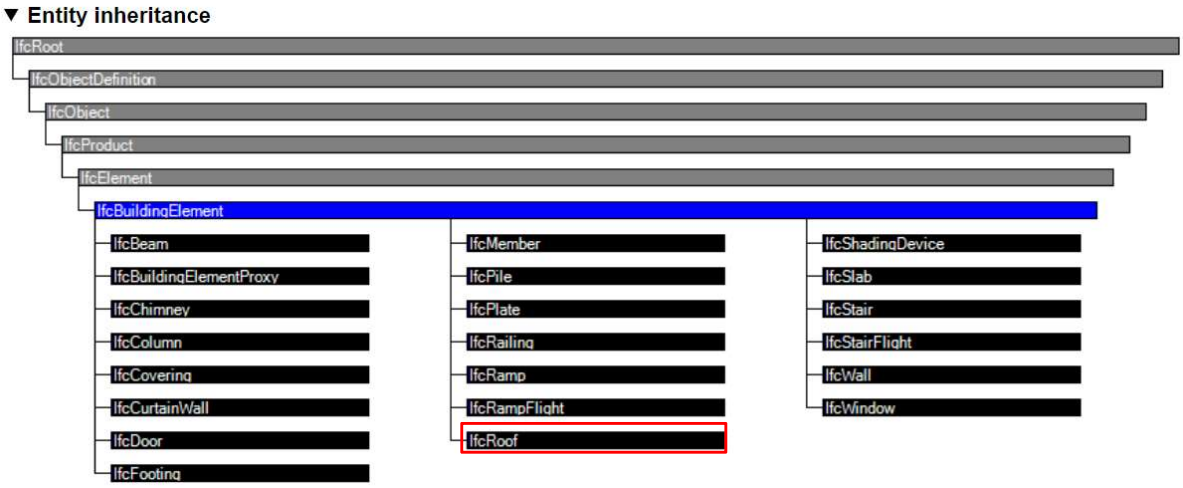


Figura 164 - Classificazione Roof sotto lo standard ifc.
(Fonte: https://standards.buildingsmart.org)

Ogni elemento può essere a sua volta decomposto in sottoelementi, a cui sono assegnati i parametri che è possibile vedere in *Figura 165*.

[33] FONTE: https://webthesis.biblio.polito.it/6708/1/tesi.pdf

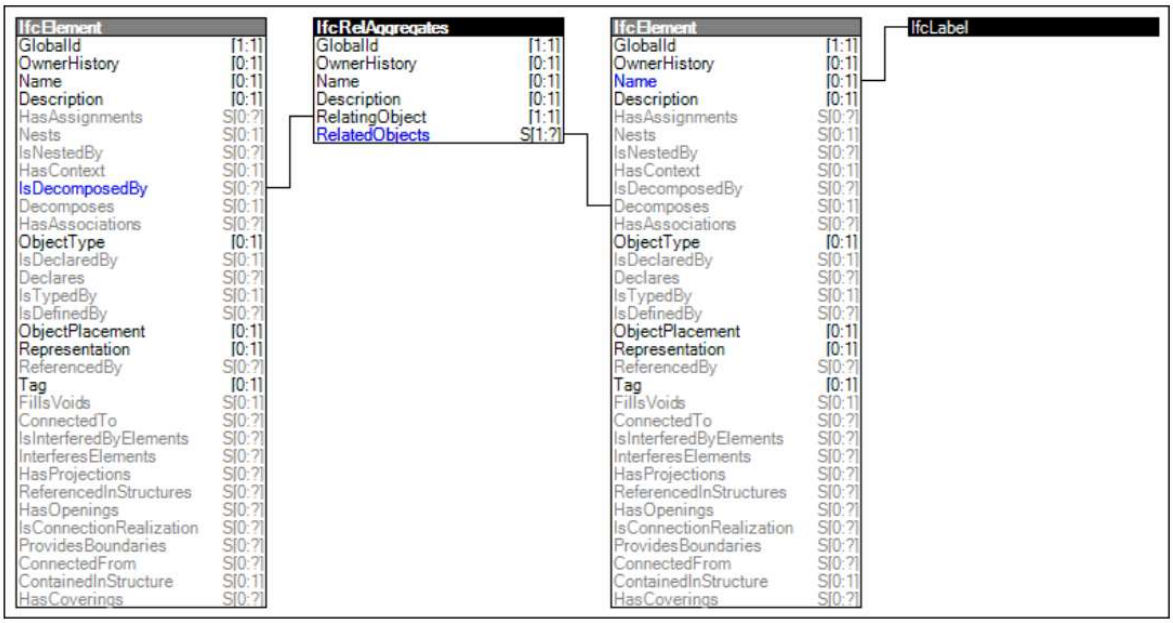


Figura 165 - Instance diagram della decomposizione di un elemento.

Gli elementi possiedono anche una serie di proprietà. Ad esempio, *IfcRoof* possiede una serie di 11 proprietà, come *Pset_RoofCommon*, che contiene informazioni su resistenza acustica, resistenza al fuoco, trasmittanza termica, *Pset_ConcreteElementGeneral*, che contiene informazioni ad esempio sul metodo di costruzione, sulla classe di esposizione, sulla classe strutturale, sulla tolleranza e la precisione delle dimensioni e così via. Tra le proprietà è stato individuato *Pset_Condition* che contiene *"Assessment"* e gli assegna i parametri *ifcDate* (data), *ifcLabel* (etichetta) e *ifcText* (testo).

Template	PropertyName	Value
Single Value	AssessmentDate	IfcDate
Single Value	AssessmentCondition	IfcLabel
Single Value	AssessmentDescription	IfcText

Figura 166 – Parametri della categoria Pset_Condition.

È stato inoltre individuato *Pset_ManufacturerTypeInformation* che contiene *"ProductionYear"*, a cui assegna il parametro *ifcLabel*.

Template	PropertyName	Value	Reference
Single Value	GlobalTradeItemNumber	IfcIdentifier	
Single Value	ArticleNumber	IfcIdentifier	
Single Value	ModelReference	IfcLabel	
Single Value	ModelLabel	IfcLabel	
Single Value	Manufacturer	IfcLabel	
Single Value	ProductionYear	IfcLabel	
Enumerated Value	AssemblyPlace	IfcLabel	

Figura 167 - Parametri della categoria Pset_ManufacturerTypeInformation.

CityGML, per quanto riguarda i singoli elementi, possiede tutti i parametri geometrici degli elementi creati in ambiente BIM, ma non possiede informazioni riguardo i dati edilizi [*Figura 168*], come lo stato di manutenzione. Per quanto riguarda l'intero edificio è stato tuttavia individuato il parametro *"Year of construction"* (anno di costruzione) [*Figura 169*].

```
▼<xs:complexContent>
  ▼<xs:extension base="core:AbstractCityObjectType">
    ▼<xs:sequence>
       <xs:element name="class" type="gml:CodeType" minOccurs="0"/>
       <xs:element name="function" type="gml:CodeType" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded"/>
       <xs:element name="usage" type="gml:CodeType" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded"/>
       <xs:element name="groupMember" type="CityObjectGroupMemberType" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded"/>
       <xs:element name="parent" type="CityObjectGroupParentType" minOccurs="0"/>
       <xs:element name="geometry" type="gml:GeometryPropertyType" minOccurs="0"/>
       <xs:element ref="_GenericApplicationPropertyOfCityObjectGroup" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded"/>
     </xs:sequence>
   </xs:extension>
 </xs:complexContent>
</xs:complexType>
```

Figura 168 - Classificazione CityObject in CityGML.
(Fonte: http://schemas.opengis.net/citygml/cityobjectgroup/2.0/cityObjectGroup.xsd)

```
<core:cityObjectMember>
  <bldg:Building gml:id="Build0815">
    <core:externalReference>
      <core:informationSystem>http://www.adv-online.de</core:informationSystem>
      <core:externalObject>
        <core:uri>urn:adv:oid:DEHE123400007001</core:uri>
      </core:externalObject>
    </core:externalReference>
    <bldg:function
        codeSpace="http://www.sig3d.org/codelists/standard/building/2.0/_AbstractBuilding_function.xml">1000</bldg:function>
    <bldg:yearOfConstruction>1985</bldg:yearOfConstruction>
    <bldg:roofType
        codeSpace="http://www.sig3d.org/codelists/standard//building/2.0/_AbstractBuilding_roofType.xml">1030</bldg:roofType>
    <bldg:measuredHeight uom="#m">8.0</bldg:measuredHeight>
    <bldg:storeysAboveGround>2</bldg:storeysAboveGround>
    <bldg:storeyHeightsAboveGround uom="#m">2.5 2.5</bldg:storeyHeightsAboveGround>
    <bldg:lod2Solid> ... </bldg:lod2Solid>
  </bldg:Building>
</core:cityObjectMember>
<core:cityObjectMember>
  <bldg:Building gml:id="Build0817">
    ...
  </bldg:Building>
</core:cityObjectMember>
<core:cityObjectMember>
  <grp:CityObjectGroup gml:id="Complex113">
    <gml:name>Hotel complex 'Scenic View'</gml:name>
    <grp:function>building group</grp:function>
    <grp:groupMember role="main building" xlink:href="#Build0817"/>
    <grp:groupMember xlink:href="#Build0815"/>
  </grp:CityObjectGroup>
</core:cityObjectMember>
</core:CityModel>
```

Figura 169 - Classificazione Building in CityGML.

Una volta analizzata la semantica degli standard IFC e CityGML si è deciso che potrebbe essere utile assegnare determinati parametri al modello HBIM, in modo da poterli interrogare in ArcGIS Pro per avere informazioni in caso di intervento sul manufatto.

Per assegnare al modello informazioni sui parametri presenti nello standard IFC ma non in CityGML si è pensato di aggiungere tali parametri alla tabella degli attributi degli elementi in ArcGIS Pro. È stato riscontrato che il modello importato in ArcGIS Pro mantiene le informazioni e le inserisce in automatico nella tabella degli attributi.

Per quanto riguarda invece le informazioni presenti nello standard CityGML ma non in IFC si è deciso di fornirle al modello in Revit. Per attribuire al modello informazioni non geometriche, Revit mette a disposizione dei parametri condivisi. I parametri sono però associati a una famiglia, che a sua volta appartiene a una categoria. Avendo individuato un parametro di CityGML riguardante l'intero edificio, si è deciso di attribuirlo al modello in ambiente GIS mettendo in relazione le varie scale di dettaglio. In ambiente BIM sono allora stati creati i parametri sull'anno di manutenzione del singolo componente edilizio.

4.2.2.3. Creazione parametri condivisi

Di seguito si riporta a titolo esemplificativo la procedura utilizzata per la creazione di parametri associati alle categorie murature e alla copertura. Sotto la sezione "Gestisci" è stato selezionato il comando "Parametri condivisi" [*Figura 170*]. È stato creato un nuovo file .txt nel quale salvare i dati riguardanti i parametri.

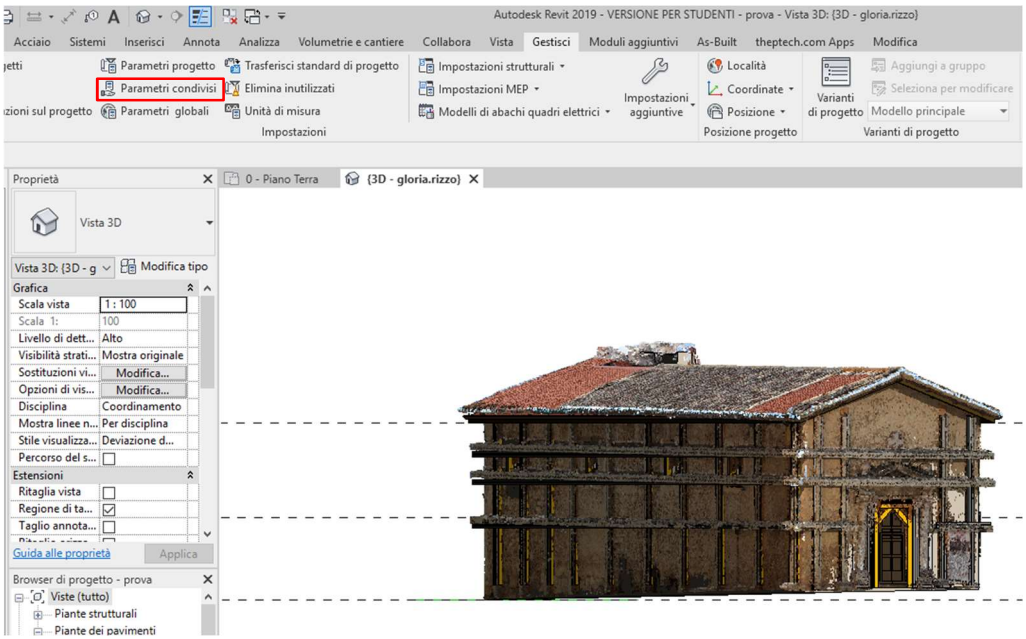


Figura 170 - Creazione parametri condivisi.

A questo punto è stato creato un gruppo di parametri e all'interno di tale gruppo sono stati creati i vari parametri come "intervento di manutenzione" e "operatore" [*Figura 171*]. Entrambi sono stati creati come parametri di testo in modo da poterli compilare manualmente con le informazioni desiderate.

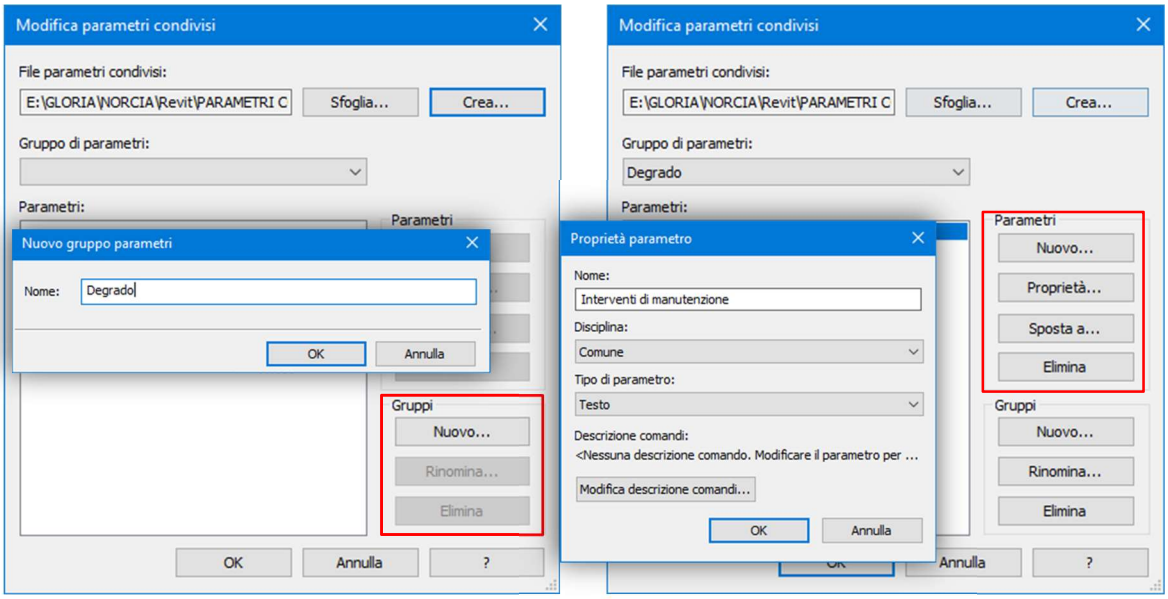


Figura 171 – A sinistra creazione gruppo parametri "Degrado", a destra creazione parametro condiviso "Interventi di manutenzione".

Una volta creati i *parametri condivisi*, questi sono stati inseriti in Revit come *parametri di progetto* [*Figura 172*] e associati a delle istanze.

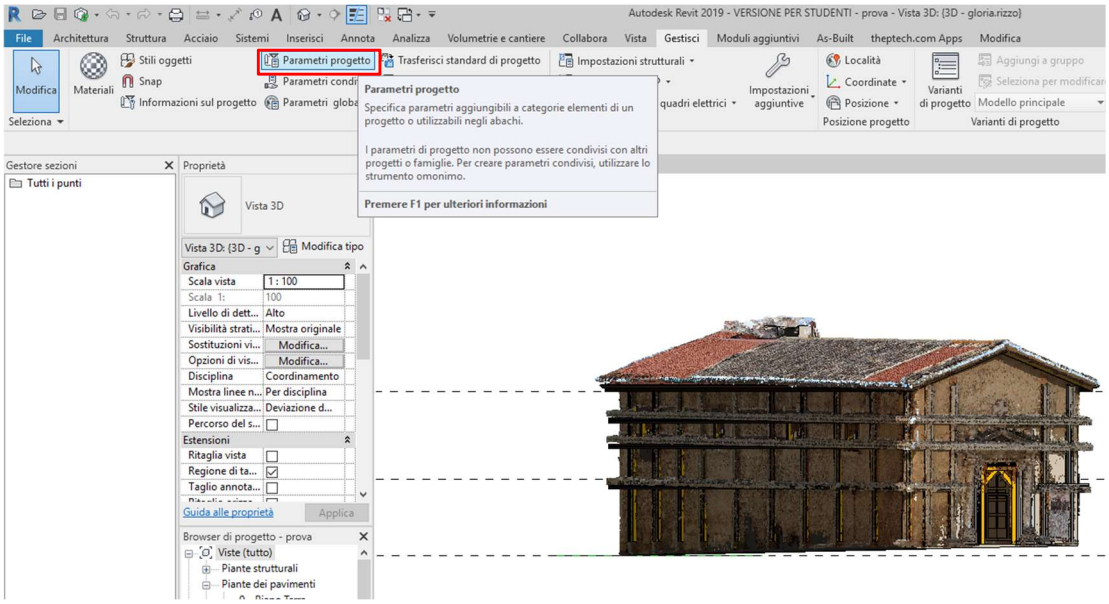


Figura 172 - Inserimento di un parametro condiviso come parametro di progetto.

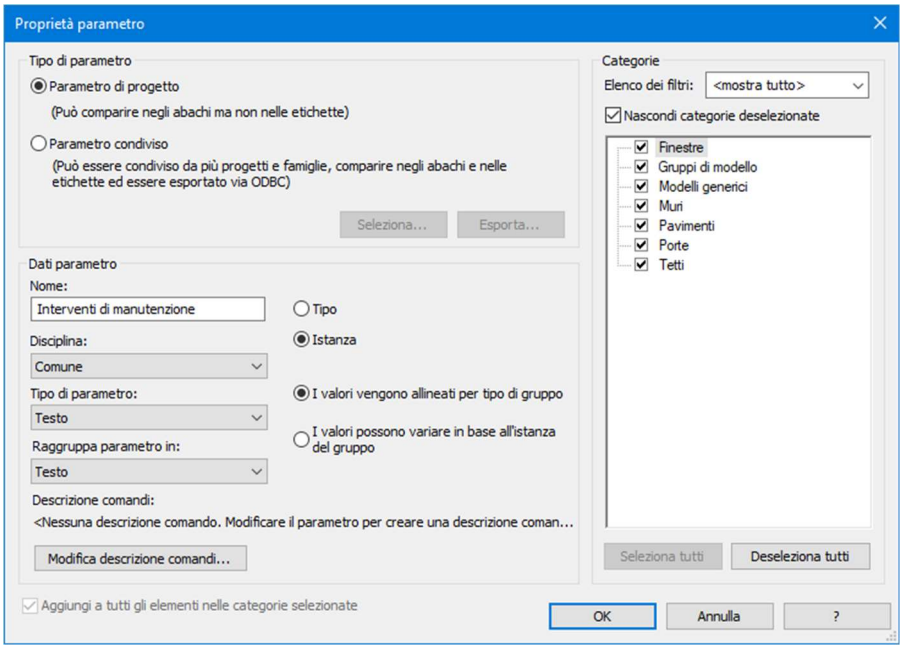


Figura 173 - Proprietà parametri di progetto.

Il parametro così creato apparirà tra le proprietà dell'istanza quando selezionata. Qui è possibile compilarlo manualmente, in quanto è stato creato come parametro di testo [*Figur3 174-175*].

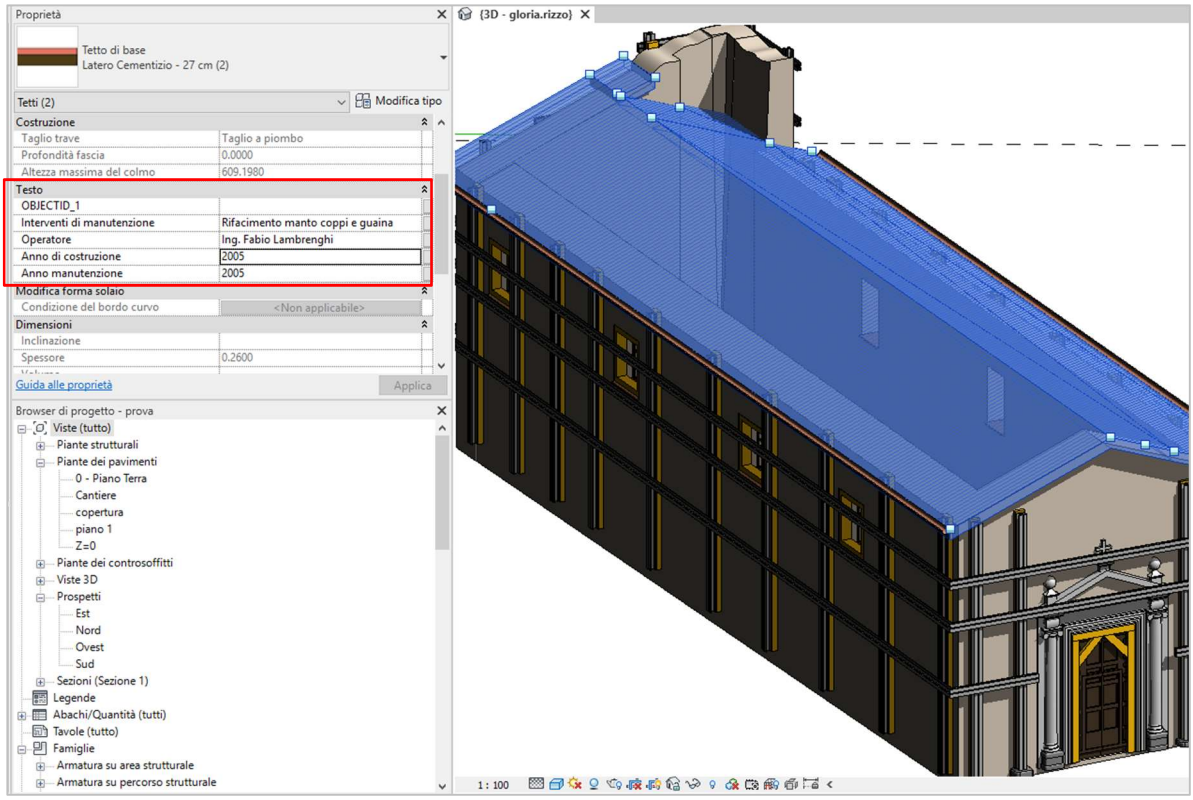


Figura 174 - Compilazione parametri condivisi copertura.

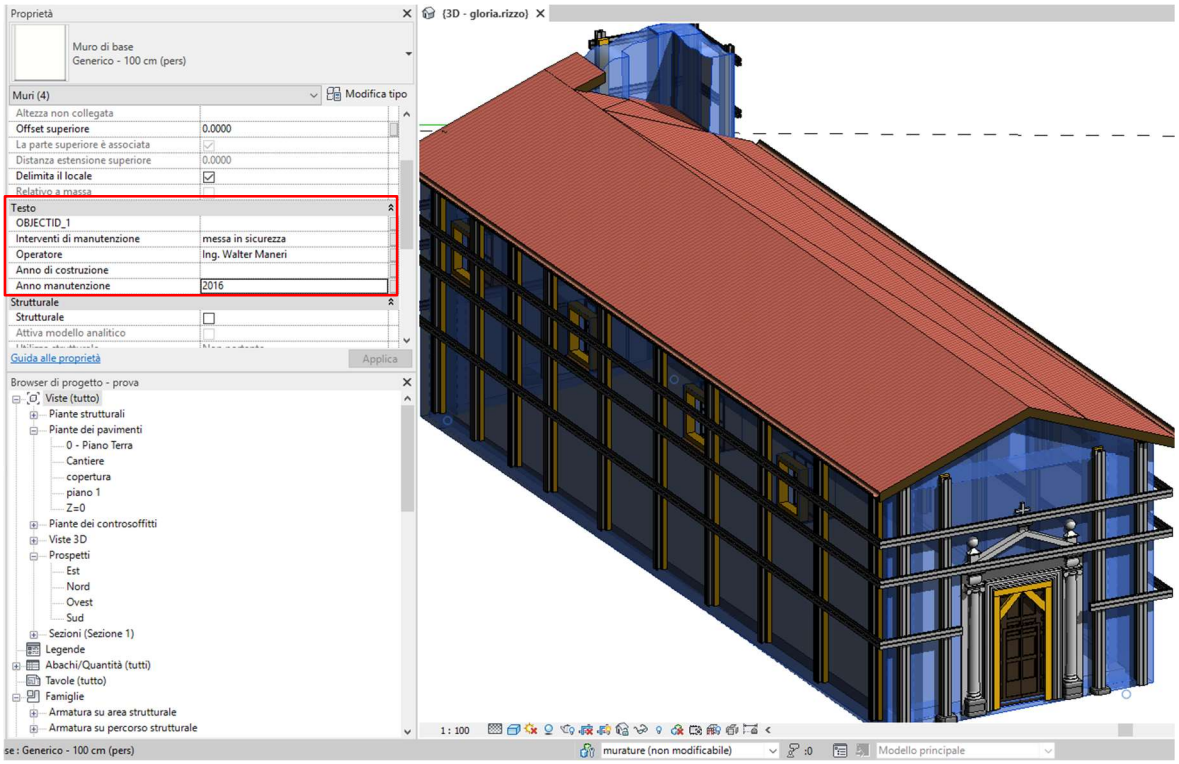


Figura 175 - Compilazione parametri condivisi - murature.

Importando il modello .rvt in ArcGIS Pro tali parametri sono stati mantenuti ed è possibile individuarli nella tabella degli attributi. Sono stati pertanto messi in relazione con gli attributi dello *shapefile* "Edifici" fornito dal Geoportale della regione Umbria. In particolare, è stata creata una relazione del tipo *Relate* 1:m, in quanto era nostro interesse mettere in relazione l'intera chiesa con i singoli componenti architettonici. La relazione fra le tabelle relative alle due entità da collegarsi si esplica per mezzo di un campo chiave comune a entrambe. Per tale motivo, oltre ai parametri relativi alle informazioni che si vogliono visualizzare, in Revit è stato assegnato ai vari componenti il parametro condiviso contenente l'ID che possiede la chiesa di appartenenza nello *shapefile* del Geoportale.

A differenza della relazione di tipo *Join* (1:1 o 1:n), che visualizza i risultati nella tabella sorgente, la relazione di tipo *Relate* crea una connessione temporanea organizzata in modo gerarchico [*Figura 176*].

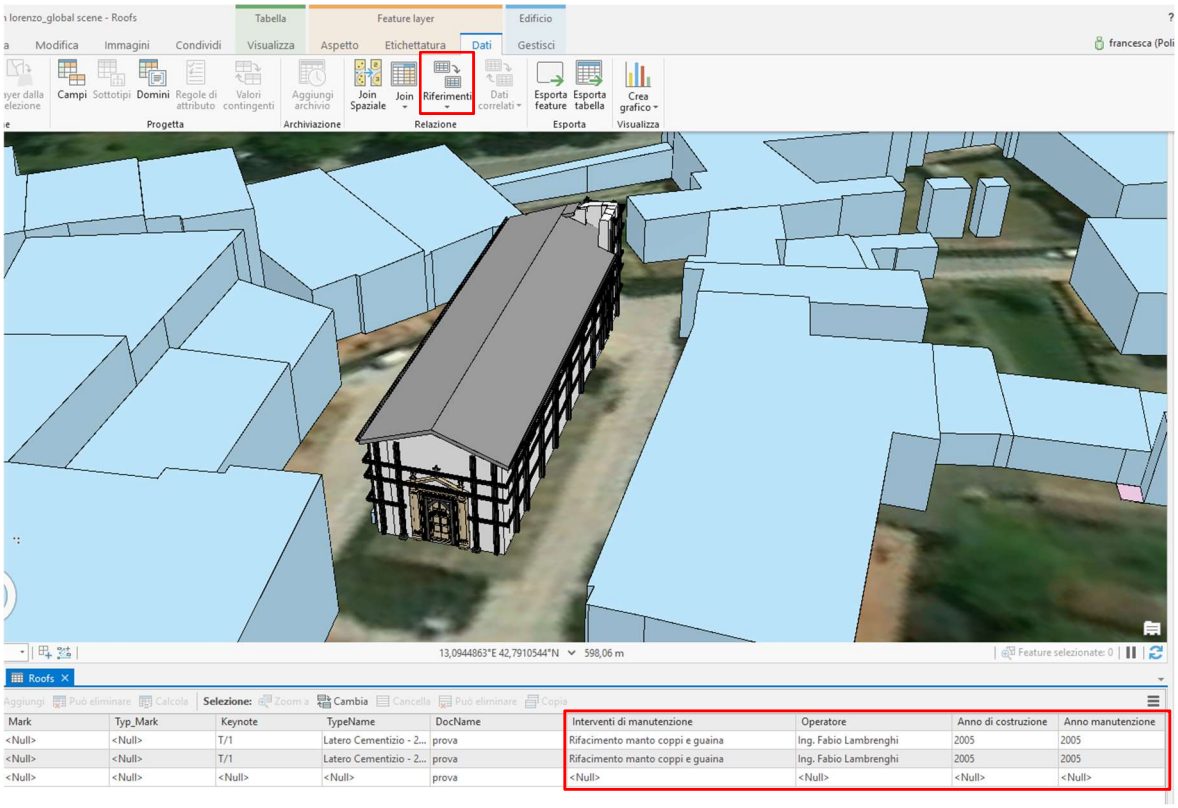


Figura 176 - In basso visualizzazione dei parametri condivisi nella tabella degli attributi; in altro comando Relate.

I dati così ottenuti possono essere condivisi con i vari operatori attivi per guidare le scelte sulle operazioni di restauro, manutenzione e messa in sicurezza.

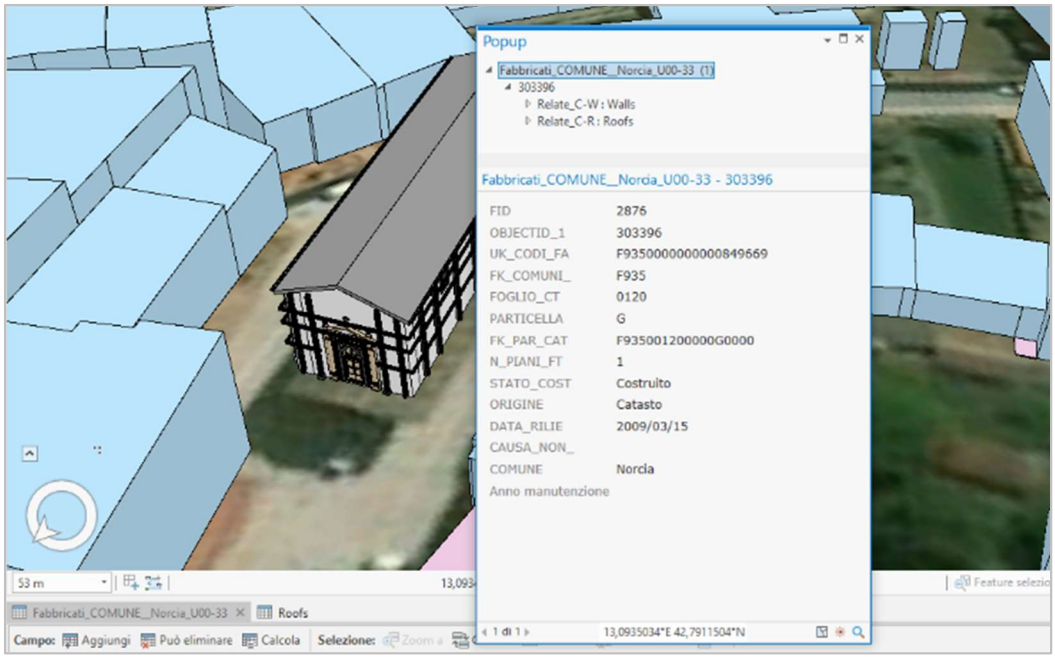


Figura 177 - Relazione di tipo Relate tra la chiesa e i suoi componenti edilizi: risposta al primo obiettivo di monitoraggio dei beni culturali.

Inoltre, trovandoci in ambiente GIS, sarà possibile pianificare le strategie di intervento mediante analisi e simulazioni. Possono ad esempio essere indicate delle aree di servizio, delle fermate, delle barriere e calcolare il percorso più breve, le posizioni migliori e i tempi di guida tra le posizioni.

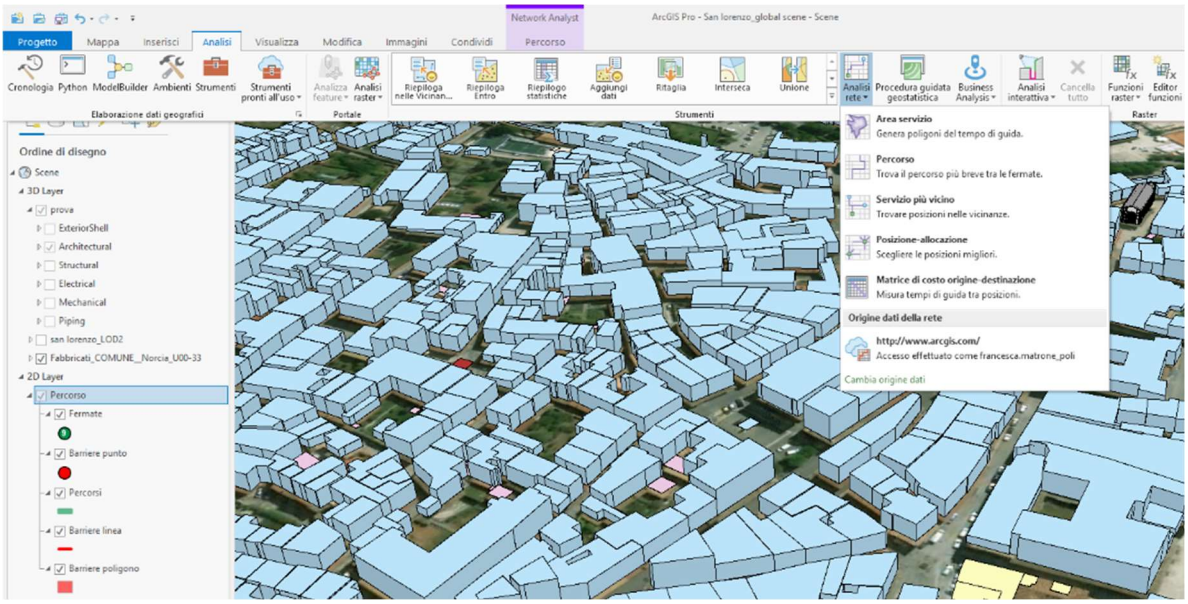


Figura 178 - Analisi di rete: risposta al secondo obiettivo di pianificazione del territorio.

CONCLUSIONI

Dati gli obiettivi proposti di tutelare i beni culturali e sviluppare delle strategie di intervento in caso di emergenza, in seguito ai recenti eventi sismici che hanno colpito il Centro Italia, è stato realizzato un progetto multiscala della città di Norcia, secondo i livelli di dettaglio (LOD) proposti dallo standard CityGML:

- LOD0 ⟶ Modello regionale 2.5D;
- LOD1 ⟶ Modello della città 3D a blocchi senza strutture dei tetti;
- LOD2 ⟶ Modello del sito 3D texturizzato con strutture dei tetti differenziate;
- LOD3 ⟶ Modello dell'edificio dettagliato.

Il LOD0 e il LOD1 sono stati realizzati in ambiente GIS grazie ai dati presenti sul Geoportale della regione Umbria. Per quanto riguarda il LOD2 e il LOD3 è stata focalizzata l'attenzione sul caso studio della chiesa di San Lorenzo ed è stato realizzato il modello tridimensione in ambiente BIM. Per ottenere il modello HBIM della chiesa è stata necessaria una nuvola di punti georeferenziata. Quest'ultima è stata ottenuta grazie al rilievo eseguito dal team DIRECT con le moderne tecnologie di acquisizione 3D. I dati del rilievo topografico, della fotogrammetria aerea con dispositivi UAV, della fotogrammetria terrestre e delle scansioni laser sono stati elaborati mediante appositi software, ottenendo infine una nuvola di punti georeferenziata della precisione di circa 2 cm, adatta a una scala di rappresentazione 1:100. Sulla base di quest'ultima è stato possibile realizzare il modello HBIM della chiesa mediante il software Revit e importarlo successivamente in ambiente GIS. Per mezzo del software ArcGIS Pro si è riusciti a superare il problema dell'incompatibilità di formato IFC-CityGML, importando direttamente il file .rvt in ambiente GIS. Qui sono state mantenute tutte le informazioni racchiuse nel modello, eccetto la *texture*. Si è deciso pertanto di analizzare la semantica degli standard IFC e CityGML al fine di individuare particolari parametri che potrebbe essere utile attribuire al modello, in modo da avere informazioni quando il modello viene interrogato in ArcGIS Pro. Per avere un'informazione completa si è deciso inoltre di unificare le informazioni possedute ai diversi livelli di dettaglio mediante una relazione *1:m*, ovvero tra l'edificio e i suoi *m* componenti edilizi.

In conclusione è stato quindi possibile strutturare un progetto in cui l'ambiente GIS permette di effettuare delle analisi sul territorio, fornendo uno strumento molto utile per la gestione delle emergenze, mentre il modello HBIM consente l'analisi a scala architettonica. Questo, in aggiunta alle informazioni attribuite ai beni culturali, permette di rispondere al duplice obiettivo di favorire la pianificazione a livello urbano e il monitoraggio del bene culturale in questione.

Bibliografia

[1] Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030, UNISDR, The United Ntion Office for Disaster Risk Reduction (Ultima consultazione 08/05/2019).

[2] World Disaster Report 2018, International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (Ultima consultazione 08/05/2019).

[3] Rapporto di sintesi sul terremoto in Centro Italia M_w6.5 del 30 Ottobre 2016, INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (Ultima consultazione 02/05/2019).

[4] Project sheet ResCult (Ultima consultazione 27/05/2019)

[5] MAURO LO BRUTTO, MARIA GRAZIA SPERA, *"Sperimentazione di procedure automatiche in fotogrammetria close-range per il rilievo di Beni Culturali*", p.1427. (Ultima consultazione 15/05/2019)

[6] GUIDI ET AL. 2003; Stumpfel et al. 2003; El-Hakim et al. 2004; Guarnieri, Remondino, Vettore 2006; Guidi et al. 2009. (Ultima consultazione 15/05/2019)

[7] PELOSO, D. (2005) Tecniche laser scanner per il rilievo dei beni culturali. Archeologia e Calcolatori (XVI). pp. 199-224. ISSN 1120-6861. (Ultima consultazione 17/05/2019)

[8] Istruzioni operative per l'uso di STARNET (Ultima consultazione 10/05/2019)

[9] SCENE 7.1 Classic manuale dell'utente Ottobre 2017. (Ultima consultazione 20/05/2019)

[10] 3DReshaper Beginners Guide. (Ultima consultazione 25/05/2019)

[11] MANUAL_As-Built for Revit 2018.0_EN (Ultima consultazione 05/06/2019)

[12] L. KIRBY, E.KRYGIEL, M.KIM; Mastering Autodesk Revit 2018, Copyright 2017 by John Wiley & Sons, Inc., Indianapolis, Indiana. (Ultima consultazione 06/06/2019)

[13] C.BALLETTI, F.GUERRA, L.PILOT; Integrazione di tecnologie 3d multiscala per la conoscenza, l'interpretazione e la diffusione di un sito archeologico. (Ultima consultazione 02/07/2019)

[14] M. DEL GIUDICE, A. OSELLO; *BIM for cultural Heritage,* International Archives of the Photogrammetry, Remote sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W2, 2013. (Ultima consultazione 12/06/2019)

[15] J.Rae Hwang, T. Wook Kang, Chang Hee Hong; A Study on The Correlation Analysis Between IFC and CityGML for Efficient Utilization of Construction Data and GIS Data. (Ultima consultazione 03/07/2019)

[16] Gerhard Gröger, Thomas H. Kolbe, Claus Nagel, and Karl-Heinz Häfele. OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard. Version 2.0.0. Open Geospatial Consortium, April 2012. (Ultima consultazione 05/07/2019)

[17] Filip Biljecki, Hugo Ledoux, and Jantien Stoter. Redefining the level of detail for 3D models. GIM International, 28(11):21–23, November 2014. (Ultima consultazione 05/07/2019)

Sitografia

Abstract e Introduzione:

[1] www.urbanisticainformazioni.it (Ultima consultazione 23/06/2019).
[2] www.unisdr.org (Ultima consultazione 08/05/2019).
[3] www.greenreport.it (Ultima consultazione 20/06/2019).
[4] media.ifrc.org/ifrc/world-disaster-report-2018/ (Ultima consultazione 08/05/2019).

Resilienza per i beni culturali e rischio sismico:

[5] ingvterremoti.files.wordpress.com (Ultima consultazione 02/05/2019)
[6] www.rescult-project.eu (Ultima consultazione 27/05/2019)
[7] areeweb.polito.it (Ultima consultazione 27/05/2019)
[8] it.wikipedia.org/wiki/Terremoto_del_Centro_Italia_del_2016_e_del_2017 (Ultima consultazione 4/05/2019)

Chiesa San Lorenzo:

[9] www.umbrialifestyle.it (Ultima consultazione 06/05/2019)
[10] http://www.giobbe.org (Ultima consultazione 06/05/2019)
[11] whatisupwiththesynod.com (Ultima consultazione 05/05/2019)
[12] www.google.com/search?q=chiesa+di+san+lorenzo+norcia&source (Ultima consultazione 4/05/2019)

Acquisizione:

[13] it.wikipedia.org/wiki/Lidar (Ultima consultazione 10/05/2019)
[14] www.3dtarget.it (Ultima consultazione 10/05/2019)
[15] it.wikipedia.org/wiki/UAV (Ultima consultazione 11/05/2019)
[16] www.treccani.it/enciclopedia/uav/ (Ultima consultazione 11/05/2019)

Elaborazione:

[17] www.danielgm.net (Ultima consultazione 14/05/2019)
[18] en.wikipedia.org/wiki/CloudCompare (Ultima consultazione 20/05/2019)
[19] 3dmetrica.it (Ultima consultazione 20/05/2019)
[20] www.3dreshaper.com/en/

Modellazione multiscala:

[21] www.iuav.it/SISTEMA-DE (Ultima consultazione 02/07/2019)

CityGML e IFC:

[22] gisak.vsb.cz/ruzicka/citygml/data/CityGML_Tutorial_Kolbe_Internet.pdf
[23] file:///C:/Users/gloria/Downloads/A_Study_on_The_Correlation_Analysis_Between_IFC_and_CityGML_for_Efficient_Utilization_of_Construction_Data_and_GIS_Data.pdf (Ultima consultazione 03/07/2019)
[24] https://webthesis.biblio.polito.it/6708/1/tesi.pdf (Ultima consultazione 06/07/2019)

HBIM:

[25] www.ingenio-web.it (Ultima consultazione 02/07/2019)
[26] bim.acca.it (Ultima consultazione 02/07/2019)

ArcGIS Pro:

[27] www.esri.com/en-us (Ultima consultazione 28/06/2019)

Indice delle figure

Figura 1 - Tipologia di disastri che stanno accadendo e con quale impatto (Fonte: World Disaster Report)..... 2
Figura 2 – Approccio open source per la condivisione dei dati. 4
Figura 3 - Logo ResCult. 4
Figura 4 - Partners del progetto ResCult: 5
Figura 5 - Mappa dei terremoti storici della regione. 7
Figura 6 - Storia sismica di Norcia. 7
Figura 7 - Schema delle faglie quaternarie e/o attive nell'area compresa tra il bacino di Montereale (sud) e l'area di Colfiorito (nord). 8
Figura 8 - Sismogramma giornaliero della stazione sismica CESX (a Cesi, Terni) della Rete Sismica Nazionale dell'INGV. Ogni riga rappresenta 30 minuti; è ben visibile il terremoto principale delle 6:40 UTC. 9
Figura 9 - Mappa della rete sismica temporanea installata da SISMIKO (quadrati gialli) tra il 24 e 30 agosto 2016 ad integrazione della Rete sismica nazionale (RSN; rombi blu)..... 10
Figura 10 - Mappa delle reti di monitoraggio sismico installate nell'area colpita dalla sequenza sismica. 11
Figura 11 - Mappa degli spostamenti co-sismici GPS orizzontali (frecce rosse) e verticali (frecce blu) ottenuti dalla combinazione di tre soluzioni geodetiche indipendenti per l'evento del 30 Ottobre 2016. I quadrati bianchi mostrano la posizione delle stazioni GPS permanenti e quelle magenta delle stazioni RING-ING (doi: 10.13127/RING). I quadrati arancioni mostrano le stazioni GPS gestite da DPC e ISPRA. I quadrati verdi e blu mostrano le stazioni della rete CaGeoNet e della rete IGM, rispettivamente, ri-occuppati dopo il 24 Agosto. 12
Figura 12 - Andamento delle probabilità settimanali per terremoti superiori a magnitudo 5.5 nell'area delimitata nel riquadro a sinistra. 12
Figura 13 - Logo del Team DIRECT. 14
Figura 14 - Vigili del Fuoco a Norcia in seguito alla scossa del 30 ottobre 2016. 14
Figura 15 - Mappa di Norcia, scaricata da Google maps, utilizzata per le operazioni di acquisizione tramite dispositivo UAV (eBee). In essa l'indicazione manuale dei marker. 17
Figura 16 - Aree rilevate con ingrandimento sul caso studio della Chiesa di San Lorenzo. 18
Figura 17 - Chiesa di San Lorenzo prima del terremoto: in altro a sinistra vista dall'ingresso; in alto a destra vista dal retro; in basso vista degli interni. 19
Figura 18 - Chiesa di San Lorenzo dopo il terremoto: in altro a sinistra vista dall'ingresso; in alto a destra vista dal retro; in basso vista degli interni. 20
Figura 19 - In alto a sinistra eidotipi dei vertici della rete di inquadramento; in alto a destra e in basso eidotipi delle scansioni. 21
Figura 20 - Schema di tutti gli strumenti per l'acquisizione 3D. 23
Figura 21 - Modalità operative riguardanti la fase di acquisizione dati. 24
Figura 22 - Rete di inquadramento. 25
Figura 23 - Monografie dei vertici NOR3000, NOR3100 e NOR3200. 26
Figura 24 - Esempio di compilazione del vertice NOR3000. 26
Figura 25 - Ricevitore satellitare GPS/GNSS in acquisizione: a sinistra acquisizione del vertice NOR3000; a destra ricevitore Leica. 27
Figura 26 - Procedura di triangolazione mediante mini prisma Leica 360. 27
Figura 27 - Acquisizione target a parete. 28

Figura 28 - FARO Focus 3D MS120: specifiche tecniche. 29
Figura 29 - A sinistra monografie delle scansioni, a destra eidotipi delle scansioni. 30
Figura 30 - DJI Spark 30
Figura 31 - Dimensioni sensori. 32
Figura 32 - Piano di volo 1. 32
Figura 33 - Piano di volo 2. 34
Figura 34 - Piano di volo 3. 35
Figura 35 - Piano di volo 4. 36
Figura 36 - Piano di volo 5. 37
Figura 37 - CANON EOS 5DS R. 38
Figura 38 - Caratteristiche della camera. 38
Figura 39 - Schema dei software utilizzati per l'elaborazione dei dati. 39
Figura 40 - Impostazione parametri di progetto "Adjustment" 40
Figura 41 - Impostazione parametri di progetto "General". 41
Figura 42 - Impostazione parametri di progetto "Instrument". 41
Figura 43 - Listing. 42
Figura 44 - Rete di dettaglio. 43
Figura 45 - Impostazioni delle preferenze. 44
Figura 46 - Caricamento foto. 45
Figura 47 - Allineamento foto. 46
Figura 48 - Posizionamento camere: a sinistra presa aerea tramite drone; a destra presa fotogrammetrica da terra. 46
Figura 49 - Importazione delle coordinate dei marker da un file di testo. 47
Figura 50 - Posizionamento di un marker. 48
Figura 51 - Errore totale Chunck volo. 48
Figura 52 - Errore totale Chunk fotogrammetria terrestre. 49
Figura 53 - Resize region, vista xy. 49
Figura 54 - Resize region, vista xz. 50
Figura 55 - Nuvola densa ottenuta tramite fotogrammetria aerea: a sinistra vista dal fronte della chiesa; a destra vista dal retro. 50
Figura 56 - Nuvola densa ottenuta tramite fotogrammetria terrestre: a sinistra vista dal fronte della chiesa; a destra vista dal retro. 50
Figura 57 - Nuvola densa ottenuta dall'unione di fotogrammetria aerea e terrestre: a sinistra vista della copertura; a destra vista delle pareti. 51
Figura 58 - Errore totale Merged chunk. 51
Figura 59 – Parametri generazione mesh. 52
Figura 60 - Parametri generazione modello 3D. 53
Figura 61 - Tiled model. 53
Figura 62 - DEM 5mm 54
Figura 63 - Parametri per la generazione dell'otofoto. Figura 64 – Ortofoto. 54
Figura 65 - Importa dati scansione. 55
Figura 66 - Carica dati scansione. 56
Figura 67 - Posizionamento manuale delle scansioni, vista "Corrispondenze". 57
Figura 68 - Collocazione scansioni "da nuvola a nuvola". 57
Figura 69 - Trova scacchiere. 58

Figura 70 - Crea punto medio di contrasto. 58
Figura 71 - Colloca scansione. 59
Figura 72 - Tensioni dei target. 60
Figura 73 - Visualizzazione della disposizione spaziale dei target. 60
Figura 74 - Scansioni collocate per target: a sinistra Vista corrispondenze; a destra Vista 3D. 61
Figura 75 - Colorazione delle scansioni: in alto selezione comando “Applica immagini”; in basso a sinistra vista 3D dal retro della chiesa; in basso a destra vista 3D dall’ingresso della chiesa. 62
Figura 76 - Creazione nuvola di punti di scansione e di progetto. 63
Figura 77 - Esportazione nuvola di punti. 63
Figura 78 - importazione file. 64
Figura 79 - Comando "Segment in". 66
Figura 80 - Comando "Cloud/Cloud Dist.". 67
Figura 81 - Impostazione parametri per il confronto cloud-to cloud. 67
Figura 82 - Risultato analisi cloud-to-cloud: Distance. 68
Figura 83 - Grafici risultato analisi cloud-to-cloud: Distance. 68
Figura 84 - Impostazione parametri per il calcolo della densità. 69
Figura 85 - Confronto della densità: a sinistra istogramma della nuvola di punti ottenuta da scansioni laser, a destra istogramma della nuvola di punti ottenuta da fotogrammetria. 69
Figura 86 - Comando “Subsample”. 70
Figura 87 - Sezione" Nuvola" del menu: comandi "Pulisci" e "Filtra". 71
Figura 88 - Pulizia della nuvola. 71
Figura 89 - Filtraggio della nuvola. 71
Figura 90 - Schema dell'applicazione di CityGML. 74
Figura 91 - Classificazione in base allo scopo e alla scala 74
Figura 92 - Logo ifc 77
Figura 93 - Logo CityGML 77
Figura 94 - Livelli di dettaglio di CityGML. 78
Figura 95 - Diagramma UML del modello in loD0. 79
Figura 96 – Convengo: Impostazione dei parametri di conversione. 80
Figura 97 - Inserimento grigliati. 81
Figura 98 - Definizione delle proiezioni. 82
Figura 99 - Indicazione delle coordinate e dell'unità di misura. 82
Figura 100 - Visualizzazione per Categorie. 83
Figura 101 - Diagramma UML del modello in loD1. (Fonte: T. H. Kolbe - CityGML Tutorial). 83
Figura 102 - Impostazione dell'estrusione degli edifici. 84
Figura 103 - LOD1 della città di Norcia. A destra zoom sulla chiesa di San Lorenzo. 84
Figura 104 - Diagramma UML del modello in loD2: in giallo loD1, in verde loD2. 85
Figura 105 – Planimetrie: a sinistra stralcio catastale foglio 120 particella G, a destra pianta piano terra. 87
Figura 106 – Prospetti con quadro fessurativo: 87
Figura 107 - Modello della chiesa di San Lorenzo in loD2. 88
Figura 108 - Diagramma del LOD3: in giallo LOD0, in verde LOD2, in arancio LOD3, in viola LOD4. 88
Figura 109 - Classificazione delle geometrie di un GML-Object. 89
Figura 110 – Zoom su geometrie primitive. 90

Figura 111 – Zoom su geometrie aggregate. 90
Figura 112 - Comando Fence. 91
Figura 113 - Comando Clip Outside. 92
Figura 114 - Comando Clip Inside. 92
Figura 115 - Comando New Region. 93
Figura 116 - Regioni: Copertura, murature e messa in sicurezza. 93
Figura 117 – Sezione “Collabora”. 94
Figura 118 - Creazione workset. 94
Figura 119 - Importazione della prima nuvola con posizionamento "da origine a origine". 95
Figura 120 - Importazione delle altre nuvole con posizionamento "da origine a ultimo posizionamento". 95
Figura 121 - Visibilità Grafica. 96
Figura 122 - Creazione Gruppo Chiesa. 96
Figura 123 - Famiglia “Porta A”, vista 3D. 98
Figura 124 - Modellazione messa in sicurezza. 98
Figura 125 – Modellazione in alto a sinistra messa in sicurezza delle finestre, in basso a sinistra messa in sicurezza della porta, a destra messa in sicurezza delle pareti. 99
Figura 126 - Modello 3D della Chiesa di San Lorenzo con materiali di default, Vista 3D. 99
Figura 127 - Creazione nuovo materiale. 100
Figura 128 - Browser dei materiali. 101
Figura 129 - Visualizzazione modello con l'assegnazione dei materiali: a sinistra visualizzazione per colori omogenei, al centro visualizzazione Realistica, a destra visualizzazione Raytrace. 101
Figura 130 - Sovrapposizione modello e nuvola. 102
Figura 131 - Facce sulle quali è stata effettuata l’analisi. 102
Figura 132 - Impostazione dei parametri di analisi. 103
Figura 133 - Analisi scostamento del modello HBIM dalla nuvola di punti: vista 3D. 103
Figura 134 - Analisi dello scostamento del modello rispetto alla nuvola di punti. 104
Figura 135 - Scostamento modello-nuvola nel campanile. 104
Figura 136 - Creazione di un modello locale. 105
Figura 137 – Creazione di un volume vuoto tramite estrusione su percorso. 105
Figura 138 - Scostamento modello-nuvola nel campanile rastremato. 106
Figura 139 - Modello HBIM della chiesa di San Lorenzo, Norcia. 106
Figura 140 - Coordinate punto T8. 107
Figura 141 - Individuazione punto T8: a sinistra vista negli eidotipi; a destra vista nel modello.. 108
Figura 142 - Finestra "Visibilità grafica", attivazione punto base di progetto e punto rilevamento. 108
Figura 143 - Abilitazione delle modifiche del punto base di progetto e del punto di rilevamento. 109
Figura 144 - Assegnazione coordinate (E,N,Q) del punto T8. 109
Figura 145 - Scena globale. 110
Figura 146 - Scena locale. 111
Figura 147 - Primo inserimento del modello Revit in ArcGIS Pro. 112
Figura 148 - Attivazione del layer "Architettonico". 112
Figura 149 - Georeferenziazione manuale: assegnazione del sistema di proiezioni in ambiente GIS. 113
Figura 150 - Individuazione località. 114

Figura 151 - Inserimento modello .rvt LOD3 in ArcGIS Pro. 114
Figura 152 - Sito per scaricare le proiezioni WGS84-UTM fuso 33N..... 115
Figura 153 - Rinominazione file .prj 115
Figura 154 - Creazione estrusioni in ArcGIS Pro. 116
Figura 155 - Progetto multiscala: visualizzazione in LOD0 in alto a sinistra, LOD1 in alto a destra, LOD2 in basso a sinistra, LOD3 in basso a destra. 116
Figura 156 - LOD0 in ArcGIS Pro. 117
Figura 157 - LOD1 in ArcGIS Pro. 117
Figura 158 - LOD2 in ArcGIS Pro. 118
Figura 159 - LOD3 in ArcGIS Pro. 118
Figura 160 - Suddivisione in classi: in azzurro il costruito, in rosso il demolito, in giallo le opere in costruzione, in rosa il non classificato. 119
Figura 161 - Tabella degli attributi della chiesa di San Lorenzo. 119
Figura 162 - Confronto IFC-CityGML classificazione in base alla scala 120
Figura 163 - Virtual Reality Exchange Formats. 120
Figura 164 - Classificazione Roof sotto lo standard ifc. 123
Figura 165 - Instance diagram della decomposizione di un elemento. 124
Figura 166 – Parametri della categoria Pset_Condition. 124
Figura 167 - Parametri della categoria Pset_ManufacturerTypeInformation. 124
Figura 168 - Classificazione CityObject in CityGML. 125
Figura 169 - Classificazione Building in CityGML. 125
Figura 170 - Creazione parametri condivisi. 126
Figura 171 – A sinistra creazione gruppo parametri “Degrado”, a destra creazione parametro condiviso “Interventi di manutenzione”. 127
Figura 172 - Inserimento di un parametro condiviso come parametro di progetto. 127
Figura 173 - Proprietà parametri di progetto. 128
Figura 174 - Compilazione parametri condivisi copertura. 128
Figura 175 - Compilazione parametri condivisi - murature. 129
Figura 176 - In basso visualizzazione dei parametri condivisi nella tabella degli attributi; in altro comando Relate. 130
Figura 177 - Relazione di tipo Relate tra la chiesa e i suoi componenti edilizi: risposta al primo obiettivo di monitoraggio dei beni culturali. 130
Figura 178 - Analisi di rete: risposta al secondo obiettivo di pianificazione del territorio. 131

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Lista delle scosse telluriche registrate dal 24 agosto 2016. 6
Tabella 2 - Scale di lavoro archeologiche e possibili dati o tecniche per il rilievo 3D digitale e non invasivo. (Fonte: Guidi et al.2003; Stumpfel et al. 2003; El-Hakim et al. 2004; Guarnieri, Remondino, Vettore 2006; Guidi et al.2009) 22
Tabella 3 - Scheda tecnica DJI Spark..... 31
Tabella 4 - Geometria della camera. 32
Tabella 5 - Pianificazione del tempo di volo..... 33
Tabella 6 - Tensioni dei target..... 61
Tabella 7 - LOD0-4 con i loro requisiti di precisione proposti. 78
Tabella 9 - Confronto semantica tra file .rvt in ArcGIS Pro e classificazione CityGML. 121
Tabella 10 - Confronto semantica ifc-CityGML ai diversi livelli di dettaglio. 122

Allegati

Allegato 1 – Export Starnet

Allegato 2 – Report Metashape

Ringraziamenti

Ringrazio tutti i membri del DIATI per la gentilezza e la diponibilità dimostrati in questi mesi. In particolare ringrazio Vincenzo, Irene e Paolo per avermi seguita durante il tirocinio ed Elisabetta e Francesca per avermi seguita durante la stesura della tesi. Ringrazio i tesisti e i tirocinanti che hanno condiviso con me questo periodo al laboratorio di Geomatica e con i quali ci siamo sostenuti a vicenda giorno dopo giorno.

Ringrazio tutte le persone che ho avuto la fortuna di incontrare durante questi anni qui a Torino. Studiare fuorisede non è mai facile, soprattutto se hai 19 anni e all'improvviso ti ritrovi lontana da casa, dalla tua famiglia, dagli amici di sempre. Grazie perché tra un'uscita e una mangiata siete diventati la mia seconda famiglia e mi avete fatto sentire meno sola. Senza di voi non ce l'avrei mai fatta. In particolare ringrazio il mio gruppo di Progettazione Integrale, nato per caso, ma che da subito è stato molto unito. Purtroppo, o per fortuna, tutte le disgrazie che sono successe ci hanno uniti a livello umano oltre che a livello universitario e ci hanno fatto capire chi ci sarà sempre per noi quando ne avremo bisogno. Nel mio cuore ci sarà sempre uno spazio per tutti voi.

Un ringraziamento speciale va a Marilena, che mi capisce più di quanto io capisca me stessa, che mi è stata accanto quando neanche io sapevo di averne bisogno. Grazie perché sono più le notti che ho dormito a casa tua che non a casa mia, per la pasta al pesto con le patatine, per i programmi di studio della sessione mai rispettati, per le canzoni napoletane neomelodiche, per la preparazione insieme prima di uscire, grazie per la quotidianità. Sei come una sorella. Grazie perché tra di noi non servono parole.

Grazie alla mia Kiki, che ha un cuore grande e un sorriso per tutti. Grazie perché mi hai fatto credere in me stessa e nelle mie capacità, per il tuo entusiasmo per ogni mio piccolo successo, per il cibo greco, per gli abbracci, per le passeggiate al parco, perché con te posso parlare di tutto e so che mi capirai.

Grazie a Betti, che mi ha lasciata entrare nel suo piccolo mondo personale e ne ha ricavato uno spazio tutto per me. Grazie perché possiamo stare al telefono a parlare di tutto e di niente per ore, per il karaoke di prima mattina, per la pizza da Pulcinella, per lo spazzolino sempre in borsa "così puoi fermarti a dormire da me!". Grazie perché non importa se hai degli impegni, se stai studiando, se ho bisogno ci sei sempre.

Grazie a Lu, l'ultima arrivata ma non meno importante. Dove sei stata tutto questo tempo? Ti sei fatta voler bene da subito e adesso non riesco a immaginare il nostro gruppetto senza te, è come se tu ci sia sempre stata. Grazie perché sai aspettare, non chiedi spiegazioni, ma ci sei a prescindere da tutto. Con la tua pacatezza e la tua precisione trasmetti tranquillità. Grazie per le serate pane e panelle,

e per quelle arancine, e per quelle torta al cioccolato, e per quelle grigliata, perché mi hai fatta sentire più vicina al mio Sud. Grazie perché “se affonda una affondano tutte!”.

Grazie a Nico e Vale semplicemente per essere così come siete, del tutto diversi ma sempre complici. Grazie perché mi fate morire dalle risate, perché non vi fate scrupoli a dire quello che vi passa per la testa, per le nottate a fare progetto di strutture, per le “tisanine” nelle tazze di Cucciolo, Brontolo e Biancaneve. Grazie perché mi assecondate in tutto, perché siete speciali, perché siete due disgraziati, perché siamo il “super trio”. Grazie perché vi siete fidati di me sin da subito e mi avete confidato i vostri problemi, perché mi avete insegnato ad essere forte e a non perdere mai il sorriso. Grazie perché “i segreti si portano nella tomba”.

Grazie e scusa alle mie coinquiline, che mi hanno sopportata e supportata mentre facevo nottate per i progetti e hanno condiviso con me la quotidianità della vita fuorisede, tra gioie, stanchezza ed esaurimenti nervosi.

Il ringraziamento più grande va alla mia famiglia per avermi sostenuta economicamente ed emotivamente. Penso di aver deciso di mollare tutto più o meno a ogni sessione d’esame, ma voi con tanta pazienza mi avete sempre convinta a non arrendermi e a continuare. Non vi ringrazierò mai abbastanza per tutto quello che fate per me. Più di tutti, voi avete creduto in me e spero con questa laurea di ripagarvi dei sacrifici che avete fatto e di rendervi fieri di me.

Qualunque cosà accadrà dopo la laurea porterò sempre con me tutti i bei ricordi di questo percorso.
Sono un po’ cresciuta, ma sono sempre la stessa e sono pronta per quello che verrà.