

I modelli digitali 3D di città come hub informativo per simulazioni energetiche a scala urbana

Giorgio Agugiaro

AIT – Austrian Institute of Technology, Energy Department, Sustainable Buildings and Cities Unit,
Giefinggasse 2, 1210 Vienna, Austria, giorgio.agugiaro@ait.ac.at

Riassunto

Sempre più città si stanno dotando di modelli virtuali tridimensionali urbani come strumento di integrazione, armonizzazione e gestione di dati. Sempre più spesso, inoltre, lo standard internazionale CityGML viene adottato come modello informativo per modelli semantici a scala urbana e territoriale, poiché esso permette di gestire in modo coerente dati sia spaziali sia semantici. La gestione integrata di informazioni di origine eterogenea a livello urbano apre dunque la porta ad una serie di nuove applicazioni che potrebbero trarre profitto da una banca dati unica contenente informazioni dettagliate sugli edifici (dati catastali, anagrafici, ecc.) e su tutte le altre entità rilevanti per la pianificazione urbana (rete viaria, idrografia e rilievo, infrastrutture, ecc.).

Un esempio di applicazione di tale tipo riguarda gli aspetti energetici, in particolare quelli relativi alla stima del fabbisogno energetico dell'edificato ad uso residenziale – aspetto di particolare rilevanza nell'ottica di gestione oculata delle risorse energetiche e ricadente nel concetto più generale di “Smart city”. L'introduzione della certificazione energetica ha permesso di iniziare una mappatura e, pertanto, la conoscenza anche a livello energetico del patrimonio edificato esistente, purtroppo a macchia di leopardo. Il lavoro presentato in questo articolo si pone invece come obiettivo la stima del fabbisogno energetico di *tutti* gli edifici ad uso residenziale di una città a partire da un modello urbano tridimensionale virtuale basato sullo standard CityGML. Come zona di studio si è scelta una parte della città di Trento.

Abstract

More and more cities are moving towards the creation and adoption of three-dimensional virtual city models as a means for data integration, harmonisation and storage. To this purpose, CityGML is an international standard conceived specifically as information and data model for semantic city models at urban and territorial scale.

A central database for data of heterogeneous origins can thus foster the development of new integrated applications profiting from such an harmonised data source, in that detailed information is retrieved about building characteristics (e.g. from cadastre of registry office) or any other relevant entities needed for urban planning (infrastructures, hydrography and terrain models, etc.). For example, such an integrated application deals with the energy-related aspects of a city, in particular those tied to the estimation of energy demand for (existing) residential buildings – indeed a relevant topic of research at national and international level with regard to the more general concept of “Smart city”. The relatively recent adoption of the energy certification allows for a better knowledge of the energy demand of residential units (or sometimes whole buildings), however its spatial distribution is still poor and unevenly spread out.

This paper deals instead with the estimation of the energy demand of all residential buildings in a city, starting from a CityGML-based, three-dimensional virtual model. A test area, a part of Trento (Italy) was chosen.

Introduzione

La città è un sistema complesso, anche da un punto di vista energetico. La gestione oculata delle risorse energetiche, nonché la pianificazione di interventi atti a modificare gli assetti esistenti, richiedono una conoscenza il più possibile dettagliata del sistema urbano. Una componente non trascurabile, circa il 40%, dei consumi energetici urbani è costituita dal fabbisogno energetico degli edifici a uso residenziale.

La relativamente recente introduzione della certificazione energetica per gli edifici rappresenta un passo verso la conoscenza (anche da un punto di vista energetico) del patrimonio edificato esistente, tuttavia è lecito assumere che, almeno nel breve periodo, la maggior parte degli edifici realizzati precedentemente al 2009 non sarà interessato da questo tipo di certificazione – fatto salvo per i casi previsti dalla legge. Di fatto, si andrà costituendo una mappatura energetica della città a macchia di leopardo.

Il presente lavoro si pone pertanto come obiettivo la stima del fabbisogno energetico di *tutti* gli edifici a uso residenziale di una città. Come zona di studio si è scelta una parte della città di Trento. Sebbene esistano diversi esempi in letteratura riguardo alla stima del fabbisogno energetico degli edifici, quelli che si basano su un modello semantico tridimensionale basato su CityGML (CITYGML) (Kolbe et al., 2008) sono relativamente pochi nel panorama nazionale. Un approccio che presenta alcune analogie con quanto presentato in questo articolo è menzionato in Dalla Costa et al. (2011), tuttavia non sono esplicitamente specificate le caratteristiche del modello 3D. A Trento, il progetto I-Scope (I-SCOPE) (Prandi et al., 2013) persegue obiettivi in parte simili (modello 3D basato su CityGML, stima del fabbisogno energetico degli edifici), tuttavia ad oggi (settembre 2014) non sono noti e pubblicati né dettagli tecnici sulla metodologia di calcolo adottata, né risultati (il progetto è tuttavia ancora in corso, la conclusione è prevista nel corso del 2015).

A livello internazionale esistono diversi esempi, soprattutto in ambito tedesco. Basti citare il caso dell'Energy Atlas di Berlino (ENERGY ATLAS BERLIN) (Kaden et al., 2013), o di altre città come Stoccarda, Amburgo, Karlsruhe o Ludwigsburg (Nouvel et al., 2013).

Il lavoro svolto e qui descritto è stato suddiviso in due parti: inizialmente si è creato un modello virtuale tridimensionale e semantico di città aderente allo standard CityGML, in un secondo tempo sono stati sviluppati ed adattati algoritmi per la stima del fabbisogno energetico a livello di singolo edificio, con specifico riferimento agli standard nazionali vigenti.

Per ragioni di spazio, della prima parte verrà data in questo articolo solo una sommaria descrizione e si rimanderà alla bibliografia esistente per i dettagli, mentre della seconda parte si darà un più esteso resoconto. Saranno poi presentati e discussi i risultati, per poi passare alle conclusioni ed alla descrizione degli sviluppi futuri.

Il modello digitale 3D di Trento

Prerequisito fondamentale di questo lavoro è stata la creazione di un modello 3D di una parte di Trento secondo CityGML. L'area di studio è stata scelta in modo da contenere un sufficiente numero di edifici (circa 2300), opportunamente distribuiti in termini di età (anno di costruzione), uso (residenziale, commerciale, ecc.) e dimensioni (case singole, a schiera, condomini, ecc.). La zona di studio è presentata in Figura 1.

Da un punto di vista geometrico, gli edifici sono stati modellati in LoD2 (Level of Detail 2). Ciò significa che non si tratta di semplici modelli prismatici ottenuti per estrusione dai sedimi, bensì è inclusa una rappresentazione, eventualmente semplificata, delle falde di copertura. La suddivisione degli edifici è stata effettuata in considerazione della suddivisione catastale; per ogni edificio, le superfici esterne sono semanticamente distinte in *GroundSurface*, *WallSurface* e *RoofSurface*, come peraltro previsto da CityGML.

Per maggiori dettagli sul processo di creazione del modello 3D, si invita a far riferimento ad Aguiaro (2014), in cui la metodologia seguita, i dati utilizzati ed i problemi affrontati sono illustrati in dettaglio.

Per quanto riguarda i dati raccolti ed associati ad ogni edificio, qualora disponibili, questi sono di seguito elencati e brevemente riassunti:

- superficie, volume, numero di piani (interrati e non), numeri di piani interi;
- indirizzo/i, numero di famiglie e di persone residenti;
- codice catastale, numero di unità immobiliari (UI) globale, numero di unità immobiliari a uso residenziale, numero di vani;
- anno di costruzione ed elenco di eventuali interventi di restauro/ampliamento/sistemazione;
- elenco di certificati energetici.

Il modello 3D, ed una selezione di dati associati, sono consultabili liberamente all'indirizzo web <http://sbc1.ait.ac.at/projects/trento/kmz/trento.kml> (è richiesto l'utilizzo dell'applicazione Google Earth). Un esempio è riportato in Figura 2.

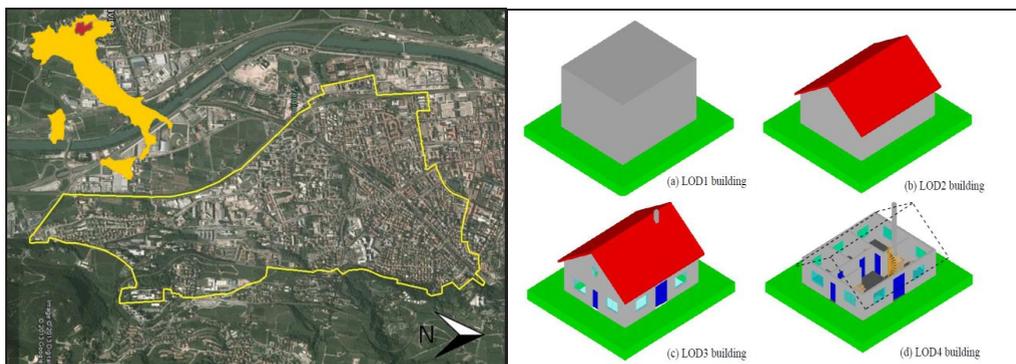


Figura 1 – A sinistra: l'area di studio. A destra: diversi livelli di dettaglio (LoD) dello stesso edificio secondo CityGML. Fonte dell'immagine: specifiche del formato CityGML.

Trento CityGML

General Building Cadastre Energy About

General information

Condominio Manila is a Edificio, used mostly as Residenziale misto. It corresponds to the following address(es):

VIA G. BUCCELLA, 14
 VIA G. BUCCELLA, 16
 VIA G. BUCCELLA, 18
 VIA G. BUCCELLA, 20
 VIA G. BUCCELLA, 22
 38122, TRENTO

According to the Registration office in Trento, there are 15 familie(s) living here, for globally 27 resident(s).

Location coordinates (decimal degrees):
 N 46.05790094274059, E 11.12359168846827

[See location in Google Maps](#)
[See location in OpenStreetMap](#)
[See location \(oblique imagery\) in Trento WebGIS](#)

Object added to the 3DCityDB on 2014-07-03 by Giorgio Agugiaro
 Gmlid: UUID_ef09cc29-25c5-4de5-8c01-88cb9a8e178c

Figura 2 – Esempio di informazioni consultabili per ogni edificio modellato nella zona di studio.

Determinazione della prestazione energetica: metodologia ed ipotesi di lavoro

Il modello 3D di Trento descritto nel paragrafo precedente è servito come base di partenza per la determinazione della prestazione energetica di ogni edificio, espressa in termini di fabbisogno sia mensile che annuo di energia primaria per il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria. Si è seguita essenzialmente la procedura di calcolo contenuta nelle specifiche tecniche UNI/TS 11300 (parti 1 e 2). Non essendo tuttavia disponibili dati di dettaglio sull'interno degli edifici, il calcolo è stato effettuato modellando ogni edificio come un'unica zona termica ed applicando una serie di assunzioni e di ipotesi semplificative che verranno esposte via via di seguito. Si sono trascurati i fabbisogni dovuti alla climatizzazione estiva.

A partire dai criteri di classificazione identificati nel progetto "Tabula" (TABULA) (Corrado et al., 2011) per gli edifici ricadenti nella zona climatica media (l'area di studio di Trento rientra completamente nella zona climatica E), e sfruttando le informazioni contenute nel modello 3D, tutti gli edifici residenziali sono stati classificati secondo 8 classi di epoca di costruzione (fino al 1900, 1901-1920, 1921-1945, 1946-1960, 1961-1975, 1976-1990, 1991-2005, 2006-oggi) e 4 classi di dimensione edilizia (casa monofamiliare, casa a schiera, edificio multifamiliare, blocco di appartamenti). Agli edifici così classificati è stato quindi possibile assegnare dei valori caratteristici di trasmittanza termica (U) per i componenti opachi e trasparenti, di trasmittanza di energia solare totale per i componenti trasparenti, nonché una serie di parametri prestazionali per l'impianto di riscaldamento e di generazione di acqua calda ad uso sanitario. Tali valori sono da intendersi "tipici" per ogni classe di edificio ed impianto e sono stati ricavati dai risultati pubblicati in seno al succitato progetto "Tabula" per l'Italia.

Grazie alle informazioni semantiche presenti nel modello tridimensionale, è stato possibile distinguere le geometrie delle coperture da quelle delle pareti e, calcolarne area, angolo di orientamento (e relativa classe di orientamento secondo le direzioni cardinali N, S, E, O, NE, NO, SE, SO) e di inclinazione. Sono inoltre state calcolate tutte le superfici imputabili a pareti condivise, distinguendo tra superfici tra due edifici residenziali, in cui per ipotesi non avviene alcun scambio termico e tra edificio residenziale e non residenziale, in cui per ipotesi vi è scambio termico verso un ambiente non riscaldato.

Il calcolo del fabbisogno di energia netta per le esigenze di riscaldamento in condizioni standard è stato eseguito utilizzando i dati climatici di Trento (UNI 10349) e applicando le seguenti assunzioni e semplificazioni:

- maggiorazione delle dispersioni della parete opaca del 5%, relativa alla presenza di ponti termici;
- fattore di correzione $b_{tr,x}=0,5$ per lo scambio termico verso ambienti non climatizzati;
- fattore di correzione $b_{tr,g}=0,45$ per lo scambio termico verso il terreno, in assenza di piani interrati non riscaldati;
- fattore di riduzione $F_{sh,ob,k}$ per ombreggiatura da ostruzioni esterne pari a 0,9 per tutti i componenti verticali dell'involucro opaco e trasparente;
- fattore di assorbimento solare $\alpha_{sol,c}$ dei componenti opachi pari a 0,6;
- rapporto tra superficie finestrata e parete pari a 0,28;
- assenza di schermature solari e chiusure oscuranti sulle superfici dei serramenti ($F_{sh,gl}=1$);
- fattore di correzione dovuto al telaio F_F pari a 0,2 per tutti i componenti trasparenti;
- calcolo del volume netto riscaldato V_{ve} pari ad una frazione del volume lordo dell'edificio, quest'ultimo calcolato trascurando il volume del sottotetto e degli eventuali vani interrati, fatto salvo dove si dispongano informazioni sull'edificio che indicano un sottotetto abitato;
- tasso di ventilazione naturale fissato a $0,3 \text{ h}^{-1}$;
- calcolo semplificato della superficie utile di pavimento A_f a partire dalla superficie lorda e moltiplicandola per il numero di piani interi;
- calcolo degli apporti termici interni Q_{int} in funzione della superficie utile di pavimento;

- calcolo semplificato della capacità termica interna dell'edificio in base alla tipologia costruttiva.

Come indicato in "Tabula", il calcolo delle perdite di energia termica dei sottosistemi impiantistici è stato eseguito applicando i valori dei rendimenti assegnati in base alla tipologia impiantistica o, in alternativa, i valori predeterminati delle perdite di energia termica disponibili per alcuni sottosistemi analizzati.

Il calcolo del fabbisogno di energia netta per acqua calda ad uso sanitario è stato effettuato a partire dal volume d'acqua calda richiesto giornalmente da un'unità abitativa, quest'ultimo espresso in funzione della superficie utile di pavimento. È stato assunto un rendimento di erogazione costante pari a 0,95. Laddove necessario, si sono poi applicati i parametri di conversione da energia netta ad energia primaria.

Risultati

La metodologia di calcolo descritta nel paragrafo precedente è stata implementata ed applicata a tutti gli edifici ad uso residenziale ricadenti nell'area di studio, per complessivi 1900 edifici circa. Per ogni edificio residenziale, si sono ottenuti i seguenti valori:

- fabbisogno mensile specifico di energia netta per riscaldamento, per produzione di acqua calda ad uso sanitario e totale (somma dei due termini) per unità di superficie utile, in $[kWh/m^2]$;
- valori di fabbisogno annuale specifico di energia netta per riscaldamento, per produzione di acqua calda ad uso sanitario e totale (somma dei due termini) per unità di superficie utile, in $[kWh/(m^2 \cdot a)]$;
- valori di fabbisogno come al punto b), ma in termini di energia primaria, in $[kWh/(m^2 \cdot a)]$;
- classe di prestazione energetica, da A+ a G, secondo la normativa della Provincia Autonoma di Trento.

Un esempio di visualizzazione dei risultati e della rispettiva classe energetica per un edificio è presentato in Figura 3 a sinistra, mentre a destra è riportato il grafico dei valori mensili di energia netta per riscaldamento ($Q_{h,nd}$) e produzione di acqua calda sanitaria ($Q_{w,nd}$) del medesimo edificio, ottenuti moltiplicando il valore specifico per la sua superficie utile.

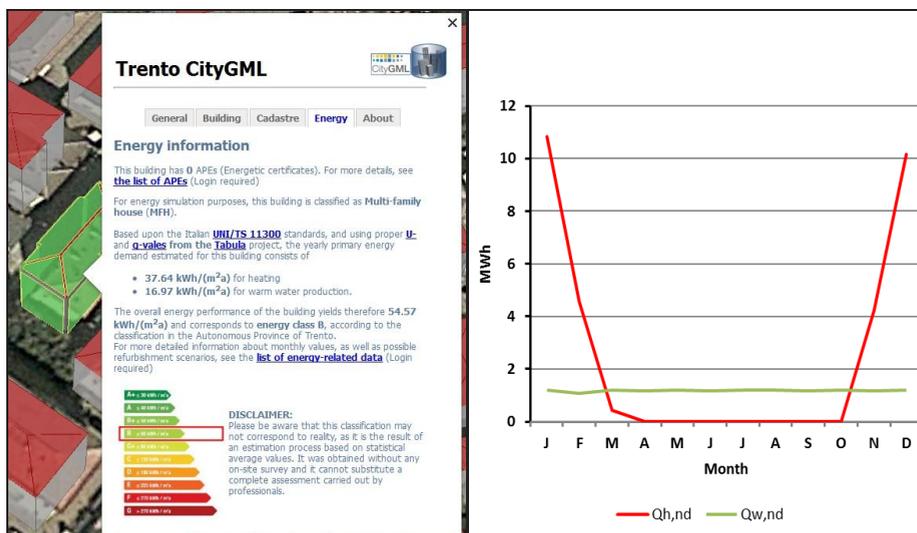


Figura 3 – A sinistra: visualizzazione dei risultati mediante interfaccia grafica. A destra: grafico del fabbisogno mensile di energia netta per riscaldamento ($Q_{h,nd}$) e produzione di acqua calda sanitaria ($Q_{w,nd}$) del medesimo edificio.

Al fine di caratterizzare gli edifici in modo migliore rispetto alla semplice classificazione di cui al progetto “Tabula”, sono state utilizzate le informazioni relative all’elenco degli interventi di restauro effettuati sull’edificio o sugli impianti nel corso del tempo. In tal modo è stato possibile aggiornare lo stato tecnologico in caso, per esempio, di sostituzione dei serramenti o del generatore di calore, aggiunta di un cappotto esterno di isolamento, rifacimento della copertura, ecc. Nel caso di sostituzione dei serramenti, per esempio, i valori originali di trasmittanza termica e di trasmittanza di energia solare totale sono stati cambiati con quelli relativi alla medesima classe di dimensione edilizia, ma con la classe di epoca di costruzione corrispondente a quella in cui è avvenuto l’intervento di sostituzione. Un esempio è presentato in Figura 4, in cui sono evidenziati alcuni edifici per i quali gli interventi di “aggiornamento” implicano un cambio di classe energetica.



Figura 4 – A sinistra: rappresentazione degli edifici residenziali in base alle classi energetiche ottenute utilizzando l’anno di costruzione come unico valore temporale per descrivere l’edificio. A destra: sono evidenziati alcuni edifici per i quali gli interventi di restauro e/o aggiornamento tecnologico implicano un cambio di classe energetica.

Calcolo di scenari di riqualificazione energetica ed aggregazione dei risultati

Una volta stimati i fabbisogni di energia per lo stato attuale, gli stessi algoritmi sono stati applicati per stimare il fabbisogno energetico nel caso di riqualificazione energetica di tutti gli edifici mediante tecnologie e materiali attuali, in modo da poterne valutare il potenziale in termini di risparmio energetico. Inoltre è stato possibile aggregare spazialmente i valori dei singoli edifici usando per esempio le sezioni ISTAT. Un esempio è riportato in Figura 5 a sinistra e a destra, rispettivamente.

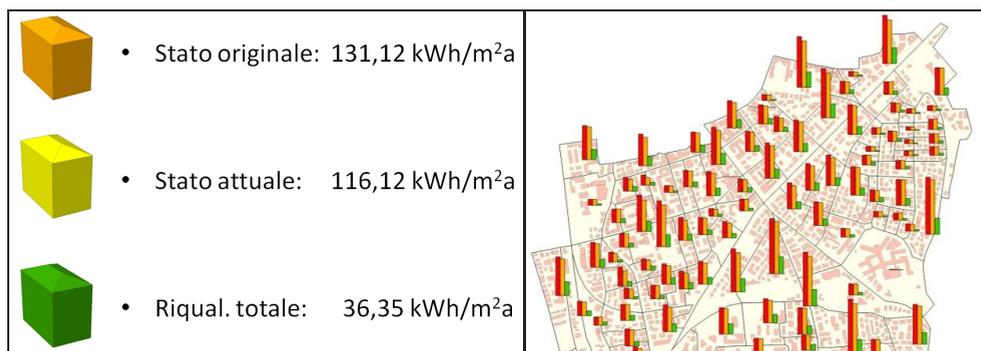


Figura 5 – A sinistra: esempio di calcolo di riqualificazione energetica di un edificio. A destra: aggregazione dei fabbisogni di energia primaria a livello di sezione ISTAT. Rosso indica “stato originale”, arancione “stato attuale” e verde “riqualificazione totale”.

Conclusioni e sviluppi futuri

A partire da un modello urbano tridimensionale e semantico, conforme allo standard internazionale CityGML ed opportunamente arricchito con set di dati di diversa origine, si sono implementati algoritmi necessari per la stima del fabbisogno energetico degli edifici ad uso residenziale.

Gli edifici sono stati classificati secondo i criteri proposti dal progetto “Tabula”, mediante i quali è stato possibile assegnare loro caratteristiche fisiche e parametri tipici, necessari al calcolo della prestazione energetica in condizioni standard (per riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria) basandosi sulle norme UNI/TS 11300.

Vista l'impossibilità di conoscere in dettaglio la struttura e le caratteristiche degli interni, il calcolo è avvenuto considerando ciascun edificio come unica zona termica ed adottando, dove necessario, opportune semplificazioni. Un esempio è dato dalla mancanza di dati relativi alla precisa estensione dell'involucro trasparente, poiché queste informazioni non sono disponibili a livello di dettaglio LoD2. Tuttavia CityGML già prevede la modellazione esplicita anche delle finestre a partire dal livello di dettaglio LoD3, per cui la metodologia sviluppata e presentata in questo articolo può essere adattata con minimo sforzo a modelli di edifici più dettagliati. Un secondo esempio è dato dalla possibilità offerta da CityGML di gestire anche gli spazi interni di un edificio al livello di dettaglio LoD4. A tale scopo, un test per importare automaticamente in CityGML i dati catastali, geometrici e non, nel nuovo formato DocFa4 adottato nelle Province Autonome di Trento e Bolzano a fine 2013 è già stato condotto con successo (Fronza et al., 2013). Si veda a tal proposito quanto presentato in Figura 6. Ciò dimostra che i modelli urbani tridimensionali bene si prestano in qualità di hub informativi per simulazioni energetiche a scala urbana.

Nonostante gli edifici siano stati caratterizzati con valori statistici “tipici” e tratti dalla letteratura esistente, uno degli aspetti che ancora richiedono maggiori approfondimenti riguarda la validazione del modello. Una possibilità potrebbe essere offerta dai certificati energetici, dove tuttavia vadano chiaramente identificati i rischi associati al confronto di entità a scala differente: un intero edificio con dati (spesso) solo su una parte di esso.

Uno dei prossimi passi consisterà nell'integrare con i risultati finora ottenuti anche le informazioni relative al potenziale fotovoltaico e solare termico delle superfici di copertura, poiché questi dati sono già disponibili per Trento grazie a progetti conclusi negli anni scorsi (Agugiario et al., 2012; Nex et al., 2013).



Figura 6 – A sinistra: visualizzazione del modello 3D dell'interno dell'edificio, ottenuto da dati Docfa 4. A destra, visualizzazione integrata dell'esterno (da dati topografici) e dell'interno dell'edificio (da dati Docfa).

Bibliografia

Agugiaro, G., Nex, F., Remondino, F., De Filippi, R., Droghetti, S., Furlanello, C. (2012) “Solar radiation estimation on building roofs and web-based solar cadaster”, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. I(2), pp. 177-182.

Agugiaro, G. (2014), “From sub-optimal datasets to a CityGML-compliant 3D city model: experiences from Trento, Italy”, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-4, pp.7-13.

CITYGML, <http://www.citygml.org> (ultimo accesso: 5 settembre 2014).

Corrado, V., Ballarini, I., Corgnati S., Talà, N. (2011), *Building Typology Brochure – Italy*, Dipartimento di Energetica, Gruppo di Ricerca TEBE, Politecnico di Torino, Torino, Italy. ISBN: 978-88-8202-070-5.

Dalla Costa, S., Roccatello, E., Rumor, M. (2011) “A CityGML 3D geodatabase for buildings energy efficiency”, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVIII-4/C21.

ENERGY ATLAS BERLIN, <http://energyatlas.energie.tu-berlin.de> (ultimo accesso 5: settembre 2014).

Fronza, A., Dalla Torre, S., Agugiaro, G. (2013), “Docfa 4: rappresentazione grafica vettoriale e integrazione 3D”, *Atti della 17a Conferenza Nazionale ASITA*, Riva del Garda (TN).

Kaden, R., Kolbe, T. H. (2013) “City-wide total energy demand estimation of buildings using Semantic 3D city models and statistical data”, *Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. II-2/W1.

Kolbe, T. H., Gröger, G., Plümer, L. (2008), “CityGML - 3D City Models for Emergency Response”, In: Zlatanova, Li (eds.): *Geospatial Information Technology for Emergency Response*, ISPRS book series, Taylor & Francis.

I-SCOPE, <http://www.iscopeproject.net> (ultimo accesso 5: settembre 2014).

Nex, F., Remondino, F., Agugiaro, G., Filippi, R., Poletti, M., Furlanello, C., Menegon, S., Dallago, G., Fontanari, S. (2013) “3D Solarweb: A solar cadastre in the Italian Alpine landscape”, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-7/W2, pp.173-178.

Nouvel, R., Schulte, C., Eicker, U., Pietruschka, D., Coors, V. (2013) “CityGML-based 3D city model for energy diagnostics and urban energy policy support”, *IBPSA World 2013*, pp. 1-7.

Prandi, F., De Amicis, R., Piffer, S., Soave, M., Cadzow, S., Gonzalez Boix, E., D’Hont, E. (2013) “Using CityGML to deploy smart-city services for urban ecosystems”, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-4/W1, pp. 87-92.

TABULA, <http://episcopo.eu> (ultimo accesso 5: settembre 2014).

Ringraziamenti

L’autore desidera ringraziare il Comune di Trento (in particolare: Servizio Sistema Informativo, Servizio Urbanistica, Ufficio Anagrafe e Archivio Storico) e la Provincia Autonoma di Trento (in particolare: Servizio Catasto e Agenzia Provinciale per le Risorse Idriche e l’Energia) per aver fornito tutti i dati usati in questo lavoro.

Un sentito ringraziamento va ai colleghi della Technische Universität München, in particolare Thomas Kolbe, Maximilian Sindram e Robert Kaden, per le proficue discussioni ed i consigli inerenti l’implementazione degli algoritmi per la stima del fabbisogno energetico a partire da un modello urbano in CityGML.