

Tecnologie geomatiche integrate di rilievo e rappresentazione per valutazioni interdisciplinari di rischio e resilienza: il piano di ricostruzione post-sisma per il Comune di Arsita (Teramo)

Maurizio Indirli, Lorenzo Moretti, Fabio Geremei, Anna Marzo,
Giuseppe Marghella

ENEA-UTSISM, via Martiri di Monte Sole 4, 40129 Bologna, tel. +39 051 6098727, fax +39 051 6098544
maurizio.indirli@enea.it, lorenzo.moretti@enea.it, fabio.geremei@enea.it, anna.marzo@enea.it,
giuseppe.marghella@enea.it

Riassunto

A seguito del terremoto che ha colpito la Regione Abruzzo (e in particolare la città de L'Aquila) il 6 Aprile 2009, un gruppo di lavoro (coordinato dall'Unità UTSISM del Centro Ricerche dell'ENEA di Bologna, con la partecipazione delle Università di Chieti-Pescara "Gabriele D'Annunzio", Napoli "Federico II", e Ferrara) è stato incaricato dall'Amministrazione Comunale per la redazione del piano di ricostruzione post-sisma del centro storico di Arsita (Teramo), situato nei pressi del Gran Sasso, ricadente in un pregevole territorio con notevoli potenzialità turistiche, sebbene non completamente valorizzato. Nel corso dell'effettuazione dei sopralluoghi in sito (ambiente e pericolosità da hazard naturali; danno e vulnerabilità; rilievi architettonici, urbanistici, e strutturali; sostenibilità ed efficienza energetica; aspetti sociali e demografici), della costruzione del *building inventory* geo-referenziato/su base GIS, nonché della realizzazione di un modello dettagliato 3D del costruito, sono state utilizzate in modo integrato tecnologie geomatiche di rilievo/rappresentazione (GPS, GIS, Laser Scanner, cartografia innovativa, ecc.) e metodologie digitali per l'acquisizione (tablet e smartphone), la gestione (*webservice*, *webGIS*) e l'elaborazione (algoritmi e procedure) dell'informazione. La grande mole di dati a disposizione è stata quindi finalizzata all'ottenimento delle valutazioni interdisciplinari di rischio e resilienza, delle linee guida per gli interventi strutturali, infrastrutturali e urbanistici, nonché delle idee forza per un rilancio sostenibile.

Abstract

After the seismic event that struck the Abruzzo Region in Italy (and the city of L'Aquila in particular) on April 6th, 2009, a working team (coordinated by the UTSISM Unit of the ENEA Research Centre of Bologna, with the participation of the Universities of Chieti-Pescara "Gabriele D'Annunzio", Napoli "Federico II", and Ferrara) has been entrusted by the Municipality to elaborate the post-earthquake reconstruction plan of the historic centre of Arsita (Teramo), close to the Gran Sasso Massif, in a worthy territory with remarkable tourism potentiality but not enhanced enough. During the *in situ* investigation (environment and natural hazards; damage and vulnerability; architectonic, urban planning, and structural surveys; sustainability and energy efficiency; social and demographic aspects), the setting up of the geo-referenced/GIS-based building inventory, as well as the realisation of a 3D detailed model of the construction stock, various survey/representation geomatics tools have been used in an integrate way (GPS, GIS, Laser Scanner, innovative cartography, etc.), together with digital acquisition (tablet, smartphone), management (*webservice*, *webGIS*), and elaboration (algorithms, procedures) methodologies to handle the information. The great amount of available data has been finalised to achieve the interdisciplinary assessment of risk and resilience, the guidelines for structural, infrastructural, and urban planning interventions, as well as the key ideas for a sustainable recovery.

1. Una breve descrizione del terremoto del 6 Aprile 2009

Nella notte del 6 Aprile 2009 (3:32:12, ora GMT), un terremoto di magnitudo $M_w=6.3$ ha colpito la Regione Abruzzo, con epicentro a bassa profondità focale (9.5 km, coordinate 42.348 N, 13.380 E) molto vicino a L'Aquila (7 km SO), città con circa 73000 abitanti. L'evento principale è stato il più intenso di una sequenza, iniziata alcuni mesi prima, costituita da 23 scosse di $M_w>4$ tra il 30 Marzo e il 23 Aprile, inclusi forti aftershock ($M_w=5.6$ il 7 e $M_w=5.4$ il 9 Aprile). Il sisma ha causato 305 vittime, circa 1500 feriti e più di 24000 sfollati, con l'evacuazione temporanea di almeno 80000 residenti nei primi mesi dopo il disastro, infierendo su un'area molto vasta, tra cui il centro storico de L'Aquila, i suoi sobborghi e molti paesi del circondario, causando il collasso o il danno grave di parecchi edifici, non solo costruzioni in muratura, ma sorprendentemente anche fabbricati in cemento armato abbastanza recenti, tra cui l'ospedale de L'Aquila (ultimato nel 2000) e la Casa dello Studente (risalente alla fine degli anni '70). Anche in diversi paesi del circondario il danneggiamento a muri portanti, solai e coperture è stato consistente. Il terremoto ha provocato l'inagibilità di circa 18000 unità immobiliari nell'area epicentrale, colpendo complessivamente 90 comuni con un'Intensità variabile dal V-VI al X della scala Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS), valori comparabili con quelli rilevati dopo eventi sismici verificatisi in altri Paesi anche di magnitudo più elevata. Gran parte del patrimonio storico-artistico è stato danneggiato o distrutto, in particolare le chiese barocche, i palazzi storici e altri monumenti dei periodi Medievale, Rinascimentale e Barocco (Indirli, 2010; Indirli et al., 2012).

2. Arsita, il suo territorio e il terremoto

Arsita è una cittadina di circa 1000 abitanti (ma con una considerevole estensione territoriale) situata nella Provincia di Teramo a 470 m s.l.m., sulle colline prospicienti il massiccio del Gran Sasso (Figura 1). Dopo gli isolati insediamenti preromani, il primo nucleo di Arsita, come molti altri comuni appenninici, è consistito in una costruzione fortificata evolutasi nel tempo (il Castello Bacucco, oggi in rovina), grazie alla posizione strategica nel territorio, che conferisce al luogo una splendida posizione nel paesaggio. Attorno a questa rocca, nel Medio Evo, nel Rinascimento e fino ai nostri giorni, si è sviluppato il centro storico attuale, per successive aggregazioni e modificazioni. Arsita fa parte del Parco Gran Sasso e Monti della Laga ed è sede del Museo del Lupo.



Figura 1. A sinistra, in alto e al centro: la posizione di Arsita, nei pressi del Massiccio del Gran Sasso; a sinistra, in basso: la Chiesa di Santa Vittoria e il Museo del Lupo; a destra: immagini del centro storico.

Dopo il sisma del 2009, un gruppo di lavoro (coordinato dall'Unità UTSISM del Centro Ricerche dell'ENEA di Bologna, con la partecipazione delle Università di Chieti-Pescara "Gabriele D'Annunzio", Napoli "Federico II", e Ferrara) è stato incaricato dall'Amministrazione Comunale di Arsita per la redazione del Piano di Ricostruzione; tutti i rapporti sono riportati nel sito web <http://www.pdr-arsita.bologna.enea.it/>. Dopo il terremoto, il pregevole centro storico presentava una situazione molto disomogenea riguardo a danno, vulnerabilità, interventi pregressi, manutenzione, nonché per le tracce evidenti di terremoti precedenti (Figura 1). Il terremoto ha colpito Arsita con un'Intensità pari al VI grado della scala MCS. Sebbene essa possa essere considerata moderata, il danno nel centro storico è stato consistente e diffuso per la combinazione di diversi fattori (vulnerabilità strutturale, scarsa manutenzione, particolari condizioni topografiche e natura del suolo), come riportato dalle schede AeDES di agibilità (AeDES, 2010) compilate dalle squadre della Protezione Civile nell'emergenza (Figura 2, nella versione elaborata e geo-referenziata dal gruppo di lavoro); infatti, circa una decina di nuclei familiari è stata evacuata.

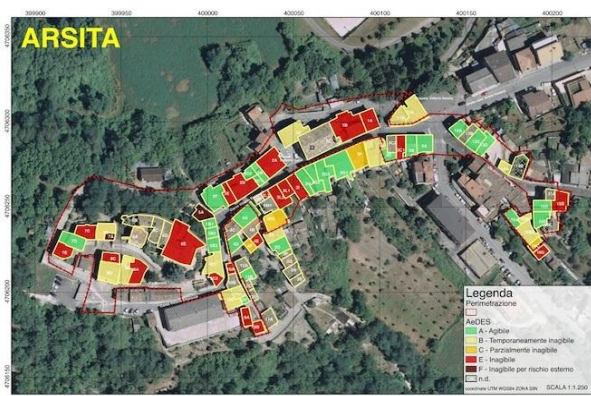


Figura 2. Carta delle agibilità del centro storico di Arsita, elaborata e geo-referenziata sulla base dei dati delle squadre della Protezione Civile.

3. Acquisizione ed elaborazione della cartografia principale

Il primo passo è stato quello di acquisire, valutare ed elaborare il materiale cartografico e fotogrammetrico indispensabile per il Piano di Ricostruzione (Tabella 3 ed esempi in Figura 4).

| |
|--|
| Carta Tecnica Regionale-Territorio Comunale 1:10000 |
| Carta IGM- Territorio Comunale 1:10000 |
| Ortofoto volo aereo anno 2007- Territorio Comunale 1:10000 |
| Carta altimetrica e dei rilievi- Territorio Comunale 1:50000 |
| Carta Tecnica Regionale su Ortofoto volo aereo anno 2007- zona Comune di Arsita 1:5000 |
| Piano Regolatore Esecutivo (PRE) |
| Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP) |
| Piano Regionale Paesistico (PRP) |
| Piano stralcio di bacino per l'assetto idrogeologico (PAI) |
| Carta Uso del suolo |
| Zonazione Parco Nazionale del Gran Sasso e Monti della Laga |

Tabella 3. Materiale cartografico e fotogrammetrico acquisito, valutato ed elaborato dal gruppo di lavoro.

Detto materiale è stato utilizzato per l'inquadramento del territorio, l'analisi di pericolosità (in particolare terremoti e frane, si veda un esempio in Figura 5), nonché per la suddivisione del centro storico in 17 aggregati e 91 unità strutturali (Figura 4d), sulla base della perimetrazione fornita dall'Amministrazione Comunale (verificata ed ampliata dal gruppo di lavoro, anche sulla base delle indagini in sito, come da paragrafo successivo).

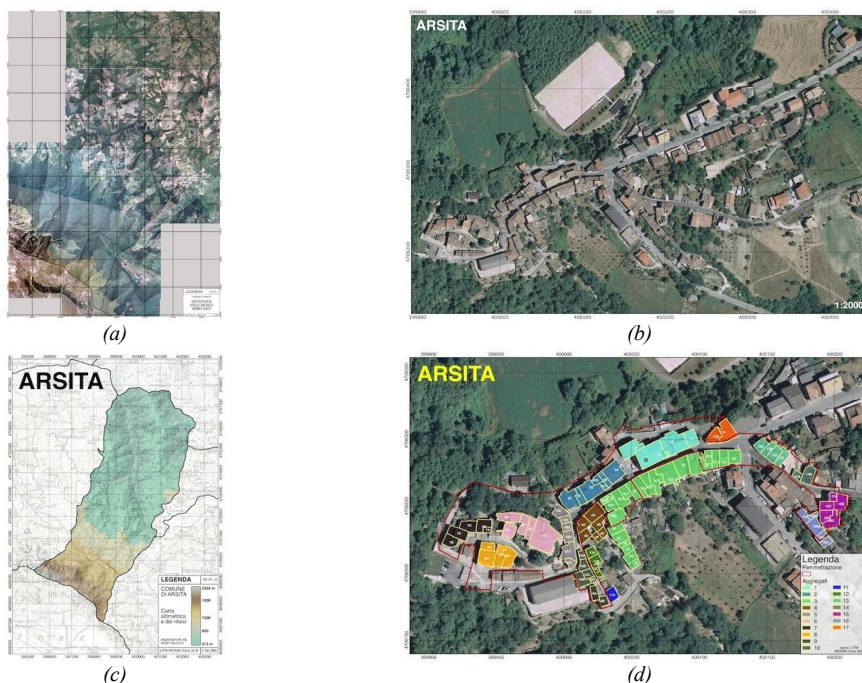


Figura 4. Esempi di elaborazione cartografica; a): ortofoto del territorio; b): ortofoto del centro storico; c): carta altimetrica e dei rilievi; d): suddivisione in aggregati ed unità strutturali.

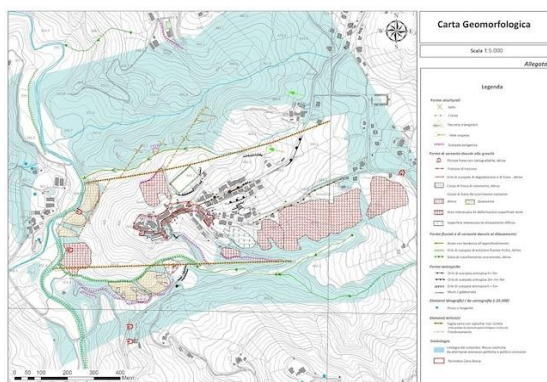


Figura 5. Esempi di elaborazione cartografica per valutazioni di pericolosità; carta geomorfologica.



Figura 6. Acquisizione digitalizzata tramite iPad e iPhone.

4. Indagini in sito

Le indagini in sito sono state le seguenti: rilievo topografico tramite DGPS (Differential Global Positioning System); rilievo fotografico e laser scanner; indagine urbanistico-architettonica degli edifici e degli spazi aperti; indagine per la verifica degli esiti di agibilità; indagine per la valutazione della vulnerabilità; indagine sulle tipologie murarie e sul quadro fessurativo. L'acquisizione dei dati in sito (valori, foto, schizzi, disegni, geo-posizionamento, ecc.) è stata anche effettuata con tablet iPad (strumento leggero e potente, completo di fotocamera, GPS, 32GB di memoria ed alcune decine applicazioni anche personalizzate) e smartphone tipo iPhone (Figura 6).

4.1 Rilievo DGPS

Il rilievo topografico è stato effettuato tramite DGPS in una serie di postazioni situate lungo la via principale del centro storico, al fine di verificare la cartografia acquisita, fornire coordinate precise per il database GIS, e ottenere posizioni di ancoraggio per le scansioni laser scanner.

4.2 Rilievo fotografico e laser scanner

Il rilievo del centro storico di Arsita ha avuto lo scopo di ricavare informazioni sulla distribuzione dei volumi abitativi, sulle tipologie costruttive e sullo stato di manutenzione degli edifici, nonché sul quadro fessurativo sia dei paramenti murari di facciata che di quelli interni, distinguendo i dati per unità strutturali nell'ambito dell'aggregato di appartenenza. Il rilievo fotografico è stato effettuato per tutto il centro storico lungo la viabilità principale e secondaria, nei cortili interni e per la totalità delle unità strutturali; le scansioni laser scanner sono state eseguite sui prospetti della viabilità principale e su alcuni caratteristici della viabilità secondaria. Per ciascun prospetto rilevato con il laser scanner, la nuvola di punti è stata elaborata per ottenere una restituzione grafica in formato CAD, indispensabile per le successive analisi (esempio in Figura 7).

4.3 Indagine urbanistico-architettonica dei volumi edilizi e degli spazi aperti

Sono state rilevate le caratteristiche salienti di tutte le unità strutturali tramite una specifica scheda di analisi urbanistico-architettonica del costruito. Ciascuna scheda è suddivisa nelle seguenti sezioni: identificazione, descrizione generale, qualità architettonica, condizioni generali e manutenzione. Sono stati individuati, con la stessa scheda di rilievo speditivo, anche gli spazi aperti. Tutti i dati sono stati inseriti nel building inventory. Alcuni esempi sono riportati nella Figura 8.

4.4 Indagine per la verifica degli esiti di agibilità

Sono state digitalizzate tutte le schede AeDES di agibilità (AeDES, 2010), compilate dalle squadre della Protezione Civile nell'emergenza ed elaborata una mappa geo-referenziata (Figura 2). Nel caso di esiti di agibilità mancanti o contraddittori, si è supplito con l'esito più conservativo proveniente dall'analisi di vulnerabilità (si veda il punto successivo).

4.5 indagine per la valutazione della vulnerabilità

Lo studio di vulnerabilità del centro storico di Arsita è stato effettuato attribuendo a tutte le 91 unità strutturali dei 17 aggregati un indice di vulnerabilità, adottando le seguenti metodologie: a) scheda GNDT II Livello per edifici in muratura (GNDT-INGV muratura, 2010); b) scheda GNDT II Livello per edifici in cemento armato (GNDT-INGV cemento armato (2010)); c) scheda Formisano per edifici in muratura (Formisano, 2013); d) scheda MEDEA per edifici in muratura e in cemento armato (MEDEA, 2005; Papa & Zuccaro, 2004; Zuccaro & Leone, 2010); e) scheda FAMIVE per edifici in muratura (D'Ayala & Speranza, 2002 and 2003); f) scheda chiese per la Chiesa di Santa Maria Vittoria (Chiese, 2010); g) scheda palazzi per il Museo del Lupo (Palazzi, 2010). Tutti i dati sono stati riportati nel building inventory. Un esempio è riportato in Figura 9.

4.6 indagine sulle tipologie murarie e sul quadro fessurativo

Sono state rilevate le principali tipologie murarie impiegate nella costruzione degli edifici del centro storico di Arsita tramite la compilazione della Scheda di I livello per il rilievo della tipologia e della qualità della muratura (Muratura, 2013); in totale sono state redatte 47 schede, riguardanti 47 paramenti murari e 6 sezioni murarie, ove ciò è stato possibile. Tutti i dati sono stati riportati nel building inventory. Un esempio è riportato in Figura 10.

5. Indicazioni progettuali

Una definizione puntuale delle proposte progettuali finali (interventi di manutenzione, consolidamento, rinforzo antisismico e restauro; risparmio/efficientamento energetico) è stata ottenuta nella fase conclusiva del lavoro, integrando le informazioni della scheda urbanistico-

architettonica con gli esiti di agibilità e le analisi di vulnerabilità/qualità muraria. Il quadro riassuntivo è riportato in Figura 11. L'incrocio dei dati ha fatto propendere per la soluzione più conservativa.



Figura 7. Rilievo fotografico/laser scanner per l'Unità Strutturale 6A:
a) posizione nell'aggregato; b) rilievo fotografico; c) nuvola di punti; d) restituzione grafica.

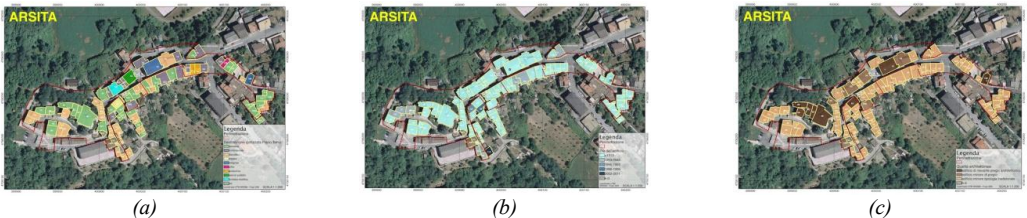


Figura 8. indagine urbanistico-architettonica: a) destinazione d'uso piano terra; b) età; c) qualità architettonica.

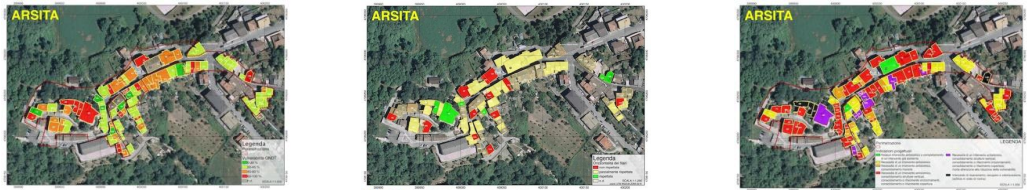
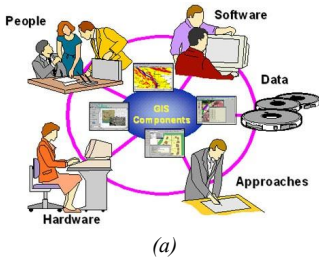


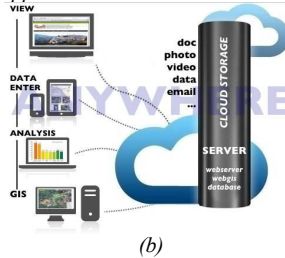
Figura 9. indici di vulnerabilità: GNDT
II Livello muratura.

Figura 10. qualità muraria:
apparecchiatura/orizzontalità dei filari.

Figura 11. Proposte progettuali
in base alle valutazioni di e vulnerabilità.



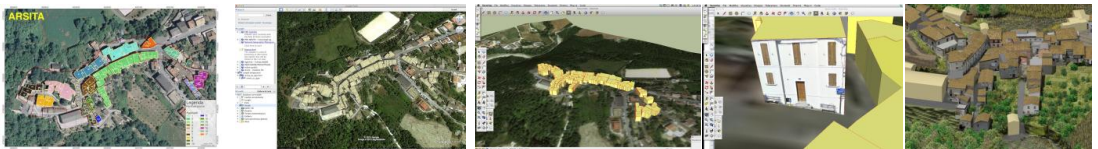
(a)



(b)



Figura 13. virtual tour con Google Earth
nel sito web del piano di ricostruzione.



(a) da QGIS a Google Earth

(b) da Google Earth a Trimble SketchUp

(c) da Trimble SketchUp a VNS

Figura 14. Evoluzione del modello 3D.

6. Il building inventory, database geo-referenziato su base GIS

Il sistema multidisciplinare più efficace per gestire l'informazione è il GIS (Geographic Information System), insieme di risorse hardware, software e umane per processare dati riferiti ad un territorio (Figura 12a). Esso è stato lo stimolo per proporre un metodo di lavoro innovativo, tale da risparmiare tempo e risorse, permettere la condivisione del materiale prodotto e sfruttare la moderna tecnologia "anywhere". Con il GIS/Webgis (via computer, tablet o smartphone) è infatti possibile l'inserimento, l'analisi e l'aggiornamento dei dati online in formato digitale, nonché la condivisione dell'informazione. La Figura 12b descrive un'infrastruttura completa di server centrale, con funzione sia di webserver che di "cloud storage". Sono stati utilizzati software Open Source GRASS (<http://grass.osgeo.org/>) e QGIS (<http://www.qgis.org/>). L'ultimo si è dimostrato potente per la possibilità di personalizzazione attraverso il linguaggio di programmazione Python. Questi software hanno la capacità di gestire la cartografia con differenti proiezioni geografiche. Nel nostro caso è stata scelta la proiezione WGS84/UTM Zona 33 Nord, ma la trasformazione in altri tipi di proiezione si effettua senza problemi. QGIS ha permesso di integrare carte vettoriali e raster con livelli di trasparenza differenti e vari stili di colore, per creare cartografie ad alto impatto. L'organizzazione digitale e geo-referenziata ha permesso di rappresentare in modo efficace non solo ogni singola grandezza rilevata, ma anche di fornire nuove elaborazioni interrogando il GIS con opportune query. Inoltre, gli errori sono stati molto ridotti per i controlli automatici inseriti nel software (Marghella et al., 2013; Geremei et al., 2013). Per la gestione dell'informazione è stato approntato un apposito sito web del Piano di Ricostruzione di Arsita (<http://www.pdr-arsita.bologna.enea.it/>, Figura 13), con diversi livelli di accessibilità a seconda dell'utente, strumenti di informazione (newsletter) e partecipazione (email e/o blog).

7. Il modello 3D del centro storico di Arsita

Per realizzare il modello 3D di Arsita sono stati utilizzati i seguenti strumenti: Trimble SketchUp (<http://www.sketchup.com>), Google Earth nella versione freeware (<http://www.earth.google.com>) e il software commerciale VNS di 3DNature, versione 3 (<http://www.3dnature.com>). Trimble SketchUp si è rivelato un ottimo modellatore 3D, permettendo la costruzione di edifici direttamente sul DTM (Digital Terrain Model) di Google Earth con alta qualità e flessibilità, interfacciandosi, inoltre, con VNS. Infatti, dopo aver convertito i dati (GIS, modellazione 3D e 2D/3D CAD) degli edifici e del territorio (provenienti dalle varie fonti di indagine) in un formato comune, sono stati importati con grande accuratezza in QGIS e quindi in Google Earth (Figura 14a). Il passaggio successivo ha visto la trasformazione da Google Earth a Trimble SketchUp, mantenendo il modello 3D geo-referenziato e compatibile, ma molto più realistico, importando direttamente le foto delle facciate (Figura 14b). L'ulteriore conversione in VNS ha permesso il completamento degli edifici con gli effetti di tessitura e ombreggiatura, nonché l'inserimento nel paesaggio, grazie alle specifiche librerie di ecosistemi ed ecotipi (Figura 14c). Il passo finale è stato quello di reimportare il modello 3d in Google Earth per permettere il tour virtuale accessibile dal sito web del piano di ricostruzione, visualizzabile anche da iPhone/iPad.

8. Il collegamento tra building inventory e modello 3D

Attualmente il modello 3D è collegato ai dati principali afferenti ad ogni unità strutturale, ma è in corso un'ulteriore implementazione per rendere disponibili rilievi, fotografie, schede compilate, schizzi, disegni, ecc.; in aggiunta, ulteriori informazioni sempre più precise saranno accessibili man mano che si svilupperanno i progetti di intervento, permettendo anche un monitoraggio continuo del piano di ricostruzione.

9. Conclusioni

L'utilizzo di strumenti avanzati per l'indagine in sito, la gestione dei dati tramite GIS e la modellazione 3D ha permesso di creare un building inventory geo-referenziato e ben organizzato a supporto del piano di ricostruzione per il centro storico di Arsita. Il futuro prossimo vedrà ulteriori

sviluppi, finalizzati alla diretta interrogazione delle informazioni raccolte tramite il collegamento diretto tra modello 3D e database, anche per seguire in tempo reale la ricostruzione post-terremoto.

10. Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il Sindaco Enzo Lucci, gli impiegati del Comune per la grande disponibilità, i progettisti locali e la popolazione di Arsita che ci ha accolto con grande affetto. Uno speciale ringraziamento va a tutti i colleghi ENEA e ai ricercatori delle istituzioni scientifiche coinvolte nella realizzazione del Piano di Ricostruzione. Un caloroso grazie ai colleghi di ENEA WebTV Fabiola Falconieri e Massimo Maffioletti per l'ottimo filmato realizzato.

Riferimenti bibliografici

- AeDES (2010). Scheda Agibilità e Danno nell'Emergenza Sismica. *Dipartimento Protezione Civile*.
- Chiese (2010). Scheda per il rilievo del danno ai Beni Culturali: chiese. *Dipartimento Protezione Civile*.
- D'Ayala D., Speranza E. (2002). An integrated procedure for the assessment of seismic vulnerability of historic buildings, *Proc. 12th European Conference on Earthquake Engineering*, London, UK.
- D'Ayala D., Speranza E. (2003). In plane and out of plane failure mechanisms on the basis of an opus quadratum mechanical formulation of the wall. *Earthquake Spectra*, August 2003.
- Formisano A. (2013). Scheda Formisano per gli edifici in muratura. *Università di Napoli "Federico II"*.
- Geremei F., Moretti L., Marzo A., Marghella G., and Indirli M. (2013). 3D modelling of Arsita town in the framework of the reconstruction, *Proc. CC2013, The 14th International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*, Cagliari, Italy, 3-6 September 2013.
- GNDT-INGV muratura (2010). Scheda GNDT II Livello per edifici in muratura. *Dipartimento Protezione Civile*.
- GNDT-INGV cemento armato (2010). Scheda GNDT II Livello per edifici in cemento armato. *Dipartimento Protezione Civile*.
- Indirli M. (2010). The 6th April 2009 L'Aquila earthquake: from ruins to reconstruction. *Seismicity and Earthquake Engineering: L'Aquila Earthquake of April 2009*. Eds. R.P. Borg, ISBN-978-99932-0-879-2, Kamra Tal-Periti, April 2010, La Valletta, Malta, 39-72.
- Indirli M., Kouris L.A.S., Formisano A., Borg R.P., Mazzolani F.M. (2012). Seismic damage assessment of unreinforced masonry structures after the Abruzzo 2009 earthquake: the case study of the historical centres of L'Aquila and Castelvechio Subequo. *International Journal of Architectural Heritage*, 7 (5): 536-578.
- Marghella G., Marzo A., Moretti L., Indirli M. (2013). Uso del GIS per il piano di ricostruzione di Arsita (TE), *Proc. XV Convegno ANIDIS (Associazione Nazionale Italiana di Ingegneria Sismica)*, Padua, June 30 – July 4, 2013.
- MEDEA (2005). Manuale di Esercitazioni sul Danno ed Agibilità per edifici ordinari, *Dipartimento della Protezione Civile*.
- Muratura (2013). Scheda di I livello per il rilievo della tipologia e della qualità della muratura. *Politecnico di Milano*.
- Palazzi (2010). Scheda per il rilievo del danno ai Beni Culturali: palazzi. *Dipartimento Protezione Civile*.
- Papa F., Zuccaro G. (2004). MEDEA: A Multimedia and Didactic Handbook for Seismic Damage Evaluation, *European Seismological Commission*, Potsdam.
- Zuccaro G., Leone M.F. (2010). Structural damage and vulnerability assessment for service life estimation through MEDEA tool. *Proc. of Final Conference of COST Action C26, Urban Habitat Constructions under Catastrophic Events*, in: Mazzolani, F. M. (chair) Naples, Italy, 16-18 September, 2010, Taylor & Francis Group, London, 1023-1029, ISBN: 978-0-415-60685-1.