

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



Tesi di Laurea Magistrale

**Produzione di cartografia tecnica in ambito comunale mediante
l'utilizzo di droni.**

Il caso del Comune di Mappano.

Relatore: Prof. Lingua Andrea Maria

Correlatore: Ing. Di Pietra Vincenzo

Candidata: Beani Egle

Anno Accademico 2018/ 2019

a Francesca,

ai Nostri sogni,

ai Nostri incubi,

a Noi.

Sommario

Con questo progetto di Tesi ci si è proposti di sperimentare e racchiudere lo stato dell'arte della ricerca nell'ambito della restituzione fotogrammetrica digitale, con particolare interesse all'ambito urbano del Comune di Mappano.

Nel dettaglio, la stesura dell'elaborato prende forma dalle basi teoriche a me note, approfondite mediante lo studio di testi e normative aggiornate, includendo la trattazione delle metodologie innovative messe in atto nel processo di acquisizione aerofotogrammetrica mediante droni.

Nelle successive fasi di elaborazione dei dati si è potuto sperimentare il grande potenziale della restituzione automatica, con la fondamentale influenza della qualità dei dati acquisiti e forniti come input degli algoritmi di calcolo eseguiti dai software commerciali utilizzati.

L'analisi dei risultati è stata affrontata con una prospettiva e una ricerca dell'interoperabilità dei risultati stessi. Lo sguardo è stato rivolto innanzitutto agli Standard Europei, che trovano traduzione in quelli Regionali messi in atto, nell'ottica di rendere questo tipo di ricerca una realtà consolidata nelle amministrazioni comunali del contesto territoriale piemontese ed italiano.

La parte finale della trattazione riguarda il dato tridimensionale, per la quale modellazione è stata sperimentata una procedura semi-automatica, che ha dato modo di evidenziare la grande necessità di automatizzazione della stessa, finalizzata ad ottenere dati di qualità elevata, capaci di garantire un'efficienza maggiore a fronte di un costo temporale inferiore.

L'utilità delle applicazioni ingegneristiche del dato ottenuto si rivolge all'intero panorama tecnico-amministrativo, spaziando in diversi domini e aree di competenza; ed è capace di incentivare un processo di miglioramento, semplificazione e automatizzazione di procedure attualmente complessi.

Abstract

With this Thesis project we set out to experiment and encompass the state of the art of research in the field of digital photogrammetric restitution, with particular interest in the urban environment of the Municipality of Mappano.

In detail, the drafting of the paper takes shape from the known theoretical bases, that I studied in depth through the analysis of updated texts and regulations, including the discussion of the innovative methodologies implemented in the aerial photogrammetric acquisition process using drones.

In the subsequent data processing phases it was possible to experience the great potential of automatic return, with the fundamental influence of the quality of the data acquired and provided as input of the calculation algorithms performed by the commercial software used.

The analysis of the results was addressed with a perspective and a research for interoperability of the results themselves. The focus was first of all on the European Standards, which find translation in the Regional standards put in place, with a view to making this type of research a consolidated reality in the municipal administrations of the Piedmontese and Italian territorial context.

The final part of the discussion concerns the three-dimensional datum, for which modeling a semi-automatic procedure has been experimented, which has given way to highlight the great need for its automation, aimed at obtaining high quality data, able to guarantee a greater efficiency compared to a lower time cost.

The usefulness of the engineering applications of the data obtained is aimed at the entire technical-administrative landscape, ranging over different domains and areas of competence; and it's able to stimulate a process of improvement, simplification and automation of currently complex procedures.

Indice

Sommario	I
Abstract	II
Indice	III
Indice delle figure	V
Indice delle tabelle	IX
Capitolo 1 - Introduzione	1
1.1 I database geotopografici	1
1.2 Il sistema BDTRE di riferimento	2
1.3 Il caso del Comune di Mappano	4
1.4 L'obiettivo e le applicazioni	4
1.4.1 Applicazioni per il contesto cittadino	6
Capitolo 2 - Cenni Teorici	13
2.1 Il processo fotogrammetrico	13
2.1.1 Fase di presa – fotogrammetria aerea da drone	16
2.1.2 Fase di appoggio – i GCP	21
2.1.3 Il posizionamento GNSS	22
2.1.4 Fase di modellazione fotogrammetrica – il software	25
2.1.5 I risultati	26
2.2 I database	29
2.2.1 Base dati Regione Piemonte: BDTRE	30
2.2.2 Specifiche per cartografia di base	33
2.2.3 Da DBTRE a INSPIRE	35
2.2.4 Interoperabilità degli Standard Europei	37
Capitolo 3 - Caso studio	40

3.1	Il territorio in esame	40
3.2	Il coinvolgimento dell'organizzazione sociale	42
3.3	Materializzazione GCP	44
3.4	La pianificazione del volo	48
3.4.1	I voli realizzati	53
3.5	Elaborazione dati fotogrammetrici e risultati	62
3.5.1	Report Pix4Dmapper	67
3.5.2	Report Agisoft Metashape	74
Capitolo 4 - Ottenere il dato cartografico 3D		82
4.1	Il modello CityGML	82
4.1.1	Livelli di dettaglio	85
4.1.2	Classificazione degli elementi presenti sul territorio	88
4.1.3	Building Model	90
4.1.4	Transportation objects	92
4.1.5	Vegetation objects	93
4.2	Da CityGML a BDTRE	94
4.2.1	Livello Urbano – Edifici	96
4.2.2	Livello Viabilità	97
4.2.3	Livello Vegetazione	98
4.3	Creazione automatizzata del modello di città 3D	98
4.3.1	La procedura sperimentata	101
4.3.2	Il dato 3D prodotto	111
Capitolo 5 - Conclusioni		113
Bibliografia		115
Sitografia		119

Indice delle figure

Figura 1.2.1. BDTRE – Sistema aperto e collaborativo.	3
Figura 1.4.1: Applicazioni utili 3D City Model.	5
Figura 1.4.2: Stima dell'ombra proiettata dall'edificio per differenti posizioni della fonte luminosa – CyberCity3D.	8
Figura 1.4.3: Simulazione del livello di rumore su un modello di città 3D – Kurakula.	9
Figura 1.4.4: Stima dell'irradiazione solare degli edifici per una data e un'ora specifiche – Argedor.	10
Figura 1.4.5: Risultati della stima della domanda di calore degli edifici. - Jean-Marie Bahu, EIFER.	11
Figura 2.1.1: Dall'immagine fotografica originale alla rappresentazione raster.	14
Figura 2.1.2: (a) Un solo fotogramma – (b) Due fotogrammi da centri di proiezione distinti.	15
Figura 2.1.3: sinistra: Modalità di presa terrestre – destra: Modalità di presa aerea.	16
Figura 2.1.4: Strisciata aerofotogrammetrica.	17
Figura 2.1.5: Schema pianificazione del piano di volo.	19
Figura 2.1.6: Fasi della metodologia di rilievo PPK.	24
Figura 2.1.7: DSM e DTM a confronto.	28
Figura 2.2.1: Metadati disponibili sul GeoPortale.	32
Figura 2.2.2: Esempi di strutture del dato dal Catalogo dei Dati Territoriali Versione 2.2.1.	36
Figura 2.2.3: Relazione tra le norme di attuazione di INSPIRE e le linee guida tecniche - Direttiva 2007/2/CE (INSPIRE).	39
Figura 3.1.1: Strumento ricerca Mappe – GeoPortale Piemonte.	40
Figura 3.1.2: Individuazione confini Comune di Mappano – GeoPortale Piemonte.	41
Figura 3.2.1: Parte della squadra del DIATI, e dei volontari Arcobaleno Mappanese sul campo, durante la fase di appoggio – 27 marzo 2019, Mappano.	42

Figura 3.2.2: Parte della squadra del DIATI, e dell' Arcobaleno Mappanese sul campo, durante gli spostamenti delle fasi di presa aerea – 29 marzo 2019, Mappano.	44
Figura 3.3.1: Materializzazione GCP: marker in plastica semi-rigida e PVC flessibile.	45
Figura 3.3.2: Materializzazione GCP: marker rappresentati artificialmente sul territorio.	45
Figura 3.3.3: Materializzazione GCP: elementi identificabili sul territorio.	46
Figura 3.3.4: Localizzazione marker sul territorio mappanese – GoogleMaps.	47
Figura 3.4.1: UAV senseFly eBee Plus.	49
Figura 3.4.2: Fasi di assemblaggio della strumentazione senseFly - eBee Plus.	50
Figura 3.4.3: Camera senseFly S.O.D.A.	51
Figura 3.4.4: Schermata di visualizzazione eMotion3.	51
Figura 3.4.5: Visualizzazione barra di controllo software eMotion3 – simulazione missione di volo.	52
Figura 3.4.6: Visualizzazione cono di presa e numero di acquisizioni - software eMotion3.	53
Figura 3.4.7: Volo n. 1 – venerdì 29/03/2019.	54
Figura 3.4.8: Volo n. 2 – venerdì 29/03/2019.	55
Figura 3.4.9: Volo n. 3 – venerdì 29/03/2019.	55
Figura 3.4.10: Volo n. 4 – venerdì 29/03/2019.	56
Figura 3.4.11: Volo n. 5 – sabato 30/03/2019.	56
Figura 3.4.12: Volo n. 6 – sabato 30/03/2019.	57
Figura 3.4.13: Volo n. 7 – domenica 31/03/2019.	57
Figura 3.4.14: Volo n. 8 – domenica 31/03/2019.	58
Figura 3.4.15: Volo n. 8+ – domenica 31/03/2019.	58
Figura 3.4.16: Volo n. 9 – domenica 31/03/2019.	59
Figura 3.4.17: Volo n. 10 – domenica 31/03/2019.	59
Figura 3.4.18: Volo n. 11 – domenica 31/03/2019.	60
Figura 3.4.19: Volo n. 12 – domenica 31/03/2019.	60
Figura 3.4.20: Copertura completa voli eseguiti sul territorio di Mappano.	61

Figura 3.5.1: Ortofoto prodotta in formato jpeg - Pix4Dmapper.	64
Figura 3.5.2: DSM prodotto – Pix4Dmapper.	65
Figura 3.5.3: Visualizzazione camere e fotogrammi su nuvola di punti – Pix4DMapper.	66
Figura 3.5.4: Presentazione Quality Report Pix4Dmapper.	67
Figura 3.5.5: Posizione iniziale delle immagini - Quality Report Pix4Dmapper.	68
Figura 3.5.6: Offset tra posizioni iniziali (blu) e calcolate (verde) - Quality Report Pix4Dmapper.	69
Figura 3.5.7: Numero di immagini sovrapposte calcolate per ciascun pixel dell'ortomosaico - Quality Report Pix4Dmapper.	70
Figura 3.5.8: Posizioni delle immagini calcolate con collegamenti tra immagini corrispondenti - Quality Report Pix4Dmapper.	71
Figura 3.5.9: Presentazione Processing Report Agisoft Metashape – anteprima ortofoto prodotta.	74
Figura 3.5.10: Posizione delle camere e sovrapposizione delle immagini – Processing Report Agisoft Metashape.	75
Figura 3.5.11: Posizione delle camere e stima dell'errore - Processing Report Agisoft Metashape.	76
Figura 3.5.12: Posizione GCP e stima dell'errore - Processing Report Agisoft Metashape.	77
Figura 4.1.1: Diagramma UML del modello geometrico: Primitive e Compositi – CityGML Encoding Standard.	84
Figura 4.1.2: Diagramma UML del modello geometrico: Complessi e Aggregati – CityGML Encoding Standard.	84
Figura 4.1.3: Gerarchia delle classi – CityGML Encoding Standard.	85
Figura 4.1.4: Cinque livelli di dettaglio definiti dal CityGML.	86
Figura 4.1.5: Livelli di dettaglio CityGML con relativi requisiti di accuratezza.	87
Figura 4.1.6: Diagramma UML Building model – CityGML Encoding Standard.	89
Figura 4.1.7: Diagramma UML Transportation model – CityGML Encoding Standard.	90
Figura 4.1.8: Diagramma UML Vegetation model – CityGML Encoding Standard.	90

Figura 4.1.9: Building model in LOD0-4.	91
Figura 4.1.10: TrasportationComplex in un modello di città 3D CityGML-LOD2.	92
Figura 4.1.11: Evoluzione TransportationComplex da LOD0 a LOD4.	93
Figura 4.1.12: Esempio di elementi VegetationObjects.	93
Figura 4.2.1: Costruzione dell'attributo concatenato – BDTRE.	95
Figura 4.3.1: Estrusione delle impronte degli edifici – 3D City Modelling EuroSDR.	99
Figura 4.3.2: Ricostruzione da forme parametriche – 3D City Modelling EuroSDR.	99
Figura 4.3.3: Procedural modelling - 3D City Modelling EuroSDR.	99
Figura 4.3.4: Porzione di territorio selezionata – nuvola di punti a sinistra, ortofoto a destra.	100
Figura 4.3.5: Schema di flusso procedura sperimentata.	101
Figura 4.3.6: Modellazione dati vettoriali bidimensionali – Layers ArcMap.	103
Figura 4.3.7: Definizione base dati layer vegetation – Attribute Table ArcMap.	104
Figura 4.3.8: Definizione base dati layer traffic_area – Attribute Table ArcMap.	104
Figura 4.3.9: Definizione base dati layer building– Attribute Table ArcMap.	105
Figura 4.3.10: Struttura Workflow – FME Software.	106
Figura 4.3.11: FME Reader nuvola di punti in formato LAS.	107
Figura 4.3.12: FME Reader shapefile 2D 'building'.	107
Figura 4.3.13: FME Reader shapefile 2D 'traffic area'.	108
Figura 4.3.14: FME Reader shapefile 2D 'vegetation'.	108
Figura 4.3.15: FME SurfaceDraper elementi 'traffic area'.	109
Figura 4.3.16: FME SurfaceDraper elementi 'vegetation'.	109
Figura 4.3.17: FME SurfaceDraper elementi 'building'.	110
Figura 4.3.18: FME Clipper nuvola di punti – shapefile 'building'.	110
Figura 4.3.19: FME Extruder shapefile 'building'.	111
Figura 4.3.20: Il modello tridimensionale e il database prodotto - ArcScene.	112

Indice delle tabelle

Tabella 3.3.1: Coordinate acquisite con ItalPOS – parte 1.	47
Tabella 3.3.2: Coordinate acquisite con ItalPOS – parte 2.	48
Tabella 3.5.1: Corrispondenza fotogrammi/marker GCP.	63
Tabella 3.5.2: Precisioni e accuratezze GCP contrassegnati.	72
Tabella 3.5.3: Errori coordinate X, Y, Z Ground Control Point.	78
Tabella 3.5.4: Errori coordinate X, Y, Z Check Points.	79
Tabella 3.5.5: Accuratezze software a confronto.	80
Tabella 3.5.6: Tempi di elaborazione softwares a confronto.	81
Tabella 4.1.1: Entità, file e geometrie corrispondenti secondo CityGML.	88
Tabella 4.1.2: Semantica della classe CityGML _AbstractBuilding.	91
Tabella 4.2.1: Tipologia degli attributi – Specifica Semplificata.	95
Tabella 4.2.2: Classi e attributi del Livello Urbano – Specifica Semplificata.	96
Tabella 4.2.3: Classi e attributi del Livello Viabilità – Specifica Semplificata.	97
Tabella 4.2.4: Classi e attributi del Livello Vegetazione – Specifica Semplificata.	98

Capitolo 1 - Introduzione

Nel presente elaborato finale si tratterà della ricostruzione e dell'utilizzo di strumenti cartografici a livello urbano, con particolare interesse all'ambito urbano del Comune di Mappano.

L'obiettivo finale della procedura semi-automatica messa in atto, consiste nell'implementazione dei cosiddetti *database* geotopografici (DBGT), che con riferimento alle normative Europee (Direttiva INSPIRE) e a quelle Nazionali (D.M. 10/11/2011) e Regionali, rappresentano la base per un gran numero di applicazioni ingegneristiche. L'utilità del dato ricercato si rivolge all'intero panorama tecnico-amministrativo, spaziando in diversi domini e aree di competenza; ed è capace di incentivare il processo di miglioramento, semplificazione e automatizzazione di procedure attualmente complesse.

Nelle differenti fasi di elaborazione e modellazione dei dati si è potuto sperimentare il grande potenziale della restituzione automatica, con la fondamentale influenza della qualità dei dati acquisiti e forniti come input degli algoritmi di calcolo eseguiti dai software commerciali utilizzati durante le diverse fasi.

L'analisi dei risultati è stata affrontata con una prospettiva e una ricerca dell'interoperabilità dei risultati stessi, nell'ottica di rendere questo tipo di ricerca una realtà consolidata nelle amministrazioni comunali del contesto territoriale piemontese ed italiano.

1.1 I database geotopografici

Il *database* geotopografico, dal punto di vista tecnico, è la soluzione più moderna per modellare il dato territoriale, e dal punto di vista normativo, è quanto richiesto dal D.M. 10/11/2011, che rappresenta l'implementazione italiana della Direttiva INSPIRE.

Una delle banche dati più utilizzate sul territorio italiano è la Carta di Copertura del Suolo (CCS) che, costantemente aggiornata, rappresenta uno strumento di supporto alla pianificazione e al monitoraggio territoriale, permettendo di leggere le trasformazioni del territorio nel tempo e comprendere le fasi evolutive in atto, per la definizione delle regole per l'uso dei suoli secondo criteri di prevenzione e riduzione dei rischi, di efficienza ambientale e di riqualificazione territoriale.

Compresa l'importanza fondamentale del disporre di fonti informative con le quali costruire la conoscenza del territorio e le sue evoluzioni nel tempo, si comprende la volontà di generare ed implementare i DBGT, che costituiscono il più importante dato ausiliario a tale scopo.

1.2 Il sistema BDTRE di riferimento

La Base Dati Territoriale di Riferimento degli Enti (BDTRE) promossa dalla Regione Piemonte, è lo standard italiano sulla cartografia tecnica finalizzato a supportare le attività di pianificazione, governo e tutela del territorio a scala regionale.

Durante i numerosi seminari tenutisi dalla presentazione di questa nuova base cartografica regionale, a partire dal 2011, i tecnici di Regione Piemonte per il Settore Infrastruttura geografica, Cartografia e SIT – DB08, definiscono la BDTRE un sistema aperto e collaborativo (Figura 1.2.1) in quanto favorisce e promuove la collaborazione: “se tutti partecipano alla sua realizzazione, ed al conseguente aggiornamento, tutti ne beneficiano”¹.

La BDTRE è organizzata in strati, temi, classi e attributi, in cui ogni classe possiede vincoli e relazioni rispetto alle altre classi, in modo tale da garantire consistenza geometrica topologica e di contenuto, seguendo la struttura descritta nell'allegato del D.M. 10/11/2011, detta *National Core* (NC).

¹ GianBartolomeo Siletto Regione Piemonte Settore Infrastruttura geografica, Torino, 9 ottobre 2014, seminario Infrastruttura per l'informazione territoriale e ambientale: strumenti di conoscenza, soluzioni tecnologiche e strategiche organizzative. La nuova base cartografica regionale: BDTRE

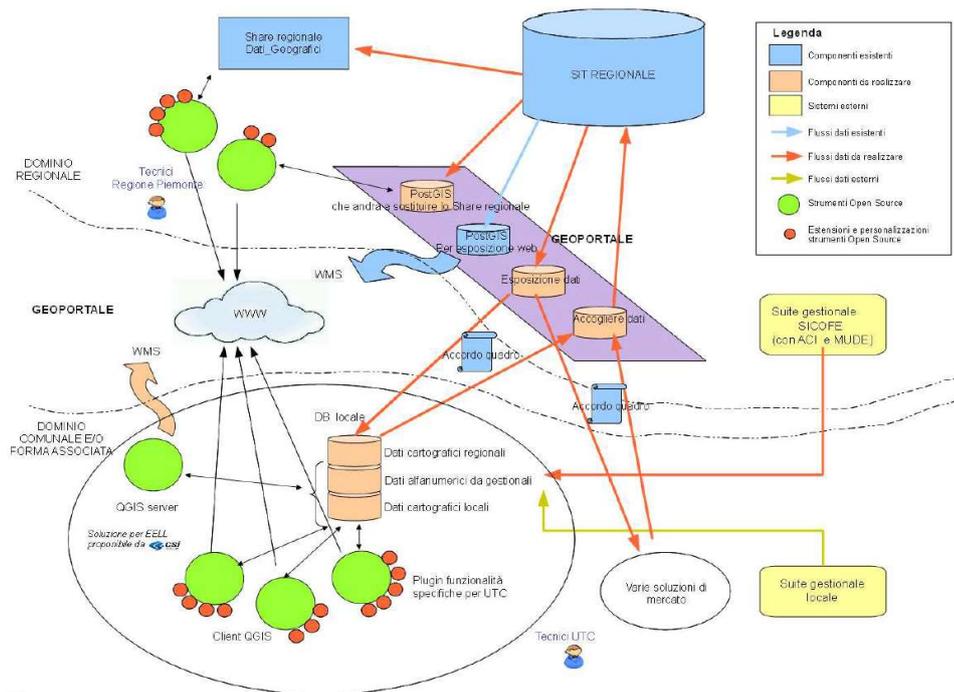


Figura 1.2.1. BDTRE – Sistema aperto e collaborativo².

Per *National Core* si intende il contenuto informativo minimo che le amministrazioni che producono dati territoriali nell’ambito della propria attività istituzionale devono garantire per i *database* geotopografici, consentendo la realizzazione di una base dati omogenea e a copertura nazionale. La definizione di NC è legata alla scala di riferimento, individuando due livelli di scala: per le scale 1:1.000 - 1:2.000 si definisce NC1, per 1:5.000 – 1:10.000 è definito NC5. La specifica tecnica contiene le informazioni di obbligatorietà per i contenuti del NC ai due diversi livelli di scala.

Il “Catalogo dei Dati Territoriali - Specifiche di contenuto per i DB Geotopografici”, unitamente alle “Regole di Interpretazione delle Specifiche di Contenuto per i Database Topografici”, sono i documenti di riferimento per i *database* Geotopografici che costituiscono base informativa territoriale per le pubbliche amministrazioni, ai sensi dell’Art. 59 del D. Lgs. 82/2005.

² G.B. Siletto – Regione Piemonte Settore Cartografia e Sit – DB08, Torino, 10 maggio 2012 – seminario Dati e informazioni di interesse ambientale e territoriale. Prima sessione: dati e informazioni inerenti lo stato dell’ambiente. La Base Dati Territoriale di riferimento degli Enti: BDTRE

1.3 Il caso del Comune di Mappano

Durante il nostro progetto ci siamo interfacciati con l'amministrazione del Comune di Mappano. La sua istituzione viene stabilita dalla Regione Piemonte il 31 gennaio 2013, per scorporo del territorio dai comuni di Caselle Torinese, Borgaro Torinese, Settimo Torinese e Leini, che ritardano l'operatività del Comune stesso, la quale diventa effettiva nel febbraio del 2017.

Si tratta quindi di un Comune neonato, con esigenze, peculiarità, problematiche e volontà nuove, atte a garantire la migliore gestione territoriale e sociale ai cittadini che da poco si identificano nella comunità Mappanese.

Tra le necessità del Primo Cittadino F. A. Grassi vi è l'intenzione di creare un Ufficio Tecnico aggiornato e fornito di strumenti tali da sviluppare e gestire al meglio il territorio comunale.

Sulla base di questi bisogni si sviluppa la collaborazione con il Politecnico di Torino, che attraverso il Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI), si è reso disponibile alla ricostruzione della cartografia del Comune di Mappano a partire da nuovi dati acquisiti, con tecniche d'acquisizione ed elaborazione innovative.

Prende così origine la sperimentazione del rilievo aerofotogrammetrico mediante drone, che costituisce la base di partenza per l'acquisizione dei dati necessari alla restituzione cartografica finale.

1.4 L'obiettivo e le applicazioni

Il primo obiettivo del nostro progetto è proprio quello di produrre la cartografia tecnica del Comune di Mappano, che essendo di recente istituzione ne risulta sprovvisto. Lo scopo ultimo dell'intero progetto, così come del sistema di BDTRE in generale, è fornire gli strumenti utili alla gestione del territorio, a livello regionale, sotto forma di dato tridimensionale.

La geo-informazione 3D in ambito urbano si traduce nei modelli di città 3D, rappresentazioni di ambienti urbani con una geometria tridimensionale di oggetti e strutture comuni, con gli edifici come elemento principale.

Oltre alla pura visualizzazione tridimensionale del dato, con lo sviluppo di strumenti e studi tecnologici, tali modelli risultano preziosi per diversi scopi e vengono utilizzati in un gran numero di applicazioni. Le principali attività sono rappresentate schematicamente in Figura 1.4.1:

- a) analisi della visibilità
- b) stima della domanda di energia
- c) piano di emergenza
- d) stima delle zone d'ombra
- e) gestione della rete di servizi
- f) valutazione del potenziale solare
- g) catasto 3D
- h) esplorazione interna
- i) emissioni sonore
- j) progettazione delle infrastrutture

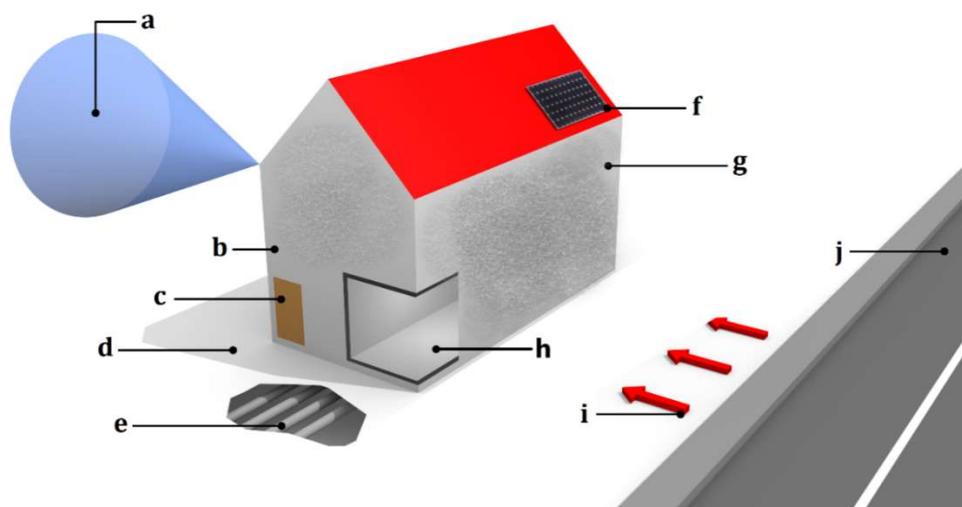


Figura 1.4.1: Applicazioni utili 3D City Model.

1.4.1 Applicazioni per il contesto cittadino

Negli ultimi 20 anni, è stata studiata l'applicabilità generale della geo-informazione 3D per la risoluzione di problemi industriali e di ricerca. In alcuni degli studi condotti l'utilizzo dei modelli (*3D City Model*) è stato suddiviso in 12 categorie di industrie: servizi di emergenza, pianificazione urbana, telecomunicazioni, architettura, gestione di strutture e servizi pubblici, marketing e sviluppo economico, analisi della proprietà, turismo e intrattenimento, *e-commerce*, ambiente, istruzione e apprendimento e portali cittadini.

È inoltre possibile riscontrare una macro-suddivisione in tre particolari classi d'uso: applicazioni che si basano solo sulla geometria (es. stima dell'ombra), analisi basate sulla geometria e su informazioni semantiche (es. stima del potenziale solare), e infine analisi basate sul dominio di estensioni specifiche e dati esterni (es. calcolo delle emissioni sonore).

Un ulteriore aspetto criticamente esaminato negli anni, riguarda il valore economico della geo-informazione tridimensionale. Uno dei più recenti studi in merito è stato condotto nel 2015, presso la *University College London*, come un'iniziativa dell'EuroSDR *3D Special Interest Group*. Si tratta di un'analisi di differenti casi studio, dell'utilizzo di GIS³ 3D classificati in base alle aree/domini di appartenenza e delle molteplici applicazioni relative, notando che ad una medesima area possono corrispondere più applicazioni.

Nelle pagine seguenti si cerca di esaminare con attenzione, seppur brevemente, le applicazioni precedentemente elencate per fornire una panoramica delle risorse per il contesto cittadino.

Il principale contributo bibliografico in questo caso risiede negli studi pubblicati sul ISPRS *International Journal of Geo-Information*, del 2015, ad opera di un gruppo di professionisti dell'università tecnica dei Paesi Bassi, *Delft University of Technology*, considerata una delle più prestigiose scuole di ricerca a livello mondiale.

³ GIS – *Geographic Information System* – sistema informativo geografico/territoriale

➤ Analisi di visibilità

I modelli di città 3D sono indispensabili per molte analisi di visibilità, come la determinazione della linea di vista (LoS) tra due punti in un ambiente urbano, o per stimare il fattore di vista del cielo (SVF): il grado che indica la percentuale di oscurazione del cielo ad opera degli edifici circostanti, per studi sul clima urbano e analisi del comfort termico.

Vengono inoltre utilizzati per stimare ad esempio la visibilità di un punto di riferimento, valutando la visibilità della facciata per il marketing urbano, per determinare la posizione ottimale di un sistema di sorveglianza, per la valutazione della copertura del sensore, e per migliorare la sicurezza stradale.

Ulteriori applicazioni prevedono la previsione della visibilità di Satelliti GNSS nell'ambiente costruito e consentire conseguentemente una più efficace mitigazione dell'effetto multipath.

➤ Visualizzazione per la navigazione

Navigare, muoversi negli spazi urbani usando modelli di città tridimensionali può risultare utile in quanto questi ultimi offrono punti di riferimento familiari, motivo per il quale si affermano per la loro natura “più intuitiva” rispetto alle mappe tipicamente bidimensionali, fornendo indicazioni di navigazione più naturali e realistiche, che facilitano l’orientamento dell’utente.

➤ Aiutare il posizionamento

Vi sono ulteriori metodi che utilizzano modelli di città 3D per migliorare il posizionamento in ambienti urbani. La logica è che è possibile derivare la posizione dei fotogrammi se è possibile abbinare la stessa prospettiva da un modello di città 3D; tutto ciò risulta utile nell’ambito di canyon urbani in cui il posizionamento satellitare potrebbe essere meno affidabile.

➤ Stima delle zone d'ombra

Stimare le ombre proiettate dagli edifici è spesso utile nella pianificazione urbana, per valutare ad esempio l'impatto di un edificio multipiano sullo spazio che lo circonda. Questo tipo di valutazione è sempre più spesso richiesta nelle fasi di presentazione di progetti in ambito metropolitano.

Si riporta di seguito (Figura 1.4.2) un esempio di visualizzazione dei risultati di un'analisi dell'ombra. Tali analisi risultano essenziali nella stima del potenziale solare degli edifici, che può incidere negativamente sulla resa fotovoltaica di un pannello solare; questo aspetto è strettamente correlato alla stima dell'insolazione degli edifici, e per questo vengono tipicamente associati e sviluppati parallelamente.

Ulteriori applicazioni includono la stima del comfort termico degli edifici e la determinazione di involucri solari, di rilevante utilità nel settore energetico.

Infine, questo caso d'uso ha anche un'applicazione in agricoltura, ad esempio, per stimare l'area prevalentemente ombreggiata del suolo, ed ottenere i dati utili per il calcolo della crescita delle colture.

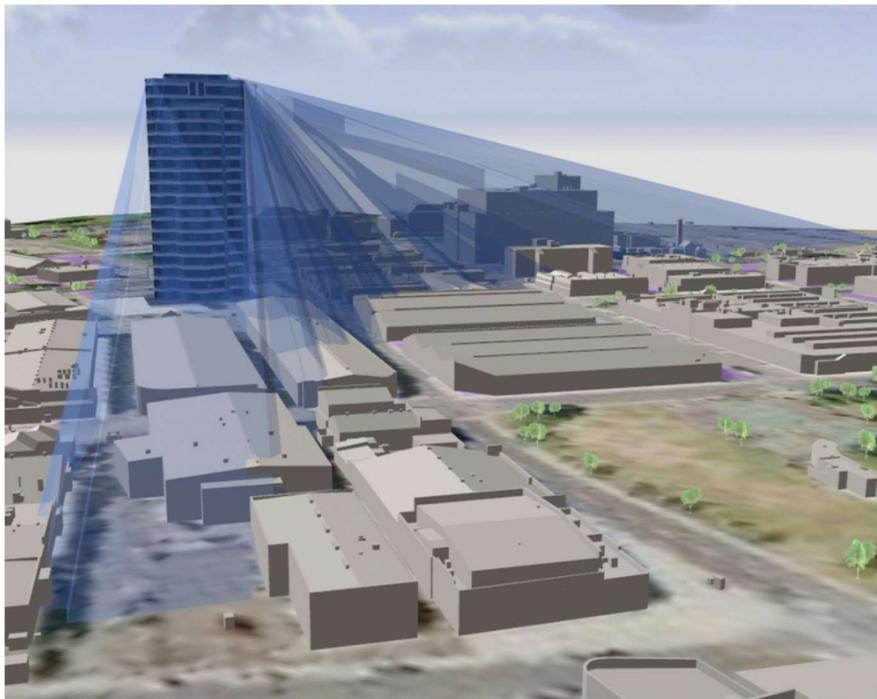


Figura 1.4.2: Stima dell'ombra proiettata dall'edificio per differenti posizioni della fonte luminosa – CyberCity3D.

- Stima della propagazione del rumore in un ambiente urbano

I dati 3D vengono utilizzati per creare modelli che valutano come i cittadini in ambito urbano possono essere disturbati e danneggiati dall'inquinamento acustico, (Figura 1.4.3) e successivamente per lo studio di soluzioni atte a mitigare gli effetti di quest'ultimo, come la progettazione di barriere antirumore.

In Europa l'utilizzo di modelli di città 3D per questa applicazione è aumentato dopo l'implementazione della direttiva sul rumore *2002/49/CE* che impone ai paesi dell'UE di produrre mappe acustiche strategiche, con lo scopo di informare la popolazione sull'esposizione al rumore ed i relativi effetti.

La geo-informazione 3D offre un considerevole vantaggio, in quanto a causa dei fenomeni di rifrazione delle onde sonore, per le medesime coordinate planari, possono variare considerevolmente i livelli sonori a differenti elevazioni.

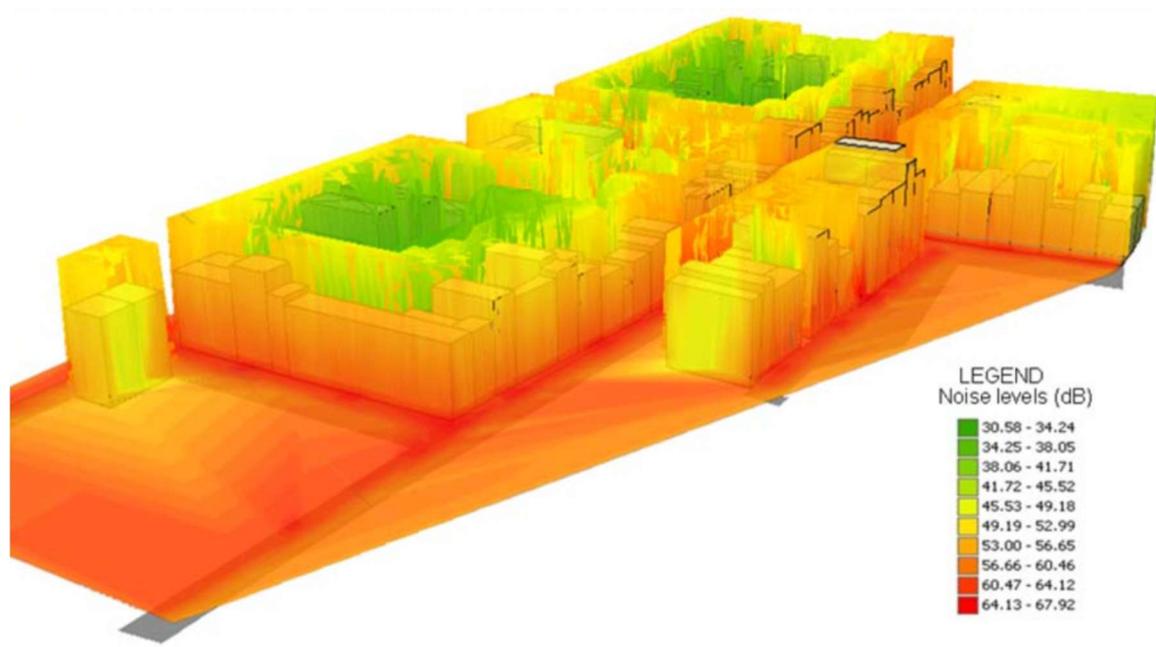


Figura 1.4.3: Simulazione del livello di rumore su un modello di città 3D – Kurakula⁴.

⁴ Kurakula, V. A GIS-Based Approach for 3D Noise Modelling Using 3D City Models. Master's Thesis, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands, 2007

➤ Catasto 3D

Lo sviluppo della registrazione delle proprietà in 3D può fornire approfondimenti su situazioni immobiliari complesse, proprietà verticali in edifici e costruzioni sotterranee (ad esempio cavi e condutture, garage, e strutture compenetranti).

➤ Stima dell'irradiazione solare

La stima dell'insolazione degli edifici è uno dei casi d'uso più importanti nella modellazione urbana tridimensionale. I modelli di città 3D vengono utilizzati per stimare quanto un edificio è esposto al sole al fine di valutare l'idoneità all'installazione di pannelli solari (fotovoltaici) sulle superfici di copertura, in quanto forniscono informazioni geometriche come l'inclinazione, l'orientamento e l'area del tetto, utilizzate come dati di input per modelli empirici, prendendo in considerazione anche la vegetazione circostante ed il tipo di materiale che costituisce la superficie irradiata (Figura 1.4.4).



Figura 1.4.4: Stima dell'irradiazione solare degli edifici per una data e un'ora specifiche – Argedor.

Anche la stima dell'insolazione degli edifici è di importanza rilevante per stimare il comfort termico, ovvero il rilevamento di edifici esposti a troppa luce solare, con conseguente potenziale surriscaldamento durante la stagione estiva.

➤ Stima della domanda di energia

Nella Figura 1.4.5 di seguito riportata si visualizzano i risultati di un'analisi della domanda di energia termica degli edifici in contesto urbano, in termini di kWh/m² per anno. Negli ultimi anni, molti ricercatori, soprattutto in Germania, hanno concentrato le loro analisi su questo tipo di applicazione per combinare i dati del volume degli edifici, il numero di piani, il tipo di edificio e altre caratteristiche, e prevedere il fabbisogno energetico per servizi di riscaldamento e/o raffreddamento. In combinazione con altri dati, i modelli di città 3D possono essere utilizzati per la valutazione termica, e per determinare ponti termici e perdite di calore dall'involucro dell'edificio.

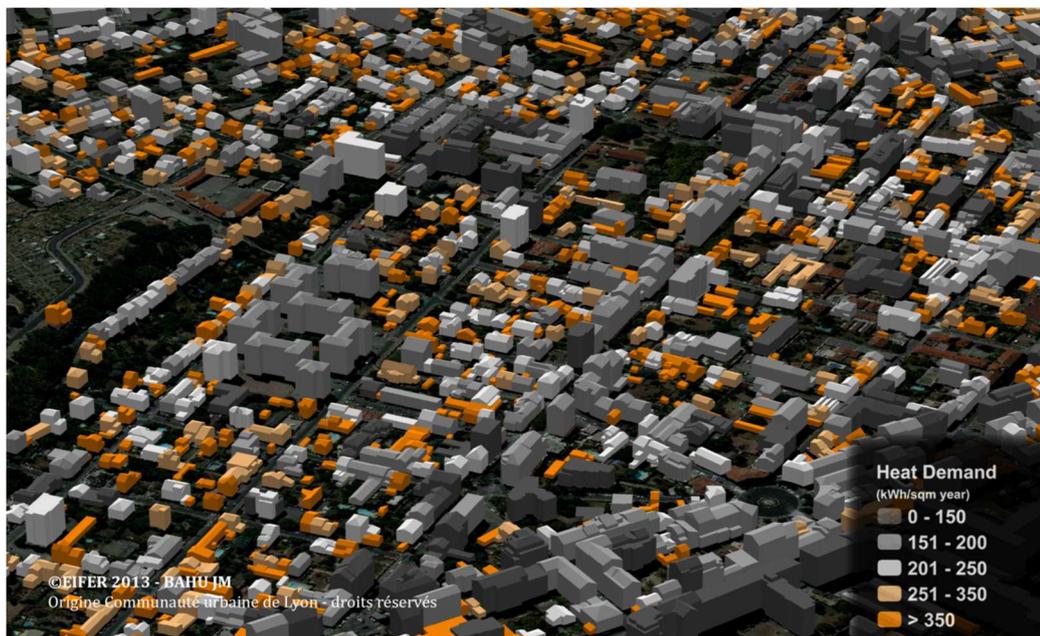


Figura 1.4.5: Risultati della stima della domanda di calore degli edifici. - Jean-Marie Bahu, EIFER⁵.

⁵ Bahu, J.M.; Koch, A.; Kremers, E.; Murshed, S.M. *Towards a 3D spatial urban energy modelling approach*. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 2013, II-2/W1, 33-41.

➤ Pianificazione urbana

La geo-informazione 3D è onnipresente nella pianificazione urbana per vari scopi specifici: progettazione di parchi, analisi del traffico, indagini riguardo l'interferenza tra oggetti urbani esistenti e nuove pianificazioni di infrastrutture viarie, oltre ad un'analisi temporale dei cambiamenti del paesaggio (skyline urbano).

Queste sono solo alcune delle molte applicazioni utili che motivano i progetti di aggiornamento e ricerca degli strumenti e delle metodologie automatizzate necessarie ad ottenere i dati 3D con precisione ed efficienza in termini di tempo e costi.

Nella realtà comunale da noi esaminata si tratterà prevalentemente di applicazioni urbane quali la manutenzione ordinaria e/o straordinaria delle infrastrutture stradali, la gestione e il monitoraggio del Parco Europa, fiore all'occhiello della cittadina mappanese.

Allo tempo stesso l'Ufficio Tecnico avrà a disposizione gli strumenti per analisi volumetriche e misurazioni fondamentali per la pianificazione delle reti di servizi di vario genere, dai trasporti ai sottoservizi, dall'agricoltura allo sviluppo delle zone industriali che circondano il contesto abitativo.

Capitolo 2 - Cenni Teorici

Nel presente Capitolo si presenterà lo specchio teorico di riferimento per la procedura messa in atto nel Caso Studio successivamente illustrato.

A partire dalle fasi principali del processo di acquisizione fotogrammetrica, si analizzeranno il processamento dei dati acquisiti e la restituzione automatica mediante i *software* commerciali utilizzati.

Infine si presenterà la struttura della base dati BDTRE, che costituisce l'obiettivo finale dell'intera trattazione.

2.1 Il processo fotogrammetrico

All'interno del grande campo della Geomatica, che racchiude in sé l'insieme dei metodi e delle tecnologie utilizzate dall'acquisizione dei dati fino al loro utilizzo, si identifica l'importante disciplina della fotogrammetria.

La fotogrammetria rappresenta il metodo più completo e preciso, a parità di costi e rapidità, rispetto ad altri metodi di studio e rappresentazione del territorio.

Sebbene la sua origine si confonda storicamente con la nascita della fotografia, risalente alla metà dell'Ottocento, è stato solo nei primi del Novecento, che è divenuta la protagonista assoluta nella realizzazione di qualsiasi documento cartografico, parallelamente allo sviluppo della tecnologia aeronautica.

Nello sviluppo della tecnica del rilievo fotogrammetrico, è possibile riconoscere schematicamente quattro fasi temporali, grossomodo della durata di cinquant'anni ciascuna, la cui distinzione è legata allo sviluppo delle relative tecnologie: fase pionieristica, fase analogica/stereoscopica, fase analitica e fase digitale.

La quarta ed ultima fase, cosiddetta "digitale" (1990-oggi), nasce dalla possibilità di produrre e utilizzare immagini numeriche, che si differenziano dalle semplici immagini fotografiche, in quanto immagini digitali, definite in una rappresentazione

raster (Figura 2.1.1), strutturate in una matrice di piccoli elementi di dimensioni finite detti *pixel*.

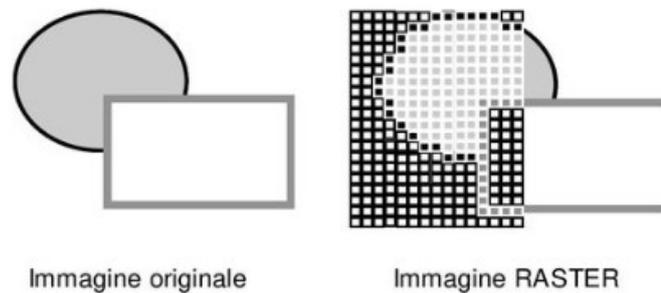


Figura 2.1.1: Dall'immagine fotografica originale alla rappresentazione raster.

Dall'unione di "fotogramma" e "metria" - misura, ha origine questa scienza che consente di ottenere informazioni affidabili, metriche e non solo, di oggetti fisici e dell'ambiente circostante mediante processi di registrazione, misura ed interpretazione delle immagini fotografiche e digitali.

La fotogrammetria così definita risulta essere uno strumento fondamentale per il rilievo di oggetti di qualsiasi forma e dimensione che necessitano di un elevato numero di punti per una descrizione completa, quali possono essere oggetti difficilmente accessibili, o accessibili per breve tempo, oggetti di piccole dimensioni o organismi viventi.

A partire dalla definizione di fotogramma come quel piano che si interpone tra l'oggetto e il centro di proiezione, sul quale va a proiettarsi l'oggetto stesso, si realizza la connessione tra spazio oggetto e spazio immagine, corrispondente alla realtà tridimensionale il primo, e al fotogramma bidimensionale il secondo.

Ne deriva che per riuscire nel secondo intento di tale scienza, che consiste nel produrre dati misurabili, è necessario avere dei punti. Nella figura di seguito riportata si può osservare come una sola fotografia (caso a) non sia sufficiente per definire la posizione dei punti sul terreno; ma se si dispone di due fotogrammi che da due centri di presa contengono lo stesso oggetto (b), i suoi punti sono definiti univocamente dall'intersezione dei raggi omologhi r_1 e r_2 (configurazione di presa

aerea). La fotogrammetria infatti, sfrutta il principio della visione stereoscopica, ovvero la visione dell'oggetto da due diversi punti di vista/presa.

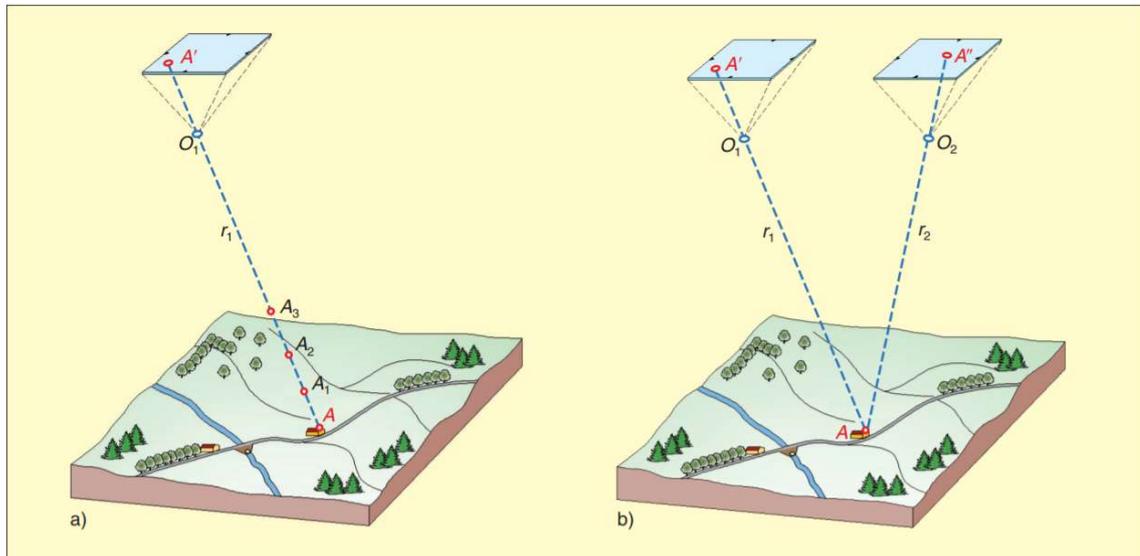


Figura 2.1.2: (a) Un solo fotogramma – (b) Due fotogrammi da centri di proiezione distinti.⁶

I vantaggi del processo fotogrammetrico rispetto al rilievo diretto del territorio per produrre cartografia, sono molteplici, in quanto risulta avere caratteristiche di maggiore produttività, rapidità ed economicità, con un'uniformità di precisione, soprattutto per rilievi di grande estensione e scale medio-piccole.

Andando ad esaminare lo sviluppo pratico del rilievo fotogrammetrico si individuano le seguenti fasi:

- Fase 1: presa, acquisizione delle immagini digitali con opportune macchine fotografiche, meglio dette camere di presa, in funzione dello scopo del rilievo (scala della rappresentazione, morfologia del territorio, precisioni richieste nella restituzione, ecc), come rappresentato di seguito.

⁶ Modulo T – Fotogrammetria, Unità T1 Principi e strumenti della fotogrammetria, estensione online del corso Cannarozzo, Cucchiari, Meschieri, *Misure, rilievo e progetto* – Zanichelli (2012)

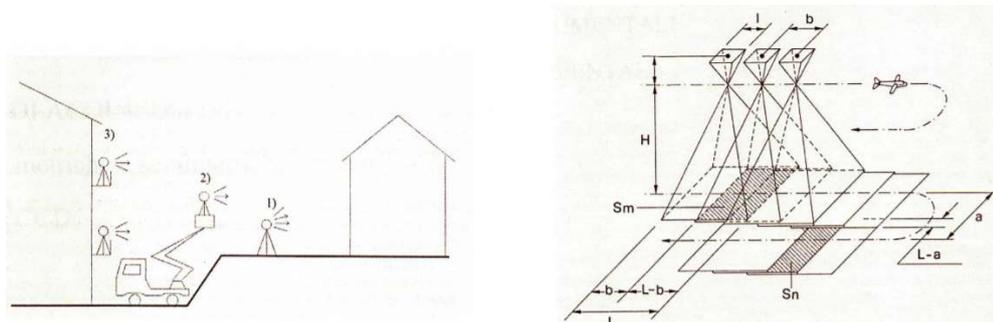


Figura 2.1.3: sinistra: Modalità di presa terrestre – destra: Modalità di presa aerea.

- Fase 2: appoggio, tramite l'utilizzo di punti di appoggio, o "GCP" (Ground Control Point) in numero tale da determinare i parametri utili nelle successive fasi di orientamento.
- Fase 3: orientamento, attraverso la determinazione dei parametri che definiscono la geometria della camera di presa, forniscono la posizione dei centri di proiezione rispetto ai relativi fotogrammi, e consentono di riprodurre l'assetto della camera stessa rispetto ad un sistema di riferimento tridimensionale.
- Fase 4: restituzione della geometria 3D a partire dalle immagini bidimensionali, attraverso la determinazione delle coordinate di punti utili alla ricostruzione del modello. Nella fotogrammetria digitale tali operazioni vengono eseguite automaticamente dai software di restituzione, mediante l'utilizzo di algoritmi in grado di generare i prodotti cartografici richiesti.

Le suddette fasi sono sequenziali e fondamentali l'una per l'altra, con lo scopo ultimo di ottenere un prodotto di alta qualità, precisione e fruibilità.

2.1.1 Fase di presa – fotogrammetria aerea da drone

Nel caso in esame si tratterà di fotogrammetria aerea, o aerofotogrammetria, la quale si fonda sullo stesso principio della parziale sovrapposizione delle immagini fotografiche che è proprio della stereoscopia.

La fotogrammetria aerea consente di produrre cartografia di qualsiasi tipo, da quelle generali a scala piccola, alle carte tecniche a grande scala. Il tipo di prodotto realizzabile dipende da molteplici fattori, tra cui la quota di volo e il tipo di camera utilizzata. Differiscono ovviamente le modalità operative dell'acquisizione: si useranno camere metriche montate su aeromobili, o come nel nostro caso, su UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*).

Secondo tale procedura il territorio è ripreso con sequenze di fotogrammi, chiamate strisciate o *strip*, scattati automaticamente a intervalli regolari, mantenendo velocità di volo uniformi lungo traiettorie rettilinee e a quota costante.

I fotogrammi ottenuti vengono utilizzati a coppie, in modo tale che ciascuno si sovrapponga per circa l' 80% con quelli adiacenti, rispettando così il requisito di sovrapposizione longitudinale o *overlap*, e ciascuna strisciata si sovrapponga a sua volta per circa il 60% con quelle contigue, garantendo la sovrapposizione laterale o *sidelap*. Per la ricostruzione completa del territorio occorrono molti fotogrammi parzialmente sovrapposti (Figura 2.1.4), che determineranno il cosiddetto piano di volo.

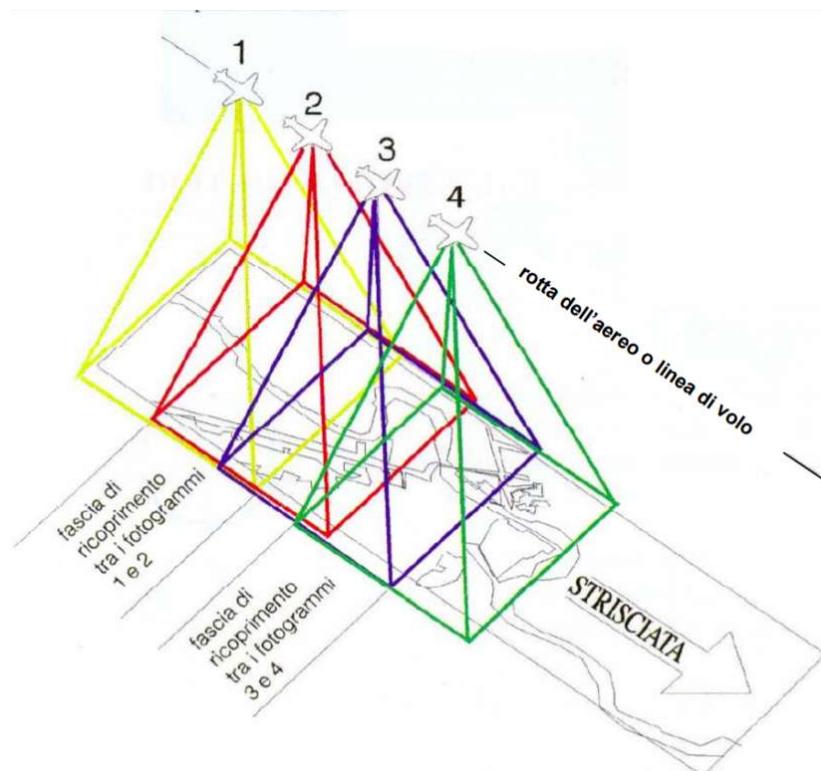


Figura 2.1.4: Striscia aerofotogrammetrica.

La fotogrammetria aerea mediante l'utilizzo di droni permette oggi giorno attività di rilevamento di caratteristiche del territorio non facilmente percepibili e misurabili a livello del suolo.

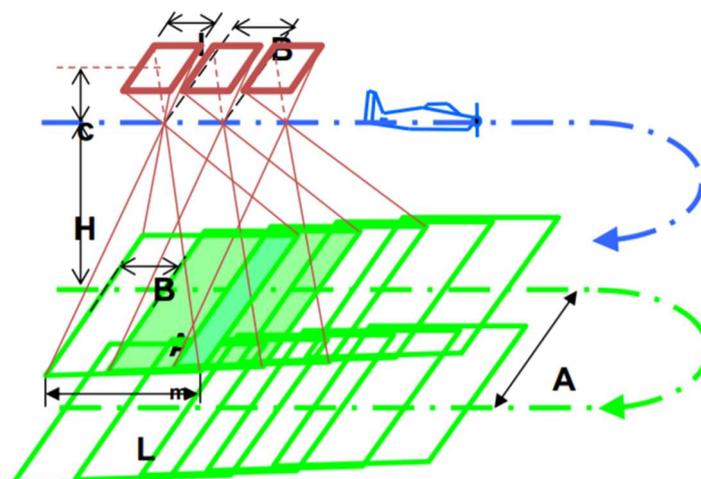
I droni, anche chiamati UAV o APR, per indicare gli Aereomobili a Pilotaggio Remoto, sono veri e propri aeromobili, di svariate dimensioni e caratteristiche tecniche, che per scopi topografici supportano una macchina fotografica e permettono perciò un rilievo aerofotogrammetrico.

È importante ricordare e distinguere alcuni concetti di base:

- il drone non è uno strumento topografico, ma semplicemente è il supporto aeromobile dello strumento fotografico;
- la macchina fotografica installata a bordo dell'APR non è uno strumento topografico in sé;
- l'aerofotogrammetria mediante UAV si basa sull'utilizzo di *software* specifici, per l'elaborazione delle immagini acquisite dall'apparecchio fotografico installato sull'aeromobile;
- un rilievo aerofotogrammetrico, come qualsiasi altro rilievo in fotogrammetria, ha necessariamente bisogno di punti riconoscibili a terra, la cui posizione sia nota e determinata con strumenti di rilievo topografico.

In questo caso un fase fondamentale è il *planning*, che comprende tutte le operazioni con le quali è possibile definire il piano di volo, in cui si definiscono le quote relative di volo, la velocità di crociera, gli eventuali assetti di presa e i tempi di scatto. Il piano di volo, benchè correlato a un UAV, deve seguire le tradizionali regole di un piano di volo fotogrammetrico, come riportato nello schema seguente (Figura 2.1.5).

I dati definiti nel piano di volo, verranno gestiti automaticamente dal *software* di pianificazione del volo proprio dell'UAV utilizzato, grazie ai sensori navigazionali (ricevitore/i GNSS, antenna radio-modem e IMU) integrati nei vettori disponibili sul mercato, che permettono anche al drone di contrastare l'azione del vento, guadagnando in stabilità del mezzo e quindi in qualità delle riprese, il tutto ottimizzando il numero di scatti e il tempo di volo.



Base per un ricoprimento η %	$B = L \cdot \left(1 - \frac{\eta}{100}\right)$
Interasse fra strisciate per ricoprimento trasversale γ %	$A = L \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{100}\right)$
N. Modelli per strisciata	$n_m = \left\lfloor \frac{L}{B} + 1 \right\rfloor$
N. fotogrammi per strisciata	$n_b = n_m + 1$
N. Strisciate per blocco	$n_s = \left\lfloor \frac{Q}{A} + 1 \right\rfloor$
Area coperta da un modello	$A_m = L \cdot (L - B)$
Intervallo di scatto	$At [s] = \frac{B [m]}{v [m/s]} \geq 2.0$

Figura 2.1.5: Schema pianificazione del piano di volo⁷.

I droni per fotogrammetria aerea presentano una tecnica che trova applicazione in numerosi campi, dalla cartografia, al rilievo, all'architettura. Con i droni per mappatura dotati di sistemi GPS RTK evoluti, e fotocamere digitali ad altissima risoluzione, sono possibili rilievi con precisione centimetrica.

Come nel caso della strumentazione utilizzata, si mette in atto una guida autonoma con *waypoint*: l'elettronica di bordo, grazie al GNSS integrato ed al sistema di controllo evoluto con *Ground Station*, permette al drone di volare in maniera

⁷ "Attività di ricerca e sviluppo sulle tecnologie e strumenti della geomatica per il monitoraggio di versanti in dissesto e infrastrutture - 1° consegna deliverables: D1, D2.1, D3.1" A.Cina, L. Marcellin, CSP - Innovazione nelle ICT, Politecnico di Torino DIATI, 28 luglio 2017

autonoma e di scattare automaticamente fotografie geo-referenziate in base a parametri preimpostati dall'utente, mediante il *software* di gestione.

Dopo aver eseguito un numero di voli tale da coprire l'area di interesse e aver acquisito il numero di fotogrammi determinato dalle impostazioni definite dal piano di volo, l'operazione di elaborazione di questi ultimi e delle posizioni dei punti noti avviene attraverso algoritmi automatici dei *software* utilizzati, i quali danno vita al modello tridimensionale del territorio.

La procedura descritta risulta essere rapida e consente di ottenere ottimi risultati anche su superfici notevolmente estese; anzi, è proprio in questi casi che i vantaggi in termini di costi-benefici si fanno più rilevanti.

Come anticipato, la prima fase di un rilievo fotografico con drone è la pianificazione e la progettazione del piano di acquisizione delle immagini, anche detto piano di volo.

Il piano di volo dipende dalla GSD (*Ground Sampling Distance*) richiesta dalle specifiche del progetto e dal tipo di terreno/oggetto da ricostruire; esso deve essere attentamente progettato al fine di garantire una sovrapposizione sufficiente, tenendo presente che in caso contrario porterà a risultati imprecisi o errori di elaborazione e richiederà nuovamente l'acquisizione di immagini

In termini generali è molto importante progettare un buon piano considerando:

- tipo di progetto (aereo, terrestre, misto) in base alla tipologia di terreno/oggetto,
- caratteristiche dello strumento fotografico,
- scopo del progetto,
- frequenza di acquisizione delle immagini,
- distanza di campionamento GSD che, in base alle specifiche del progetto, definirà l'altezza di volo alla quale le immagini dovranno essere riprese,
- percorso da seguire per scattare le immagini.

Individuata l'area da rilevare, si pianificano le operazioni di volo che consentano di coprire l'intera area con soddisfacente precisione:

- si definiscono i punti di decollo e atterraggio dell'aeromobile e la posizione della stazione di controllo a terra.
- si controlla la presenza di ostacoli al volo (vegetazione, cavi, infrastrutture e rete servizi aeree),
- si progettano le missioni di volo programmato automatico (*tramite software mission planner*).

È consigliabile acquisire le immagini con uno schema a griglia regolare ed è fondamentale assicurarsi che diversi piani di volo siano presi il più possibile nelle stesse condizioni (direzione del sole, condizioni meteorologiche, edifici, ecc.), così come è necessario che la telecamera sia mantenuta il più possibile a un'altezza costante sul terreno per garantire il GSD desiderato.

2.1.2 Fase di appoggio – i GCP

Il rilievo aerofotogrammetrico è sostenuto dalla presenza e dal rilevamento di punti noti in termini di coordinate. Le operazioni proprie del processo fotogrammetrico sono l'orientamento e la georeferenziazione.

Quello che si fa in concreto è materializzare a terra, prima di eseguire il piano di volo con l'acquisizione dei fotogrammi, i GCP *Ground Control Point*, successivamente rilevati con un ricevitore GNSS e una stazione base fissa, in modo tale che le loro coordinate possano poi essere inserite nel software di elaborazione dei dati che restituisce il rilievo.

Tali punti possono essere realizzati mediante vari *target*, o *marker*, col fine di garantire le seguenti caratteristiche:

- alta visibilità: è fondamentale che siano ben visibili nei fotogrammi acquisiti dal drone, anche a grande distanza;

- facile individuazione del loro centro: per attribuire con precisione, e accuratezza, le coordinate rilevate manualmente a terra;
- manovrabilità: devono essere facilmente trasportabili nell'area del rilievo, in termini di dimensioni e peso;
- posizionabili agilmente a terra;
- rimovibili, al termine delle operazioni;
- adattabili alle caratteristiche del terreno.

2.1.3 Il posizionamento GNSS

In termini generali un rilievo GNSS viene caratterizzato dalla combinazione di due elementi: modalità di determinazione delle coordinate di posizione (PP – *Post Processing*, o RT – *Real Time*), e procedura operativa di acquisizione di dati sul campo (statica, statico-veloce, o cinematica).

Per quanto riguarda l'acquisizione cinematica della posizione dei punti materializzati in campo, secondo la procedura operativa RTK sono necessarie:

- n.1 stazione *master*, fissa in corrispondenza della posizione nota a priori,
- n.1 unità ricevente *rover* che una volta raggiunto il punto incognito da rilevare vi resta ferma per un breve tempo, dopodiché viene spostata sul punto successivo
- una comunicazione continua tra *master* e *rover*, via radio o GSM,
- una visualizzazione continua, anche durante gli spostamenti, di almeno 4 satelliti.

La stazione base calcola le correzioni di pseudorange che vengono trasmesse in tempo reale al *rover*, il quale applica tali correzioni alle proprie misure migliorandone la precisione. L'elaborazione dei dati avviene quindi direttamente in campagna e l'utente può controllare in tempo reale l'operatività della stazione master e interrompere il rilievo in caso di malfunzionamento, il possibile svantaggio

risiede nella decadenza della precisione del rilievo all'aumentare della distanza *master-rover*.

Esaminando con maggiore accuratezza le varie fasi del posizionamento in tempo reale, si elencano di seguito le modalità consecutivamente attuate:

- Si colloca un ricevitore GNSS sulla stazione di posizione nota (master) e si iniziano le osservazioni;
- per ogni epoca di osservazione la stazione master calcola la propria posizione e la confronta con quella nota a priori, la differenza tra la posizione nota e quella calcolata viene attribuita agli errori di misura;
- la stima di tali errori viene quindi comunicata (via radio, modem GSM o Internet) al ricevitore *rover* che sta osservando gli stessi satelliti, in una posizione incognita;
- l'unità *rover* utilizza le proprie misure di distanza per effettuare un primo calcolo prossimato della propria posizione; quindi corregge tale calcolo con i termini di errore comunicatigli dal ricevitore master.

Nel nostro caso il posizionamento RTK, come si vedrà in seguito, ha permesso di ottenere risultati di ottima qualità, in termini di accuratezza e precisione, ma quando si tratta di mappatura aerea, tale procedura può avere i suoi lati negativi, con interruzioni dei collegamenti radio e blocchi di segnali GNSS.

A causa delle lunghe distanze tra il drone e la stazione base, i segnali possono essere ostruiti e ciò comporta la perdita di dati di correzione e una percentuale inferiore di posizioni precise della telecamera durante il volo. Questi problemi portano a una grande incertezza delle correzioni. L'accuratezza sarà di nuovo di decine di centimetri per i voli RTK, o addirittura fino a metri come si otterrebbe dai voli non RTK. Questo è il motivo per cui molti dispositivi UAV dispongono della tecnologia PPK, che indica il post-processamento (*Post-Processed Kinematic*): metodo di correzione della posizione GNSS basato sui dati registrati dalla stazione di base.

Fondamentalmente, la differenza principale tra RTK e PPK è quando si verifica questa correzione posizionale: RTK corregge durante il volo mentre PPK elabora le informazioni di posizionamento dopo il volo (Figura 2.1.6).

Entrambe le metodologie di rilievo permettono teoricamente di fare fotogrammetria senza posizionare target a terra, semplicemente utilizzando un GNSS che registra dati come stazione base e una antenna GNSS collegata alla camera applicata sul drone a disposizione. I dati vengono registrati nell'aeromobile e combinati con i dati della stazione base al termine del volo.

Dopo il volo, per elaborare le correzioni PPK, sarà necessario disporre di:

- File del "Rover", il file Rinex scaricabile dal GNSS a bordo del drone,
- File della "Stazione Base", il file Rinex scaricabile dalla stazione base fissa,
- Le fotografie scattate, scaricabili dalla SD del drone,
- Le coordinate dei GCP da utilizzare come punti di controllo.

L'elaborazione è simile alla metodologia RTK, tuttavia risulta più approfondita in quanto traccia ripetutamente i dati per fornire risultati più completi, offrendo inoltre una maggiore flessibilità in termini di volo effettivo, con una portata maggiore dalla stazione base.

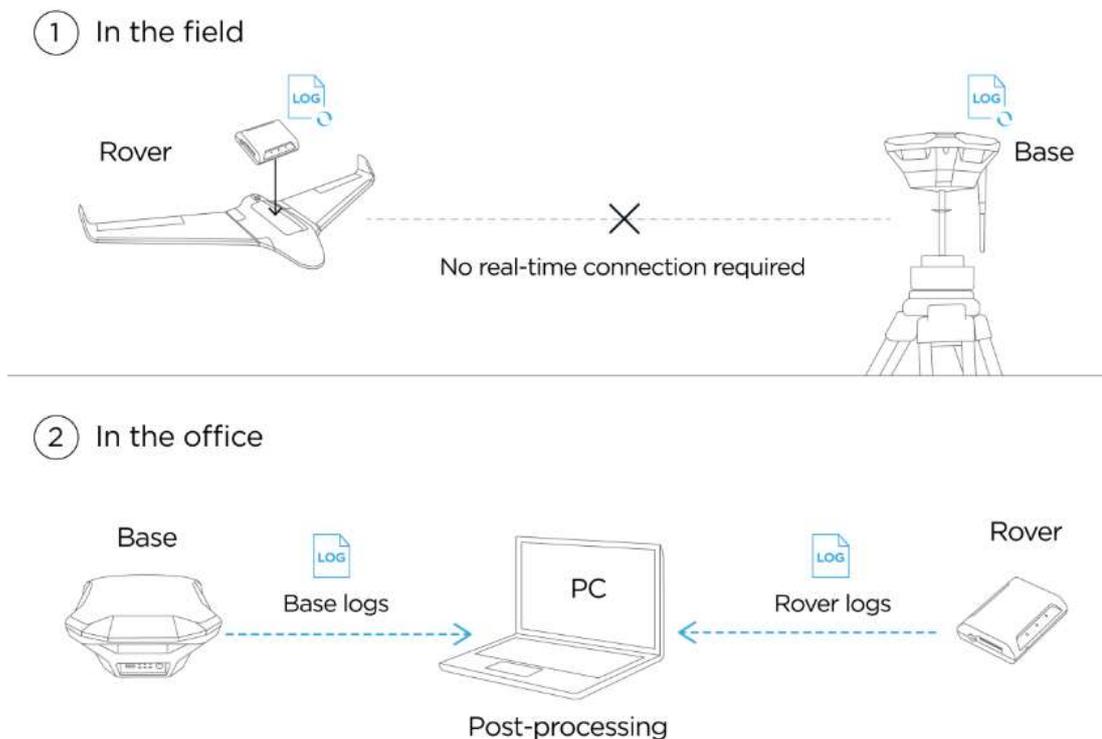


Figura 2.1.6: Fasi della metodologia di rilievo PPK.

2.1.4 Fase di modellazione fotogrammetrica – il software

A valle delle fasi iniziali di presa e appoggio, si entra nel vivo del processo fotogrammetrico, attraverso la restituzione automatica realizzata mediante l'utilizzo del *software Pix4Dmapper*, un applicativo di fotogrammetria automatica di modelli 3D e nuvole di punti, per mappatura da drone, disponibile in una versione di prova gratuita per un tempo limitato di 15 giorni, o nella versione acquistata nel Laboratorio di Geomatica del Politecnico.

Si tratta di un software di elaborazione delle immagini basato sulla ricerca automatica di migliaia di punti comuni tra le immagini. Ogni punto caratteristico trovato in un'immagine è chiamato *keypoint* - punto chiave. Quando due punti chiave su due immagini diverse sono identici, vengono identificati come un unico punto chiave. Ogni gruppo di punti chiave correttamente abbinati genererà un punto 3D. Nel caso di sovrapposizione elevata tra le immagini, l'area comune acquisita risulta più ampia e potrà essere abbinato un maggior numero di punti chiave, che consentiranno di calcolare più precisamente i punti tridimensionali. Pertanto, la regola principale è mantenere un'alta sovrapposizione tra le immagini, come è stato possibile nel caso delle nostre acquisizioni aeree.

All'interno di *Pix4Dmapper* l'elaborazione del set di dati acquisiti viene indicata con il termine "Progetto" e comporta una serie di fasi sequenziali, a partire dall'importazione delle immagini acquisite, e la successiva configurazione delle proprietà relative alla geolocalizzazione, del sistema di coordinate e del modello di camera utilizzato.

Prima di avviare la fase di ricostruzione/restituzione è necessario tenere conto di un numero minimo di 5 GCP, ognuno contrassegnato in almeno 2 immagini, come consigliato nel manuale d'uso del *software*. Quest'ultimo indica come sufficiente un numero di 5/10 GCP, anche per progetti di grandi dimensioni, in quanto un maggior numero di GCP non contribuirebbe in modo significativo ad aumentare la precisione, ad eccezione dei casi con topologie complesse, in cui consentirebbe una ricostruzione più accurata.

Nel mio progetto ho utilizzato principalmente il *software Pix4Dmapper*, mentre il *software Agisoft Metashape* è stato utilizzato a scopo di confronto e verifica, come illustrato nel dettaglio all'interno del Capitolo 3, paragrafo 3.5.

Agisoft Metashape è un *software stand-alone* per il processo fotogrammetrico di immagini digitali, in grado di generare dati utilizzabili da applicazioni GIS, per la documentazione del patrimonio culturale, la produzione di effetti speciali e le misurazioni di oggetti di svariate scale. Ha avuto origine a partire dall'applicativo *Agisoft PhotoScan*, introducendo algoritmi ottimizzati per impiegare al meglio le risorse di calcolo disponibili. La tecnologia della fotogrammetria digitale si traduce in *Metashape* in un sistema intelligente di elaborazione automatizzata, che può essere utilizzato sia da un neofita, sia da specialisti, che hanno l'opportunità di adattare il flusso di lavoro a specifici compiti e diverse tipologie di dati.

2.1.5 Irisultati

A partire dai dati di *input*, quali fotogrammi digitali del territorio rilevato, gli output potranno essere modelli digitali di terreno/superficie (DTM/DSM), ortoimmagini, nuvole di punti, modelli 3D texturizzati, e molti altri.

Si presentano di seguito i prodotti ottenuti nel Caso Studio in esame.

Con il termine modello digitale del terreno, si intende la ricostruzione della superficie terrestre, a partire da una nuvola di punti ottenuta mediante metodi di acquisizione fotogrammetrica in grado di ricostruire il modello di superficie del terreno, come nel nostro caso, oppure con tecnica Lidar (*Light Detection and Ranging* o *Laser Imaging Detection and Ranging*), in grado di ricostruire sia il modello di superficie che del terreno.

Le tipologie di modelli digitali di terreno citate sono definite nello specifico come segue:

- *DTM – Digital Terrain Model*: riguarda il modello digitale del terreno, ovvero quello che corrisponde all'ultimo ritorno di un rilievo Lidar. La ricostruzione di un DTM permette di individuare le strutture del terreno, eliminando quelle che sono le strutture come edifici e vegetazione.
- *DSM – Digital Surface Model*: il modello digitale della superficie tiene conto delle strutture che insistono sulla superficie, quindi rileva la vegetazione e gli edifici presenti. (Figura 3.5.2), e può essere identificato anche con l'acronimo *DEM – Digital Elevation Model* o modello digitale di elevazione.

È importante ricordare che DTM e DSM, così come il DEM, sono superfici statistiche. “Una superficie statistica è una rappresentazione della distribuzione dei valori di un determinato fenomeno definito, per ogni coppia di coordinate (X, Y), da un valore di Z, misurato o calcolato” (Robinson et al., 1995; DeMers, 1997). Il termine statistico, associato al concetto di superficie, deriva dal fatto che questo tipo di rappresentazione si ottiene attraverso la stima del valore di una variabile dove non è stata fatta nessuna misura. Le tecniche statistiche di stima, come interpolazione ed estrapolazione, permettono di calcolare una variabile in ogni punto di una superficie a partire da dati misurati solo in alcune posizioni di essa.

Come precedentemente anticipato DTM e DSM non sono lo stesso prodotto, come è facilmente osservabile nella rappresentazione esemplificativa riportata di seguito (Figura 2.1.7).

Con DSM si intende la superficie terrestre comprensiva degli oggetti che vi sono al di sopra, mentre il DTM rappresenta l'andamento della superficie del suolo senza gli elementi antropici e la vegetazione.

La struttura dei dati differenzia ulteriormente DTM e DEM, associando quest'ultimo alla rappresentazione *raster grid*, e al primo il dominio vettoriale degli *shape files*.

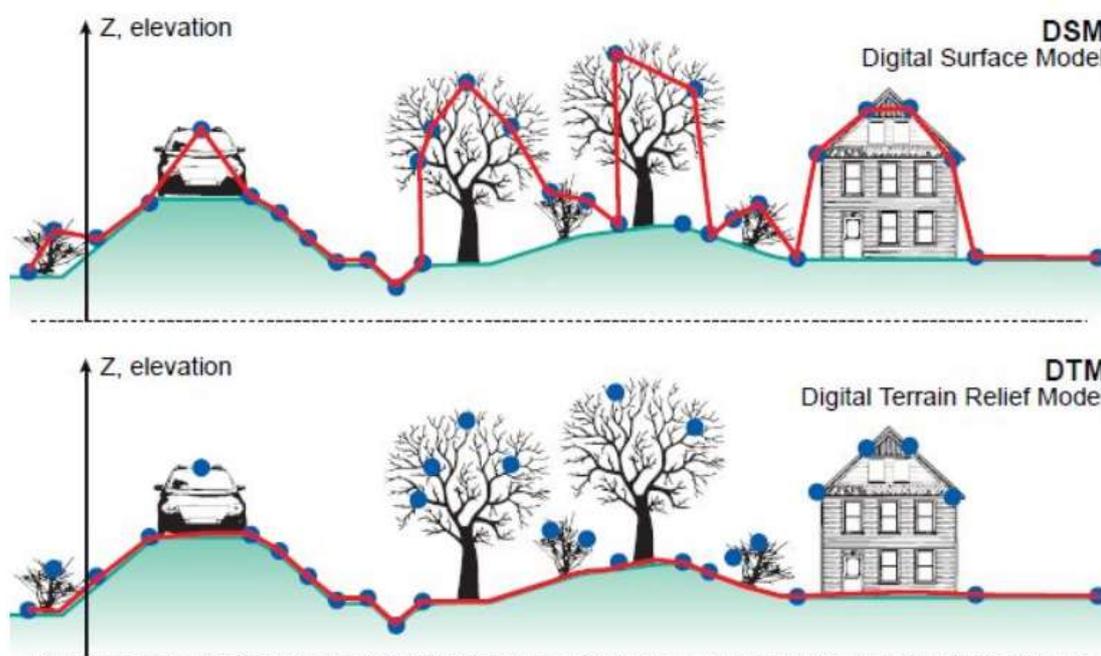


Figura 2.1.7: DSM e DTM a confronto.

L'ortofoto, o ortomosaico, è la rappresentazione cartografica in forma di immagine digitale georeferenziata. L'ortoproiezione permette di trasformare geometricamente un'immagine fotografica, o meglio l'insieme delle immagini fotografiche di un oggetto che non è considerevole piano, come il nostro territorio, in un'immagine che è la proiezione ortogonale o cartografica dello stesso.

L'ortofoto è un prodotto che conserva tutti i contenuti informativi delle acquisizioni fotografiche aeree, accanto alla congruenza metrica necessaria a renderlo uno strumento prezioso. Tali caratteristiche permettono infatti di utilizzarla come supporto cartografico, aggiornamento cartografico e completamento/sfondo nei Siti Informativi Territoriali (SIT).

L'ortofoto è definita 'speditiva', 'ordinaria' o 'di precisione' secondo i seguenti criteri:

- 'Speditiva' in quanto rapida ed economica.
- 'Ordinaria' nel caso in cui utilizzi come fonte il modello digitale del terreno DTM.

- 'Di precisione' nel momento in cui vengono corrette tutte le deformazioni prospettiche, e si ottiene la corretta sovrapposizione con la cartografia numerica. In questo modo si può produrre un DSM a partire dal DTM in formato vettoriale, ed un modello di superficie denso DDSM in formato *raster* mediante la cartografia numerica, la fotogrammetria e/o nuvole di punti. Un ulteriore prodotto di fusione tra il contenuto metrico bidimensionale e cromatico dell'ortofoto di precisione e l'informazione tridimensionale del DSM, è l'Ortofoto Solida di Precisione (OSP). Quest'ultima unisce il modello altimetrico a tante matrici sovrapposte l'una sull'altra, associando ad ogni pixel l'informazione cromatica ed altimetrica.

Per ogni *pixel* vengono determinate le coordinate planimetriche (E, N corrispondenti ad X e Y), si interpola la quota Z mediante un modello altimetrico, proiettando il punto 3D di coordinate (E, N, z) sull'immagine (ξ, η); e infine si determina il DN-*Digital Number*, o contenuto radiometrico da associare con ricampionamento, scrivendo il suddetto DN nel *pixel* dell'ortofoto prodotta.

2.2 I database

Un *database* può essere definito come una raccolta di informazioni o dati correlati, gestiti e archiviati insieme, come unità collettiva. Una base dati spaziale GIS è un *database* che include informazioni sulla posizione spaziale, sulla relazione e la forma delle caratteristiche geografiche topologiche e i dati sotto forma di attributi.

La progettazione del *database* spaziale è il processo formale di analisi del mondo reale in un modello strutturato, essa si sviluppa nelle seguenti fasi: analisi dei requisiti, progettazione logica, progettazione fisica.

In termini più comuni, sono necessari un piano, un layout di progettazione e quindi i dati per completare il processo.

Avere un solido *database* spaziale ben progettato è la chiave per eseguire una buona analisi spaziale, esso può essere complesso e progettato con sofisticati *software* automatici o può essere semplicemente una raccolta di dati organizzata con attenzione, che può essere utilizzata in una forma geografica.

L'obiettivo di un *database* è duplice: da un lato consentire una rapida consultazione delle informazioni territoriali disponibili, dall'altro correlare le risorse informative al loro utilizzo in processi di conoscenza, analisi, decisione o progettazione. Registrando queste attività permette di verificare in ogni momento il rapporto tra informazioni territoriali e le diverse tematiche di applicazione fornendo una chiave di lettura aggiuntiva che supera la semplice ricerca per contenuti, operando classificazioni di tipo tematico-applicativo.

Il *database* in generale costituisce quindi un catalogo interattivo e dinamico dei livelli informativi disponibili in funzione delle classi di contenuto e di categorie tematiche, analizzate nel dettaglio nei paragrafi successivi.

2.2.1 Base dati Regione Piemonte: BDTRE

La Base Dati Territoriale di Riferimento degli Enti (BDTRE) è la base dati geografica del territorio piemontese promossa dalla Regione, con i contenuti propri di una cartografia tecnica, strutturata secondo le "Regole tecniche per la definizione delle specifiche di contenuto dei *database* geo-topografici" nazionale e in primo luogo finalizzata a supportare le attività di pianificazione, governo e tutela del territorio.

Fin dal 2014 "la base cartografica di riferimento per la Regione e per tutti i soggetti pubblici e privati che con essa si interfacciano è quella derivata dalla BDTRE" (art. 10 della Legge Regionale 5 febbraio 2014, n. 1).

La Legge Regionale 1° dicembre 2017, n. 21 istituisce l'infrastruttura geografica regionale, con il fine di integrare le informazioni a contenuto geografico provenienti da varie fonti (uffici regionali, enti locali e altri soggetti pubblici e privati),

garantendone validità, accuratezza, coerenza, completezza e aggiornamento, e conferma quanto stabilito nel 2014.

La BDTRE assume quindi il ruolo di "contenitore" condiviso di tutti i dati geografici, da cui deriva la base cartografica di riferimento regionale. Per consentirne la sua piena fruizione ai molteplici soggetti interessati, dagli Enti della Pubblica Amministrazione Piemontese, ai professionisti, agli enti universitari e di ricerca e ai cittadini, è resa disponibile in modalità *open*.

La BDTRE è pubblicata in diversi formati e attraverso diverse tipologie di servizi secondo i principali standard.

I metadati riassunti nella tabella in Figura 2.2.1 permettono di conoscere i dettagli, scaricare e visualizzare i dati disponibili.

Gli acronimi indicati nella rappresentazione tabellare precedente indicano: WMS – *Web Map Service*, WMTS – *Web Map Tile Service* e WFS – *Web Feature Service*. Nel primo e nel secondo caso si tratta di immagini di mappa georiferite, o mappe a tessere, mentre nel terzo di descrizioni dei singoli oggetti spaziali contenuti all'interno dell'area di interesse interrogata.

Sono disponibili:

- Allestimenti cartografici: rappresentazioni del territorio piemontese secondo le convenzioni cartografiche. Sono disponibili a varie scale, in bianco nero (1: 10.000) o a colori (1: 50.000 - 1: 250.000) per l'anno corrente, e in bianco nero (1: 10.000) per gli anni precedenti.
- Dati di scarico: i dati vettoriali di geometrie discrete (punti, linee e poligoni), di oggetti geografici e le informazioni alfanumeriche associate, sono strutturati in coerenza con la classificazione e la nomenclatura della specifica nazionale e sono pubblicati in formato *shapefile*. Sono scaricabili per comune, con un file *zip* che racchiude tutti gli *shapefile* della BDTRE presenti su quel comune. Per avere tutti i dettagli o scaricare o visualizzare il dato si può consultare il metadato relativo.
- Strati "prioritari": per alcune classi di BDTRE, ritenute di interesse più comune e organizzate in strati, sono disponibili servizi di visualizzazione

(WMS - *Web Map Service*) che consentono di caricare i singoli *layer*, componendo quindi una mappa a seconda delle proprie necessità, e di interrogarne gli attributi.

	Metadato	WMS	WMTS	WFS	Scarico	
ALLESTIMENTI	BDTRE - SFONDO CARTOGRAFICO REGIONE PIEMONTE - GEO-SERVIZIO WMS E WMTS Sfondo cartografico multiscala ottimizzato per la fruizione web disponibile nelle seguenti versioni	colore EPSG: 32632	getcapabilities	getcapabilities		
		colore EPSG: 3857	getcapabilities	getcapabilities		
		bianco/nero EPSG: 32632	getcapabilities	getcapabilities		
		ALLESTIMENTO CARTOGRAFICO DI RIFERIMENTO BDTRE 2018 COLORI 1:250.000				link
		ALLESTIMENTO CARTOGRAFICO DI RIFERIMENTO BDTRE 2018 COLORI 1:50.000				link
		ALLESTIMENTO CARTOGRAFICO DI RIFERIMENTO BDTRE 2018 B/N 1:10.000	getcapabilities	getcapabilities		link
		BDTRE 2017	getcapabilities	getcapabilities		
		BDTRE 2016	getcapabilities	getcapabilities		
		BDTRE 2015	getcapabilities	getcapabilities		
		BDTRE 2014	getcapabilities	getcapabilities		
DATI IN SCARICO	BDTRE – DATABASE GEOTOPOGRAFICO (shapefile su taglio comunale)				link	
STRATI PRIORITARI	INFORMAZIONI GEODETICHE E FOTOGRAMMETRICHE	getcapabilities		getcapabilities		
	VIABILITA' E INDIRIZZI	getcapabilities		getcapabilities		
	IMMOBILI ED ANTROPIZZAZIONI	getcapabilities		getcapabilities		
	IDROGRAFIA	getcapabilities		getcapabilities		
	OROGRAFIA	getcapabilities		getcapabilities		
	VEGETAZIONE	getcapabilities		getcapabilities		
	RETI DI SOTTOSERVIZI	getcapabilities		getcapabilities		
	LOCALITA' SIGNIFICATIVE E SCRITTE CARTOGRAFICHE	getcapabilities		getcapabilities		
	AMBITI AMMINISTRATIVI	getcapabilities		getcapabilities		
	AREE DI PERTINENZA	getcapabilities		getcapabilities		

Figura 2.2.1: Metadati disponibili sul GeoPortale.

Le fasi descritte nel Capitolo 4 del presente elaborato riguardano proprio il processo di ottenimento di quei dati e metadati sopra descritti, che per un Comune neonato quale Mappano, devono essere prodotti ex-novo, per entrare potenzialmente a fare parte della BDTRE di riferimento.

In generale la condivisione e l'inclusione di dati/metadati all'interno della Base Dati Regionale è subordinata al rispetto di requisiti standardizzati ed unificati, come indicato nelle Specifiche descritte nel successivo paragrafo.

2.2.2 Specifiche per cartografia di base

Le specifiche tecniche per la formazione e l'aggiornamento delle basi cartografiche di riferimento (Data Base Topo-cartografico – BDTRE) sono messe a disposizione dei comuni e dei liberi professionisti secondo le seguenti modalità:

- Specifica completa: Regione Piemonte ha predisposto un capitolato tipo e una specifica per la produzione di Data Base Topo-cartografici ai sensi del D.M. 10/11/2011 (*Regole tecniche per la definizione delle specifiche di contenuto dei database geotopografici*, pubblicato in Gazzetta Ufficiale n. 48 del 27 febbraio 2012, Supplemento ordinario n. 37).

La specifica completa è utilizzata per le produzioni cartografiche finanziate da Fondazione CRT con il supporto tecnico di Regione. Questa tipologia di produzione cartografica prevede un rilievo rigoroso mediante fotorestituzione a partire da una ripresa aerea realizzata appositamente.

- Specifica semplificata: Regione Piemonte ha predisposto una specifica semplificata per l'aggiornamento della cartografia da parte degli Enti (ad esempio Comuni) e per produzioni cartografiche di minor precisione.

Nel nostro caso, come ampiamente descritto nel Capitolo finale, faremo riferimento alla specifica semplificata in quanto permette un approccio più semplice al Data Base Topografico (D.M. 10/11/2011) e allo stesso tempo consente l'aggiornamento speditivo della BDTRE.

Le suddette specifiche sono state realizzate con gli strumenti della *GeoUML Methodology*, messe a punto dallo *SpatialDBgroup* del Politecnico di Milano.

La metodologia *GeoUML* è orientata alla realizzazione di Infrastrutture dei Dati Territoriali (IDT – sezione Visione), perché semplifica la realizzazione di *database* che condividono contenuti comuni e supporta la realizzazione di *dataset* di trasferimento adatti allo scambio di tali contenuti.

I principi fondamentali della metodologia *GeoUML* sono i seguenti:

- applicare una netta distinzione tra il livello concettuale (livello della specifica) e il livello fisico dei dati (livello dell' implementazione);
- supportare molti modelli implementativi orientati a rappresentare uno stesso schema concettuale su diversi schemi fisici relativi alle principali tecnologie disponibili;
- supportare la definizione di molti vincoli di integrità (anche di natura spaziale) e altre proprietà strutturali a livello concettuale, e permettere il loro controllo sui dati a livello fisico.

Tale procedura è corredata da alcuni strumenti, detti *GeoUML Tools*:

- *GeoUML Catalogue* che permette la definizione di uno Schema Concettuale e la definizione di parametri per la generazione di schemi fisici basati sui modelli implementativi.
- *GeoUML Validator* che esegue il controllo di conformità di un *dataset* o *database* rispetto a una Specifica (Schema Concettuale) prodotta dal *GeoUML Catalogue*.

In particolare, il modello *GeoUML* e il *GeoUML Catalogue* sono stati utilizzati per realizzare lo standard nazionale *Catalogo dei Dati Territoriali – Specifiche di Contenuto per i DB Geotopografici* (Allegati 1 e 2 al Decreto - 10 novembre 2011 - sulle regole tecniche per la definizione delle specifiche di contenuto dei database geotopografici dei Ministeri per la Pubblica Amministrazione e l'innovazione e

dell'Ambiente) all'interno del quale è definito il cosiddetto “*National Core*”, cioè l'insieme dei dati geo-topografici che dovranno essere condivisi a livello nazionale.

2.2.3 Da DBTRE a INSPIRE

Il ‘Catalogo dei Dati Territoriali - Specifiche di contenuto per i DB Geo-topografici’, unitamente alle ‘Regole di Interpretazione delle Specifiche di Contenuto per i Database Topografici’, sono i documenti di riferimento per i *database* geo-topografici che costituiscono base informativa territoriale per le pubbliche amministrazioni, ai sensi dell’Art. 59 del D. Lgs. 82/2005.

Al fine di sviluppare un’attività necessaria e opportuna per la realizzazione dell’Infrastruttura dei Dati Territoriali nazionale, in tali documenti sono stati considerati il campo di applicazione e i principi di carattere generale enunciati dalla Direttiva INSPIRE (Direttiva 2007/2/CE del 14 marzo 2007 pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale dell’Unione Europea del 25/04/07) che istituisce un’Infrastruttura per l’informazione territoriale nella Comunità Europea.

Il Catalogo definisce i contenuti e la struttura dei suddetti *database* prodotti dai Comuni della Regione Piemonte, e rispetto alle precedenti specifiche pubblicate da IntesaGIS, viene mantenuta la stessa organizzazione di definizione degli oggetti per ‘Strati’, ‘Temi’ e ‘Classi’; ogni ‘Classe’ è caratterizzata dalla propria descrizione, dall’insieme degli attributi tematici e dei loro domini, dalle componenti spaziali e dagli eventuali attributi; per ognuna sono specificate le relazioni e i vincoli sulle componenti spaziali.

Quanto indicato nelle Specifiche di Contenuto non è che una parte di tutto il contesto necessario all’implementazione e alla gestione di un Sistema Informativo Territoriale in cui si deve inserire l’informazione geografica; i dati territoriali descritti nel suddetto Catalogo costituiscono solamente un primo nucleo informativo che potrà e dovrà essere ampliato in seguito. Le Specifiche costituiscono il riferimento per lo sviluppo delle attività di aggiornamento dei dati territoriali di base o di alcuni loro livelli, e delle modalità di interscambio dei dati dagli Enti

proprietari o gestori verso Regione Piemonte, con la relativa armonizzazione di quelli provenienti dai diversi Enti con il DB Geotopografico regionale.

Il Catalogo individua i dati territoriali che rappresentano e descrivono la copertura del suolo, sotto forma di poligoni, il grafo viabilità con toponomastica e numeri civici, il grafo dell'idrografia ed infine una serie di classi non topologiche.

La struttura di riferimento è costituita dalla Classe (Figura 2.2.2), che definisce la rappresentazione di una specifica tipologia di oggetti territoriali: le proprietà, la struttura del dato, le regole di acquisizione e di strutturazione e di relazione con gli altri oggetti.

livello	classi	Attributo1	Attributo2	Attributo3	Attributo4	Attributo5	Attributo6	Attributo7	Attributo8
URBANO	AREE ATTREZZATE	AATT_TY							
	PARTICOLARI ARCHITETTONICI	PAR_AR_TY							
	EDIFICI MINORI	EDI_MIN_TY							
	AREE IN TRASFORMAZIONE	A_TRAS_TY							
	SCAVI E DISCARICHE	SC_DIS_TY							
	MANUFATTO INDUSTRIALE	MN_IND_TY							
	EDIFICIO	EDIFC_TY	EDIFC_USO	EDIFC_STAT	EDIFC_SOT				
	ATTREZZATURE SPORTIVE	ATTR_SP_TY							
	MURI DI SOSTEGNO	MU_SOS_TY							
	MURO DIVISORIO	MU_DIV_TY							
	DIGA	DIGA_CT							
	ARGINE	ARGN_TY							
VIABILITA'	VIABILITA MISTA SECONDARIA	AR_VMS_TY	AR_VMS_SED	AR_VMS_LIV					
	AREA DI CIRCOLAZIONE VEICOLARE	AC_VEI_ZON	AC_VEI_SED	AC_VEI_LIV	AC_VEI_FON				
	AREA DI CIRCOLAZIONE CICLABILE	AC_CIC_SED	AC_CIC_LIV	AC_CIC_FON					
	AREA DI CIRCOLAZIONE PEDONALE	AC_PED_SED	AC_PED_LIV	AC_PED_FON					
	MANUFATTI DI TRASPORTO	MAN_TR_TY							
	SEDE FERROVIARIA	SD_FER_TY	SD_FER_SED	SD_FER_LIV					

Figura 2.2.2: Esempi di strutture del dato dal Catalogo dei Dati Territoriali Versione 2.2.1.

Per definire la parte strutturata delle Specifiche di Contenuto, detta 'Schema Concettuale', viene utilizzato il modello GeoUML-*Geographic Unified Modelling Language*. Allo scopo di definire in modo completo il modello GeoUML è stato predisposto uno specifico documento cui far riferimento: "Il Modello GeoUML: Regole di Interpretazione delle Specifiche di Contenuto per i Database Topografici". All'interno di questo modello, finalizzato a definire la copertura topologica del suolo, sono stati individuati 4 livelli: livello urbano, livello viabilità, livello acque, e livello vegetazione. Un quinto livello è coniato per le Classi non topologiche - livello

notopo, e tre ulteriori livelli, lineari e puntuali, per i grafi e gli indirizzi: livello grafo viabilità, livello grafo idrografia e livello indirizzi.

Nel Capitolo 4, dedicato al processo di generazione del dato 3D, verranno esaminate nel dettaglio le strutture dei dati relativamente alla Specifica di contenuto semplificata con lo scopo ultimo di implementare la Base Dati Territoriale di Riferimento degli Enti Piemontesi.

2.2.4 Interoperabilità degli Standard Europei

Le sfide relative alla mancanza di disponibilità, qualità, organizzazione, accessibilità e condivisione delle informazioni spaziali sono comuni a un gran numero di politiche e attività e sono sperimentate attraverso i vari livelli di autorità pubblica in Europa. Con lo scopo di risolvere questi problemi, e adottare misure di coordinamento tra gli utenti e i fornitori di informazioni spaziali, la direttiva 2007/2/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio, adottata il 14 marzo 2007, mira a istituire un'infrastruttura per l'informazione territoriale nella Comunità Europea (INSPIRE) per le politiche ambientali o le politiche e attività che hanno un impatto sull'ambiente.

INSPIRE si basa sulle infrastrutture per l'informazione territoriale create e gestite dagli Stati membri. Per sostenere la creazione di un'infrastruttura Europea, sono state specificate le norme di attuazione relative ai seguenti componenti dell'infrastruttura: metadati, interoperabilità dei set di dati territoriali e servizi di dati spaziali, servizi di rete, condivisione di dati e servizi e procedure di monitoraggio e comunicazione.

INSPIRE non richiede la raccolta di nuovi dati, ma richiede che gli Stati membri rendano disponibili i propri dati conformemente alle norme di attuazione.

Il concetto di interoperabilità proposto contiene la possibilità di combinare dati e servizi spaziali provenienti da diverse fonti in tutta la Comunità Europea in modo coerente. È importante notare che per "interoperabilità" si intende l'accesso ai set di dati spaziali attraverso i servizi di rete, in genere via internet. L'interoperabilità

può essere ottenuta modificando, armonizzando e archiviando set di dati esistenti, o trasformandoli tramite servizi per la pubblicazione nell'infrastruttura INSPIRE, con lo scopo ultimo che gli utenti debbano dedicare meno tempo e sforzi alla comprensione e all'integrazione dei dati al momento dello sviluppo delle loro applicazioni sulla base dei dati forniti in conformità con INSPIRE.

Per facilitare l'implementazione di INSPIRE, è importante che tutte le parti interessate abbiano l'opportunità di partecipare alle specifiche e allo sviluppo. Per questo motivo, la Commissione ha avviato un processo di costruzione del consenso che coinvolge utenti dei dati e fornitori insieme a rappresentanti dell'industria, della ricerca e del governo.

Il framework di sviluppo elaborato dal team di redazione delle specifiche dei dati, mira a mantenere coerenti le specifiche dei dati dei diversi domini, e riassume la metodologia da utilizzare per lo sviluppo delle specifiche dei dati, fornendo una serie coerente di requisiti e raccomandazioni per raggiungere l'interoperabilità.

Le linee guida per la codifica dei dati territoriali definiscono come le informazioni geografiche possano essere codificate per consentire i processi di trasferimento tra i sistemi dei fornitori di dati negli Stati membri.

Per supportare lo sviluppo coerente delle specifiche e il potenziale riutilizzo degli elementi delle specifiche sono stati mantenuti un *repository* di modelli consolidato, un dizionario dei concetti di funzionalità e un glossario.

Elencando una serie di requisiti e formulando le raccomandazioni necessarie, le specifiche dei dati consentono la piena interoperabilità del sistema negli Stati membri, nell'ambito delle aree di applicazione previste dalla direttiva.

Oltre a fornire una base per l'interoperabilità dei dati spaziali in INSPIRE, il quadro di sviluppo delle specifiche dei dati e le specifiche dei dati tematici possono essere riutilizzati in altri ambienti a livello locale, regionale, nazionale e globale, contribuendo a migliorare la coerenza e l'interoperabilità dei dati nelle infrastrutture di dati spaziali.

Il diagramma riportato nella figura seguente offre una panoramica delle relazioni tra gli atti giuridici (la direttiva INSPIRE e le norme di attuazione) e le Linee guida tecniche.

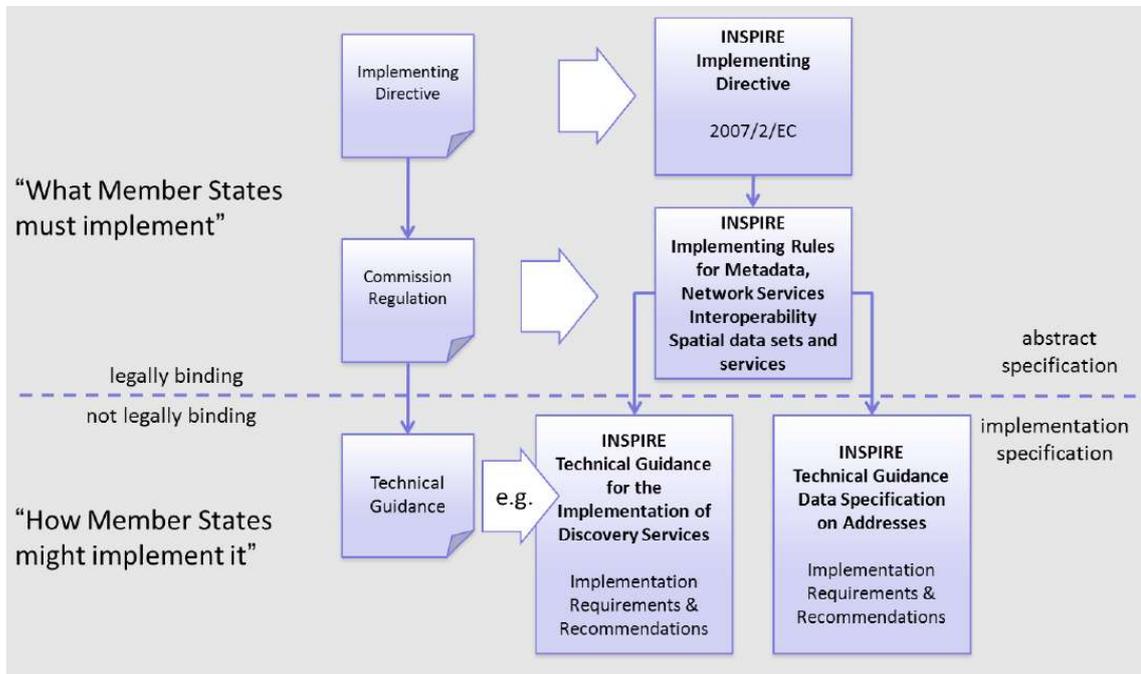


Figura 2.2.3: Relazione tra le norme di attuazione di INSPIRE e le linee guida tecniche - Direttiva 2007/2/CE (INSPIRE).

La direttiva INSPIRE e le norme di attuazione includono requisiti giuridicamente vincolanti che descrivono, di solito a livello astratto, ciò che gli Stati membri devono attuare. Al contrario, gli orientamenti tecnici definiscono le modalità con cui gli Stati membri possono attuare i requisiti inclusi nelle norme di attuazione, pertanto, possono includere requisiti tecnici non vincolanti che devono essere soddisfatti se un fornitore di dati degli Stati membri sceglie di conformarsi alle linee guida tecniche.

L'attuazione di queste linee guida tecniche massimizzerà l'interoperabilità dei set di dati spaziali INSPIRE.

Capitolo 3 - Caso studio

Nel presente Capitolo si presenta nel dettaglio la procedura applicata al Caso del Comune di Mappano, evidenziandone le peculiarità e analizzando infine i risultati prodotti.

3.1 Il territorio in esame

Il primo passo verso la vera e propria messa in opera del progetto riguarda l'individuazione del territorio oggetto di studio. In questa fase preliminare si prende atto della documentazione cartografica attuale (marzo 2019), resa disponibile attraverso la sezione Catalogo/Mappe del GeoPortale della Regione Piemonte (<http://www.geoportale.piemonte.it/geocatalogorp/?sezione=mappa>), di cui si riporta una visualizzazione d'insieme (Figura 3.1.1).

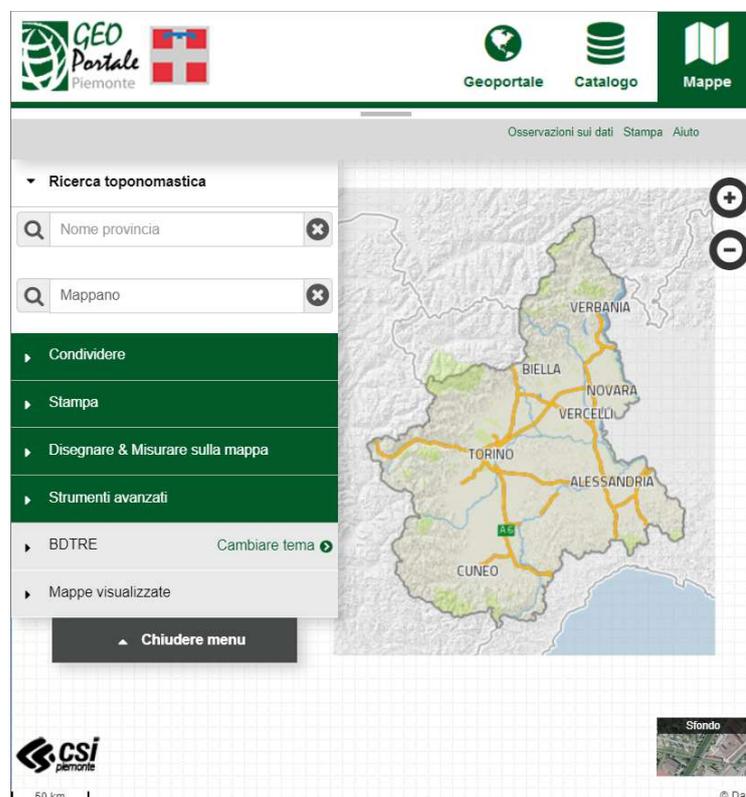


Figura 3.1.1: Strumento ricerca Mappe – GeoPortale Piemonte.

Andando ad inserire il Comune di Mappano nel *tag* di ricerca toponomastica si ottiene una visualizzazione focalizzata sui confini della zona d'interesse (Figura 3.1.2).

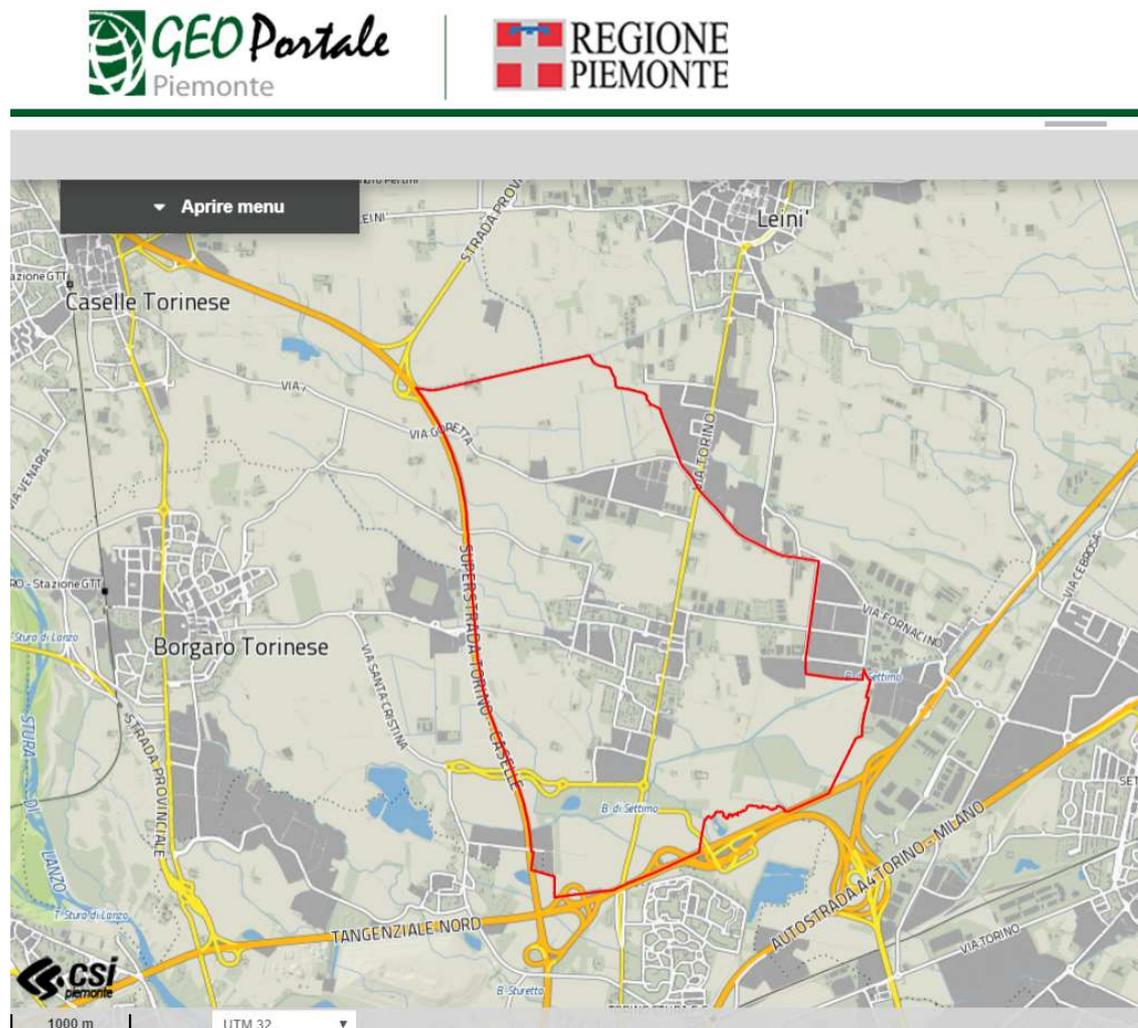


Figura 3.1.2: Individuazione confini Comune di Mappano – GeoPortale Piemonte.

È possibile visualizzare i medesimi confini sulla base dell'ortofoto disponibile.

Questo strumento consente inoltre di esportare i file pdf della cartografia a differenti scale in base alle necessità richieste dal successivo utilizzo, andando a selezionare manualmente l'area di visualizzazione in base alla scala e all'orientamento richiesto.

Utilizzando in modo complementare le informazioni fornite a diversi livelli di dettaglio dalle ortofoto prodotte alle scale 1: 100.000 e 1: 50.000, si individuano i

confini del territorio oggetto del nostro studio e si può procedere con le fasi successive di acquisizione del dato.

3.2 Il coinvolgimento dell'organizzazione sociale

L'attuazione del processo di acquisizione prende vita a partire dalle fasi di organizzazione e consulenza con gli esponenti dell'amministrazione pubblica del Comune di Mappano, che ci hanno fornito piena disponibilità.

La collaborazione delle nostre forze (DIATI - Politecnico di Torino) e quelle del Comune è stata coordinata durante una riunione tecnica tenutasi nella sede del Municipio Mappanese. A prestare servizio in qualità di rappresentanti dell'organizzazione comunale è stato il Gruppo Arcobaleno, che ha costituito un'importante risorsa per la fase di acquisizione dei dati.



Figura 3.2.1: Parte della squadra del DIATI, e dei volontari Arcobaleno Mappanese sul campo, durante la fase di appoggio – 27 marzo 2019, Mappano.

Il Politecnico di Torino, in qualità di istituzione tecnica, con la figura del Dott. Maschio P. F., membro del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, ha saputo coinvolgere e coordinare le competenze tecniche dell'Ateneo con quelle del Comune di Mappano. Le prime hanno preso forma in noi studenti del Laboratorio di Geomatica, interessati al progetto, in alcuni dottorandi e ricercatori del DIATI, sotto la continua supervisione e guida del Professor Lingua A. M. riferimento titolare di questo progetto; le seconde si sono sviluppate tramite le figure del Sindaco, dell'Ufficio Tecnico comunale, e dell'associazione di volontari "Arcobaleno Mappanese" del Comune di Mappano.

La realtà dell' Arcobaleno è stata fondata nel 2018 su iniziativa di un gruppo di amici, e ad oggi conta all'incirca settanta iscritti. I componenti si mettono a disposizione nel tempo libero per il bene del territorio e tra le numerose iniziative svolte ci sono giornate ecologiche, la periodica pulizia del parco "Unione Europea", oltre a piccoli interventi nelle scuole del Comune.

Questi protagonisti locali hanno dimostrato, sin dalle prime operazioni di coordinazione, forti capacità organizzative e collaborative; hanno fornito supporto allo staff del Politecnico durante l'intera campagna di rilevazione, rendendosi disponibili con mezzi e presenze costanti sul campo.

In generale le organizzazioni con consolidata esperienza locale, come questa, rivestono un ruolo determinante, e in particolare se i processi partecipativi sono avviati nell'ambito della rivitalizzazione di insediamenti soggetti a fenomeni di abbandono. Essendo portatori di un patrimonio di storie, di rappresentazioni e di pratiche sviluppate nel corso del tempo, essi mettono a disposizione tali conoscenze per arricchire gli scenari di sviluppo.

Considerando quindi le organizzazioni sociali locali come una vera e propria risorsa, la valorizzazione del loro ruolo nello sviluppo dei processi di partecipazione può essere inteso come una valorizzazione del capitale immateriale locale, in quanto in una comunità coinvolta risiede il potenziale di una consapevolezza e una propensione alla conservazione e alla diffusione del patrimonio locale in tutti i suoi aspetti.



Figura 3.2.2: Parte della squadra del DIATI, e dell' Arcobaleno Mappanese sul campo, durante gli spostamenti delle fasi di presa aerea – 29 marzo 2019, Mappano.

3.3 Materializzazione GCP

Il passo successivo riguarda l'appoggio fotogrammetrico, ovvero la collocazione dei *marker* sul territorio analizzato, in modo tale da costituire un'adeguata ed efficiente rete topografica, fondamentale per la qualità di una corretta restituzione del dato finale. Tale procedura ha avuto luogo in due giornate in cui abbiamo provveduto ad a materializzare i punti di appoggio a terra.

Nel nostro caso abbiamo utilizzato dei pannelli 60×60 cm in plastica semi rigida, o in PVC tessuto ad alta resistenza, caratterizzati da colori ad alto contrasto che ne permettono la facile localizzazione (Figura 3.3.1). Un'ulteriore tipologia di target sono quelli naturali realizzati con elementi, quali tombini, chiusini o oggetti fissi ben

identificabili presenti stabilmente sul territorio rilevato, ulteriormente evidenziati dall'uso di bombolette spray di colore rosso (Figura 3.3.2, Figura 3.3.3).



Figura 3.3.1: Materializzazione GCP: marker in plastica semi-rigida e PVC flessibile.



Figura 3.3.2: Materializzazione GCP: marker rappresentati artificialmente sul territorio.



Figura 3.3.3: Materializzazione GCP: elementi identificabili sul territorio.

Nella Figura 3.3.4 si riporta la distribuzione dei punti di controllo materializzati sul campo: si tratta di 30 GCP uniformemente distribuiti sulla superficie e sullo sviluppo verticale.

Contestualmente alle operazioni di materializzazione si è provveduto a misurare la posizione dei punti di controllo mediante ricevitore GNSS. In particolare si è fatto uso della rete GNSS SmartNet ItalPOS: un servizio di proprietà di Leyca Geosystems che offre la correzione delle misure per il posizionamento in RTK con basi fisse in tutto il territorio nazionale.

Si riportano di seguito (Tabella 3.3.1, Tabella 3.3.2) le coordinate acquisite sul campo, in termini di latitudine, longitudine e quota ellissoidica (con riferimento all'ellissoide WGS4), che prima di essere utilizzata dovrà essere convertita in quella geoidica.

Si osservi che i marker denominati M12 e M13 non sono stati rilevati a causa della rimozione dei target posizionati, ad opera di ignoti.

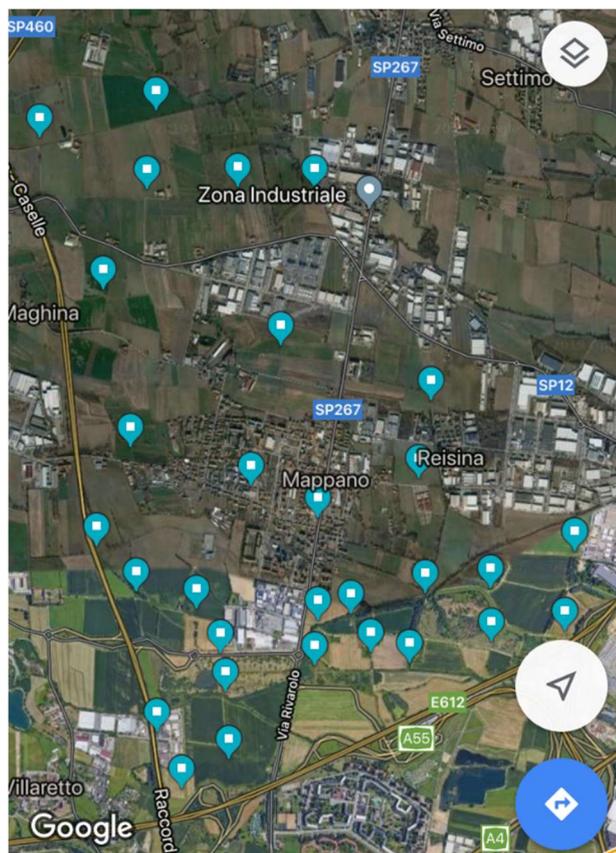


Figura 3.3.4: Localizzazione marker sul territorio mappanese – GoogleMaps.

Tabella 3.3.1: Coordinate acquisite con ItalPOS – parte 1.

Identificativo Marker	Latitudine	Longitudine	Quota ellissoidica	Accuratezza orizzontale [m]	Accuratezza verticale [m]
M1	397.724.982	4.999.209.934	232.968	0.02	0.02
M2	397.752.856	4.998.969.656	232.058	0.02	0.02
M3	397.770.873	4.998.531.517	230.437	0.02	0.02
M4	397.465.181	4.998.351.395	230.651	0.02	0.02
M5	397.316.840	4.998.714.800	232.222	0.02	0.02
M6	398.344.817	4.999.113.106	229.505	0.02	0.02
M7	398.944.724	4.999.129.777	227.013	0.02	0.02
M8	399.485.857	4.999.261.649	225.023	0.02	0.02
M9	399.957.145	4.999.310.984	222.307	0.02	0.02
M10	400.020.467	4.999.853.217	223.895	0.02	0.02
M11	399.484.811	4.999.602.840	226.480	0.02	0.02

Tabella 3.3.2: Coordinate acquisite con ItalPOS – parte 2.

Identificativo Marker	Latitudine	Longitudine	Quota ellissoidica	Accuratezza orizzontale [m]	Accuratezza verticale [m]
M14	398.352.881	4.999.421.461	231.295	0.02	0.02
M15	397.586.669	4.999.497.363	234.057	0.02	0.02
M16	397.189.249	4.999.625.881	237.367	0.02	0.02
M17	396.950.247	4.999.912.924	238.524	0.02	0.02
M18	398.376.822	5.002.203.160	241.474	0.02	0.02
M20	397.896.825	5.002.229.923	244.524	0.02	0.02
M21	397.292.346	5.002.219.092	248.724	0.02	0.02
M22	397.381.043	5.002.732.041	249.905	0.02	0.02
M23	396.605.045	5.002.566.037	253.836	0.02	0.02
M24	397.019.199	5.001.583.810	246.568	0.02	0.02
M25	398.157.109	5.001.196.047	238.677	0.02	0.02
M26	399.110.225	5.000.830.853	231.725	0.02	0.02
M27	399.041.296	5.000.322.304	230.385	0.02	0.02
M28	398.374.193	5.000.084.238	232.921	0.02	0.02
M29	397.943.713	5.000.275.503	236.218	0.02	0.02
M30	397.181.371	5.000.567.971	240.288	0.02	0.02

3.4 La pianificazione del volo

L'ultima fase del piano di lavoro in campo si è sviluppata con la realizzazione dei voli mediante drone. Per utilizzare un drone per mappatura aerea è richiesto un operatore registrato ENAC (per operazioni non critiche) ma potrebbe essere necessario essere anche autorizzati per particolari scenari critici.

Indipendentemente da ciò possono essere necessarie alcune autorizzazioni specifiche per il sorvolo di parchi e aree protette o l'autorizzazione di ENAC per operazioni all'interno di aree su cui ci sono restrizioni imposte dall'aeronautica italiana.

Anche nel nostro caso abbiamo messo in atto tutte le misure di sicurezza richieste, per compiere le operazioni in totale regolarità, con una strategia di voli multipli mediante drone, necessari a coprire l'intera area di studio di estensione pari a 11,896 km².

Il sistema utilizzato consiste in un mezzo aereo denominato *eBee Plus* di produzione *senseFly* (Figura 3.4.1), venduto dalla casa madre in kit da assemblare (Figura 3.4.2).



eBee Plus



Figura 3.4.1: UAV senseFly eBee Plus.

Il velivolo pesa circa 1,100 kg comprensivo di camera e batteria, con un'apertura alare di 110 cm.

La portata del collegamento radio si estende da un valore nominale di 3 km fino a 8 km, ed è stato utilizzato l'accessorio *Radio Tracker* fornito da *senseFly*.

La velocità di crociera varia tra 40 e 110 km/h, con una resistenza al vento fino a 45 km/h. Per il controllo di quest'ultima variabile, durante le giornate di volo, è stato utilizzato un anemometro che ci ha permesso di misurarne e monitorarne

costantemente le condizioni, per verificare di essere nei limiti della strumentazione a nostra disposizione.



Figura 3.4.2: Fasi di assemblaggio della strumentazione senseFly - eBee Plus.

Il massimo tempo di volo dichiarato è di 59 minuti, nel nostro caso abbiamo cautelativamente programmato missioni con tempi di volo mantenuti sempre al di sotto dei 40 minuti, in modo tale da evitare l'esaurimento delle batterie prima dell'atterraggio prestabilito.

In questa applicazione è stata utilizzata la camera supportata dall'apparecchio *senseFly S.O.D.A.* (Figura 3.4.3) con sensore RGB di formato 13,8 x 8,8 mm, per un totale di 20 megapixel, otturatore globale e munita di protezioni da polvere e urti. La camera in oggetto permette di avere una risoluzione al suolo teorica, o lunghezza focale, di 2,9 cm/pixel, per un'altezza di volo di 120 m.



Figura 3.4.3: Camera senseFly S.O.D.A.

Il software di controllo e per la pianificazione dei voli è *eMotion3* (Figura 3.4.4): programma supportato dal PC utilizzato in campo, che costituisce la stazione di controllo e permette di effettuare tutte le regolazioni necessarie per la corretta configurazione del sistema, definire i waypoint e trasmetterli alle memorie locali del velivolo, controllare la telemetria trasmessa durante il volo per verificarne l'efficacia e prevenire eventuali problemi.

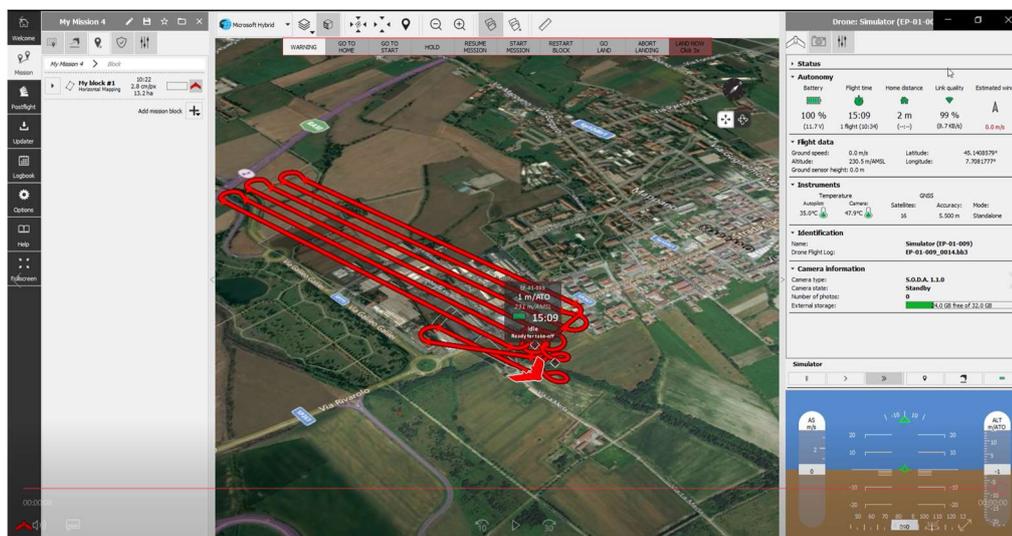


Figura 3.4.4: Schermata di visualizzazione eMotion3.

All'interno della barra di controllo riportata a lato della schermata del programma di pianificazione vengono indicate in tempo reale le informazioni utili a monitorare i parametri della missione di volo intrapresa: percentuale di batteria disponibile, tempo di volo, distanza dalla stazione di decollo/atterraggio (*home distance*), qualità

del collegamento radio, velocità del vento stimata, velocità di volo, altitudine assoluta e del sensore dal suolo, informazioni del GNSS e della camera utilizzata.

Nella Figura 3.4.5 si possono visualizzare nel dettaglio le suddette variabili in una simulazione di volo svolta in ufficio, col solo scopo esemplificativo.

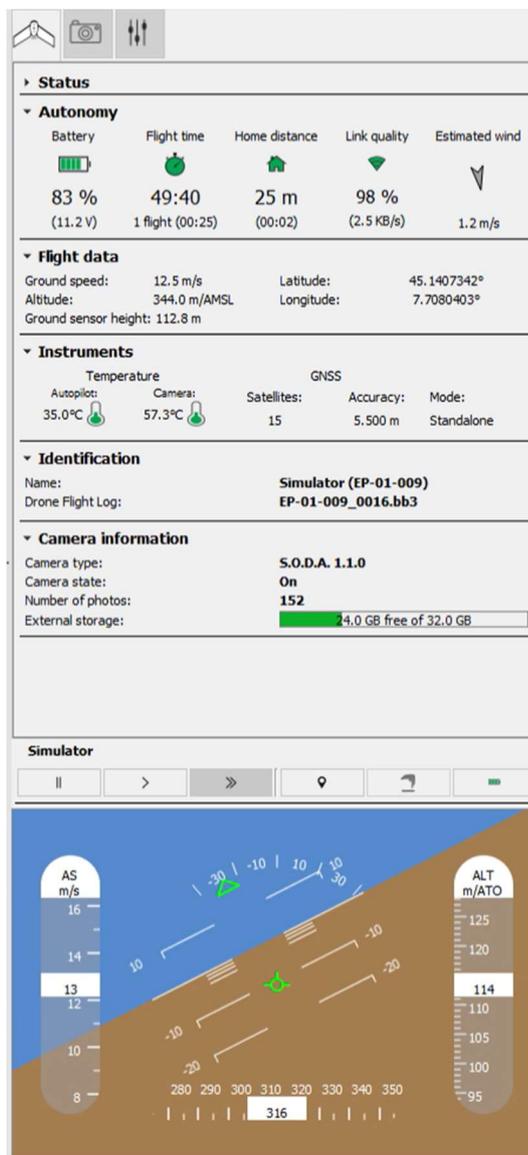


Figura 3.4.5: Visualizzazione barra di controllo software eMotion3 – simulazione missione di volo.

Durante il volo, lo scatto è impostato in remoto dalla stazione di controllo nelle fasi preliminari di pianificazione del volo, ed il *software*-stazione di controllo permette

di visualizzare il cono di presa dei singoli fotogrammi durante il volo (Figura 3.4.6), così come fornisce un'indicazione aggiornata del numero di scatti acquisiti.

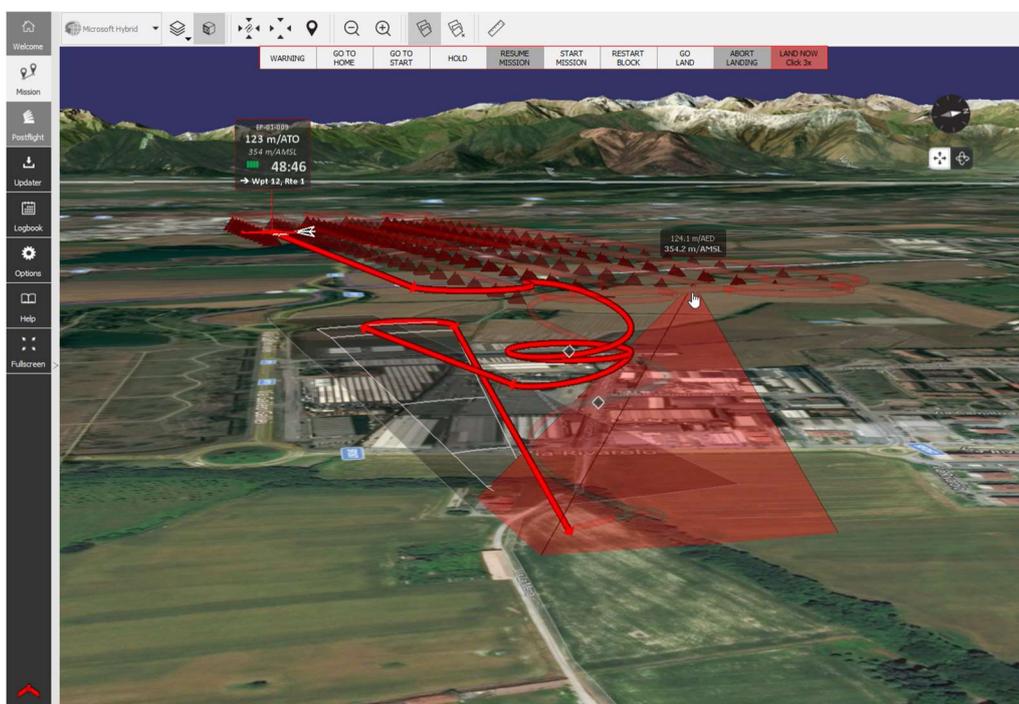


Figura 3.4.6: Visualizzazione cono di presa e numero di acquisizioni - software eMotion3.

3.4.1 I voli realizzati

La realizzazione della copertura completa del Comune di Mappano è stata ottenuta attraverso un numero totale di voli pari a 13, con un susseguirsi di tentativi e assestamenti delle traiettorie e del campo di presa, al fine di ottimizzare i tempi e, allo stesso modo, i risultati.

Nelle giornate di venerdì 29/03/2019, sabato 30/03/2019 e domenica 31/03/2019 sono stati operati i seguenti voli:

- Venerdì 29/03: voli da 1 a 4
- Sabato 30/03: voli 5 e 6
- Domenica 31/03: voli da 7 a 12

Questi ultimi sono stati selezionati in modo tale da costituire la base dati successivamente elaborata, con un totale di 5.646 fotogrammi acquisiti ad un'altezza di volo di circa 140 m, con una risoluzione pari a 3,16 cm/pixel ed un'area ricoperta di 11,7 km².

Alcuni dei voli eseguiti, e non riportati nella seguente rappresentazione in quanto non necessari all'elaborazione del progetto, sono stati oggetto di interruzione ed annullamento da parte del drone stesso per diversi motivi tecnici e/o meccanici. In alcuni casi si sono riscontrate condizioni di vento sfavorevoli alla stabilità del drone, con la conseguente perdita di qualità del dato da acquisire; in altri casi la percentuale della batteria stimata non avrebbe potuto garantire il tempo di volo imposto, motivo per il quale si è sperimentato il ritorno automatico dell'apparecchio a seguito di valutazioni intrinseche, senza bisogno del nostro intervento.

Un'ulteriore problematica verificatasi durante la fase di atterraggio di uno dei voli sperimentati, è stata la presenza di vegetazione rigogliosa che ha causato condizioni di visibilità falsate tali da deviare il piano di volo programmato.

➤ Venerdì 29/03/2019

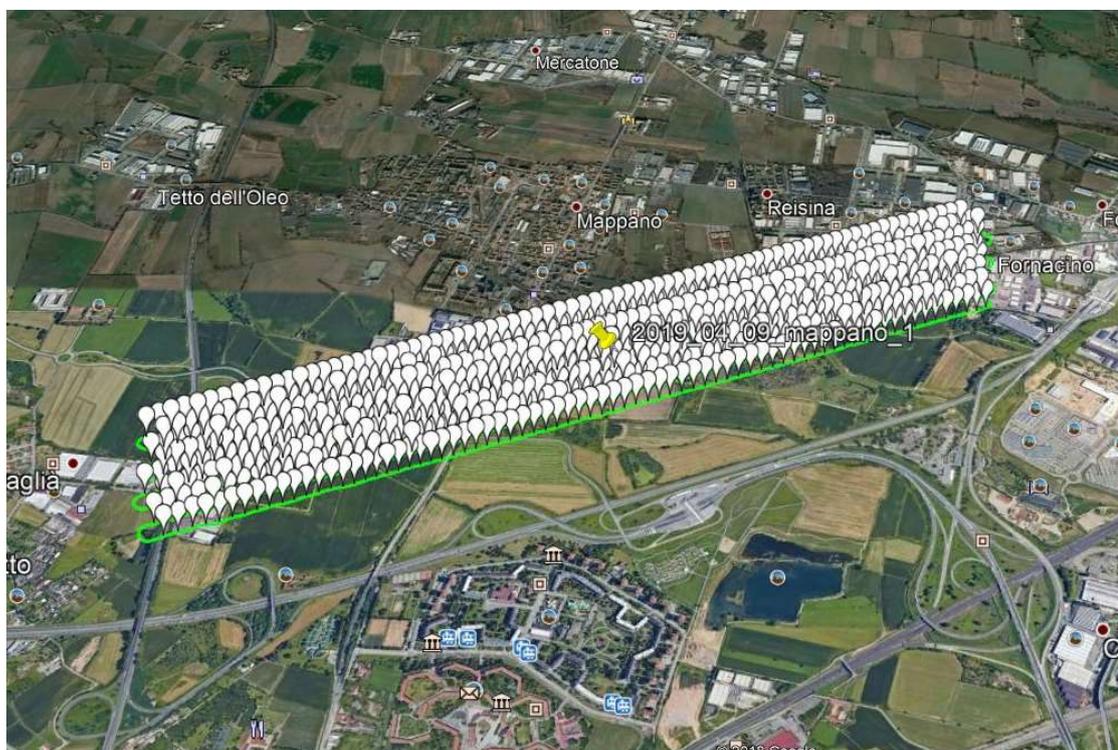


Figura 3.4.7: Volo n. 1 – venerdì 29/03/2019.



Figura 3.4.8: Volo n. 2 – venerdì 29/03/2019.

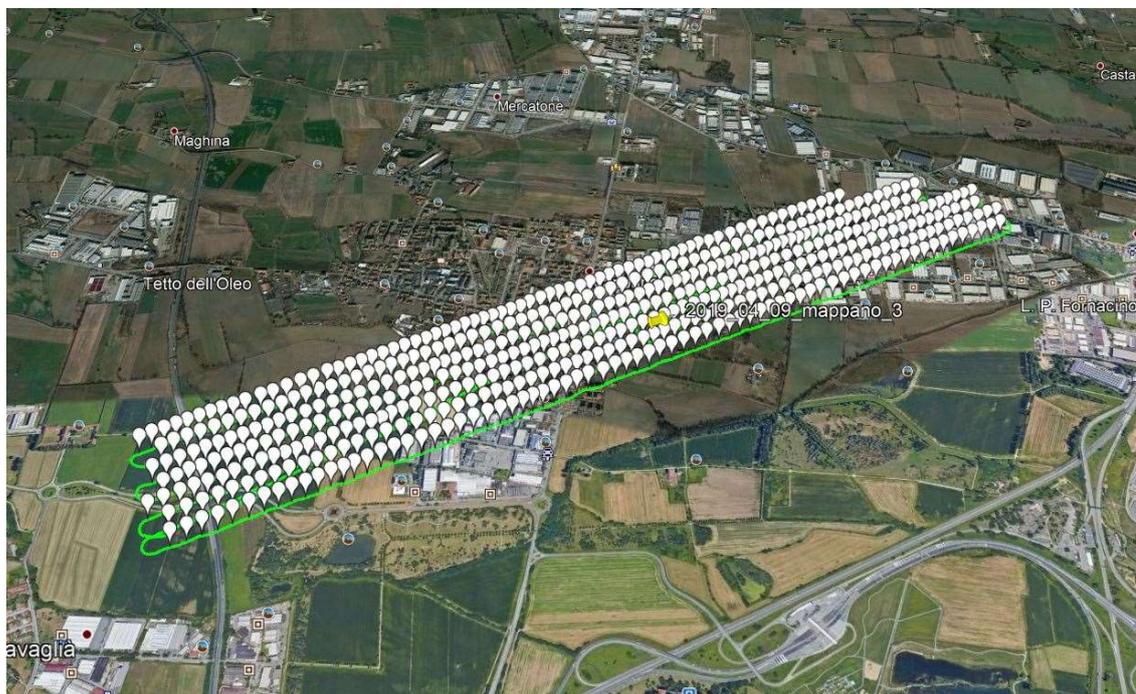


Figura 3.4.9: Volo n. 3 – venerdì 29/03/2019.



Figura 3.4.10: Volo n. 4 – venerdì 29/03/2019.

➤ Sabato 30/03/2019

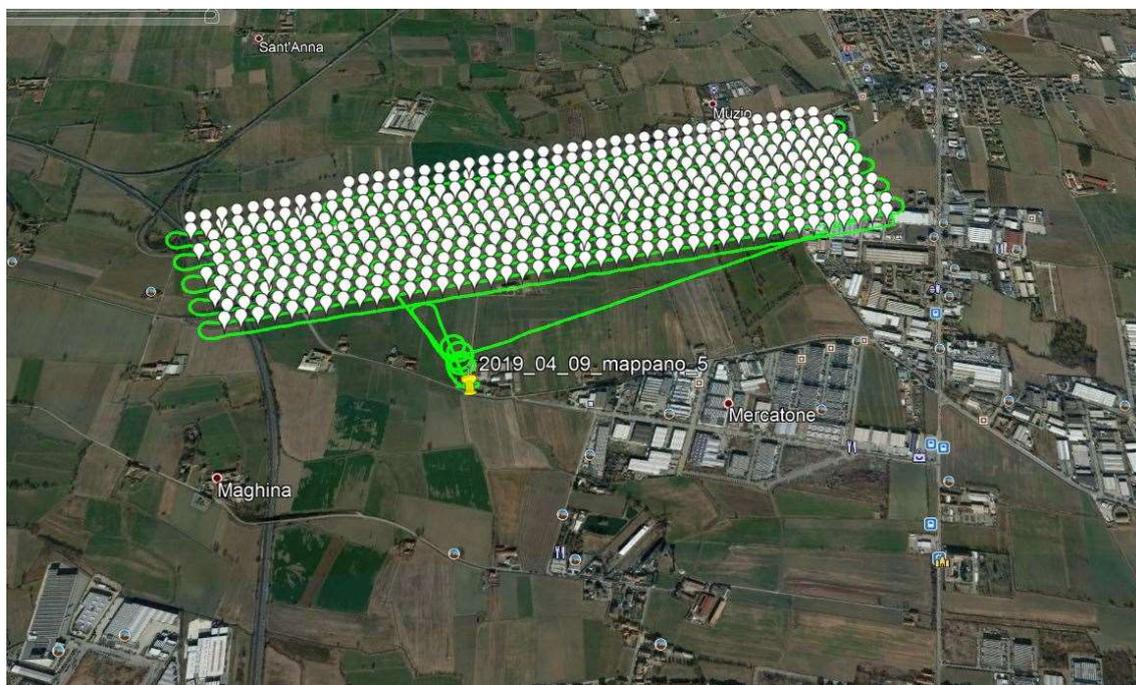


Figura 3.4.11: Volo n. 5 – sabato 30/03/2019.

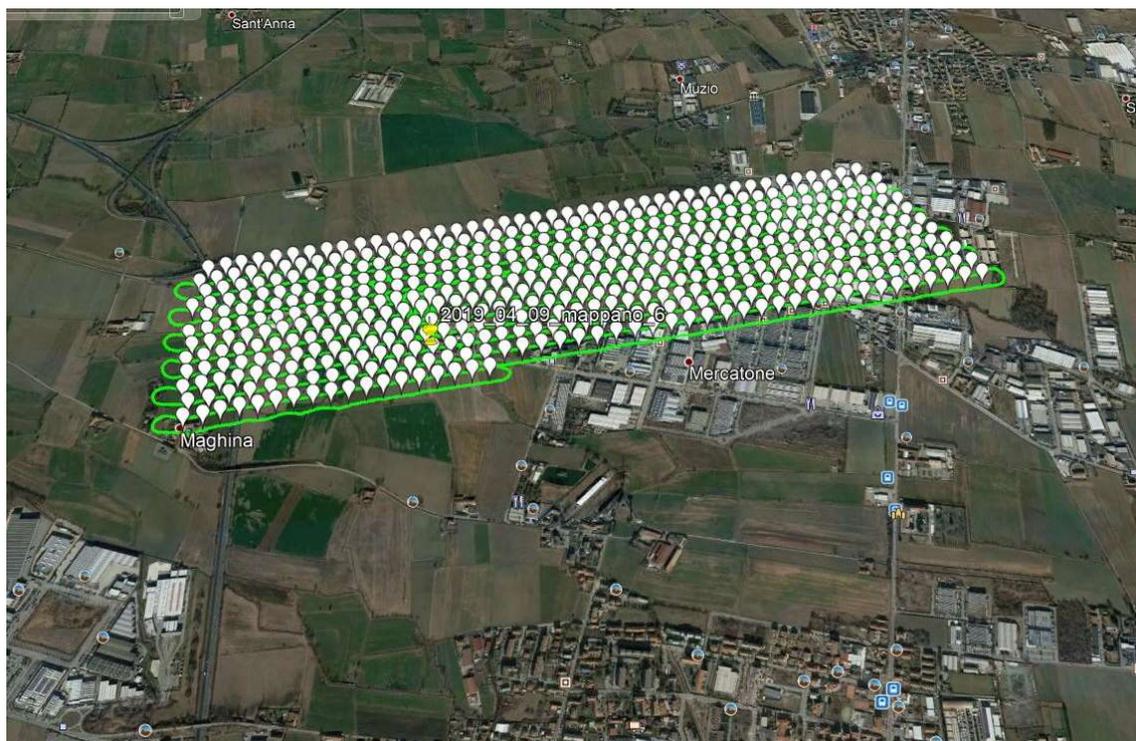


Figura 3.4.12: Volo n. 6 – sabato 30/03/2019.

➤ Domenica 31/03/2019



Figura 3.4.13: Volo n. 7 – domenica 31/03/2019.



Figura 3.4.14: Volo n. 8 – domenica 31/03/2019.



Figura 3.4.15: Volo n. 8+ – domenica 31/03/2019.

Il volo denominato “8+” (Figura 3.4.15) è stato effettuato a seguito del volo “8” precedentemente programmato ed interrotto a causa di condizioni di vento avverse, che hanno innescato il meccanismo automatico di annullamento della missione ed il rientro con atterraggio “di emergenza”.



Figura 3.4.16: Volo n. 9 – domenica 31/03/2019.



Figura 3.4.17: Volo n. 10 – domenica 31/03/2019.



Figura 3.4.18: Volo n. 11 – domenica 31/03/2019.



Figura 3.4.19: Volo n. 12 – domenica 31/03/2019.



Legenda:

Volo 1		Volo 7	
Volo 2		Volo 8 - 8+	
Volo 3		Volo 9	
Volo 4		Volo 10	
Volo 5		Volo 11	
Volo 6		Volo 12	

Figura 3.4.20: Copertura completa voli eseguiti sul territorio di Mappano.

3.5 Elaborazione dati fotogrammetrici e risultati

In questo paragrafo si mostreranno i risultati prodotti dai *software* utilizzati per l'elaborazione dei dati acquisiti, descritti nel precedente Capitolo teorico, e si proporrà un breve confronto mostrandone le accuratezze e le peculiarità riscontrate.

L'elaborazione è avvenuta presso il Laboratorio di Geomatica del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture del Politecnico di Torino. È stato utilizzato un elaboratore con CPU Intel(R) Core(TM) i7-6850K CPU @ 3.60GHz, RAM da 128 GB, GPU NVIDIA Quadro M2000 (Driver: 23.21.13.8816), e sistema operativo Windows 10 Pro, 64-bit.

Nel nostro caso sono stati posizionati 30 GCP, con distribuzione omogenea nei limiti della conformazione del territorio, di cui solo 24, nella fase di elaborazione, hanno fornito precisioni accettabili, nell'intorno di 1,52 cm per la coordinata orizzontale e 1,40 cm per la coordinata verticale.

La procedura di inserimento dei punti di controllo risulta automatica nella misura in cui viene fornito il file delle coordinate acquisite, in formato txt, ma è manuale nella fase di identificazione di ciascun marker per il maggior numero di fotogrammi.

Nella tabella riportata di seguito (Tabella 3.5.1) si illustra il numero di fotogrammi in cui è stato identificato ciascun GCP. Si noti che ciascun marker è stato rilevato in almeno 5 fotogrammi, ad eccezione del marker M9 identificato in soli 3 fotogrammi, e il marker M30 per il quale non è stato individuato nessun fotogramma in quanto non è stato rinvenuto al momento dell'acquisizione aerea, a causa della rimozione ad opera di ignoti.

L'accuratezza dei suddetti punti verrà esaminata nel dettaglio all'interno del *report* relativo al *software Pix4DMapper* illustrato nel paragrafo 3.5.1.

Tabella 3.5.1: Corrispondenza fotogrammi/marker GCP.

N° fotogrammi/ Marker	Etichetta Marker	N° fotogrammi/ Marker	Etichetta Marker
7	M1	7	M16
7	M2	10	M17
6	M3	8	M18
5	M4	9	M20
6	M5	8	M21
7	M6	10	M22
6	M7	7	M23
8	M8	9	M24
3	M9	9	M25
9	M10	12	M26
15	M11	10	M27
11	M14	10	M28
8	M15	12	M29
		0	M30

Dopo aver importato i fotogrammi, e localizzato i punti di controllo, è possibile avviare il processo di elaborazione automatica che fornirà i prodotti cartografici richiesti, in termini di ortofoto (Figura 3.5.1), modelli digitali del terreno (Figura 3.5.2) con una risoluzione di 3,16 cm/pixel, e della nuvola densa di punti.



Figura 3.5.1: Ortofoto prodotta in formato jpeg - Pix4Dmapper.

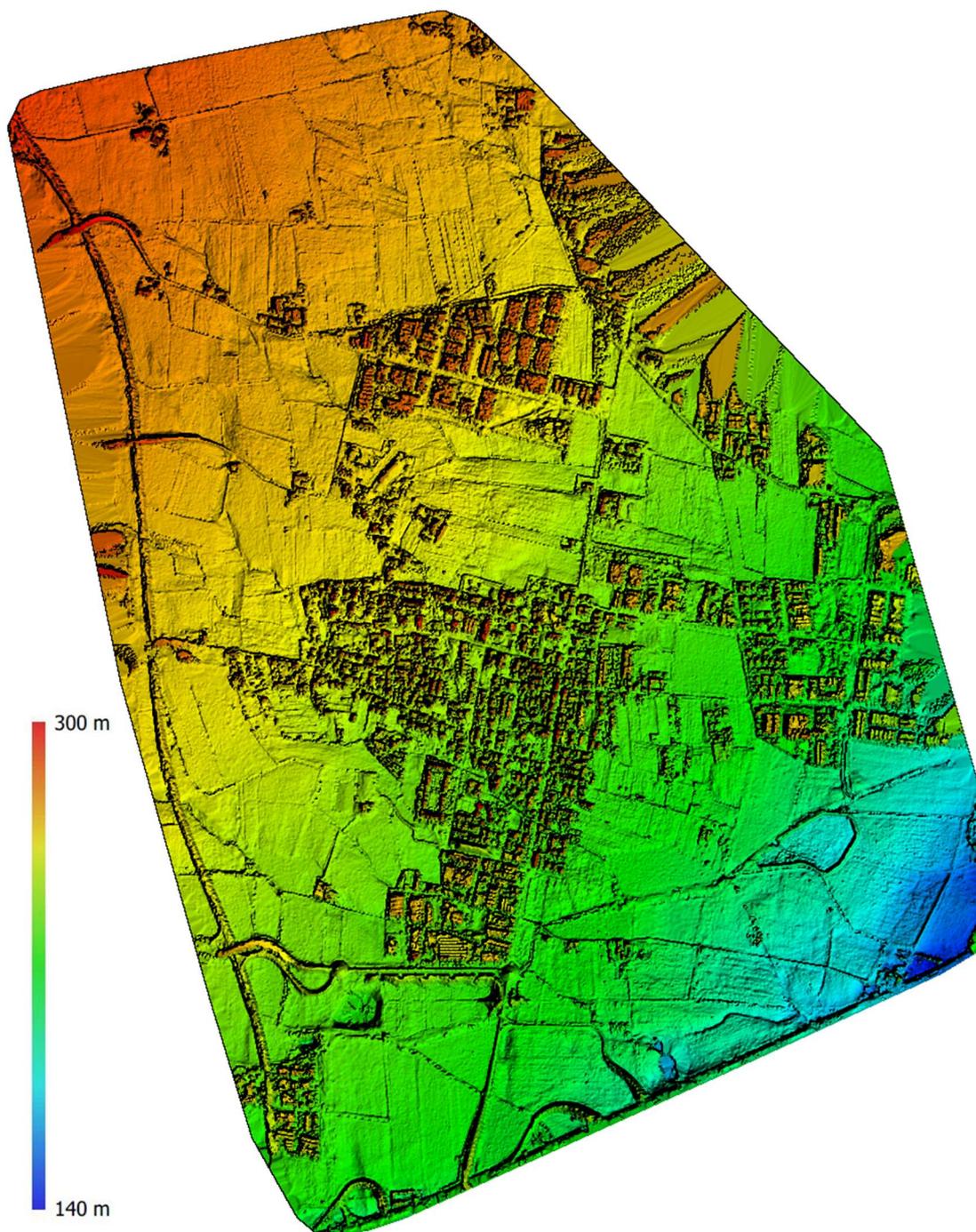


Figura 3.5.2: DSM prodotto – Pix4Dmapper.

Si riporta la rappresentazione del DSM prodotta in formato .png, della dimensione di 1.478 kB. La legenda dei colori dal rosso al blu identificano la quota dei punti del territorio dal più elevato a nord-ovest, al meno elevato a sud-est, in corrispondenza della zona dell'opera idraulica conosciuta dalla comunità Mappanese come "scolmatore".

Al termine del processo di elaborazione è inoltre possibile visualizzare la posizione delle camere e dei relativi fotogrammi (Figura 3.5.3) raffigurati sulla nuvola di punti generata e successivamente sottoposta al processo di categorizzazione automatica.

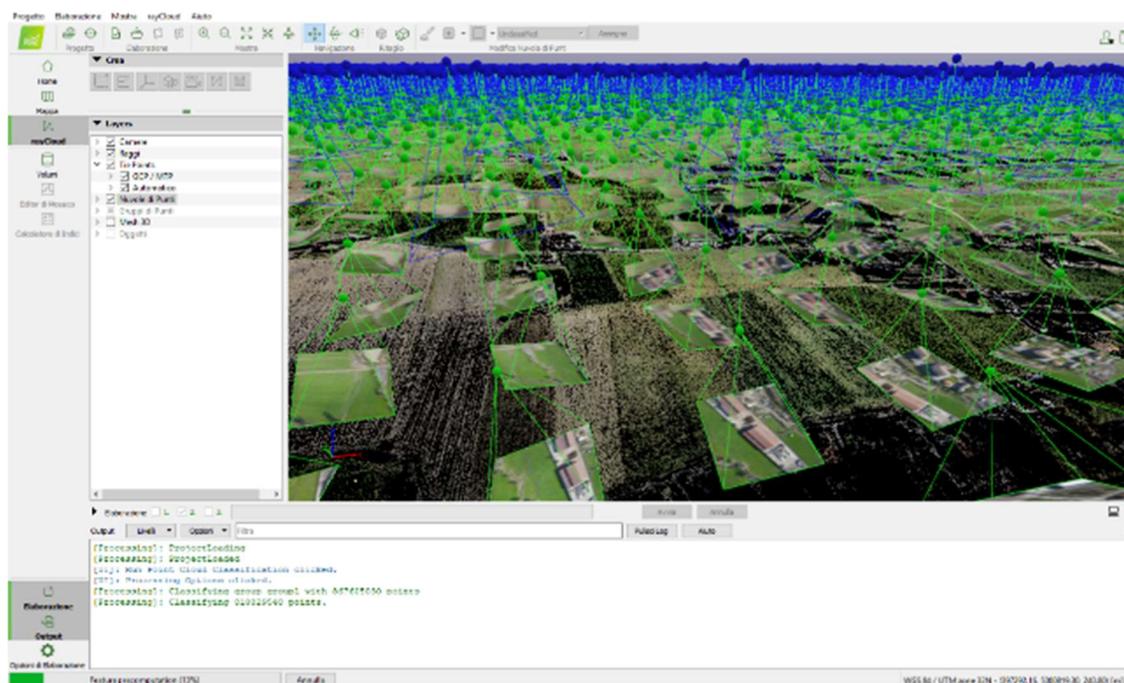


Figura 3.5.3: Visualizzazione camere e fotogrammi su nuvola di punti – Pix4DMapper.

Come anticipato, oltre al *software Pix4Dmapper* maggiormente utilizzato nelle fasi di elaborazione dei dati e restituzione dei risultati, abbiamo avuto modo di testare le funzionalità di un secondo applicativo utile all'elaborazione automatica del modello: il *software Agisoft Metashape*, conosciuto anche con la denominazione meno recente di *PhotoScan*.

Nel nostro caso abbiamo potuto beneficiare della sua rapidità di elaborazione dei dati, che a parità di numero di fotogrammi importati nel *software PIX4Dmapper*, ha consentito di ridurre i tempi utili ad ottenere dei risultati di buona qualità con la possibilità di essere ulteriormente implementati e ottimizzati. Dopo un primo apprezzamento delle capacità di calcolo e della rapida formulazione di risultati, abbiamo proceduto con l'analisi dei modelli prodotti dal primo *software*, che ha generato tutti i risultati di nostro interesse, con precisione ed accuratezza elevate.

Al termine del processo di elaborazione entrambi i *software* consentono di produrre un report dei parametri di processo e della qualità dei risultati prodotti. Si riportano di seguito tali report, in modo da attuare un confronto puntuale di ogni aspetto.

3.5.1 Report Pix4Dmapper



Quality Report

Generated with Pix4Dmapper version 4.3.31

! Important: Click on the different icons for:

- ?** Help to analyze the results in the Quality Report
- i** Additional information about the sections

 Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary **i**

Project	MAPPANO_conGCP
Processed	2019-05-10 16:32:30
Camera Model Name(s)	S.O.D.A_10.6_5472x9648 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	3.16 cm / 1.24 in
Area Covered	11.696 km ² / 1189.5603 ha / 4.60 sq. mi. / 2940.9690 acres

Quality Check **i**

? Images	median of 62900 keypoints per image	✓
? Dataset	5646 out of 5646 images calibrated (100%), all images enabled	✓
? Camera Optimization	0.43% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
? Matching	median of 11430.7 matches per calibrated image	✓
? Georeferencing	yes, 26 GCPs (26 3D), mean RMS error = 0.078 m	⚠

? Preview **i**

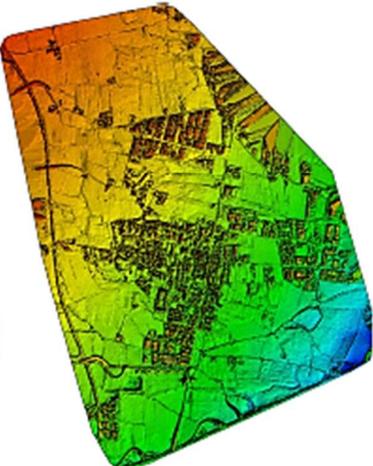



Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before denification.

Figura 3.5.4: Presentazione Quality Report Pix4Dmapper.

- *Summary* – riepilogo
 - GSD media: 3,16 cm
 - Area coperta: 11,896 km²
- *Quality Check* – controllo qualità
 - Immagini: media di 62.900 *keypoints* per ogni immagine
 - *Dataset - Calibration details*: 5.646/5.646 immagini calibrate e geolocalizzate (100%)

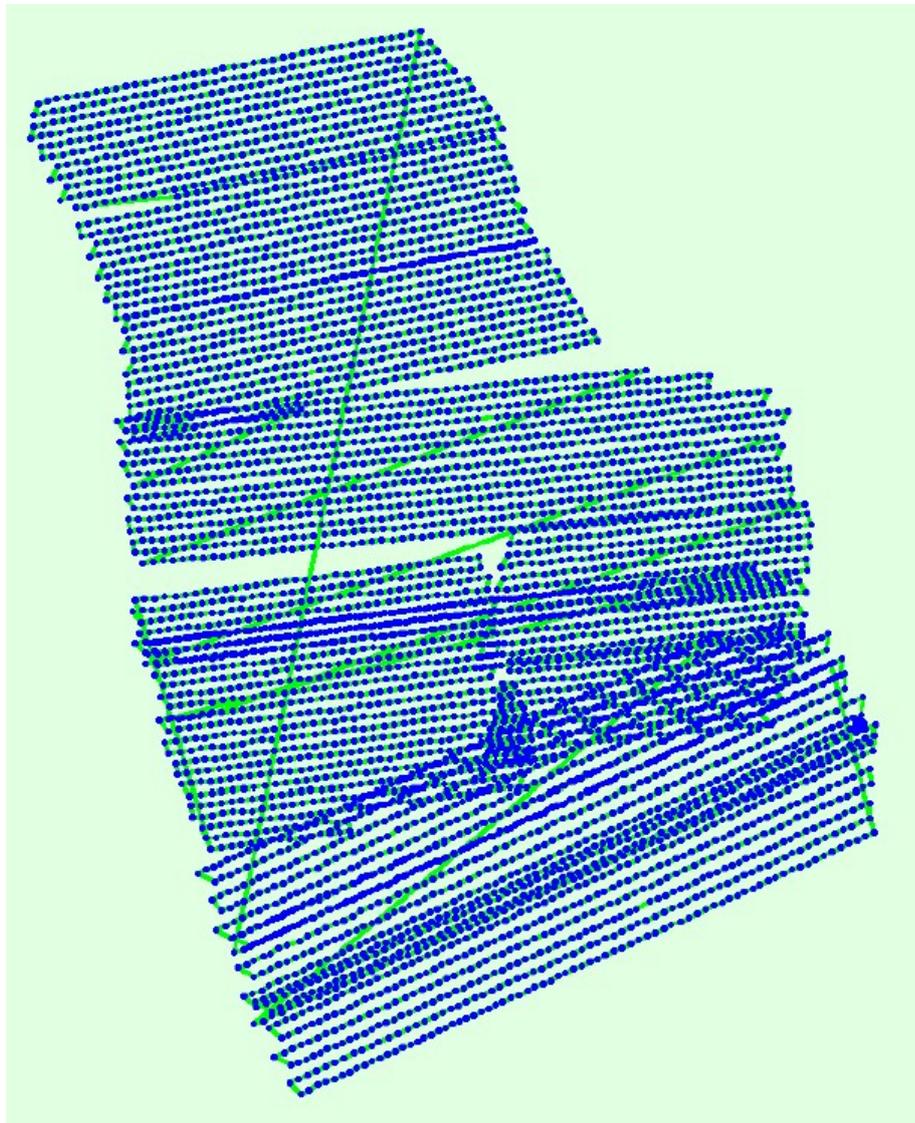


Figura 3.5.5: Posizione iniziale delle immagini - Quality Report Pix4Dmapper.

Nella Figura 3.5.5 la linea verde segue la posizione delle immagini nel tempo, a partire dal punto blu più grande in basso a destra.

- *Camera Optimization*: differenza relativa di 0,43% tra parametri interni della camera iniziali e ottimizzati
- *Matching*: media di 11.430,7 *matches* per ogni immagine calibrata
- Georeferenziazione: 26 GCP 3D, con un errore RMS medio di 0,078 m

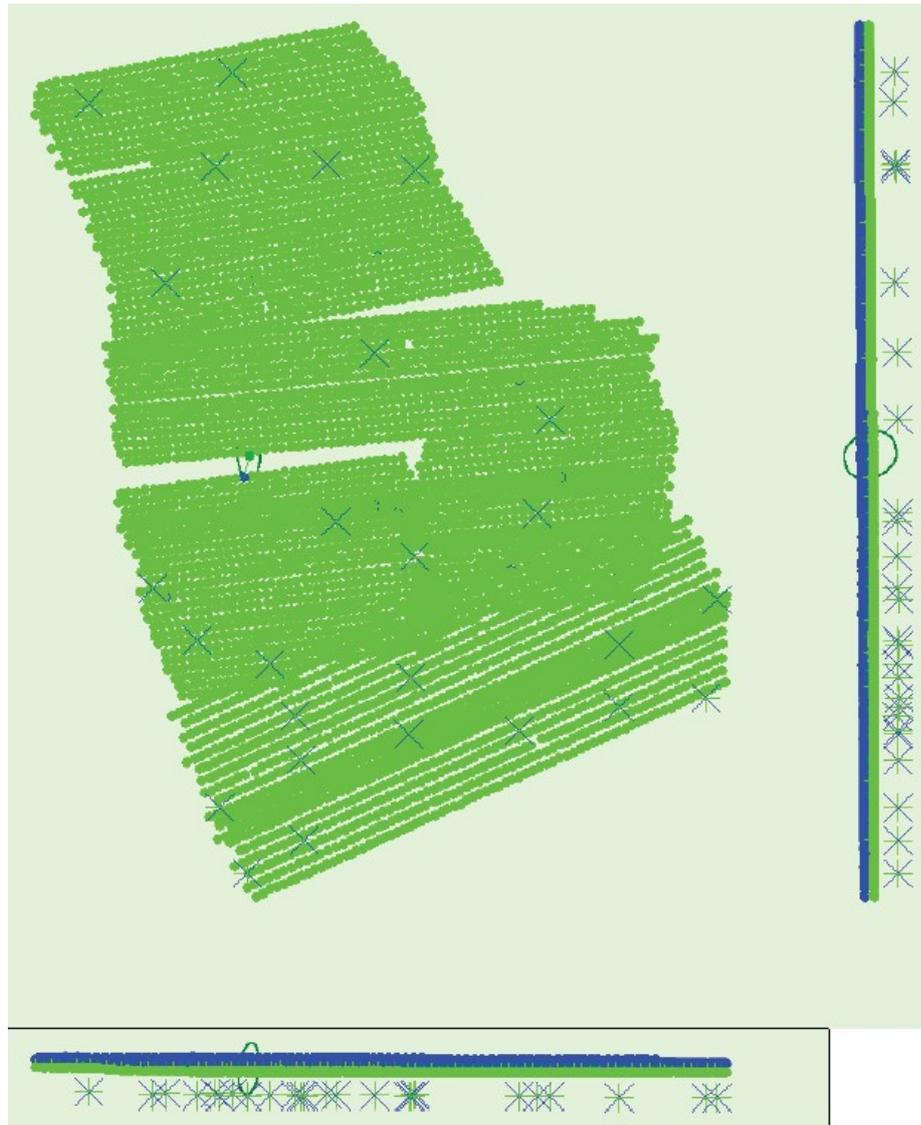


Figura 3.5.6: Offset tra posizioni iniziali (blu) e calcolate (verde) - Quality Report Pix4Dmapper.

Nella Figura 3.5.6 le croci indicano l'offset tra le posizioni iniziali dei GCP (croci blu) e le loro posizioni calcolate (croci verdi) nella vista dall'alto (piano XY), nella vista frontale (piano XZ) e nella vista laterale (piano YZ). Le ellissi verde scuro (ingrandite di 1000x) indicano l'incertezza del risultato di posizione assoluta.

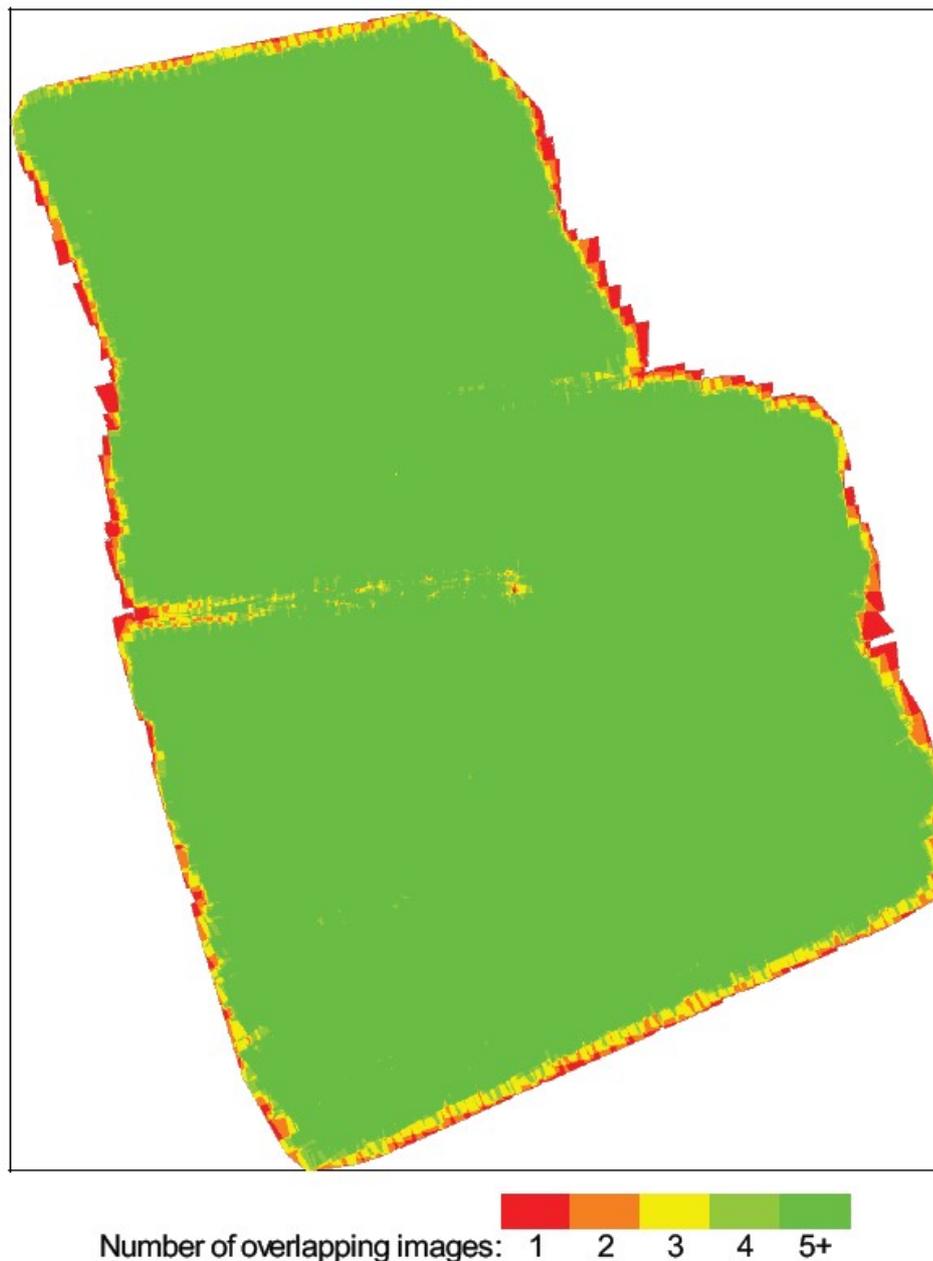


Figura 3.5.7: Numero di immagini sovrapposte calcolate per ciascun pixel dell'ortomosaico - Quality Report Pix4Dmapper.

Nella Figura 3.5.7 le aree rosse e gialle indicano una bassa sovrapposizione per la quale si possono generare risultati di scarsa qualità. Le aree verdi indicano una sovrapposizione di oltre 5 immagini per ogni pixel. Risultati di buona qualità saranno generati fintanto che il numero di corrispondenze di punti chiave è sufficiente anche per queste aree (vedere la Figura 3.5.8 per le corrispondenze di punti chiave).

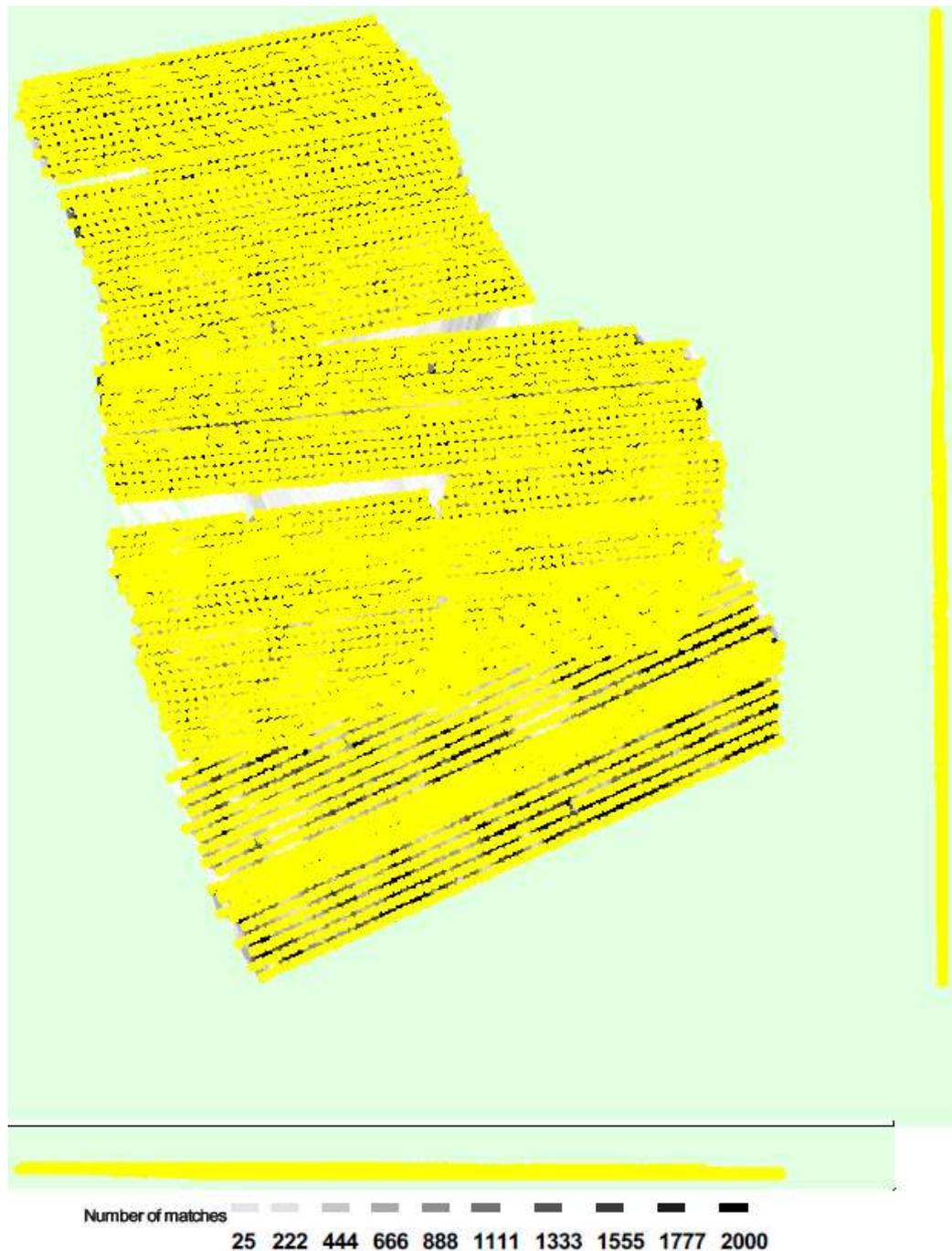


Figura 3.5.8: Posizioni delle immagini calcolate con collegamenti tra immagini corrispondenti - Quality Report Pix4Dmapper.

L'intensità del colore dei collegamenti indica il numero di punti chiave 2D corrispondenti tra le immagini. I collegamenti di colore più chiaro indicano collegamenti deboli e richiedono punti di ancoraggio manuali o un maggior numero di immagini.

Si riporta infine la relativa alla precisione della localizzazione di ciascun GCP, dove si riportano inoltre gli errori medi nelle tre direzioni delle coordinate. L'ultima colonna della tabella conta il numero di immagini calibrate in cui il GCP è stato verificato automaticamente rispetto al numero di immagini in cui è stato contrassegnato manualmente.

Tabella 3.5.2: Precisioni e accuratze GCP contrassegnati.

GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
M18 (3D)	0.020/ 0.020	-0.008	0.030	-0.021	0.514	8 / 8
M20 (3D)	0.020/ 0.020	0.019	0.004	-0.027	0.602	9 / 9
M21 (3D)	0.020/ 0.020	0.016	-0.006	-0.085	0.580	8 / 8
M22 (3D)	0.020/ 0.020	0.022	0.004	-0.156	0.692	10 / 10
M23 (3D)	0.020/ 0.020	0.016	-0.015	-0.190	0.712	7 / 7
M24 (3D)	0.020/ 0.020	-0.015	0.001	-0.111	0.814	9 / 9
M25 (3D)	0.020/ 0.020	0.012	0.020	-0.021	0.646	9 / 9
M26 (3D)	0.020/ 0.020	-0.002	0.004	0.030	0.909	12 / 12
M27 (3D)	0.020/ 0.020	-0.011	0.060	0.051	0.555	10 / 10
M28 (3D)	0.020/ 0.020	-0.006	-0.000	-0.012	0.656	10 / 10
M29 (3D)	0.020/ 0.020	0.030	0.010	-0.022	0.858	12 / 12
M14 (3D)	0.020/ 0.020	0.015	0.015	0.062	0.765	11 / 11
M15 (3D)	0.020/ 0.020	0.004	-0.013	-0.090	0.674	8 / 8
M16 (3D)	0.020/ 0.020	-0.478	0.217	0.090	0.885	7 / 7
M17 (3D)	0.020/ 0.020	-0.001	-0.005	-0.077	0.620	10 / 10
M5 (3D)	0.020/ 0.020	0.011	-0.039	0.024	0.545	6 / 6
M4 (3D)	0.020/ 0.020	-0.016	-0.017	0.051	0.842	5 / 5
M3 (3D)	0.020/ 0.020	-0.010	-0.020	0.078	0.586	6 / 6
M2 (3D)	0.020/ 0.020	0.002	0.003	0.031	0.799	7 / 7
M1 (3D)	0.020/ 0.020	-0.049	-0.054	0.066	0.907	7 / 7
M6 (3D)	0.020/ 0.020	0.001	-0.005	0.098	0.508	7 / 7
M7 (3D)	0.020/ 0.020	-0.026	-0.019	0.126	0.872	6 / 6
M8 (3D)	0.020/ 0.020	-0.022	-0.003	0.148	0.858	8 / 8
M9 (3D)	0.020/ 0.020	-0.027	0.028	0.141	0.201	3 / 3
M10 (3D)	0.020/ 0.020	0.017	0.019	0.175	0.538	9 / 9
M11 (3D)	0.020/ 0.020	0.007	-0.017	0.143	0.877	15 / 15
Mean [m]		-0.019198	0.007651	0.019309		
Sigma [m]		0.093490	0.047301	0.095126		
RMS Error [m]		0.095441	0.047916	0.097066		

○ *Initial Processing Detail*

- *System information*

- *Hardware:* CPU Intel(R) Core(TM) i7-6850K CPU @ 3.60GHz, RAM da 128GB, GPU NVIDIA Quadro M2000 (Driver: 23.21.13.8816)
- *Operating System:* Windows 10 Pro, 64-bit

- *Coordinate Systems*
 - Sistema di coordinate delle immagini: WGS 84
 - Sistema di coordinate dei GCP: WGS 84/UTM zone 32N
 - Sistema di coordinate di output: WGS 84/UTM zone 32N
- *Processing options*
 - Scala delle immagini-*keypoints*: intera, fattore di scala dell'immagine pari a 1
 - Metodo di calibrazione: standard
 - Ottimizzazione parametri interni: totale
 - Ottimizzazione parametri esterni: totale
- *Point Cloud Densification details* – dettagli nuvola di punti densificata
 - Numero di punti: 867.605.030
 - Densità media: 106,09 per m³
 - Numero di minimo di *matches*: 3
 - *Time for Point Cloud Densification*: 23 ore e 5 minuti
- *DSM and Orthomosaic Details* – dettagli modello digitale di superficie e ortofoto
 - Risoluzione di DSM e ortofoto: 1 x GSD (3,16 cm/pixel)
 - Risoluzione DTM: 5 x GSD (3,16 cm/pixel)
 - *Time for DSM generation*: 6 ore e 13 minuti
 - *Time for Orthomosaic generation*: 12 ore e 40 minuti
 - *Time for DTM generation*: 5 ore e 3 minuti

3.5.2 Report Agisoft Metashape

Agisoft Metashape

Processing Report

13 May 2019



Figura 3.5.9: Presentazione Processing Report Agisoft Metashape – anteprima ortofoto prodotta.

- *General* – parametri generali
 - Numero di camere: 5.646
 - Numero di camere allineate: 5.646
 - Numero di *markers*: 27
 - Sistema di coordinate: WGS 84 / UTM zone 32N (EPSG::32632)

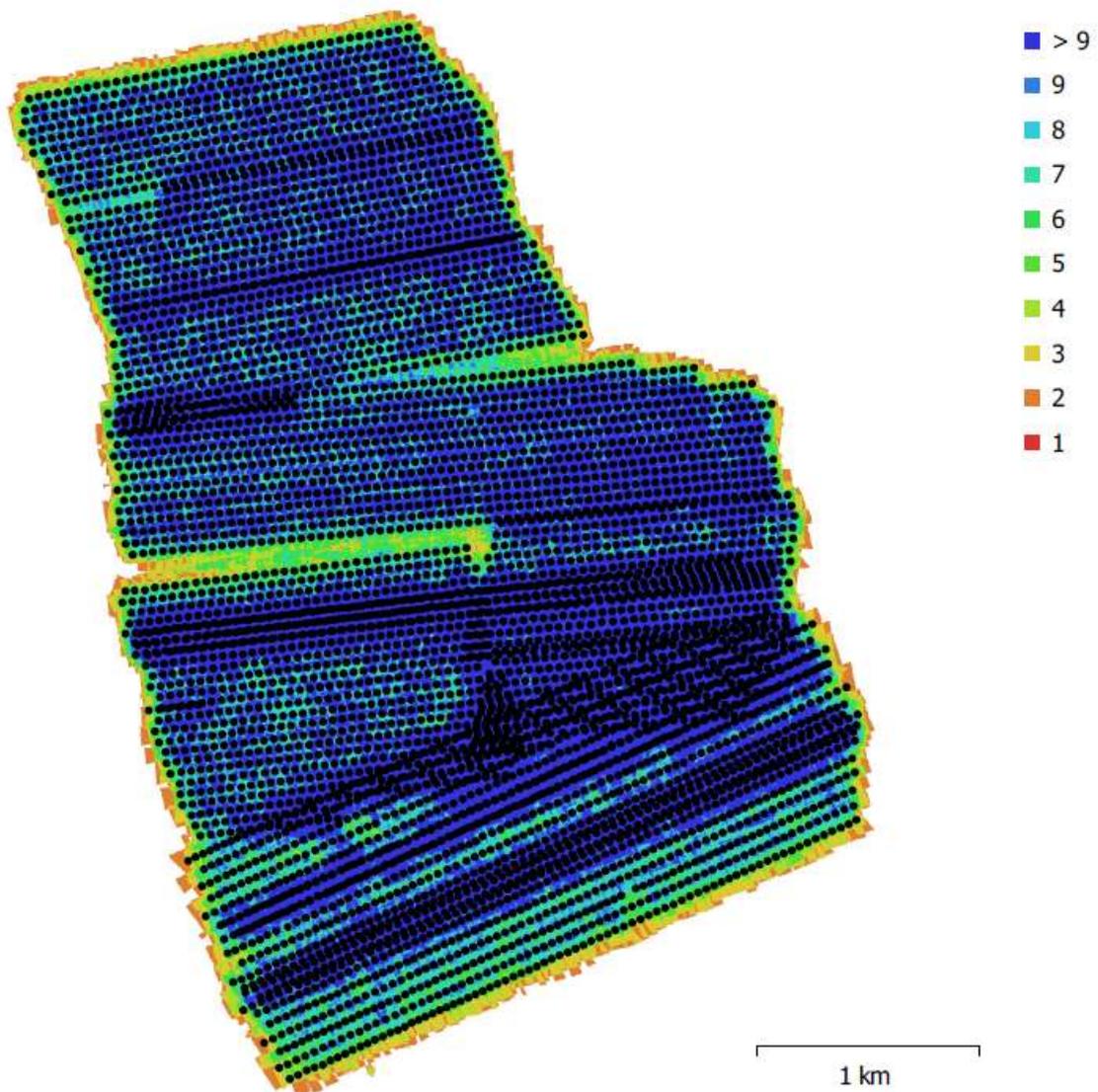


Figura 3.5.10: Posizione delle camere e sovrapposizione delle immagini – Processing Report Agisoft Metashape.

Nella Figura 3.5.10 si può osservare una sovrapposizione media molto elevata (>9), ad eccezione delle zone di confine esterne in cui la sovrapposizione si riduce drasticamente, ed alcune zone interne corrispondenti a missioni di volo limitrofe, con un minimo di sovrapposizione pari a 5.

- *Survey data* – dati del rilievo
 - Numero di fotogrammi: 5.646
 - Altezza di volo: 148 m
 - *Ground resolution*-risoluzione terra: 3,16 cm/pix

- Coverage area – area ricoperta: 11,7 km²
- Camera
 - Modello: S.O.D.A.
 - Risoluzione: 5472 x 3648
 - Lunghezza focale: 10,6 mm
 - Dimensione del pixel: 2,4 x 2,4 μm

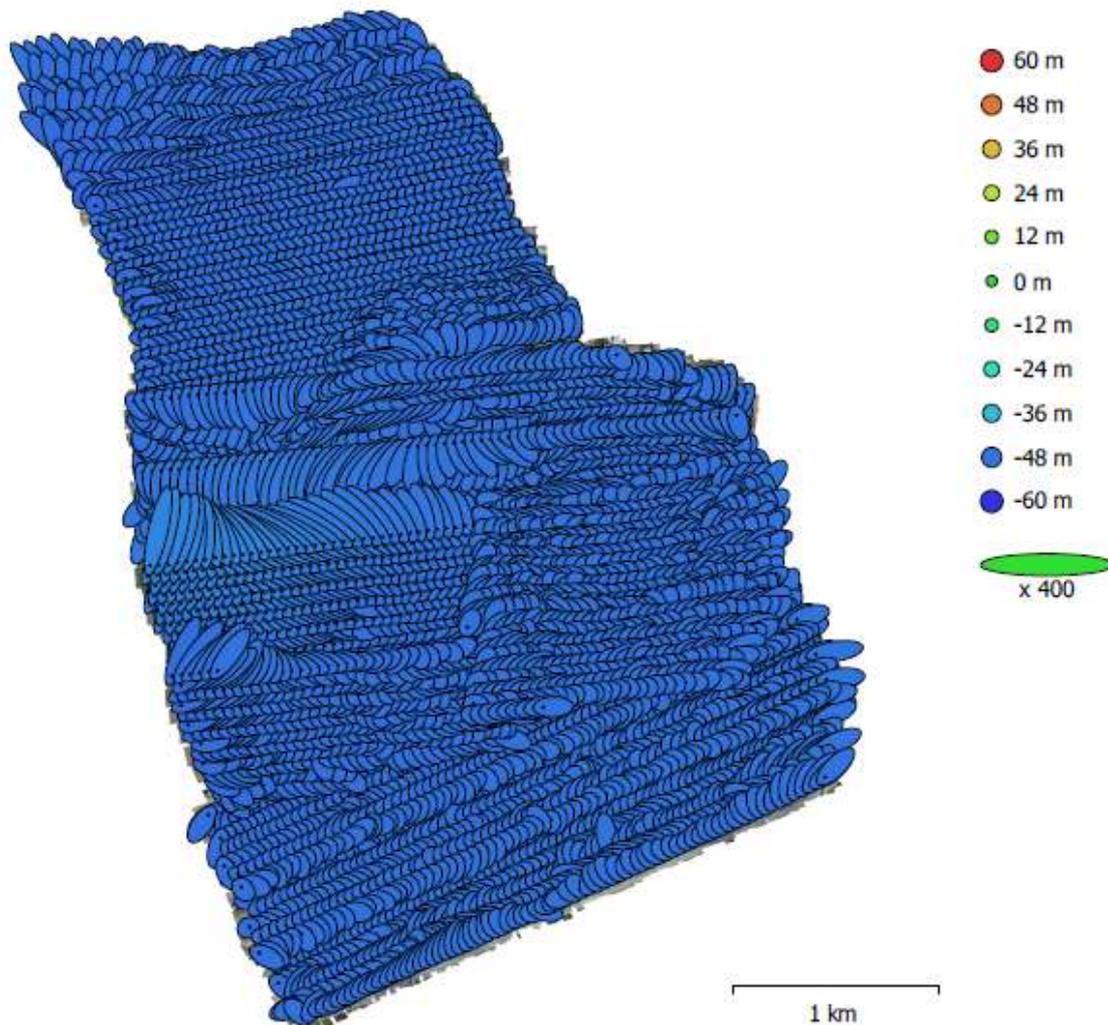


Figura 3.5.11: Posizione delle camere e stima dell'errore - Processing Report Agisoft Metashape.

Nella Figura 3.5.11 le posizioni stimate delle camere sono contrassegnate da un punto nero. L'errore della posizione delle camere relativamente alla coordinata Z è

rappresentato dal colore dell'ellisse, mentre gli errori in X e Y sono rappresentati dalla forma dell'ellisse.

Gli errori stimati per le direzioni X-Est e Y-Nord sono dell'ordine delle decine di centimetri, 0,168 m il primo e 0,221 m il secondo, mentre per l'altitudine Z l'errore è dell'ordine delle decine di metri (48,707 m).

La medesima stima, con le medesime convenzioni di colore e forma rispettivamente per gli errori nelle direzioni Z, X e Y, viene effettuata per la posizione dei GCP, ed è rappresentata nella Figura 3.5.12 di seguito riportata.

Le posizioni stimate dei *Control Points* sono contrassegnate da un punto, mentre per identificare i *Check points* è stata utilizzato un incrocio a "T".

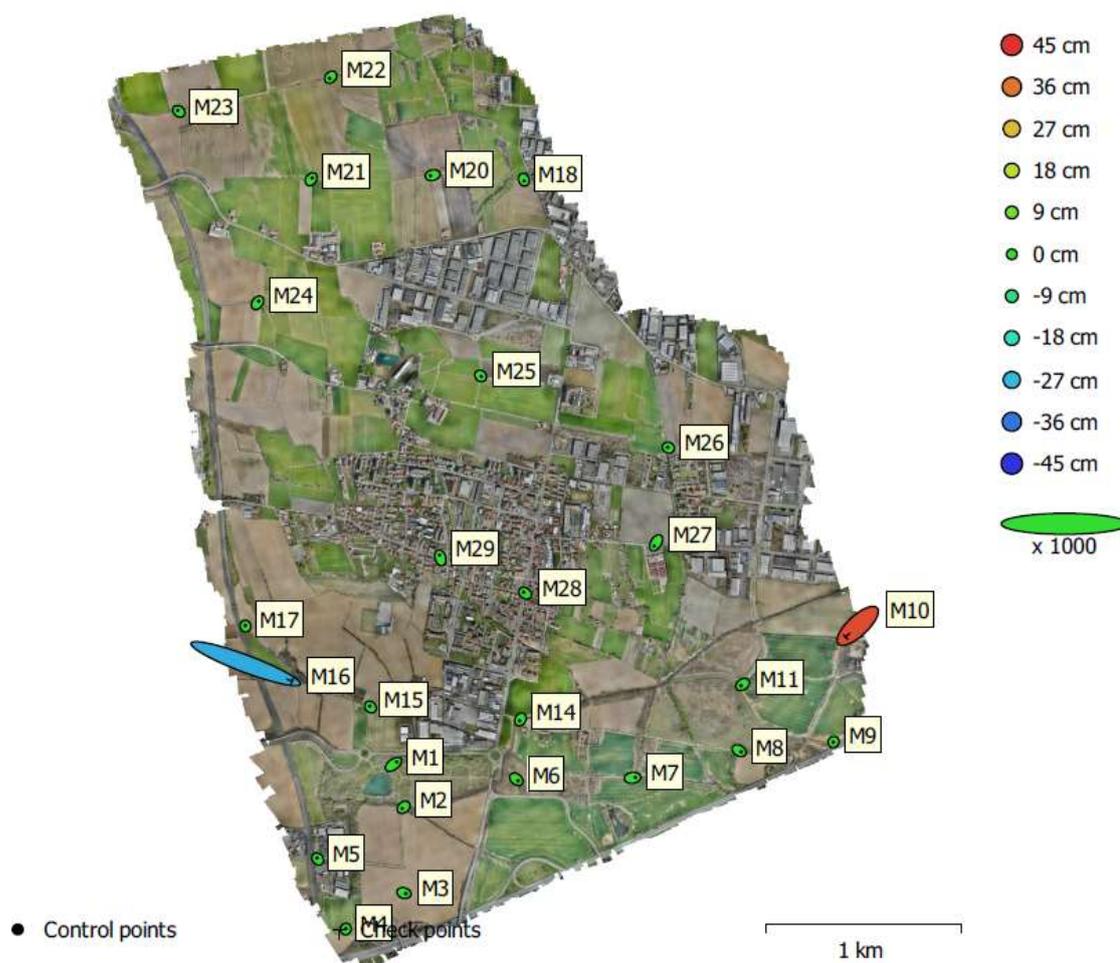


Figura 3.5.12: Posizione GCP e stima dell'errore - Processing Report Agisoft Metashape.

Sono stati utilizzati 24 punti in qualità di GCP, e 2 *Check points* (*markers* M10 e M16), con errori relativi alle coordinate X-Est, Y-Nord e Z-Altitudine dell'ordine del centimetro per i primi (Tabella 3.5.3), e dell'ordine della decina di centimetri per i secondi (Tabella 3.5.4).

Tale differenza è probabilmente dovuta ad errori intrinseci alla fase di appoggio durante il processo di acquisizione.

Tabella 3.5.3: Errori coordinate X, Y, Z Ground Control Point.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
M20	-2.31191	-0.554889	0.255407	2.39124	0.302 (10)
M21	1.0193	1.41533	0.545715	1.82755	0.371 (7)
M22	-1.09849	-1.148	0.136799	1.59477	0.552 (10)
M23	-1.02216	0.853013	0.357177	1.37841	0.113 (7)
M24	1.27936	1.66924	0.728767	2.2258	0.130 (9)
M25	0.661297	-0.547515	1.06914	1.37119	0.172 (9)
M26	-0.715669	0.408106	0.740877	1.10798	0.231 (14)
M27	-1.98052	-3.23639	0.272306	3.80405	0.156 (9)
M28	-1.37773	0.997154	0.216979	1.7145	0.125 (9)
M29	-0.78659	2.80969	0.768749	3.01729	0.298 (15)
M14	-0.850791	-1.43655	0.233737	1.68587	0.246 (10)
M15	-0.742794	0.888292	0.165401	1.16968	0.224 (9)
M17	-0.155695	0.617938	0.512978	0.818067	0.133 (9)
M5	-0.788534	1.03212	-0.443098	1.37237	0.033 (4)
M4	0.17735	0.536164	-0.112619	0.575854	0.421 (5)
M3	1.86459	-0.580311	0.313971	1.97789	0.187 (6)
M2	-1.45193	-1.25046	0.272728	1.93549	0.169 (8)
M1	3.40005	2.55718	0.074397	4.255	0.292 (10)
M6	1.734	-1.45417	0.403076	2.29866	0.131 (11)
M7	2.87016	0.372114	1.63497	3.32406	0.338 (3)
M8	2.09006	-1.24106	-0.0153342	2.43081	0.285 (8)
M9	-0.225698	-0.329634	0.826725	0.91819	0.164 (3)
M11	-1.71182	-1.29508	0.873717	2.31753	0.512 (12)
M18	0.399408	-1.20534	0.256072	1.29536	0.225 (9)
Total	1.52087	1.39987	0.596011	2.15125	0.280

Tabella 3.5.4: Errori coordinate X, Y, Z Check Points.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
M16	47.5165	-17.9933	-29.1303	58.5675	0.233 (7)
M10	-12.2353	-11.4976	41.5826	44.8443	0.202 (9)
Total	34.6953	15.0989	35.9005	52.1592	0.216

Si riportano di seguito i parametri rilevanti della sezione relativa ai *Processing Parameters* – parametri di processo del *Processing Report* in esame.

- *Point Cloud* – nuvola di punti
 - Numero di punti: 11.716.899 – 12.424.864
 - *Alignment parameters* – parametri di allineamento
 - Accuratezza: media
 - *Matching time*: 1 ora e 6 minuti
 - *Alignment time*: 1 ora e 17 minuti
 - *Optimization parameters* – parametri di ottimizzazione
 - *Optimization time*: 2 minuti e 35 secondi
- *Depth Maps* – mappa di profondità
 - *Reconstruction parameters* – parametri di ricostruzione
 - Qualità: media
 - *Processing time*: 7 ore e 40 minuti
- *Dense Point Cloud* – nuvola di punti densa
 - Numero di punti: 851.032.139
 - *Reconstruction parameters* – parametri di ricostruzione
 - Qualità: media
 - *Dense cloud generation time*: 7 ore e 40 minuti
 - *Dense cloud generation time*: 4 ore e 57 minuti
- *Orthomosaic* – ortofoto
 - Dimensione: 125,245 x 156,018
 - Sistema di coordinate: WGS 84 / UTM zone 32N (EPSG::32632)
 - *Reconstruction parameters* – parametri di ricostruzione
 - Superficie: *DEM*

- *Processing time*: 18 ore e 26 minuti
- *DEM* – Modello Digitale di Elevazione
 - Dimensione: 50,205 x 58,925
 - Risoluzione: 12,6 cm/pix
 - Densità: 62.7 punti/m²
 - Sistema di coordinate: WGS 84 / UTM zone 32N (EPSG::32632)
 - *Reconstruction parameters* – parametri di ricostruzione
 - Dati sorgente: *Dense Cloud*
 - *Processing time*: 33 minuti e 5 secondi

Come si può notare nei *report* illustrati precedentemente, la qualità dei risultati ottenuti mediante i due *software* utilizzati risulta paragonabile, ad esempio in termini di accuratezze, riportate a confronto nella tabella seguente, dell'ordine del centimetro in entrambi i casi.

Tabella 3.5.5: Accuratezze software a confronto.

Errore medio / <i>Software</i>	<i>Pix4Dmapper</i>	<i>Agisoft Metashape</i>
Coordinata X – Est	1,92 cm	1,52 cm
Coordinata Y – Nord	0,77 cm	1,40 cm
Coordinata Z – Altitudine	1,93 cm	0,60 cm

Per quanto riguarda i tempi di elaborazione dei dati invece, si riporta di seguito una tabella riassuntiva (Tabella 3.5.6) delle tempistiche a confronto per *Pix4Dmapper* a sinistra, e *Agisoft Metashape* a destra.

Metashape risulta essere molto più rapido in quasi ogni categoria di elaborazione, ad eccezione della produzione dell'ortofoto.

Tabella 3.5.6: Tempi di elaborazione softwares a confronto.

Elaborazione / Software	<i>Pix4Dmapper</i>	<i>Agisoft Metashape</i>
Densificazione nuvola di punti	23 ore e 5 minuti	4 ore e 57 minuti
Generazione DSM/DEM	6 ore e 13 minuti	33 minuti
Generazione Ortofoto	12 ore e 40 minuti	18 ore e 26 minuti

Capitolo 4 - Ottenere il dato cartografico 3D

A partire dai risultati del processo di elaborazione dei dati fotogrammetrici descritti nel precedente capitolo, nel contesto generale di generazione del dato 3D è necessario concentrare l'attenzione sull'obiettivo del progetto sviluppato, che prevede di ottenere un database geotopografico basato sugli standard della Specifica Semplificata proposta per la Base Dati Territoriale di Riferimento degli Enti nell'ambito di Regione Piemonte.

Il Catalogo dei Dati, e le Specifiche di Contenuto in esso descritte, è l'equivalente dell' "OGC CityGML Encoding Standard", e le entità espresse ed individuate nella struttura indicata trovano una vera e propria traduzione nel modello *CityGML*.

Nel presente capitolo si partirà da una panoramica del modello *CityGML* come base di riferimento, descrivendo i Livelli di Dettaglio proposti. L'obiettivo di tale trattazione riguarda la necessità di comprendere la struttura del modello di dati a più alto livello di interoperabilità, individuato dal *CityGML Model*, per essere in grado di riconoscere gli aspetti peculiari e comuni con la "traduzione" finale all'interno della struttura di interesse del modello BDTRE, sul quale si concentrerà la procedura sperimentata.

4.1 Il modello CityGML

CityGML è un modello di dati aperto, che costituisce uno schema applicativo per il *Geography Markup Language* versione 3.1.1 (GML3), lo standard internazionale estensibile per lo scambio di dati spaziali rilasciato dall'OGC e dall'ISO TC211.

Lo scopo dello sviluppo di *CityGML* è quello di raggiungere una definizione comune delle entità di base, degli attributi e delle relazioni di un modello di città 3D, consentendo il riutilizzo degli stessi dati in diversi campi di applicazione.

Include un modello di geometria e un modello tematico: Il modello geometrico consente la definizione coerente e omogenea di geometrie e proprietà topologiche degli oggetti spaziali all'interno dei modelli di città 3D; mentre il modello tematico impiega il modello geometrico per diversi campi tematici come i modelli digitali del terreno (DTM), i siti (ovvero edifici, ponti e gallerie), la vegetazione (oggetti solitari e anche biotipi areali e volumetrici), l'uso del suolo, i corpi idrici, i mezzi di trasporto e l'arredo urbano.

Le proprietà spaziali delle funzioni di *CityGML* sono rappresentate da oggetti del modello geometrico di GML3. Questo modello è basato sullo standard ISO 19107 "Spatial Schema" (Herring 2001), che rappresenta la geometria 3D secondo la ben nota rappresentanza dei confini (B-Rep, cfr. Foley et al. 1995). *CityGML* attualmente utilizza solo un sottoinsieme del pacchetto di geometria GML3, che definisce un profilo di GML3. Questo sottoinsieme è rappresentato nelle figure seguenti.

Il modello di geometria di GML3 è costituito da primitive (*Primitives*), che possono essere combinate per formare geometrie o aggregati, complessi e composti (*Aggregates, Complexes, Composites*), come rappresentate nella Figura 4.1.1 e Figura 4.1.2.

Per ogni dimensione esiste una primitiva geometrica: un oggetto a dimensione zero è un punto (*Point*), un elemento monodimensionale è una curva (*Curve*), un elemento bidimensionale è una superficie (*Surface*) ed un elemento tridimensionale è un solido (*Solid*). Un solido è delimitato da superfici e una superficie da curve. In *CityGML*, una curva è limitata a una linea retta, pertanto viene utilizzata solo la classe *LineString* di GML3. Le superfici invece sono rappresentate da poligoni, che definiscono una geometria planare, cioè il confine e tutti i punti interni devono essere posizionati su un unico piano.

Le geometrie combinate possono essere aggregati, complessi o composti di primitivi. Un aggregato può essere differentemente un *MultiPoint*, *MultiCurve*, *MultiSurface* e *MultiSolid* a seconda della dimensione. Così come un composto può essere *CompositeSolid*, *CompositeSurface* o *CompositeCurve*.

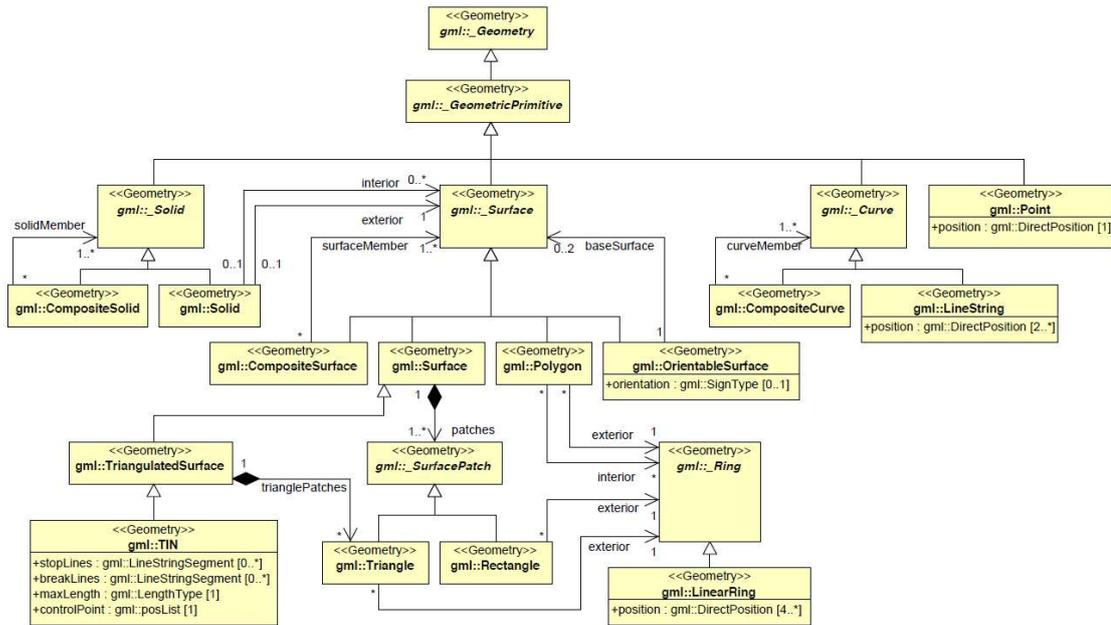


Figura 4.1.1: Diagramma UML del modello geometrico: Primitive e Compositi – CityGML Encoding Standard.

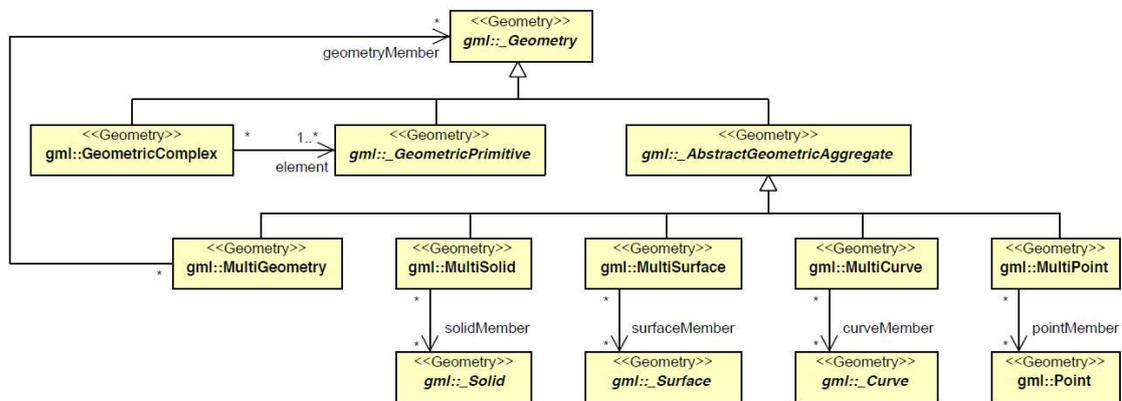


Figura 4.1.2: Diagramma UML del modello geometrico: Complessi e Aggregati – CityGML Encoding Standard.

Un aspetto caratteristico del modello di dati *CityGML* è la cosiddetta *modularisation*, o modularizzazione: il modello è costituito da definizioni di classe per i più importanti tipi di oggetti all'interno dei modelli di città 3D virtuali.

Il modello di dati *CityGML* è scomposto tematicamente in un modulo principale e in moduli di estensione tematici. La classe base di tutti gli oggetti è *_CityObject* che è

una sottoclasse della classe *GML_Feature* e tutti gli oggetti eritano le proprietà da *_CityObject*. Basata sul modulo principale, ogni estensione copre un campo tematico specifico dei modelli di città 3D virtuali. *CityGML* introduce i seguenti tredici moduli di estensione tematica: *Appearance*, *Bridge*, *Building*, *CityFurniture*, *CityObjectGroup*, *Generics*, *LandUse*, *Relief*, *Transportation*, *Tunnel*, *Vegetation*, *WaterBody* e *TexturedSurface*.

La gerarchia delle classi di livello superiore viene riportata nello schema generale seguente. Le sottoclassi di *_CityObject* comprendono i diversi campi tematici di un modello di città separati da moduli. Per indicare l'estensione nel modulo che definisce una rispettiva sottoclasse i nomi delle classi sono preceduti da prefissi, e ogni prefisso è associato a un modulo di estensione *CityGML*.

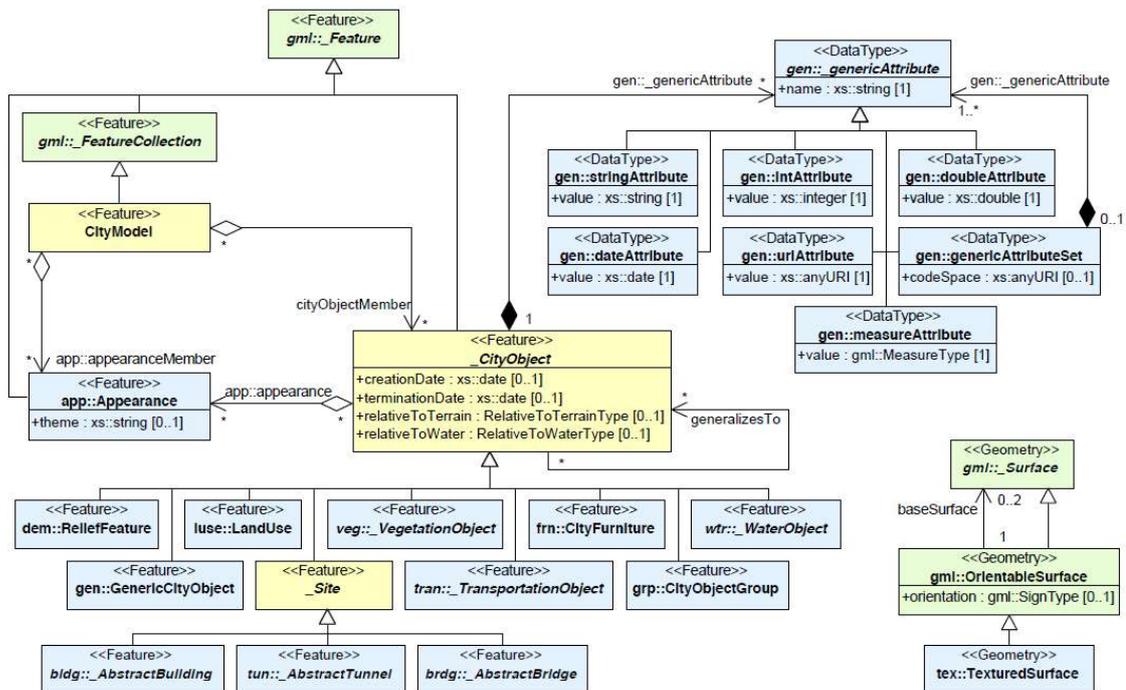


Figura 4.1.3: Gerarchia delle classi – CityGML Encoding Standard.

4.1.1 Livelli di dettaglio

Un ulteriore aspetto fondamentale del contesto *CityGML* è la modellazione multiscala: si tratta di cinque livelli di dettaglio (*LOD-Levels Of Details*), in cui un

oggetto può essere rappresentato contemporaneamente, consentendo l'analisi e la visualizzazione dello stesso oggetto in relazione a diversi gradi di risoluzione (Figura 4.1.4).

I LOD sono caratterizzati da differenti requisiti di accuratezza, definita come deviazione standard (σ) delle coordinate assolute del punto 3D, imposti dalla norma "OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard".

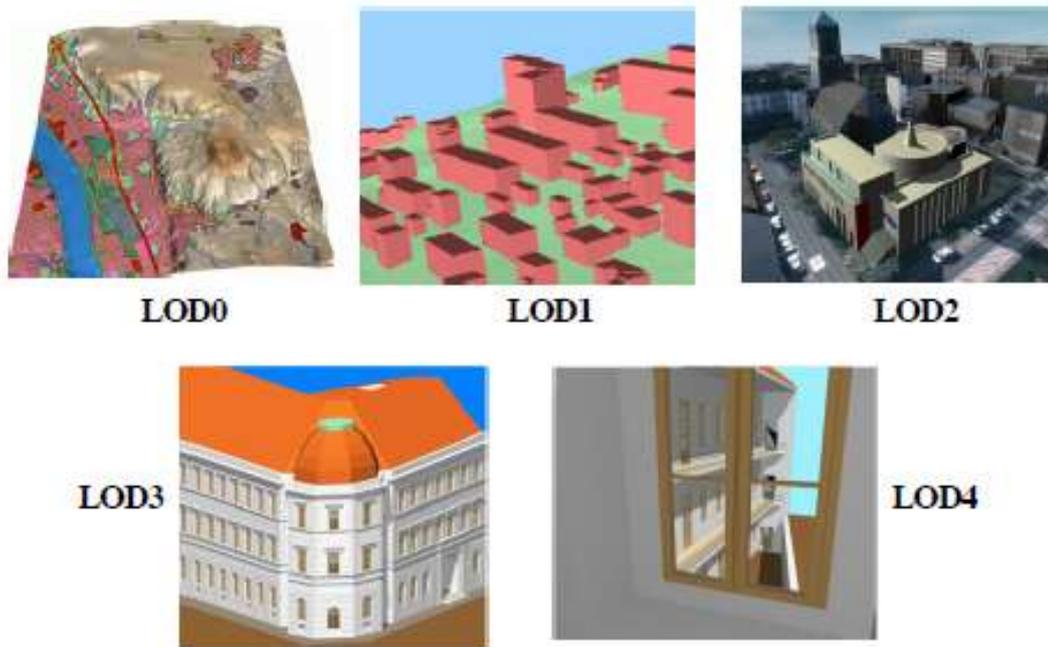


Figura 4.1.4: Cinque livelli di dettaglio definiti dal CityGML⁸.

Il livello più grossolano LOD0 è essenzialmente un modello digitale del terreno 2,5D su cui può essere rappresentata un'immagine aerea o una mappa. In questo primo livello gli edifici vengono individuati da impronte o poligoni, che riproducono ad esempio il contorno delle coperture.

LOD1 è il più noto 'modello a blocchi' comprendente edifici prismatici con strutture a tetto piano, e rappresenta il livello di dettaglio considerato nella presente trattazione. In questo caso la minima precisione, in termini di posizione e altezza dei

⁸ OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard - Open Geospatial Consortium OGC 12-019, <http://www.opengis.net/spec/citygml/2.0>

punti, è imposta pari a 5 m, e viene richiesto di considerare tutti gli oggetti con un'impronta minima di 6x6 m.

Un edificio in LOD2 inizia ad avere strutture del tetto diversificate e superfici di confine tematicamente differenziate. L'accuratezza minima di posizione e altezza dei punti viene proposta pari a 2 m e a questo livello di dettaglio devono essere considerati tutti gli oggetti con un ingombro di almeno 4x4 m.

Il LOD3 indica modelli architettonici con strutture dettagliate di pareti e tetti che includono potenzialmente porte e finestre. Le precisioni a questo livello dovrebbero essere dell'ordine di 0,5 m, e vengono rappresentati tutti gli elementi con impronta minima pari a 2x2 m.

Infine il LOD4 completa il livello inferiore aggiungendo strutture interne per gli edifici, che risultano in questo caso composti da stanze, porte interne, scale ed elementi d'arredo. La precisione di posizione e altezza raggiunge in questo caso il requisito minimo di 0,2 m.

Nella Figura 4.1.5 vengono presentati i suddetti requisiti per i differenti livelli di dettaglio, così come presentati nel documento normativo di riferimento.

	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, generalised 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

Figura 4.1.5: Livelli di dettaglio CityGML con relativi requisiti di accuratezza.

Per mezzo di queste cifre, la classificazione nei cinque LOD può essere utilizzata per valutare la qualità dei set di dati del modello di città 3D, rendendoli comparabili e fornendo un supporto per la loro integrazione.

4.1.2 Classificazione degli elementi presenti sul territorio

Gli elementi che costituiscono la realtà rappresenteranno a tutti gli effetti un modello di città 3D virtuale, in linea con gli standard *CityGML*, nel momento in cui verranno classificati e “tradotti” attraverso la semantica e la geometria opportuna.

All'interno della seguente (Tabella 4.1.1) vengono riportate schematicamente alcune delle possibili entità di interesse, associate al formato dei relativi file e le tipologie geometriche corrispondenti.

Tabella 4.1.1: Entità, file e geometrie corrispondenti secondo CityGML.

Entità	Formato file	Tipologia geometrica
Edifici	<i>Shape</i>	<i>2D Polygon/Point</i>
	<i>CityGML</i>	<i>3D Solid</i>
Parchi	<i>Shape</i>	<i>2D Polygon</i>
	<i>CityGML</i>	<i>3D Polygon</i>
Strade	<i>File Geodatabase</i>	<i>2D Line</i>
	<i>CityGML</i>	<i>3D Line+Polygon</i>
Intersezioni stradali	<i>File Geodatabase</i>	<i>2D Point</i>
	<i>CityGML</i>	<i>3D Point</i>
Alberi	<i>Shape</i>	<i>2D Point</i>
	<i>CityGML</i>	<i>3D Tree shape solid</i>

Si riportano di seguito i diagrammi UML dei modelli *CityGML* di edifici, viabilità e vegetazione (*Building model* - Figura 4.1.6, *Transportation objects* - Figura 4.1.7 e *Vegetation objects* - Figura 4.1.8), a cui saranno dedicati paragrafi seguenti, in cui

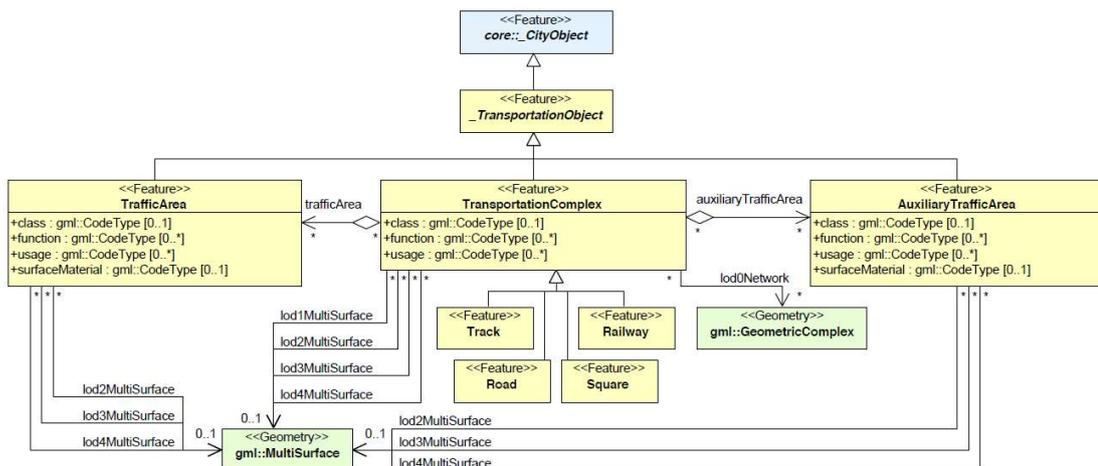


Figura 4.1.7: Diagramma UML Transportation model – CityGML Encoding Standard.

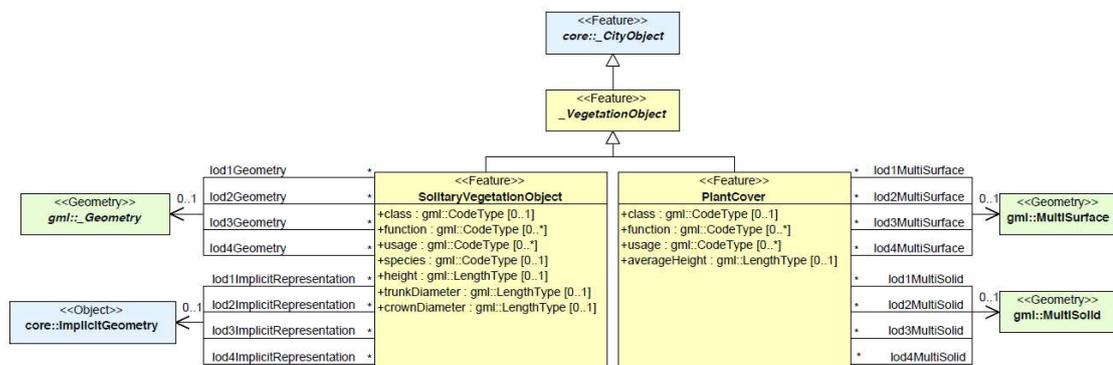


Figura 4.1.8: Diagramma UML Vegetation model – CityGML Encoding Standard.

4.1.3 Building Model

Il modello di edificio è uno dei concetti tematici più dettagliati di *CityGML*, ed è definito dal modulo di estensione tematica *Building*, e la classe *AbstractBuilding*. Permette la rappresentazione di aspetti tematici e spaziali di edifici e parti di edifici nei cinque livelli di dettaglio, da LOD0 a LOD4. Analizzando separatamente i diversi livelli di dettaglio (Figura 4.1.9), il modello di edificio si differenzia per la complessità della rappresentazione geometrica e della strutturazione tematica del modello in componenti con uno speciale significato semantico.

Nella Tabella 4.1.2 vengono riportate in forma schematica le strutture semantiche associate a ciascun livello di dettaglio utilizzato per rappresentare un edificio.

Tabella 4.1.2: Semantica della classe CityGML *AbstractBuilding*.

Geometric / semantic theme	Property type	LOD0	LOD1	LOD2	LOD3	LOD4
Building footprint and roof edge	<i>gml:MultiSurfaceType</i>	•				
Volume part of the building shell	<i>gml:SolidType</i>		•	•	•	•
Surface part of the building shell	<i>gml:MultiSurfaceType</i>		•	•	•	•
Terrain intersection curve	<i>gml:MultiCurveType</i>		•	•	•	•
Curve part of the building shell	<i>gml:MultiCurveType</i>			•	•	•
Building parts	<i>BuildingPartType</i>		•	•	•	•
Boundary surfaces (chapter 10.3.3)	<i>AbstractBoundarySurfaceType</i>			•	•	•
Outer building installations (chapter 10.3.2)	<i>BuildingInstallationType</i>			•	•	•
Openings (chapter 10.3.4)	<i>AbstractOpeningType</i>				•	•
Rooms (chapter 10.3.5)	<i>RoomType</i>					•
Interior building installations (chapter 10.3.5)	<i>IntBuildingInstallationType</i>					•

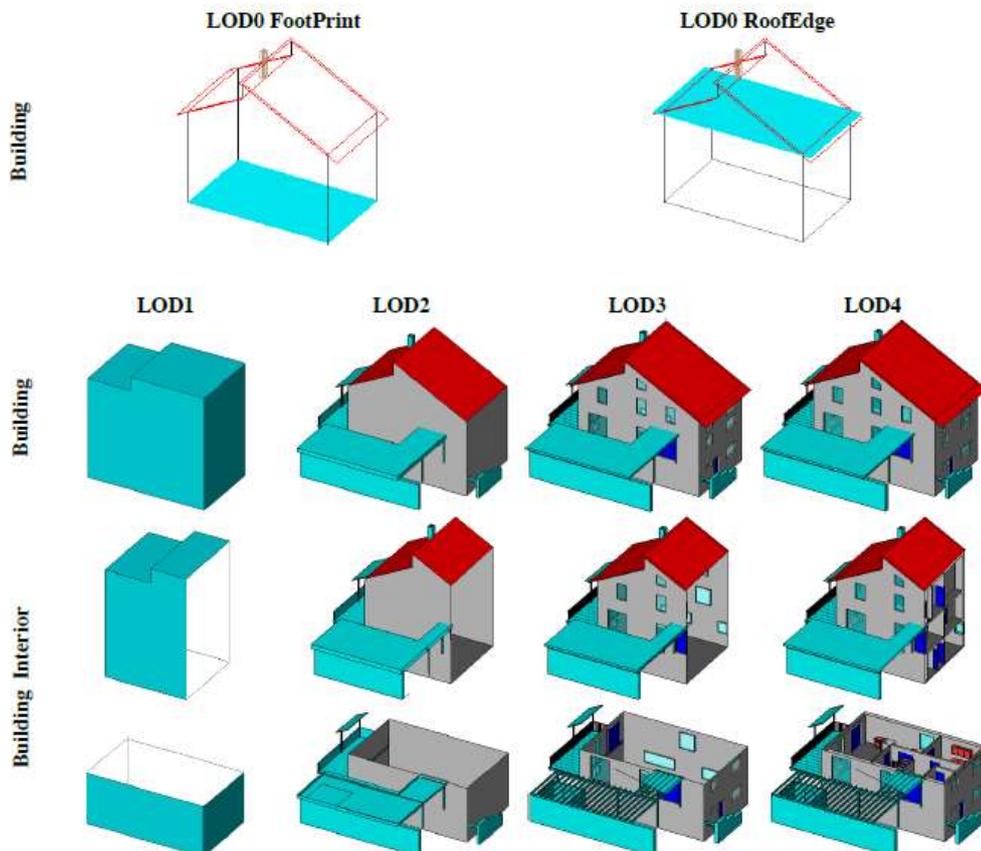


Figura 4.1.9: Building model in LOD0-4.

4.1.4 Transportation objects

Il modello di viabilità di *CityGML* è un modello multi-funzionale e multi-scala incentrato su aspetti tematici e funzionali nonché geometrici/topologici, ed è fornito dal modulo di estensione tematica *Transportation*.

Un elemento della classe principale *TransportationComplex* è composto dalle parti *TrafficArea* (corsie stradali, marciapiedi, parcheggi) e *AuxiliareTrafficArea* (aiuole), come nell'esempio illustrato nella Figura 4.1.10. Tali sottoclassi possono avere attributi quali *Class-classe*, *Function-funzione*, *Usage-utilizzo* e *surfaceMaterial-manto superficiale*.

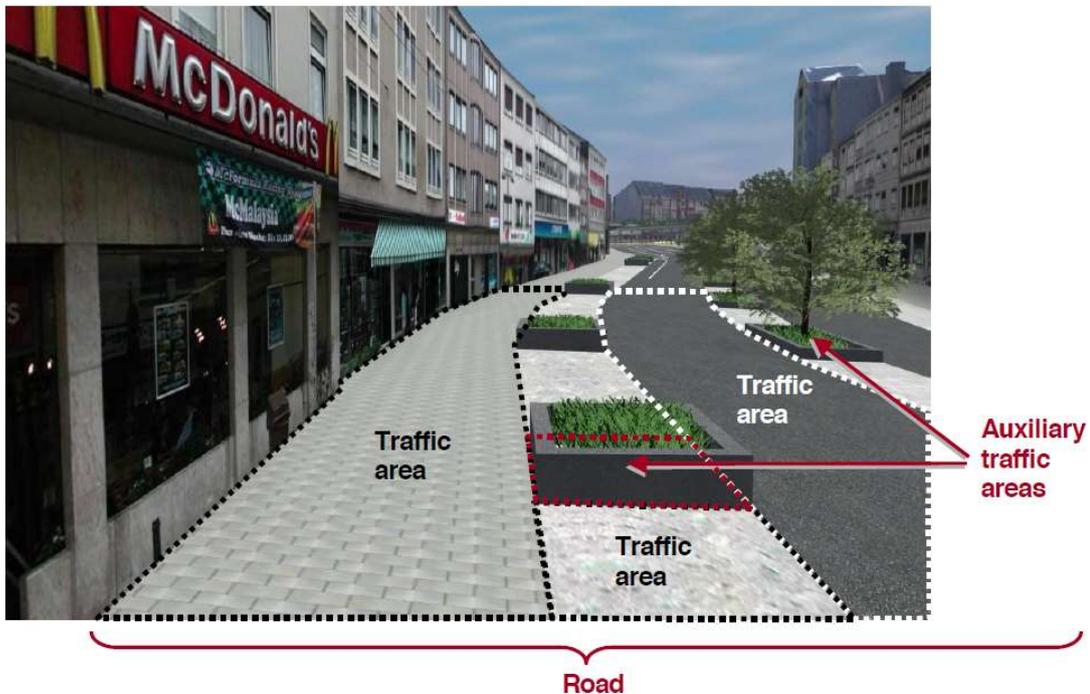


Figura 4.1.10: *TransportationComplex* in un modello di città 3D *CityGML-LOD2*.

In generale le infrastrutture di trasporto sono rappresentate come una rete lineare nel LOD0, mentre a partire da LOD1 sono descritte geometricamente da superfici 3D. Nella Figura 4.1.11 si può notare l'evoluzione del livello di dettaglio in termini di complessità geometrica e contenuti.

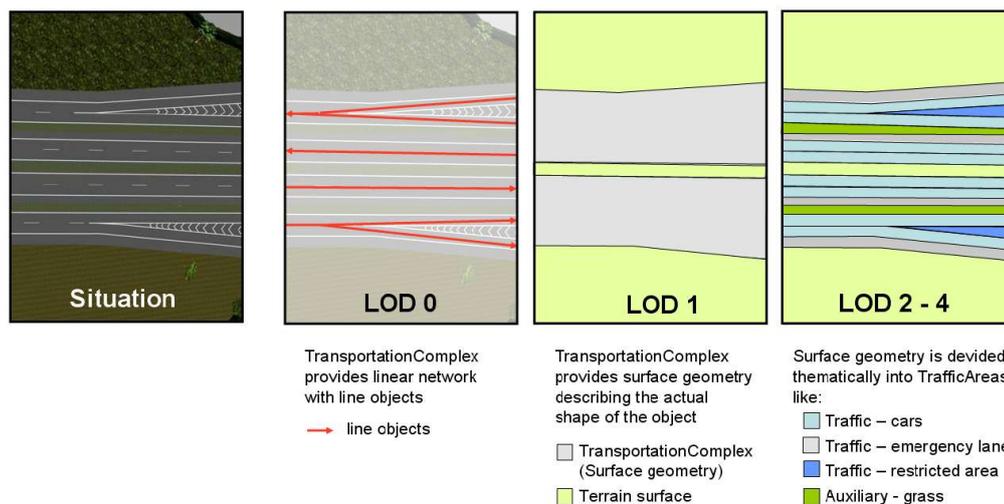


Figura 4.1.11: Evoluzione TransportationComplex da LOD0 a LOD4.

4.1.5 Vegetation objects

Il modello di vegetazione di *CityGML* è definito dal modulo di estensione tematica *Vegetation*. In esso vengono distinti (Figura 4.1.12) gli elementi di vegetazione singoli, come gli alberi (*SolitaryVegetationObject*), e le aree di copertura (*PlantCover*). La rappresentazione geometrica di una funzione *PlantCover* può essere una *MultiSurface* o una *MultiSolid*, a seconda dell'estensione verticale della vegetazione.

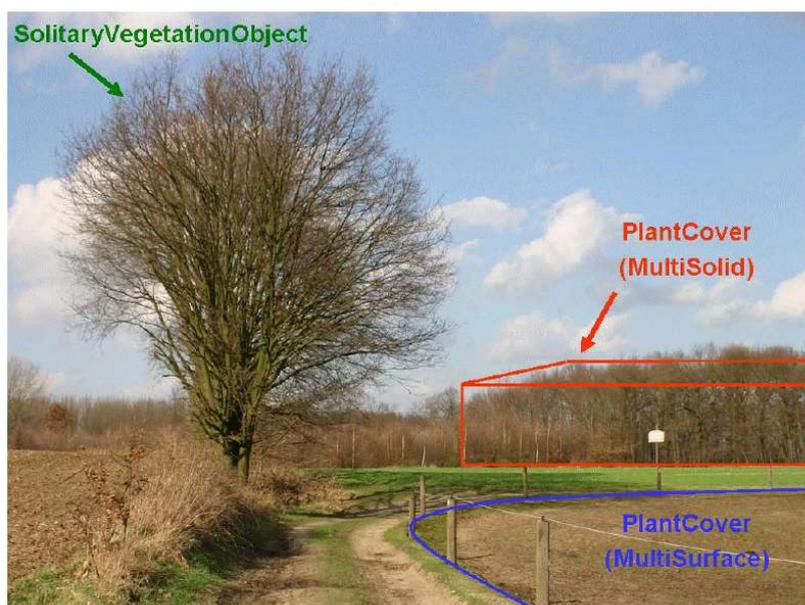


Figura 4.1.12: Esempio di elementi VegetationObjects.

Un elemento del tipo *SolitaryVegetationObject* può avere gli attributi classe, funzione, utilizzo, altezza specie, diametro del tronco e diametro della chioma. Dall'analisi e dalla visualizzazione di elementi di vegetazione, possono essere effettuate delle valutazioni relative alla loro distribuzione, struttura e diversificazione. Il modello di vegetazione può essere utilizzato come base per simulazioni, ad esempio di incendi boschivi, aerazione urbana o microclima, o per esaminare i danni alla foresta, per rilevare ostacoli (ad esempio riguardanti traffico aereo) o per svolgere attività di analisi nel campo della protezione ambientale.

4.2 Da CityGML a BDTRE

Come anticipato nell' introduzione del Capitolo in oggetto, il Catalogo dei Dati (Specifiche Operative Semplificate per i DB Geotopografici ad uso delle pubbliche amministrazioni – Regione Piemonte, Versione 2.2.1, 5 aprile 2017) può essere visto come una vera e propria traduzione della struttura illustrata nel modello *CityGML*, in quanto la struttura di riferimento è anche in questo caso costituita dalla Classe, che definisce la rappresentazione di una specifica tipologia di oggetti territoriali: le proprietà, la struttura del dato, le regole di acquisizione e di strutturazione e di relazione con gli altri oggetti.

L'insieme dei costrutti previsti in tale modello vengono suddivisi in elementi informativi e vincoli di integrità:

- gli elementi informativi costituiscono tutti i componenti utilizzabili per definire la struttura dei contenuti informativi della specifica: Classe, attributo (non geometrico), cardinalità, dominio enumerato, dominio gerarchico, associazione, ereditarietà, componente spaziale, attributo della componente spaziale, chiave primaria, strato topologico.
- i vincoli di integrità si applicano agli elementi informativi e definiscono le proprietà che i dati dovranno soddisfare, e possono essere di vincoli topologici e i vincoli di composizione.

Per definire la copertura topologica del suolo vengono individuati quattro livelli:

- livello urbano,
- livello viabilità,
- livello acque,
- livello vegetazione.

Un quinto livello per le classi non topologiche (livello notopo), e tre ulteriori livelli per i grafi e gli indirizzi: livello grafo viabilità, livello grafo idrografia, livello indirizzi.

Per tutti i livelli trattati all'interno del modello proposto è stato creato un attributo (TY) e la sua relativa decodifica (TY_DEC), concatenando i codici numerici definiti dalle specifiche *national core* secondo la regola dell'attributo concatenato:

'StratoTemaClasse_Attributo1-Enumerato1_Attributo2-Enumerato2_ecc'.

Nella Figura 4.2.1 è riportato un esempio di costruzione di concatenamento, proposto all'interno del documento CSI Piemonte (BDTRE – Specifiche per aggiornamento, vers. 07).

TY (ssttcc_a1-e1_a2-e2)	TY_DEC	ATTRIBUTO1	ATTRIBUTO2
100302_01-01_02-05	Cava-accumulo materiali	CV_AES_TY	CV_AES_ZON

Figura 4.2.1: Costruzione dell'attributo concatenato – BDTRE.

Per distinguere la tipologia degli attributi, all'interno delle Specifiche sono utilizzati dei codici identificativi, come mostrato nella tabella seguente.

Tabella 4.2.1: Tipologia degli attributi – Specifica Semplificata.

CODICE	NOME	DESCRIZIONE
Boolean	Valore booleano	Assume i valori: Vero, Falso
Data	Data	data espressa come gg/mm/aaaa
Enum	Enumerato	Lista di valori
Integer	Valore numerico intero	Numero intero
Real	Valore numerico	Numero con decimali
String	Stringa alfanumerica	Stringa formata da caratteri ASCII
Numeric string	Stringa numerica	Stringa formata da numeri

Con l'obiettivo di realizzare la suddetta traduzione delle classi e dei costrutti utilizzati dal modello *CityGML (Building, Transportation, Vegetation)*, i paragrafi seguenti sono dedicati alla definizione dettagliata dei livelli e delle classi di interesse, così come strutturate dalla Specifica di Contenuto Semplificata: livello urbano (edifici), livello viabilità e livello vegetazione.

4.2.1 Livello Urbano – Edifici

All'interno del Livello Urbano si individuano molteplici classi (Tabella 4.2.2), nel caso studio esaminato in questa sede si tratterà con particolare interesse la Classe Edificio (EDIFC – 020102).

Tabella 4.2.2: Classi e attributi del Livello Urbano – Specifica Semplificata.

livello	classi	Attributo1	Attributo2	Attributo3	Attributo4	Attributo5
URBANO	AREE ATTREZZATE	AATT_TY				
	PARTICOLARI ARCHITETTONICI	PAR_AR_TY				
	EDIFICI MINORI	EDI_MIN_TY				
	AREE IN TRASFORMAZIONE	A_TRAS_TY				
	SCAVIE DISCARICHE	SC_DIS_TY				
	MANUFATTO INDUSTRIALE	MN_IND_TY				
	EDIFICIO	EDIFC_TY	EDIFC_USO	EDIFC_STAT	EDIFC_SOT	
	ATTREZZATURE SPORTIVE	ATTR_SP_TY				
	MURI DI SOSTEGNO	MU_SOS_TY				
	MURO DIVISORIO	MU_DIV_TY				
	DIGA	DIGA_CT				
	ARGINE	ARGN_TY				

L'estensione delle componenti spaziali della classe è *GU_CPSurface2D – Composite Surface 2D* e gli attributi relativi riguardano:

- la tipologia edilizia (02010201 EDIFC_TY): generica '01', palazzo a torre '02', edificio tipico '03', ecc;
- la categoria d'uso (02010202 EDIFC_USO): residenziale '01', amministrativo '02, servizio pubblico '03', militare '04', ecc;
- la collocazione rispetto alla superficie (02010203 EDIFC_SOT): non sotterraneo '01', o sotterraneo '02';

- lo stato (02010204 EDIFIC_STAT): in costruzione '01', diruto '02' o costruito '03'.

4.2.2 Livello Viabilità

All'interno del Livello Viabilità vengono individuate differenti classi corrispondenti alle diverse tipologie di aree di circolazione (Tabella 4.2.3): veicolare (AC_VEI), ciclabile (AC_CIC), pedonale (AC_PED), ecc.

Tabella 4.2.3: Classi e attributi del Livello Viabilità – Specifica Semplificata.

livello	classi	Attributo1	Attributo2	Attributo3	Attributo4
VIABILITA'	VIABILITA MISTA SECONDARIA	AR_VMS_TY	AR_VMS_SED	AR_VMS_LIV	
	AREA DI CIRCOLAZIONE VEICOLARE	AC_VEI_ZON	AC_VEI_SED	AC_VEI_LIV	AC_VEI_FON
	AREA DI CIRCOLAZIONE CICLABILE	AC_CIC_SED	AC_CIC_LIV	AC_CIC_FON	
	AREA DI CIRCOLAZIONE PEDONALE	AC_PED_SED	AC_PED_LIV	AC_PED_FON	
	MANUFATTI DI TRASPORTO	MAN_TR_TY			
	SEDE FERROVIARIA	SD_FER_TY	SD_FER_SED	SD_FER_LIV	

L'estensione delle componenti spaziali delle classi è anche in questo caso *GU_CPSurface2D – Composite Surface 2D* e gli attributi relativi (esempio circolazione veicolare) riguardano:

- la zona di transitabilità (01010101 AC_VEI_ZON): tronco carreggiata '01', area a traffico strutturato '02', e non '03', ecc.
- il fondo, o tipologia di pavimentazione (01010102 AC_VEI_FON): pavimentato '01', o non pavimentato '02';
- la sede rispetto il terreno (01010103 AC_VEI_SED): a raso '01', su ponte/viadotto/cavalcavia '02' o in galleria '03';
- il livello (01010104 AC_VEI_LIV): in sottopasso '01', o non in sottopasso '02'.

4.2.3 Livello Vegetazione

All'interno del Livello Vegetazione vengono individuate le classi relative alle differenti tipologie di vegetazione presenti (Tabella 4.2.4): aree verdi (AR_VRD), aree prive di vegetazione (A_PVEG), forme naturali del terreno (F_NTER), ecc.

Tabella 4.2.4: Classi e attributi del Livello Vegetazione – Specifica Semplificata.

livello	classi	Attributo1	Attributo2	Attributo3
VEGETAZIONE	FORME NATURALI DEL TERRENO	F_NTER_TY		
	FORMAZIONI PARTICOLARI	FOR_PC_TY		
	COLTURE AGRICOLE	CL_AGR_TY		
	BOSCO	BOSCO_TY	BOSCO_GOV	BOSCO_ESSZ
	AREE PRIVE DI VEGETAZIONE	A_PVEG_CAU		
	AREE VERDI	AR_VRD_TY		
	PASCOLI E INCOLTI	PS_INC_TY		

L'estensione delle componenti spaziali delle classi è sempre *GU_CPSurface2D – Composite Surface 2D* e gli attributi, a partire dalla tipologia di area in esame, possono variare di classe in classe, rappresentando ad esempio la causa della mancanza di vegetazione per la aree prive di vegetazione (A_PVEG_CAU).

4.3 Creazione automatizzata del modello di città 3D

La procedura di ricostruzione del vero e proprio modello 3D della città, in termini di edifici, strade e vegetazione, varia in modo consistente in base al livello di dettaglio ricercato. Per un livello di dettaglio LOD1, come nel nostro caso sarà sufficiente una semplice estrusione (Figura 4.3.1), nel LOD2 ci si muove verso una ricostruzione a partire da forme parametriche (Figura 4.3.2), con una modellazione procedurale (Figura 4.3.3) nel LOD3, fino ai più complessi modelli architettonici per il LOD4.

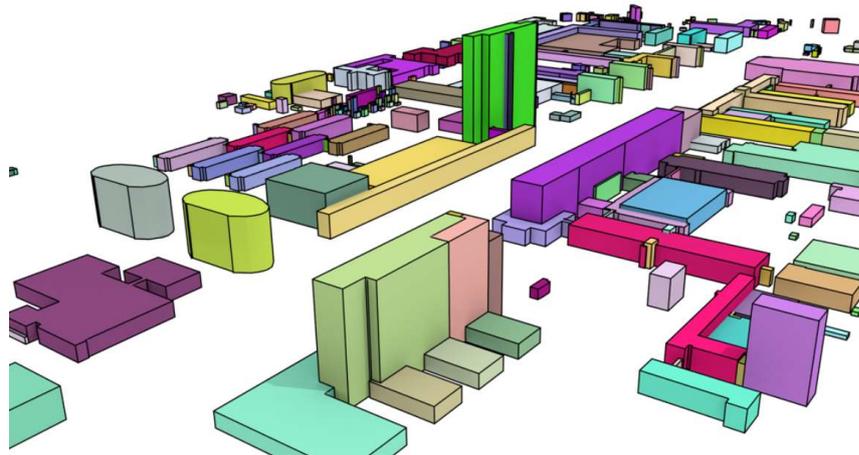


Figura 4.3.1: Estrusione delle impronte degli edifici – 3D City Modelling EuroSDR.

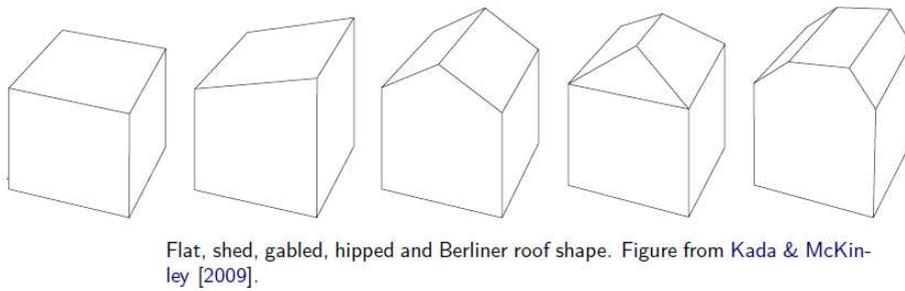


Figura 4.3.2: Ricostruzione da forme parametriche – 3D City Modelling EuroSDR.

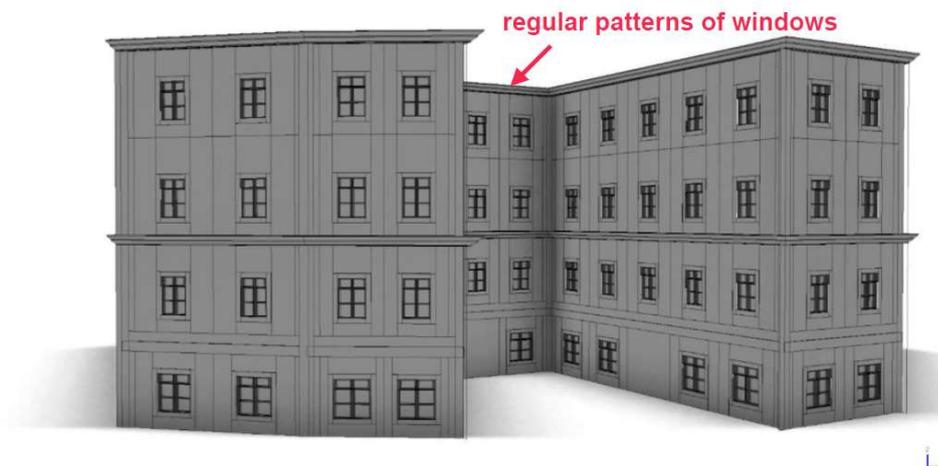


Figura 4.3.3: Procedural modelling - 3D City Modelling EuroSDR.

A partire da questa prima distinzione si entra nel vivo della procedura sperimentata per la ricostruzione della cartografica tridimensionale del Comune di Mappano, secondo il livello di dettaglio LOD1, e la struttura richiesta da BDTRE.

La procedura di modellazione illustrata nei paragrafi seguenti è stata applicata ad una zona selezionata in modo tale da comprendere tipologie di elementi diversificate, ed evidenziare eventuali peculiarità nello sviluppo della procedura stessa, che risulta applicabile successivamente con le medesime modalità al resto del territorio.

L'area selezionata comprende parte della zona industriale, della zona residenziale numerose aree verdi del territorio comunale, e viene di seguito visualizzata sottoforma di nuvola di punti e ortofoto, estratte dal *software PIX4DMapper*.



Figura 4.3.4: Porzione di territorio selezionata – nuvola di punti a sinistra, ortofoto a destra.

4.3.1 La procedura sperimentata

Si riporta di seguito una mappa concettuale delle operazioni successivamente descritte nel dettaglio, utile ad avere un'idea generale del flusso di lavoro sviluppato.

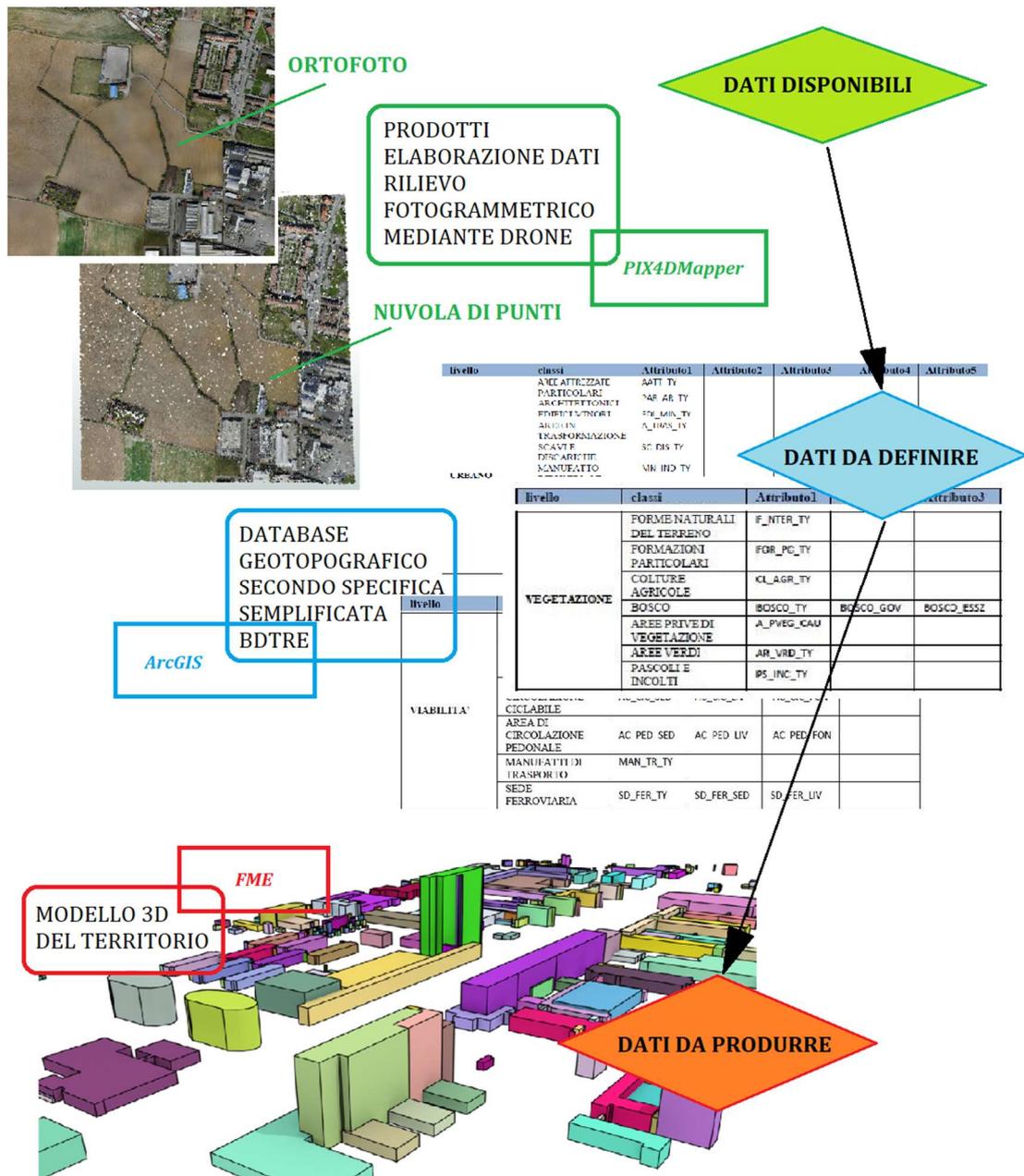


Figura 4.3.5: Schema di flusso procedura sperimentata.

Per quanto riguarda la modellazione geometrica in termini generali, vi sono molteplici opzioni, tra cui utilizzare le mappe topografiche esistenti, effettuare misurazioni 3D dirette mediante diverse tecniche fotogrammetriche, o modellare secondo procedure e parametrizzazioni; nel nostro caso i dati di input a disposizione sono rappresentati dai risultati del processo di restituzione fotogrammetrica mediante drone, tramite il *software PIX4DMapper*: nuvola di punti, ortofoto e DTM.

Il caso studio in esame, essendo un Comune neonato, risulta sprovvisto del dato bidimensionale della mappa topografica, motivo per il quale è stato necessario procedere con la modellazione manuale degli elementi presenti sul territorio. Tale operazione è avvenuta nell'ambiente di lavoro dell'applicativo *ArcMap*, all'interno del quale è stata caricata l'ortofoto precedentemente prodotta.

ArcMap è il componente principale del *software ArcGIS*, un sistema informativo geografico (GIS) prodotto da Esri, utilizzato per la creazione, l'uso e l'analisi di mappe, per la compilazione di dati geografici, la condivisione e la gestione di informazioni geografiche in una base di dati.

A partire dall'ortofoto, utilizzata come immagine di riferimento, la modellazione bidimensionale consiste nella generazione dei dati vettoriali geospaziali, mediante la definizione di poligoni associati a differenti *layers*, che rappresentano gli elementi relativi alle classi di interesse: il *layer 'building'* per gli edifici, *'traffic_area'* per la viabilità, e *'vegetation'* per la vegetazione, rappresentati in colori diversi nella Figura 4.3.6.

Si tratta di una procedura manuale piuttosto semplice, ma relativamente costosa dal punto di vista temporale. La maggiore difficoltà risiede nella restituzione di figure poligonali che rispecchino la realtà geometrica del territorio e degli elementi edificati con accuratezza, per quanto sia possibile per un processo manuale. Il livello di dettaglio geometrico si ferma alla definizione dei contorni in quanto, per il LOD1, si procederà con la semplice estrusione degli stessi.

I suddetti dati vettoriali vengono esportati in differenti *shapefile*, il formato di file sviluppato e regolato da Esri come specifica aperta per l'interoperabilità dei dati tra Esri e altri prodotti *software GIS*.

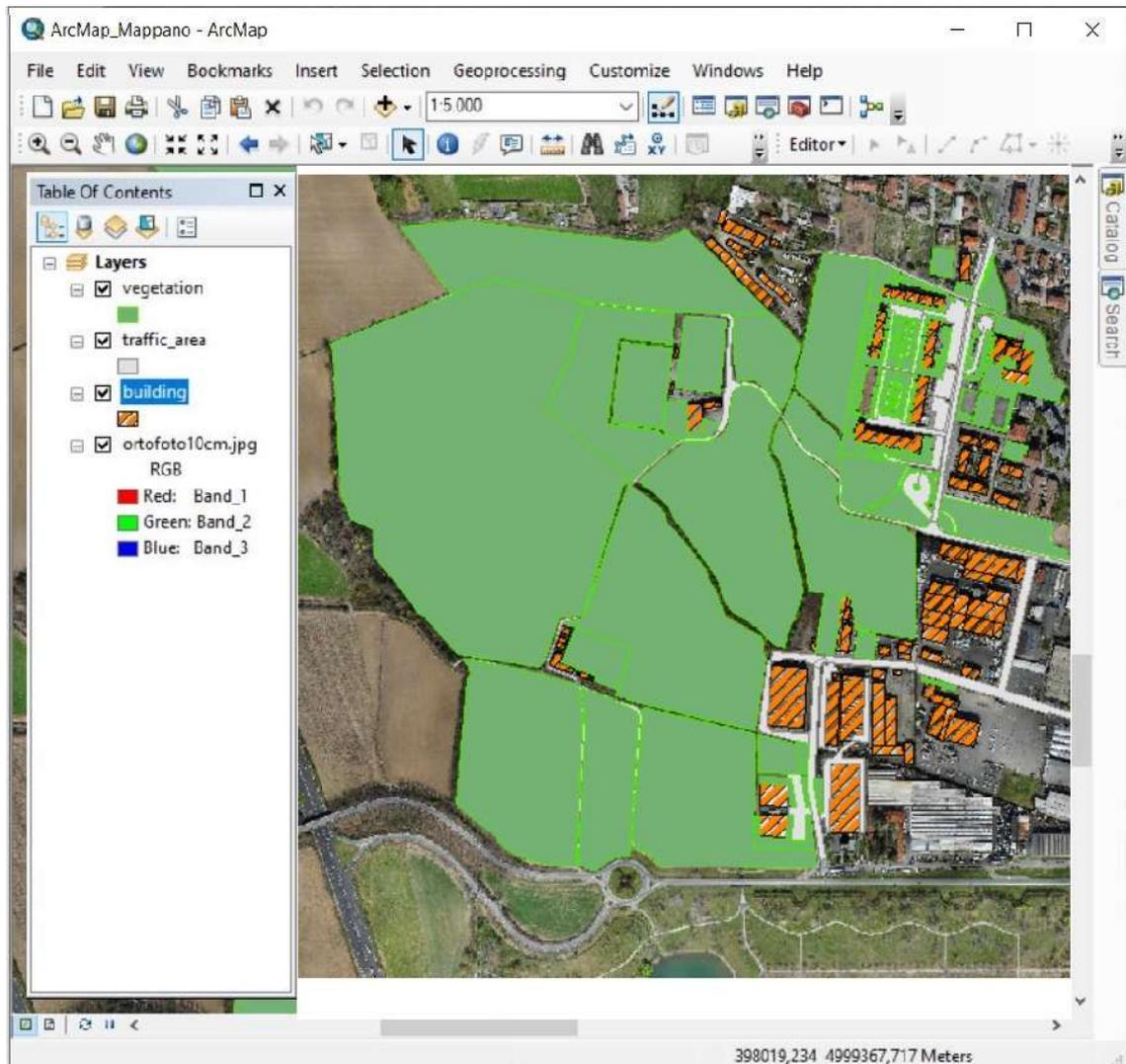
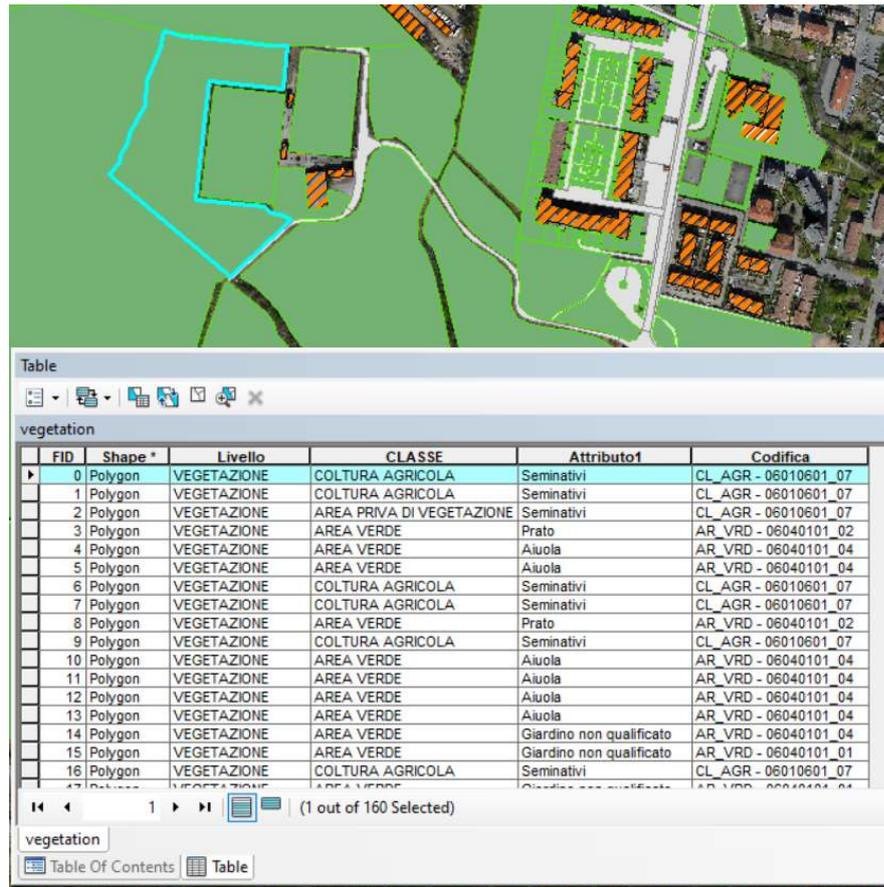


Figura 4.3.6: Modellazione dati vettoriali bidimensionali – Layers ArcMap.

All'interno del medesimo ambiente si procede inoltre alla definizione della struttura della base dati desiderata (Figura 4.3.9, Figura 4.3.8, Figura 4.3.9). Per ciascun elemento poligonale modellato si definisce la *Attribute Table* creando i campi relativi a livello, classe e a tutti gli attributi richiesti dalla Specifica, così come vengono descritti nei paragrafi precedentemente dedicati (4.2.1 – 4.2.2 – 4.2.3).

In questo modo, al termine dell'elaborazione manuale in *ArcGIS-ArcMap* è disponibile un dato vettoriale esportabile ed ulteriormente elaborabile, a cui risulta associato, elemento per elemento, il vero e proprio database ricercato.



Table

vegetation

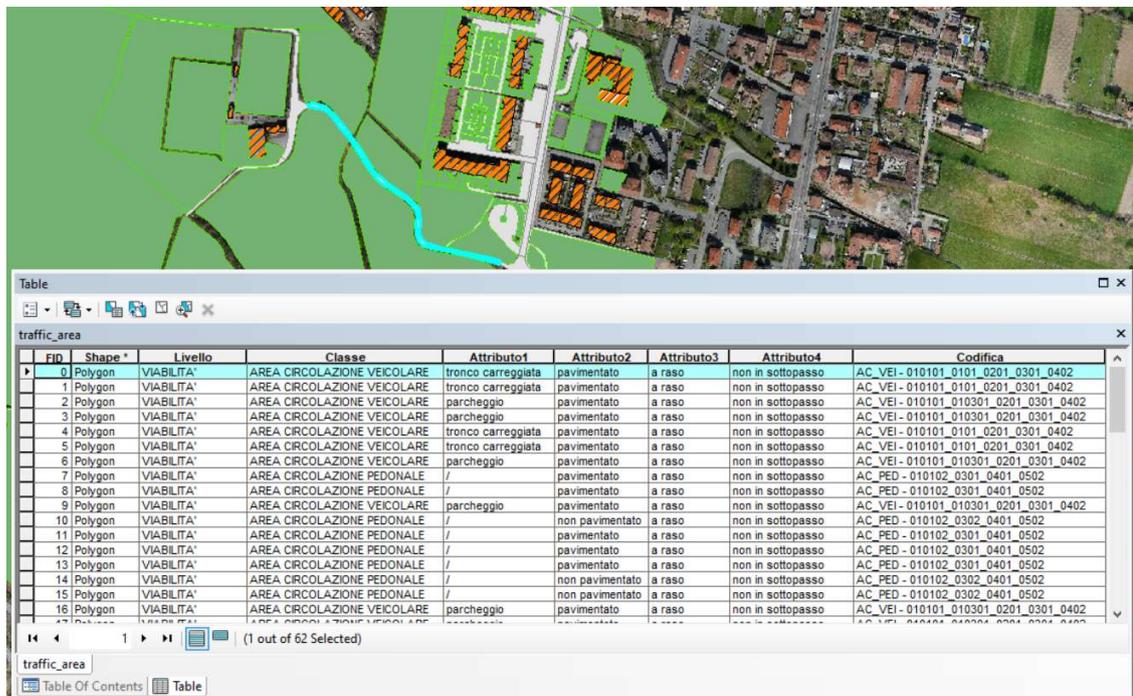
FID	Shape *	Livello	CLASSE	Attributo1	Codifica
0	Polygon	VEGETAZIONE	COLTURA AGRICOLA	Seminativi	CL_AGR - 06010601_07
1	Polygon	VEGETAZIONE	COLTURA AGRICOLA	Seminativi	CL_AGR - 06010601_07
2	Polygon	VEGETAZIONE	AREA PRIVA DI VEGETAZIONE	Seminativi	CL_AGR - 06010601_07
3	Polygon	VEGETAZIONE	AREA VERDE	Prato	AR_VRD - 06040101_02
4	Polygon	VEGETAZIONE	AREA VERDE	Aiuola	AR_VRD - 06040101_04
5	Polygon	VEGETAZIONE	AREA VERDE	Aiuola	AR_VRD - 06040101_04
6	Polygon	VEGETAZIONE	COLTURA AGRICOLA	Seminativi	CL_AGR - 06010601_07
7	Polygon	VEGETAZIONE	COLTURA AGRICOLA	Seminativi	CL_AGR - 06010601_07
8	Polygon	VEGETAZIONE	AREA VERDE	Prato	AR_VRD - 06040101_02
9	Polygon	VEGETAZIONE	COLTURA AGRICOLA	Seminativi	CL_AGR - 06010601_07
10	Polygon	VEGETAZIONE	AREA VERDE	Aiuola	AR_VRD - 06040101_04
11	Polygon	VEGETAZIONE	AREA VERDE	Aiuola	AR_VRD - 06040101_04
12	Polygon	VEGETAZIONE	AREA VERDE	Aiuola	AR_VRD - 06040101_04
13	Polygon	VEGETAZIONE	AREA VERDE	Aiuola	AR_VRD - 06040101_04
14	Polygon	VEGETAZIONE	AREA VERDE	Giardino non qualificato	AR_VRD - 06040101_04
15	Polygon	VEGETAZIONE	AREA VERDE	Giardino non qualificato	AR_VRD - 06040101_01
16	Polygon	VEGETAZIONE	COLTURA AGRICOLA	Seminativi	CL_AGR - 06010601_07

(1 out of 160 Selected)

vegetation

Table Of Contents Table

Figura 4.3.7: Definizione base dati layer vegetation – Attribute Table ArcMap.



Table

traffic_area

FID	Shape *	Livello	Classe	Attributo1	Attributo2	Attributo3	Attributo4	Codifica
0	Polygon	VIABILITA'	AREA CIRCOLAZIONE VEICOLARE	tronco carreggiata	pavimentato	a raso	non in sottopasso	AC_VEI - 010101_0101_0201_0301_0402
1	Polygon	VIABILITA'	AREA CIRCOLAZIONE VEICOLARE	tronco carreggiata	pavimentato	a raso	non in sottopasso	AC_VEI - 010101_0101_0201_0301_0402
2	Polygon	VIABILITA'	AREA CIRCOLAZIONE VEICOLARE	parcheggio	pavimentato	a raso	non in sottopasso	AC_VEI - 010101_010301_0201_0301_0402
3	Polygon	VIABILITA'	AREA CIRCOLAZIONE VEICOLARE	parcheggio	pavimentato	a raso	non in sottopasso	AC_VEI - 010101_010301_0201_0301_0402
4	Polygon	VIABILITA'	AREA CIRCOLAZIONE VEICOLARE	tronco carreggiata	pavimentato	a raso	non in sottopasso	AC_VEI - 010101_0101_0201_0301_0402
5	Polygon	VIABILITA'	AREA CIRCOLAZIONE VEICOLARE	tronco carreggiata	pavimentato	a raso	non in sottopasso	AC_VEI - 010101_0101_0201_0301_0402
6	Polygon	VIABILITA'	AREA CIRCOLAZIONE VEICOLARE	parcheggio	pavimentato	a raso	non in sottopasso	AC_VEI - 010101_010301_0201_0301_0402
7	Polygon	VIABILITA'	AREA CIRCOLAZIONE PEDONALE	/	pavimentato	a raso	non in sottopasso	AC_PED - 010102_0301_0401_0502
8	Polygon	VIABILITA'	AREA CIRCOLAZIONE PEDONALE	/	pavimentato	a raso	non in sottopasso	AC_PED - 010102_0301_0401_0502
9	Polygon	VIABILITA'	AREA CIRCOLAZIONE VEICOLARE	parcheggio	pavimentato	a raso	non in sottopasso	AC_VEI - 010101_010301_0201_0301_0402
10	Polygon	VIABILITA'	AREA CIRCOLAZIONE PEDONALE	/	non pavimentato	a raso	non in sottopasso	AC_PED - 010102_0302_0401_0502
11	Polygon	VIABILITA'	AREA CIRCOLAZIONE PEDONALE	/	pavimentato	a raso	non in sottopasso	AC_PED - 010102_0301_0401_0502
12	Polygon	VIABILITA'	AREA CIRCOLAZIONE PEDONALE	/	pavimentato	a raso	non in sottopasso	AC_PED - 010102_0301_0401_0502
13	Polygon	VIABILITA'	AREA CIRCOLAZIONE PEDONALE	/	pavimentato	a raso	non in sottopasso	AC_PED - 010102_0301_0401_0502
14	Polygon	VIABILITA'	AREA CIRCOLAZIONE PEDONALE	/	non pavimentato	a raso	non in sottopasso	AC_PED - 010102_0302_0401_0502
15	Polygon	VIABILITA'	AREA CIRCOLAZIONE PEDONALE	/	non pavimentato	a raso	non in sottopasso	AC_PED - 010102_0302_0401_0502
16	Polygon	VIABILITA'	AREA CIRCOLAZIONE VEICOLARE	parcheggio	pavimentato	a raso	non in sottopasso	AC_VEI - 010101_010301_0201_0301_0402

(1 out of 62 Selected)

traffic_area

Table Of Contents Table

Figura 4.3.8: Definizione base dati layer traffic_area – Attribute Table ArcMap.

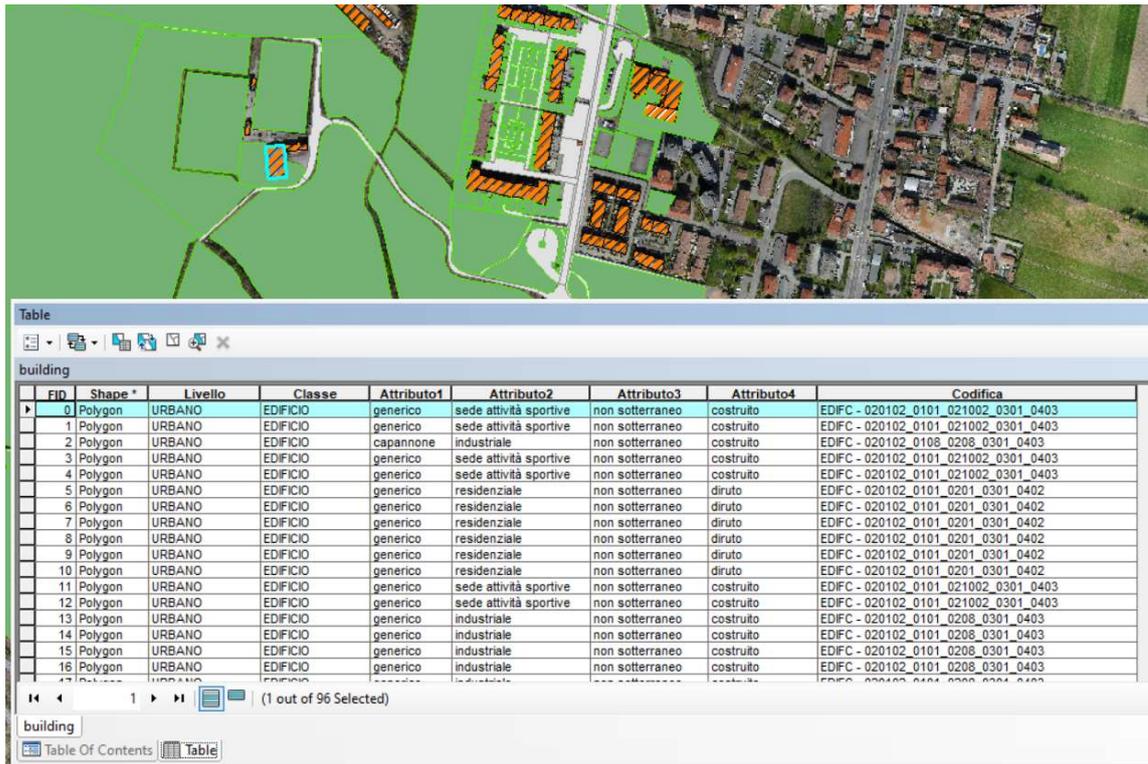


Figura 4.3.9: Definizione base dati layer building– Attribute Table ArcMap.

L'ultimo step necessario a raggiungere l'obiettivo di ottenere un modello di città 3D, e completare il database geotopografico, è la tridimensionalità stessa del dato.

Tale fase è stata sviluppata mediante il supporto del *software FME*, prodotto da *Safe Software*, utile alle operazioni automatiche di assemblaggio dei dati e restituzione del modello. *FME Workbench* è lo strumento principale per la definizione di traduzioni e trasformazioni di dati.

Nel nostro caso la trasformazione riguarda i dati disponibili e generati fino a questo punto. Nella pratica si tratta di associare al dato bidimensionale prodotto in *ArcMap*, fornito allo strumento *FME Reader* come *shapefile*, le informazioni di elevazione contenute all'interno della nuvola di punti prodotta in *PIX4DMapper*, e fornita al *Reader* in formato *laz*.

Nella figura di seguito riportata viene rappresentato il *workflow* completo eseguito in ambiente *FME*, successivamente descritto nel dettaglio.

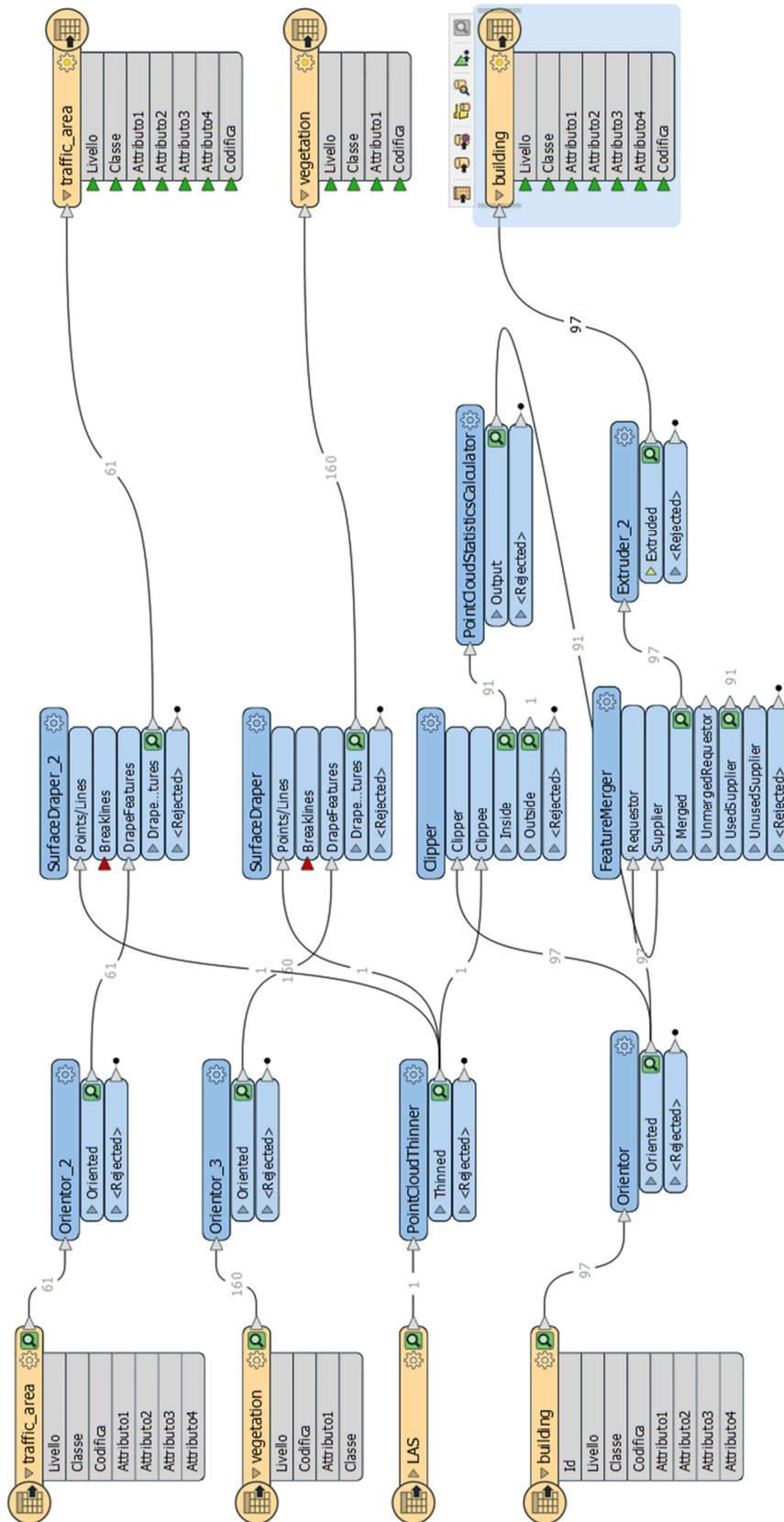


Figura 4.3.10: Struttura Workflow – FME Software.

Dopo aver importato i file di input attraverso i cosiddetti *Readers* (Figura 4.3.11, Figura 4.3.12, Figura 4.3.13, Figura 4.3.14), che consentono di visualizzare il set di dati associato a ciascun elemento, la prima trasformazione attuata riguarda l'orientamento dei dati vettoriali contenuti negli *shapefile*. Il trasformatore denominato *Orientor* consente di orientare tutti i dati forniti nella stessa direzione, secondo la regola della mano destra, che nel nostro caso consiste in un semplice controllo e conferma della corretta restituzione.

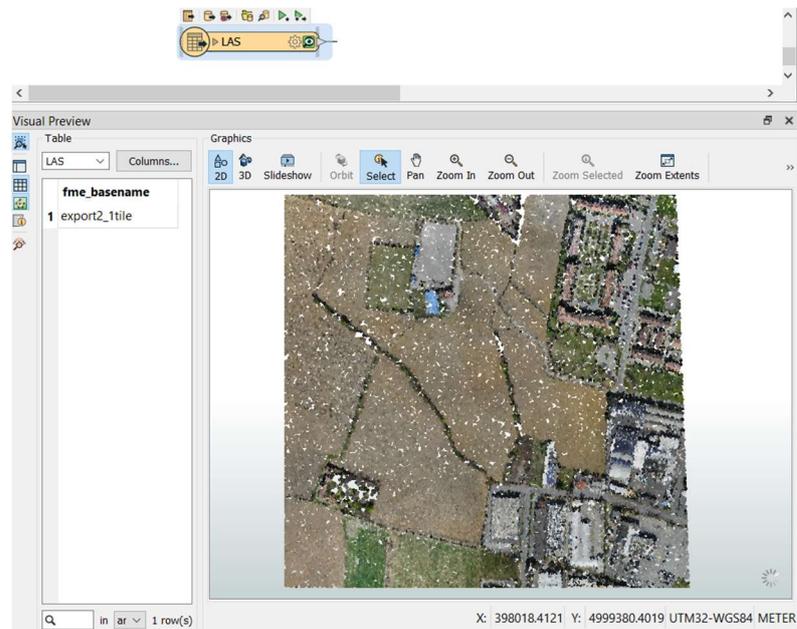


Figura 4.3.11: FME Reader nuvola di punti in formato LAS.

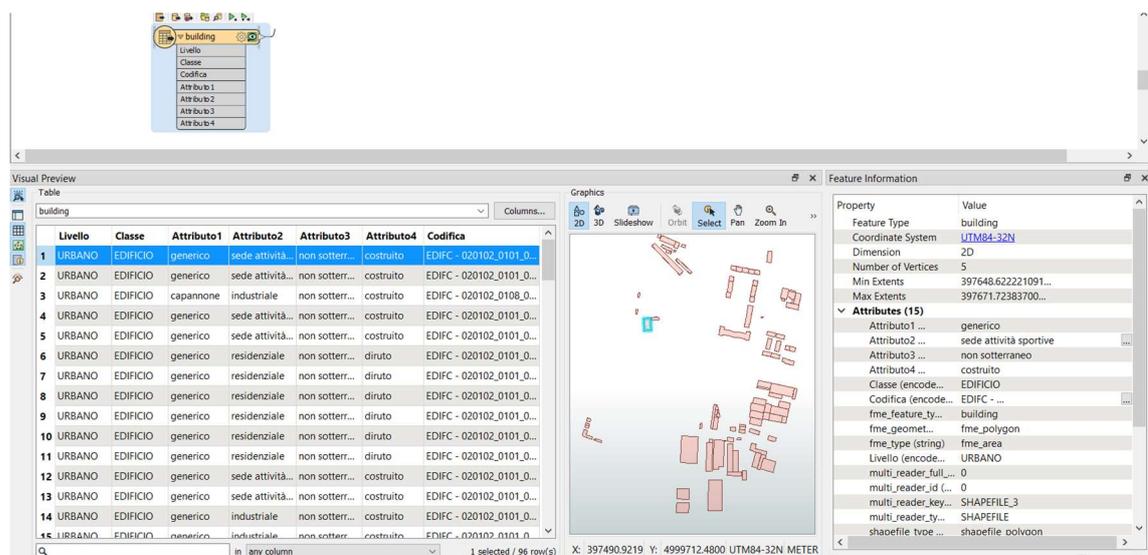


Figura 4.3.12: FME Reader shapefile 2D 'building'.

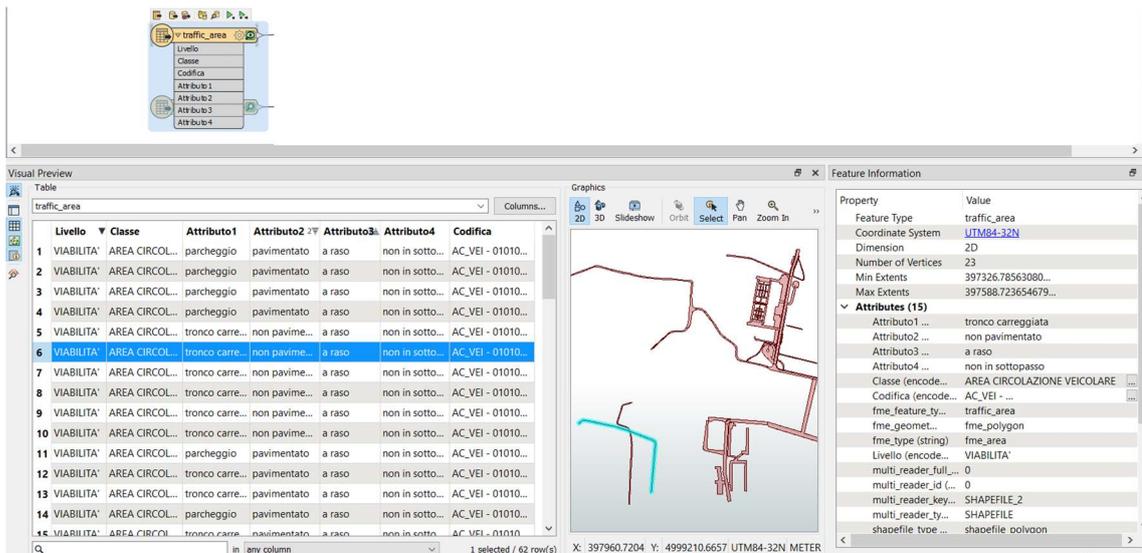


Figura 4.3.13: FME Reader shapefile 2D 'traffic area'.

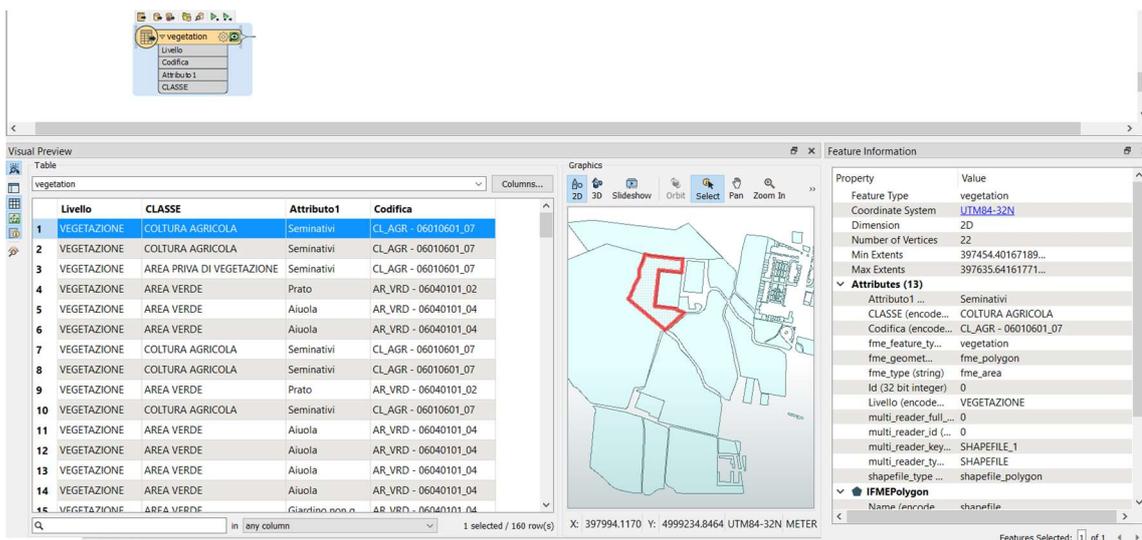


Figura 4.3.14: FME Reader shapefile 2D 'vegetation'.

Il workflow si sviluppa attraverso l'utilizzo di trasformatori capaci di effettuare l'associazione tra i dati vettoriali e l'informazione di elevazione, ed infine estrudere (*SurfaceDraper*) le impronte bidimensionali di una quantità pari alla coordinata z associata a ciascun punto della nuvola, in modo tale da generare la tridimensionalità ricercata. A seguito dell'operazione di estrusione, all'interno dei database relativi a ciascun file vettoriale (Figura 4.3.15, Figura 4.3.16) si vedrà riportata la voce relativa alla dimensione tridimensionale dell'elemento interrogato: *Dimension = 3D*.

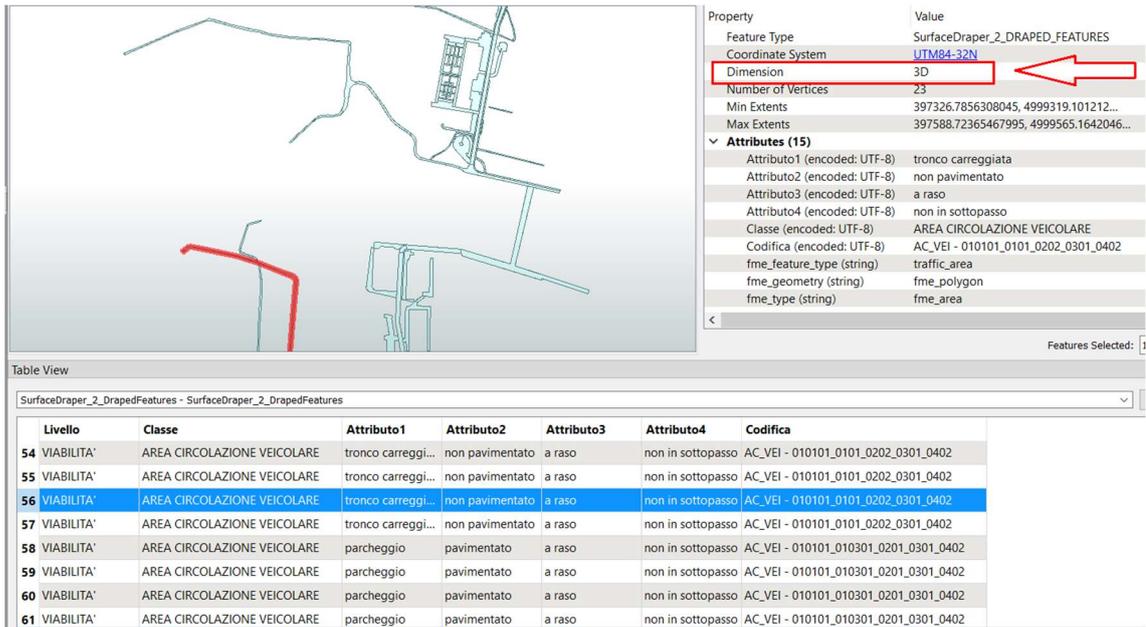


Figura 4.3.15: FME SurfaceDraper elementi 'traffic area'.

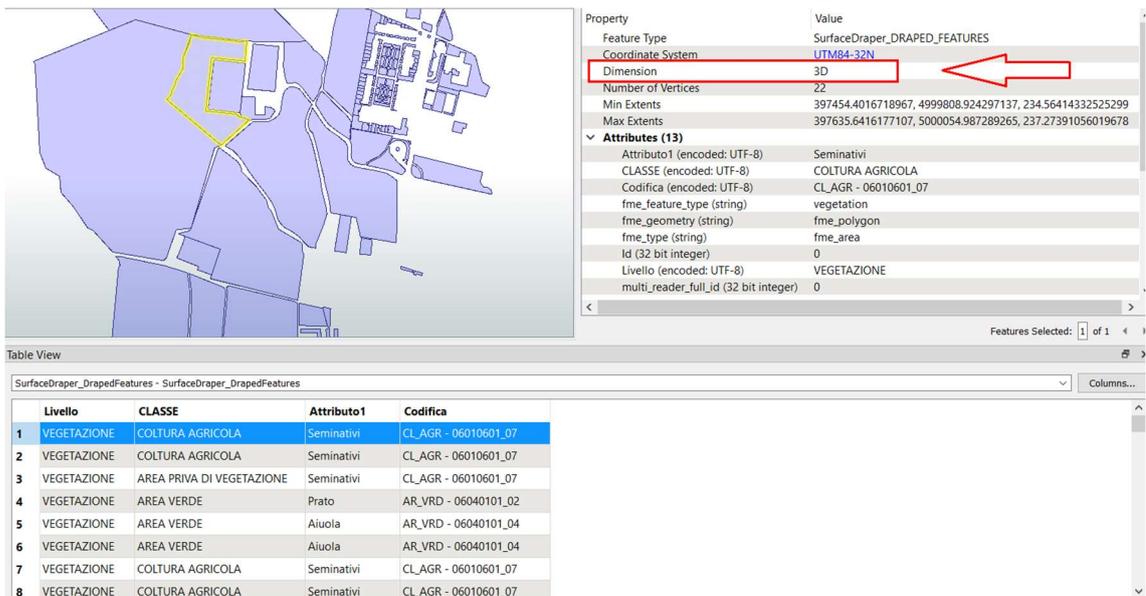


Figura 4.3.16: FME SurfaceDraper elementi 'vegetation'.

Per il caso particolare dei dati vettoriali relativi agli edifici la medesima sequenza di trasformatori porta ad una estrusione non congruente con gli standard relativi al livello di dettaglio in esame. Come si può notare nella visualizzazione riportata di seguito, l'estrusione avviene in modo irregolare seguendo le diversificazioni geometriche delle superfici, poiché le informazioni di elevazione estratte dalla nuvola di punti con il trasformatore *SurfaceDraper* sono associate ad ogni singolo

punto della nuvola. Per il LOD1 è richiesta un'elevazione costante del solido regolare rappresentante l'edificio, ed è perciò necessario che l'altezza di un singolo edificio sia unica e costante per tutta l'impronta estrusa.

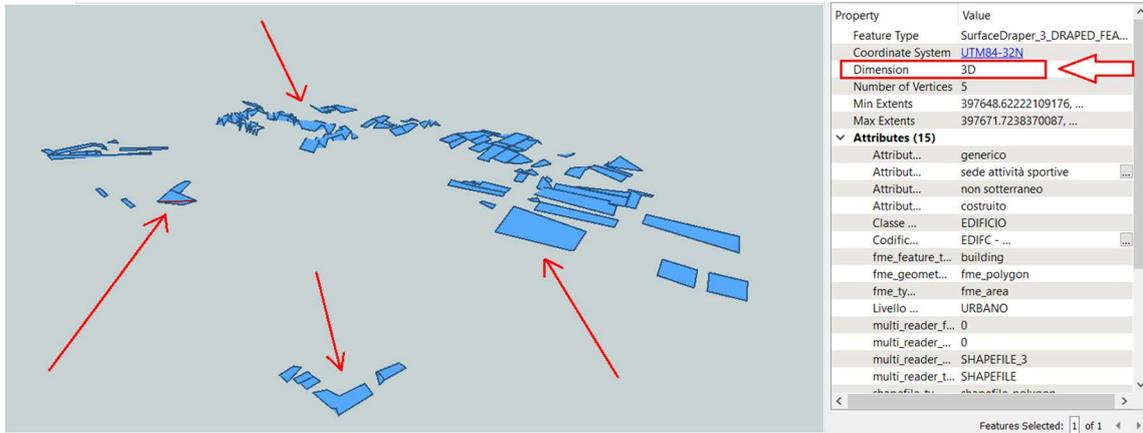


Figura 4.3.17: FME SurfaceDraper elementi 'building'.

Per ottenere tale dato si procede con la divisione dell'intera nuvola di punti in diverse nuvole corrispondenti ai diversi edifici, mediante il trasformatore *Clipper*, che estrae le sezioni contenute all'interno delle impronte bidimensionali fornite dal file 'building' (Figura 4.3.18).

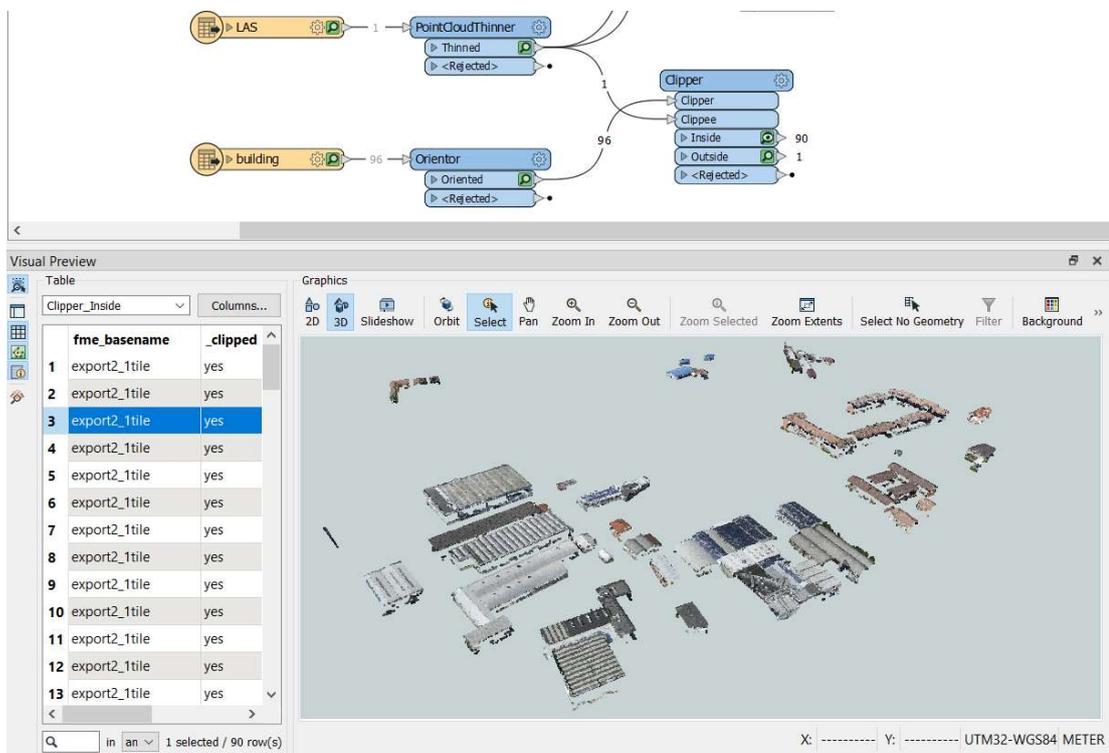


Figura 4.3.18: FME Clipper nuvola di punti - shapefile 'building'.

Successivamente si avvia un'analisi statistica delle informazioni di elevazione fornite dalle nuvole di punti, tramite il trasformatore *PointCloudStatisticsCalculator*, che calcola la mediana dell'altezza di ogni singolo edificio o *clipper*.

Queste informazioni z, che risultano essere un attributo delle nuvole di punti corrispondenti a ciascun edificio, vengono aggiunte come attributo del file *shapefile* 'building', con il trasformatore *FeatureMerger*, ed infine il trasformatore *Extruder* realizza il modello di elevazione degli edifici usando tale valore approssimativo dell'altezza.

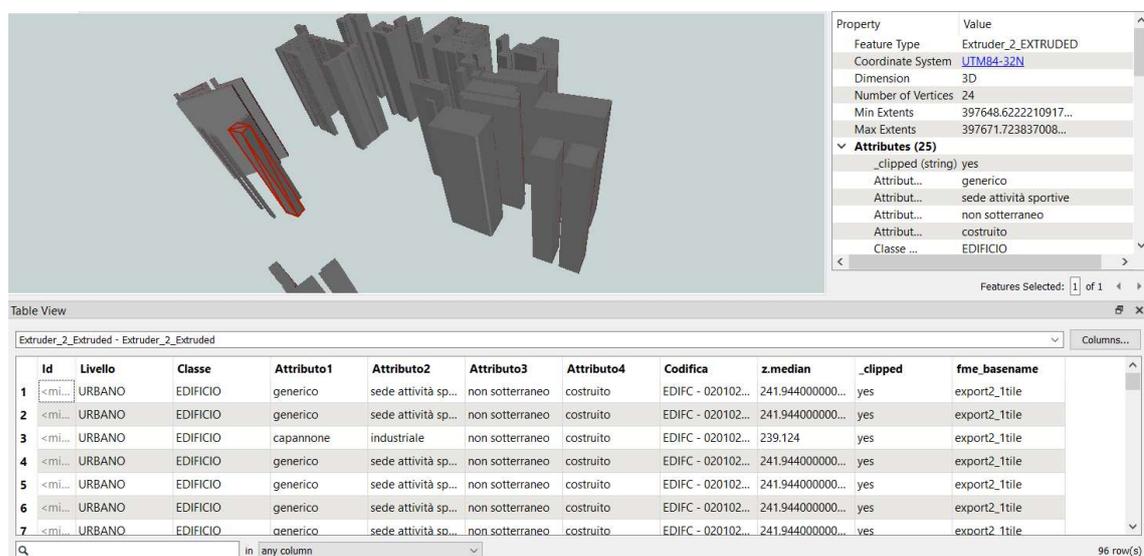


Figura 4.3.19: FME Extruder shapefile 'building'.

La fase finale si struttura mediante lo strumento *FME Writer* che permette di esportare il dato 3D che costituisce il vero e proprio modello, sottoforma di *shapefile*, consultabile e analizzabile in ambiente GIS.

4.3.2 Il dato 3D prodotto

Il dato finale ottenuto dallo strumento *FME Writer* ed esportato in formato *shapefile* viene riportato di seguito mediante la visualizzazione in *ArcScene*, l'applicativo di ArcGIS utile all'analisi cartografica con rappresentazione 3D, attraverso il quale è possibile consultare il vero e proprio *database* tridimensionale generato.

Si riporta di seguito (Figura 4.3.20) la modellazione 3D della sezione selezionata, con un'esagerazione del fattore di scala che consente una migliore visualizzazione della tridimensionalità degli edifici rispetto al territorio circostante, rappresentato dall'ortofoto posta come sfondo.

Interrogando qualsiasi elemento del modello è possibile consultare le informazioni contenute nel *database* associato, secondo la struttura richiesta dalla Specifica Semplificata della BDTRE.

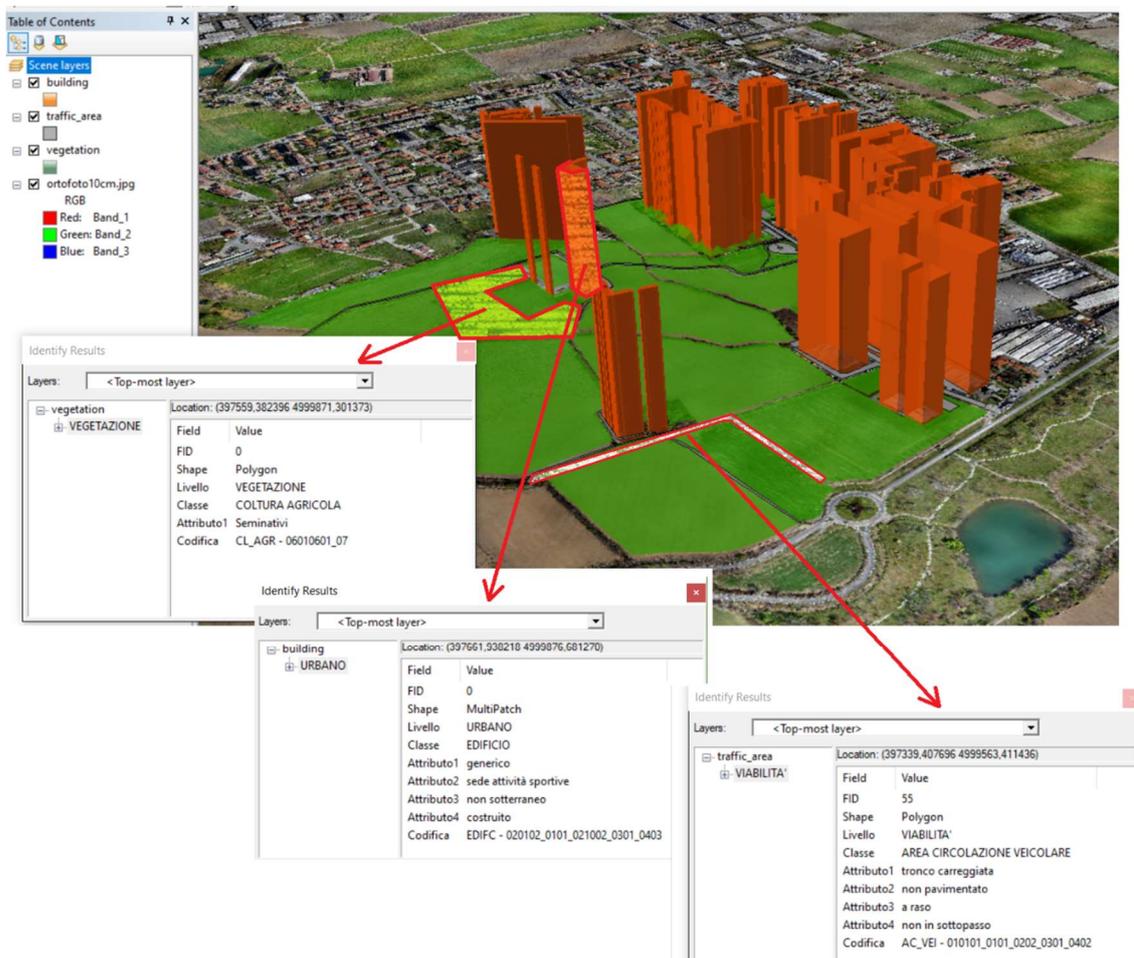


Figura 4.3.20: Il modello tridimensionale e il database prodotto - ArcScene.

Capitolo 5 - Conclusioni

Con la presente trattazione ho cercato di racchiudere lo stato dell'arte degli studi nell'ambito della restituzione aerofotogrammetrica mediante drone, con particolare interesse all'ambito urbano cittadino, e fornire uno sguardo verso le ricerche in fase di sviluppo, che prendono vita dalla continua evoluzione delle potenzialità tecnologiche.

Nel momento in cui si coglie l'importanza dello scopo ultimo del processo di automatizzazione della restituzione e ricostruzione del dato tridimensionale, si comprende la grande possibilità di implementare gli studi svolti al riguardo.

Durante la stesura del mio elaborato a partire dalle basi teoriche fornitemi durante gli anni di studio accademico, e approfondite mediante testi e normative aggiornate, ho avuto modo di assistere e partecipare attivamente alle operazioni di acquisizione dei dati, fondamentali per comprendere l'importanza delle operazioni di organizzazione e coordinazione delle competenze professionali, e non, coinvolte.

Nelle successive fasi di elaborazione dei dati è stato possibile sperimentare il potenziale che risiede all'interno di *software* commerciali, di utilizzo immediato, osservando che la qualità del dato finale, in termini di nuvole di punti, ortofoto e modelli digitali del terreno, con un'accuratezza raggiunta dell'ordine del centimetro, ha origine dalla qualità del dato iniziale fornito come input sottoforma di fotogrammi.

Il Capitolo conclusivo della trattazione non poteva riguardare altro risultato se non quello tridimensionale, che costituisce oggi, e costituirà in futuro, lo standard al quale mirano tutti i progetti di produzione cartografica, con uno sguardo più ampio sull'intero panorama tecnico-amministrativo, e le numerose applicazioni possibili.

Tale fase di assemblaggio dei risultati, e generazione dei dati cartografici tridimensionali è stata affrontata con una prospettiva di interoperabilità dei risultati stessi. Lo sguardo è stato rivolto prima agli Standard Europei e conseguentemente

a quelli Regionali, attraverso una vera e propria traduzione dei costrutti e della struttura comune.

In generale dare vita alla ricostruzione del dato 3D a partire da nuvole di punti ha due problemi principali: insufficienza di dati e complessità del tipo di elementi. La forma primitiva della nuvola di punti risulta molto influenzata dalla quantità dei dati disponibili, motivo per il quale nel nostro caso, in presenza di una grande quantità di dati acquisiti dal rilievo aerofotogrammetrico, è stato possibile ottenere una nuvola di punti estremamente densa e ricca di informazioni spaziali accurate.

Rimane il limite costituito dalla complessità del dato in sé, che risulta di difficile elaborazione nella maggior parte dei *software* commerciali disponibili, a causa dell'elevato numero di informazioni contenute, con il conseguente sforzo computazionale richiesto.

Per quanto riguarda l'aspetto dell'automatizzazione della procedura di restituzione delle geometrie, entra in gioco la complessità degli elementi che costituiscono il territorio cittadino, aspetto che una strategia di modellazione automatica dovrebbe essere in grado di affrontare, gestendo la grande diversità di strutture edilizie. Nel nostro caso abbiamo messo in atto una procedura semi-automatica in quanto la restituzione del dato vettoriale bidimensionale è stata operata manualmente attraverso gli strumenti forniti da *ArcMap*, mentre la successiva associazione dell'informazione della coordinata *z*, e la generazione del modello tridimensione è stata automatizzata mediante l'utilizzo di *FME*.

La sperimentazione di tale procedura mi ha consentito di evidenziare le problematiche e le carenze ancora presenti nelle metodologie attualmente disponibili, lasciando spazio però ad un continuo miglioramento, in forma iterativa, con l'obiettivo finale di semplificare processi attualmente complessi, ed automatizzare e correggere metodologie attualmente manuali e affette da errori.

Bibliografia

- *A graph edit dictionary for correcting errors in roof topology graphs reconstructed from point clouds*, Xiong B., Oude Elberink S., Vosselman G., University of Twente, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation – ITC, Department of Earth Observation Science, The Netherlands. In ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 93 (2014) 227–242
- *An update on automatic 3D building reconstruction*, Haala N., Kada M., ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 65 (6), 570–580 (2010)
- *Applications of 3D City Models: State of the Art Review*, Biljecki F., Stoter J., Ledoux H., Zlatanova S., Çöltekin A., on ISPRS International Journal of Geo-Information (2015)
- *Attività di ricerca e sviluppo sulle tecnologie e strumenti della geomatica per il monitoraggio di versanti in dissesto e infrastrutture – 1° consegna deliverables: D1, D2.1, D3.1*, Cina A., Marcellin L., CSP – Innovazione nelle ICT, Politecnico di Torino DIATI, 28 luglio 2017
- Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE)
- *Economic Value of 3D Geographic Information*, Wong, K.K.Y., EuroSDR and the Department of Computer Science, University College London: London, UK, (2015)

- *Geomatica*, Lingua A.M. - DIATI Politecnico di Torino – 2017
- *GIS Open Source per geologia e ambiente – Analisi e gestione di dati territoriali con QGIS*, Noti V.
- *Georeferencing of terrestrial laserscanner data for applications in architectural modelling*, Schuhmacher S., Böhm, J., in: *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Mestre-Venezia, Italy, Vol. XXXVI, Part 5/W17, articolo 15 (2005)
- *Fotogrammetria da UAV (Unmanned Aerial Vehicle): un'opportunità per il rilievo 3D multiscala*; Chiabrando F., Lingua A. M., Maschio P. F., Rinaudo F., Spano' A. T. (2017)
- *Il Catalogo degli oggetti Documenti IntesaGIS 1n1007_1-2 vers. 3.3- D.Lgs. 07/03/2005 n.82 “Codice dell'Amministrazione Digitale”, Direttiva 2007/2/CE (INSPIRE)*
- *Il Modello GeoUML: Regole di Interpretazione delle Specifiche di Contenuto per i Database Topografici*, Allegato 2 alle *Regole tecniche per la definizione delle specifiche di contenuto dei database geotopografici* (DM 10 novembre 2011 - Gazzetta Ufficiale n. 48 del 27 febbraio 2012, supplemento ordinario n. 37)
- *Linee guida per l'implementazione*, Documenti IntesaGIS 1n1014 vers. 1.4 - D.Lgs. 07/03/2005 n.82 “Codice dell'Amministrazione Digitale”, Direttiva 2007/2/CE (INSPIRE)

- *L'ortofoto solida di precisione: un prodotto innovativo per la rappresentazione e la gestione dei dati tridimensionali.* Bornaz L., Dequal S., Lingua A., Atti Conferenza nazionale SIFET, Taranto (2006)
- *Lo schema del contenuto in GeoUML*, Documenti IntesaGIS 1n1007_4 vers. 3.3 - D.Lgs. 07/03/2005 n.82 "Codice dell'Amministrazione Digitale", Direttiva 2007/2/CE (INSPIRE)
- *Mezzi aerei non convenzionali a volo autonomo per il rilievo fotogrammetrico in ambito archeologico;* Chiabrando F., Lingua A. M., Maschio P. F., Rinaudo F., Spano' A. T. (2012)
- *Misure, rilievo, progetto per Costruzioni, ambiente e territorio - Volumi 1, 2, 3;* Cannarozzo R., Cucchiaroni L., Meschieri W., Quinta edizione - 2017
- *Modellazione 3d dell'ambiente urbano mediante integrazione di scansioni laser aeree e terrestri: l'esempio del castello di Gorizia,* Visintini D., Fico B., Spangher A., Dipartimento di Georisorse e Territorio, Università degli Studi di Udine (2006)
- *Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML,* Kolbe T. H. in: Lee, J. & Zlatanova, S. (Eds.): 3D Geo-Information Sciences, Springer LNG&C Series, pp. 15-31. (2009)
- *Stato dell'arte dei Database Geotopografici nelle Regioni italiane,* CISIS Centro Interregionale per i Sistemi informatici, geografici e statistici - Ciclo di webinar su Telerilevamento, Open data, GIS e Big Data per i territori rurali organizzato da CREA-PB (22/03/2018)

- *Structural approach for building reconstruction from a single DSM*, Lafarge F., Descombes X., Zerubia J., Pierrot-Deseilligny M., IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 32 (1), 135–147 (2010)

- *Virtual 3D City Models in Urban Land Management—Technologies and Applications*, Ross, L. Ph.D. Thesis, Technische Universität Berlin, Berlin, Germany, (2010)

- *Visualizing the City: Communicating Urban Design to Planners and Decision-Makers*, Batty, M.; Chapman, D.; Evans, S.; Haklay, M.; Kueppers, S.; Shiode, N.; Smith, A.; Torrens, P.M.; Technical Report Paper 26; Centre for Advanced Spatial Analysis (UCL): London, UK, (2000)

Sitografia

Il Geoportale, GeoPortale.piemonte.it

<http://www.GeoPortale.piemonte.it/cms/il-GeoPortale>, marzo 2019

BDTRE Base Dati Territoriale di Riferimento degli Enti, GeoPortale.piemonte.it

<http://www.GeoPortale.piemonte.it/cms/bdtre>, marzo 2019

BDTRE Modalità di pubblicazione e fruizione, GeoPortale.piemonte.it

<http://www.GeoPortale.piemonte.it/cms/bdtre/modalita-di-pubblicazione-e-fruizione>, marzo 2019

BDTRE Progetto mosaicatura catastale, GeoPortale.piemonte.it

<http://www.GeoPortale.piemonte.it/cms/bdtre/progetto-mosaicatura-catastale>, marzo 2019

BDTRE Specifiche per cartografia di base, GeoPortale.piemonte.it

<http://www.GeoPortale.piemonte.it/cms/bdtre/specifiche-per-cartografia-di-base>, marzo 2019

Caratteristiche della strumentazione utilizzata: eBee Plus – sense Fly, sensefly.com

<https://www.sensefly.com/drone/ebee-plus-survey-drone/>, ottobre 2019

Catalogo-Mappe, GeoPortale.piemonte.it

<http://www.geoportale.piemonte.it/geocatalogorp/>, marzo 2019

Corso GPS per topografia - Università di Padova, A.A. 2014/2015, elearning.unipd.it

https://elearning.unipd.it/scuolaamv/pluginfile.php/35101/mod_resource/content/1/Corso%20GPS%20x%20Topografia%202014-2015.pdf, settembre 2019

Droni per fotogrammetria, dronebase.it

<https://www.dronebase.it/droni-fotogrammetria-e-rilievo/>, agosto 2019

Fotogrammetria, Geomatics for conservation & Communication of cultural heritage laboratory, www.geomaticaeconservazioni.it

http://www.geomaticaeconservazione.it/archivi/Fotogrammetria_mar2014.pdf, ottobre 2019

Il coinvolgimento delle comunità locali nella conservazione del patrimonio costruito, Ronchi A.T., Tesi di Dottorato di Ricerca TEPAC Tecnologia e Progetto dell'ambiente costruito, Ciclo XXIV, Politecnico di Milano, Dipartimento BEST (2011)

https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/56719/1/2012_03_PhD_Ronchi.PDF, settembre 2019

Il Comune di Mappano – un po' di storia, [comune.mappano.to.it](http://www.comune.mappano.to.it)

<http://www.comune.mappano.to.it/Home/Guida-al-paese?IDPagina=19314&IDCat=2940>, settembre 2019

La nuova base cartografica regionale BD TRE – Siletto G.B., Regione Piemonte – Settore infrastruttura geografica, docplayer.it

<https://docplayer.it/42993404-La-nuova-base-cartografica-regionale-bdtre-gianbartolomeo-siletto-regione-piemonte-settore-infrastruttura-geografica.html>, ottobre 2019

La Base Dati Territoriale di Riferimento degli Enti BD TRE – Siletto G.B., Regione Piemonte – Settore Cartografia e SIT -DB08, docplayer.it

<https://docplayer.it/68154969-La-base-dati-territoriale-di-riferimento-degli-enti-bdtre.html>, ottobre 2019

Mappano, Wikipedia – the free encyclopedia

<https://it.wikipedia.org/wiki/Mappano>, settembre 2019

OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard - Open Geospatial Consortium OGC 12-019

<http://www.opengis.net/spec/citygml/2.0>, ottobre 2019

Un rilievo con il drone – Rilievi – 14 Giugno 2017, 3dmetrica.it

<https://3dmetrica.it/rilievo-topografico-con-drone/>, agosto 2019

Utilizzo software Photoscan, agisoft.com

https://www.agisoft.com/pdf/manuals_other/pscan_pro_it_1-2.pdf, maggio 2019

Utilizzo software PIX4D, support.pix4d.com

<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557429>, aprile 2019

Utilizzo software Metashape, agisoft.com

https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_en.pdf, maggio 2019

Testo Misure, rilievo, progetto per Costruzioni, ambiente e territorio – Cannarosso et al., online.scuola.zanichelli.it

https://online.scuola.zanichelli.it/cannarozzomisure-5ed-files/Zanichelli_Cannarozzo_Principi_e_strumenti_fotogrammetria.pdf, agosto 2019

Ringraziamenti

Ringrazio innanzitutto il professor Lingua Andrea e l'Ing. Di Pietra Vincenzo che mi hanno supportato e sopportato durante la stesura del mio elaborato, fornendomi preziosi consigli e spronandomi a fare sempre di più per ottenere risultati concreti e soddisfacenti dal Nostro progetto.

Ringrazio inoltre tutti quei docenti che in questi cinque anni di studi si sono dimostrati appassionati e dediti all'insegnamento, trasmettendo a me come studentessa, una conoscenza con così grandi potenzialità, e a me come giovane lavoratrice, una professione che sarà il mio futuro.

Allo stesso modo ringrazio i miei compagni, con i quali ho condiviso ansie e preoccupazioni, gioie e soddisfazioni. Le differenze che ci contraddistinguono sono state preziose per imparare l'uno dall'altra e migliorarci vicendevolmente come studenti e persone.

I più grandi e sentiti Grazie li devo a Mia Mamma, a Mio Papà, a Francesca e a Lorenzo.

Ognuno di loro sa quanto per me sia stata importante la loro presenza, lontana e vicina, silenziosa e ricca di parole, in ogni momento del mio percorso.

Grazie per aver creduto in me, anche quando non ne avevo la capacità.

Grazie per aver avuto pazienza, anche quando non ne avevo la forza.

Grazie per avermi attesa, anche quando non ne avevo il tempo.

Grazie per avermi amata, anche quando non ne avevo il diritto.

Grazie Mamma. Grazie Papà. Grazie Francesca. Grazie Lorenzo.

Con Amore incondizionato,

Sempre Vostra Egle

