

**Integrazione innovativa di termografia e
fotogrammetria aeree da UAV per
l'analisi del costruito storico**

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in
Architettura Costruzione e Città



Tesi di Laurea Magistrale

Integrazione innovativa di termografia e fotogrammetria aeree da UAV per l'analisi del costruito storico

Relatore
Prof.^{ssa} Antonia Spanò
firma del relatore

Candidato
Guglielmo Cortese
firma del candidato

Correlatore
Prof. Fabio Giulio Tonolo
firma del correlatore

*Alla mia famiglia e a chi
mi ha sempre sostenuto
nonostante tutto...*

INDICE

- 0. Premessa
- 1. Metodologie per la documentazione del patrimonio costruito; metodi di rilievo 3D della geomatica.
 - 1.1 Metodologie topografiche di inquadramento del rilievo metrico
 - 1.1.1 Metodi GPS/GNSS per il posizionamento satellitare
 - 1.1.2 Misure topografiche di dettaglio
 - 1.2 Le tecniche LIDAR
 - 1.3 La Fotogrammetria
 - 1.3.1 Nascita ed evoluzione della fotogrammetria
 - 1.3.2 Principi geometrici della fotogrammetria
 - 1.3.3 Il processo fotogrammetrico
 - 1.3.4 Aerofotogrammetria
 - 1.3.4.1 Droni e regolamentazioni
- 2. La termografia
 - 2.1 Storia della termografia
 - 2.2 Principi fisici alla base della termografia
 - 2.2.1 La trasmissione del calore
 - 2.2.2 La quantità di energia emessa da un corpo
 - 2.3 Le termocamere
 - 2.4 Basi di termografia applicata

3. Caso studio

3.1 La ricostruzione di modelli digitali tridimensionali da acquisizioni RGB e termografiche

3.2 Gli strumenti

3.2.1 Il modulo UAV

3.2.2 I sensori utilizzati

3.3 Piano di volo ed acquisizioni

3.4 Elaborazione fotogrammetrica

3.4.1 Elaborazione dataset termico

3.4.2 Elaborazione dataset RGB

3.4.3 Unione dei dataset termico e RGB

3.5 Studio delle ortofoto e del modello fotogrammetrico

3.5.1 Zone di interesse

3.6 Analisi dei termogrammi

3.6.1 Confronto con il catasto Rabbini

4. Considerazioni finali e sviluppi futuri

5. Bibliografia e sitografia

6. Allegati

0

Premessa

L'obiettivo di questa tesi è quello di presentare i principi e alcuni esempi e applicazioni inerenti le tecnologie e le tecniche finalizzate al rilievo 3D da UAV (Unmanned Aerial Vehicle) per la documentazione del patrimonio costruito, intrecciando tecniche di rilevamento non invasivo proprie della fotogrammetria aerea con la tecnologia termografica.

La rapida evoluzione delle risorse tecnologiche, avvenuta negli ultimi quindici anni, ha permesso l'introduzione nel campo del rilevamento di strumentazioni sempre più innovative, efficienti ed economicamente accessibili. Tra queste, un ruolo sicuramente fondamentale lo hanno assunto gli aeromobili a pilotaggio remoto il cui utilizzo, per scopi civili ed industriali, è cresciuto in maniera esponenziale, favorendo così, una "democratizzazione tecnologica" determinata dall'abbassamento dei prezzi che ha portato allo sviluppo di questa tecnologia e che, parallelamente alla miniaturizzazione dei sensori d'immagine, permette il trasporto di strumenti fotografici sempre più avanzati, consentendone l'uso nel campo del rilievo come una pratica ormai consolidata, applicata con successo in un gran numero di scenari operativi.

Questo studio è stato condotto integrando i dati ottenuti mediante fotogrammi digitali ottenuti tramite acquisizione nello spettro del visibile e immagini termografiche, acquisite grazie all'impiego di sensori - installati a bordo di aeromobili a pilotaggio remoto - in grado di rilevare le radiazioni con lunghezze d'onda corrispondenti all'infrarosso termico, invisibile all'occhio umano.

I dati termici acquisiti consentono di indagare l'elemento considerato sotto vari e inaspettati punti di osservazione. I termogrammi, infatti, sono una rappresentazione verosimile dell'oggetto indagato, nella quale si possono facilmente riconoscere proporzioni e dimensioni di quanto ripreso; tuttavia, poiché la colorazione della superficie e la distinguibilità delle forme e dei componenti dipendono strettamente dalle caratteristiche termiche dei materiali che li costituiscono, l'immagine generata dalla termocamera è, di fatto, rappresentativa di entità che non sono altrimenti

visibili e visualizzabili, se non attraverso l'impiego di grafici o descrizioni verbali.

Seguendo dunque la ormai consolidata tendenza nell'ambito della fotogrammetria, di sperimentazione e integrazione delle informazioni ottenute attraverso l'impiego di soluzioni multisensore, si è tentato di sviluppare e sintetizzare, in un approccio metodologico sperimentale, concetti geometrici e radiometrici in un unico procedimento, finalizzato a indagare le potenzialità di analisi della termografia come supporto alla documentazione e allo studio del patrimonio costruito.

La campagna di rilievo sperimentale con integrazione multispettrale è avvenuta grazie alla disponibilità di un nuovo drone che può montare due camere con differenti sensori (RGB e termico) a disposizione dalla collaborazione tra il Lab Geomatica e il centro interdipartimentale FULL - The Future Urban Legacy Lab; il contesto in cui si è operato è stato di alta montagna, con l'intento di documentare il patrimonio storico architettonico della borgata alpina di Bout du Col (1700 m slm), frazione di Prali (TO), nel cuore della Val Germanasca.

Bout du Col si configura come uno dei tanti casi di borghi montani e altocollinari che, a causa del fenomeno di spopolamento e abbandono - cominciato nel secondo dopoguerra - sono spesso privi anche dei servizi essenziali alla vita dei suoi abitanti e versano attualmente in stato di avanzato abbandono.

Il processo metodologico impiegato per l'integrazione dei due insiemi di dati, al fine di indagare il costruito e il territorio, è stato strutturato in due fasi: la prima è avvenuta mediante l'acquisizione aerea da UAV dei dataset termografici e RGB con finalità fotogrammetriche; nella seconda fase i dati precedentemente acquisiti sono stati elaborati tramite tecniche di fotogrammetria digitale, finalizzate all'ottenimento di ortofoto, mappe di radianza e modelli tridimensionali geometricamente corretti e georeferenziati, riportanti le informazioni radiometriche

dell'area indagata.

Da questa analisi sulle potenzialità della termografia, complementare alle classiche tecniche fotogrammetriche e come elemento di sinergia per l'analisi del territorio e del costruito, è derivato uno studio sulle discontinuità termiche del terreno, che rappresentano probabili indizi della presenza di aree già interessate da precedenti edificazioni, non individuabili a occhio nudo.

Lo studio è avvenuto tramite l'analisi critica delle ortofoto, delle mappe di radianza e del modello tridimensionale, generati grazie alle metodologie sperimentate, che hanno portato l'individuazione di zone soggette ad anomalie termiche. Le aree così identificate sono state più approfonditamente analizzate al fine di individuare e riconoscere tracce di antropizzazione, mediante la lettura puntuale dei relativi termogrammi, precedentemente acquisiti dal volo UAV.

Successivamente, a verifica delle ipotesi avanzate, è stata effettuata una comparazione con cartografia storica basata su georeferenziazione, che ha sostanzialmente confermato la precedente presenza in situ di edifici, avvalorando, quindi, l'utilità di questa tecnica di indagine come supporto delle tecnologie di rilievo per il patrimonio costruito già consolidate.

1

**METODOLOGIE PER LA
DOCUMENTAZIONE DEL
PATRIMONIO COSTRUITO;
METODI DI RILIEVO 3D
DELLA GEOMATICA.**

“Il termine Geomatica indica un approccio integrato e multidisciplinare all’uso di strumenti e tecniche specifiche scelte per acquisire, integrare, gestire, analizzare e diffondere dati territoriali georeferenziati in formato digitale e in modo continuo.”

(Gomasasca, 2009)

Il termine, (che deriva dall’unione di geografia e informatica) venne introdotto per la prima volta dall’Università di Laval in Canada nei primi Anni Ottanta, ed è figlio del grande sviluppo e delle potenzialità che il calcolo elettronico - applicato alla georeferenziazione di tutto ciò che è posizionato nel nostro pianeta - cominciava, in quegli anni, ad offrire nel campo dell’analisi di imponenti quantità di dati. (Gomasasca, 2009)

Questa disciplina si occupa, in maniera interdisciplinare e interoperabile, dell’acquisizione, l’elaborazione, la restituzione, l’analisi e la gestione di dati di natura metrica o tematica relativi alla superficie della Terra, o a porzioni di essa, ivi compreso l’ambiente urbano, le infrastrutture e il patrimonio architettonico, individuati dalla loro posizione spaziale e qualificati dalla precisione del rilevamento; impiegando, in un ruolo di primo piano, l’informatica nel trattamento dei dati acquisiti. (Spanò, 2018)

Topografia, e informatica dunque, ma anche geodesia¹ (fisica, geometrica e spaziale), cartografia, telerilevamento² (spaziale, aereo e terrestre), fotogrammetria (aerea e terrestre), navigazione (spaziale, aerea, marittima e terrestre), sistemi informativi territoriali (GIS³) e ontologia⁴, con un gran numero di ambiti di applicazione: dalla produzione e l’aggiornamento della cartografia e dei data base topografici, al tracciamento di opere ed infrastrutture, passando per sistemi mobili di rilevamento, i modelli numerici del terreno e delle superfici, la gestione e la condivisione dell’informazione geografica multidimensionale e multitemporale, al rilievo 3D, analisi e gestione di sistemi informativi del territorio e degli edifici, analisi strutturali, rilievi per la geologia fino ai metodi della

1. Geodesia: La scienza che si occupa di studiare forma, dimensioni e il campo gravitazionale della Terra.

2. Telerilevamento: o *remote sensing* si occupa del rilevamento a distanza delle caratteristiche fisiche o morfologiche di oggetti o sistemi mediante uno o più sensori capaci di captare le onde elettromagnetiche emesse, diffuse o trasmesse.

3. Geographic Information System

4. Ontologia: approccio atto a specificare una concettualità.

documentazione di territorio e suoi rischi e vulnerabilità per ottimizzare le strategie delle protezione territoriale e civile, e senza dimenticare i beni culturali e paesaggistici. (Spanò, 2018)

La crisi all'interno della geomatica di scienza e tecnologia, direttamente connesse con le discipline del rilevamento, consente il continuo sviluppo di tecniche e tecnologie per l'acquisizione e la rappresentazione, anche finalizzate alla documentazione, conservazione e tutela del Patrimonio Culturale sul territorio, per la quale la realizzazione di Sistemi informativi Territoriali costituisce uno strumento essenziale di valutazione, di analisi e di supporto alle decisioni.

Al giorno d'oggi la problematica della gestione del rischio per i Beni Culturali riveste un notevole interesse ed è oggetto di numerose ricerche interdisciplinari a livello internazionale. In Italia la Carta del Rischio⁵, messo a punto dall'Istituto Superiore per la Conservazione (già ICR⁶), esplicitando i fattori di vulnerabilità individuale e pericolosità territoriale, è indubbiamente *“un interessante esempio di gestione dell'informazione legata al rischio del bene nel suo contesto territoriale e delle situazioni di pericolosità a cui è esposto.”* (Bitelli, 2010)

Con il fine, dunque, di determinare i criteri e gli indicatori per la valutazione del rischio per un *Bene Culturale*, o in generale, per acquisirne una conoscenza rigorosa, è possibile individuare nella geomatica potenzialità nuove e caratteristiche di notevole interesse rispetto alle metodologie del passato soprattutto in riferimento alle pratiche di gestione del rischio, della mitigazione, alla preparazione, all'emergenza, al recupero e ripristino.

In questo ambito la geomatica, integrando attività che coinvolgano competenze tecnico-scientifiche differenti tra loro, dall'esperto in conservazione e restauro al chimico, dall'ingegnere all'architetto, supporta efficacemente le attività diagnostiche legate al rischio sul bene culturale.

5. Carta del Rischio: SIT rivolto agli Enti statali e territoriali preposti alla tutela del patrimonio culturale per il supporto scientifico e amministrativo.

6. Istituto Centrale del Restauro.

“Le moderne tecniche e tecnologie presentano infatti elementi di grande interesse tra i quali la possibilità di: - effettuare in caso di emergenza operazioni di rilevamento in tempi molto ridotti, anche su aree vaste, con precisioni molto elevate sia in termini assoluti che relativi; - integrare fra loro dati digitali acquisiti con tecniche diverse ed anche in tempi diversi, archiviando quando necessario i dati su database geografici che ne consentano una consultazione efficiente e flessibile; - automatizzare operazioni di rilevamento ripetute, effettuate anche con scansione temporale molto elevata per fenomeni dinamici (monitoraggio in real-time), archiviando i dati su supporto digitale e con possibilità di trigger al presentarsi di situazioni critiche; - mettere a disposizione nuovi strumenti non invasivi di indagine; - offrire tecniche di visualizzazione e rappresentazione innovative, atte a gestire il dato “fedele al vero” ma anche contenuti di realtà virtuale.” (Bitelli, 2010)

1.1 METODOLOGIE TOPOGRAFICHE DI INQUADRAMENTO DEL RILIEVO METRICO

Il rilevamento costituisce un momento di conoscenza imprescindibile quando si opera su un oggetto o sul territorio. Esso fornisce, infatti, il necessario *framework* di riferimento per ogni altra analisi e diagnosi ed è solitamente considerato l'indispensabile base di ogni pratica di progetto e approfondimento ed inoltre *“utile per realizzazioni da ripetersi nel corso del tempo, operando con i metodi della topografia tradizionale mediante total station o con sistemi GNSS”*. (Bitelli, 2010)

Nella fase iniziale di qualsiasi rilievo architettonico è imperativo ancorare l'oggetto dello studio al territorio su cui si colloca, definendo, con la migliore precisione possibile, la posizione (le coordinate) di una serie di punti, denominati vertici, distribuiti in maniera omogenea sul

terreno circostante l'oggetto di studio.

Questi punti dovranno essere distribuiti a terra e abbracciare l'area complessiva del rilievo; la distribuzione di questi vertici nello spazio è fortemente determinata dalle caratteristiche geomorfologiche del sito e dalla vastità della superficie presa in esame.

Le modalità di rilievo potranno prevedere la costruzione di reti, oppure la realizzazione di poligoni - chiuse o aperte - costituite da sequenze di vertici, oppure ancora prevedere, nei casi non complessi e speditivi, semplici basi topografiche che sono finalizzate ad instaurare un sistema di riferimento a partire da una direzione nello spazio, da ottenere mediante la misurazione di angoli e distanze riferite ad un'origine.

I punti saranno dunque materializzati a terra e, determinandone le coordinate in un sistema di riferimento globale o locale, costituiranno la base su cui si appoggerà tutto il rilievo.

La definizione dei vertici materializzati⁸ a terra può essere effettuata tramite l'ausilio di sistemi GNSS (Global Navigation Satellite System), metodi di misurazione che, tramite l'utilizzo dei satelliti, risolvono gli aspetti critici connessi alla misurazione di grandi distanze effettuata tramite i metodi topografici tradizionali.

Dalle coordinate dei vertici così ottenute vengono, in seguito, definiti dei "punti di controllo" sull'oggetto, necessari per le successive elaborazioni tramite tecniche di fotogrammetria o LIDAR⁹ e la successiva restituzione grafica a scala architettonica. Essi sono distribuiti in maniera omogenea e misurati con l'ausilio della celerimensura¹⁰, utilizzando la tecnologia della stazione totale.

Il processo di rilevamento della rete topografica richiede molta attenzione durante la sua esecuzione al fine di evitare errori grossolani in quanto, questi ultimi, influenzeranno tutte le successive fasi dell'elaborazione dei dati.

A tal proposito e per completezza, si ricorda brevemente,

8. Materializzazione di un vertice: Inserire un chiodo o un picchetto con lo scopo di segnalare il punto nel terreno così che possa essere ritrovato in un secondo momento nel caso siano necessari ulteriori misurazioni.

9. Laser Imaging Detection and Ranging.

10. Celerimensura: Modalità di rilevamento topografico speditivo.

che ogni misurazione diretta o indiretta di una grandezza fisica sia soggetta, inevitabilmente, a discrepanze tra il valore misurato e quello assunto come vero, ovvero ad errori. Indipendentemente dal metodo di misurazione adottato non si potrà mai affermare con certezza che il valore sia "esatto", ma resterà soggetto ad un dato grado di approssimazione, maggiore o minore a seconda della metodologia e dello strumento di misurazione impiegato. (Spanò, 2018)

Ricordando, inoltre, che il grado di esattezza che si intende raggiungere con delle misurazioni dipende principalmente dalle possibilità tecniche dello strumento di misura utilizzato in relazione alla sua sensibilità e precisione.

"Lo studio degli errori di osservazione riveste un'importanza fondamentale in tutte le scienze sperimentali, quando cioè si devono effettuare delle misure e si vogliono stabilire i criteri più opportuni per raggiungere una certa approssimazione, valutare le entità degli errori che si sono commessi o determinare i valori numerici da assumere per le grandezze misurate o per altre ad esse collegate da relazioni analitiche".

(Spanò, 2018)

Gli errori di osservazione possono essere di diversa natura e generati, per esempio, dall'inesattezza dello strumento, dall'imprecisione dell'osservatore, o da condizioni fisiche o ambientali.

Essi si suddividono in tre categorie:

1- Gli errori grossolani (di cui fanno parte errori materiali o sbagli).

Questa tipologia è causata da misure eseguite in modo errato. Gli errori così generati risultano sempre individuabili mediante opportuni controlli che sfruttano ad esempio proprietà geometriche e, quindi, facilmente eliminabili (è tipico a tal fine il controllo delle grandezze invarianti come distanza orizzontale e dislivello misurati nei due versi di una direzione).

2- Gli errori sistematici.

Questi errori sono sempre presenti e devono essere infinitesimi perché legati al funzionamento dello strumento di misura; se non risultassero piccoli a sufficienza saranno dunque imputabili alla scorretta calibrazione dello strumento. Sono errori che si presentano sempre con la medesima forma analitica ed anche segno algebrico, ossia fanno sempre aumentare o diminuire le quantità osservate rispetto a quelle effettive. Individuata la causa che li provoca se ne può facilmente ridurre l'influenza sui risultati finali della misura.

3- Gli errori accidentali.

Questa tipologia di errori comprende quelli che sono i più complessi da individuare e risultano dal sommarsi di più casualità, nessuna delle quali preponderante e che agiscono con leggi del caso

Data la possibilità di eliminare la prima tipologia di errori, evitando sbagli nella misurazione e, una volta nota la causa che li ha generati, annullare l'effetto di quelli sistematici, restano da affrontare gli errori accidentali, al fine fornire i valori di "stima" della grandezza e di stima della "precisione" (espressa mediante lo scarto quadratico medio) con cui la grandezza è stata misurata.

Gli studi statistici hanno dimostrato che gli errori di misura hanno un comportamento ben definito e quindi si possono adottare strumenti di calcolo che, dalla molteplicità delle misure, ci riconducono a un valore univoco da attribuire alla quantità di grandezza misurata e al modo di valutarne l'accuratezza (ovvero la vicinanza tra la misura eseguita e la stima assunta come "vera") (Spanò, 2018)

La teoria degli errori¹¹ si occupa appunto di questo, definendo i metodi statistici per determinare i valori più plausibili tra quelli misurati, scegliendo i procedimenti più opportuni per raggiungere il risultato desiderato con la massima economia di tempo e mezzi, al fine di fornire una definizione della precisione raggiunta e per poter assegnare un giudizio di qualità del lavoro eseguito.

¹¹ Teoria degli errori: branca della matematica statistica che studia il comportamento delle misure e la riduzione degli errori.

1.1.1 Metodi GPS/GNSS per il posizionamento satellitare.

Come abbiamo già detto in precedenza, le coordinate dei vertici, materializzati per definire la rete topografica di appoggio, possono essere determinate tramite ricevitore GNSS; questo sistema di misurazione globale permette l'integrazione dei sistemi satellitari, americano (chiamato Navstar GPS¹² o comunemente GPS), europeo (GALILEO¹³), russo (GLONASS¹⁴) e Cinese (BEIDOU¹⁵). (gsa.europa.eu, 2019)

Ognuna di queste costellazioni utilizza tra i 22 e i 35 satelliti, separati tra loro di circa 30° longitudinalmente e di 55-65° rispetto all'equatore, in orbita a circa 19-24 mila km dalla terra e con una velocità di 14.500 km/h, tale da consentirgli di compiere una rotazione terrestre in circa 12 ore.

Il ricevitore GNSS, per determinare la distanza tra i punti di cui si vuole identificare la posizione sulla superficie terrestre ed i satelliti che vengono considerati a questo scopo, misura, il tempo che impiega il segnale radio emesso da ogni satellite per raggiungere l'antenna dello strumento. Assunto che le onde radio viaggiano alla velocità della luce, nota questa velocità, conoscendo esattamente sia il momento di emissione del segnale sia il momento in cui questo viene captato dal ricevitore, risulta semplice determinare la pseudodistanza che li separa (A.Cina, 2014) attraverso l'equazione:

$$Ds = c \Delta t$$

dove:

$Ds [m]$ rappresenta la distanza tra il ricevitore e il satellite.
 $\Delta t [s]$ è il tempo di propagazione (differenza tra invio e ricezione del segnale).

$c [m/s]$ è la velocità della luce nel vuoto, 299792458 m/s.

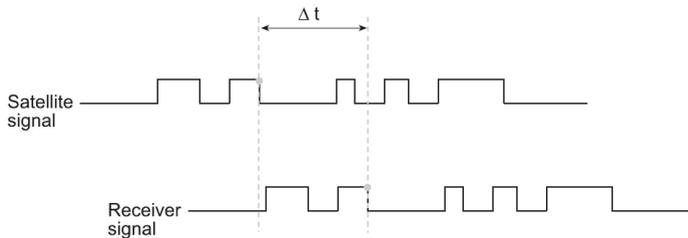
12. NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System

13. programma europeo per servizi di navigazione globali, La scelta del nome vuole onorare il grande Galileo Galilei, dal quale tutto il progetto di navigazione ha preso il nome.

14. Global'naja Navigacionnaja Sputnikovaja Sistema. GLObal NAVigation Satellite System) è un sistema satellitare globale di navigazione russo.

15. sistema di posizionamento satellitare sviluppato dalla Repubblica popolare cinese, prende il nome dall'asterismo della costellazione dell'Orsa Maggiore.

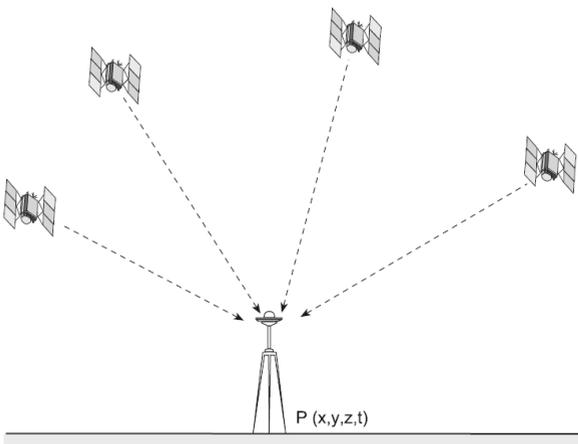
Il tempo di propagazione viene calcolato sui segnali codificati di satelliti e ricevitori, sincronizzati in modo tale da generare lo stesso codice esattamente nello stesso tempo. Sarà dunque sufficiente captare il codice proveniente da un satellite e calcolare quanto prima il ricevitore ha generato il medesimo codice per determinare il tempo che il segnale ha impiegato a coprire la distanza satellite-ricevitore.



Differenza di tempo tra il segnale del satellite e il segnale generato dal ricevitore. I due segnali sono identici ma con differenza di fase.

Fonte: Gomarasca, 2009

Per poter ottenere, invece, le tre coordinate del punto da misurare, senza ambiguità, occorre che il ricevitore GNSS intercetti il segnale da almeno quattro satelliti, così da poter ricavare le coordinate X, Y, Z, (latitudine, longitudine, quota) e determinare l'incognita t, derivata dallo sfalsamento degli orologi montati sui ricevitori rispetto a quelli atomici installati sui satelliti.



Il ricevitore GNSS intercetta il segnale da almeno quattro satelliti, così da poter ricavare le coordinate X, Y, Z, e determinare l'incognita t.

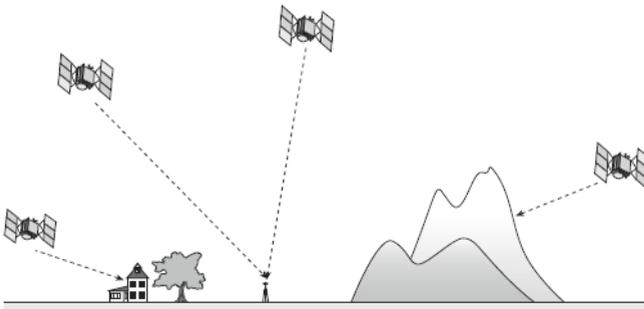
Fonte: Gomarasca, 2009

C'è da considerare tuttavia che, in base a regolamenti interni redatti dagli stati possessori dei sistemi satellitari - nati per usi militari e per pubblica sicurezza - la precisione determinabile in singola frequenza è assoluta, a meno degli errori impressi per garantire la sicurezza militare. Questi errori sono pari a circa 10 metri¹⁶ per il sistema GLONASS, a circa 7/8 metri¹⁷ per Navstar GPS, a circa 15 metri¹⁸ per GALILEO e intorno ai 10 metri¹⁹ per BEIDOU.

Per ovviare a questi errori imposti ai sistemi, al fine di ottenere un rilievo di precisione, si utilizzano tecniche di posizionamento differenziale basate sulla combinazione dei dati osservati contemporaneamente da due (o più) ricevitori GNSS, ottenendo così la significativa riduzione o eliminazione dei principali errori relativi a ricevitori e satelliti, permettendo di raggiungere in tal modo, con misurazioni prolungate, precisioni millimetriche. (A.Cina, 2014)

L'uso di sistemi satellitari per l'individuazione di coordinate ha evidenziato e reso urgente la carenza di un unico sistema di riferimento, valido e riconosciuto in tutto il globo terrestre. Per sopperire a questa mancanza è stata creata, dunque, una rete di triangolazione mondiale e di reti nazionali di coordinate note, nei due sistemi di riferimento (geocentrico e cartografico), per legare le nuove misurazioni satellitari alla cartografia preesistente e per tutte le nuove produzioni cartografiche.

Nel 1984 venne determinato un nuovo modello



16. government regulation RF n°326 from 28 may 2007 "About the order of accessing, use and providing of geospatial data"

17. global positioning system standard positioning service performance standard 4th edition sept.2008

18. Galileo Mission High Level Definition, v3, September 2002.

19. BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard V.2.0

La presenza di edifici alti, rilievi montuosi, alberi, ostruzioni varie può interferire con il segnale GNSS.
Fonte: Gomarasca, 2009

matematico che descrive il nostro pianeta dal punto di vista geometrico, geodetico e gravitazionale, consentendo di adottare un unico sistema di riferimento mondiale, in accordo con il moto dei satelliti. L'acronimo che identifica questo sistema globale è WGS84, (World Geodetic System 1984).

Nel 1992, l'Istituto Geografico Militare - I.G.M. - ha provveduto all'impianto di una nuova rete geodetica fondamentale italiana, terminata nel 1995, che, in accordo con il WGS84, è stata chiamata IGM95. (igmi.org)

La definizione di una rete topografica per mezzo di strumenti satellitari non è, tuttavia, sempre fattibile in quanto non sempre è possibile mantenere costante la comunicazione con i satelliti; le cause più frequenti sono imputabili ad interferenze causate dalla presenza di edifici alti, rilievi montuosi, alberi, ostruzioni varie o, in generale, elementi di disturbo in prossimità dello strumento di ricezione, che impediscono al ricevitore di "vedere" direttamente la volta celeste e dunque comunicare con i satelliti.

Il ricevitore terrestre utilizzato per sfruttare i sistemi GNSS, si compone, generalmente, di un corpo fisso con antenna montato su un treppiede e di un dispositivo di controllo portatile o un'antenna di ricezione collegata ad un dispositivo di archiviazione e preelaborazione dati.

Sul campo è possibile acquisire i dati della rete topografica, adottando due metodologie di acquisizione differenti, entrambe basate su tecniche di osservazione differenziale: le procedure statiche e le procedure dinamiche.

Le prime, definite "statiche", prevedono il posizionamento di un ricevitore fisso su un vertice di riferimento (master), mentre un secondo o più ricevitori mobili (stazioni remote) si sposteranno sui punti da determinare, per un tempo tale da consentire la misurazione di una base in modo accurato. Il ricevitore fisso calcolerà le correzioni di "pseudorange"²⁰ e le loro variazioni nel tempo di misura, che verranno trasmesse ai ricevitori remoti, i quali, a loro volta, calcoleranno le posizioni dei vari vertici con le osservazioni corrette.

20. pseudorange: la distanza che intercorre tra il centro di fase dell'antenna del ricevitore GPS e il centro di fase dell'antenna del satellite GNSS.

Questa metodologia, per determinare le coordinate dei punti, teoricamente, necessita della “visibilità” di almeno due satelliti per almeno tre epoche²¹ di misura, anche se, in pratica, *“il risultato non è accettabile a causa di un mal condizionamento del sistema di equazioni di osservazione, che richiederebbe epoche maggiormente spaziate, ad esempio alcune ore, per assicurare una conformazione geometrica abbastanza diversa”* (A.Cina, 2014, p 33). Qualora, viceversa, si osservino almeno 4 satelliti “è possibile la soluzione istantanea della posizione, dove le quattro incognite (X Y Z e bias²²) sono risolte ad ogni epoca” (A.Cina, p 33).

Il secondo metodo utilizzato per acquisire i dati della rete topografica è denominato RTK (Real Time Kinematic) ed è una procedura definita “dinamica”. Consiste nel posizionamento di un ricevitore montato su treppiede in corrispondenza di uno dei vertici materializzati e di un secondo ricevitore, detto rover, sintonizzato con il primo, montato su di una palina e trasportato in corrispondenza degli altri punti da un operatore.

Rispetto al metodo statico, grazie all’implementazione della tecnologia RTK, si impiega solo qualche istante per l’acquisizione dei dati e, quindi, la misura dei punti avviene in maniera speditiva. Questo sistema necessita, però, della visibilità di un minimo di cinque satelliti sulla volta celeste durante l’inizializzazione (trimble.com) – ossia il procedimento che consente la determinazione dell’ambiguità iniziale (Nikon Instrument S.P.A), *“anche nel posizionamento cinematico punto singolo con misure di fase, rispetto a quanto detto per il GPS, devono ancora essere considerati gli n_j bias intercanale incogniti: in questo caso la configurazione base è:*

$$n_j \cdot nt \geq 4nt + 2n_j \text{ da cui } nt \geq 2n_j / n_j - 4$$

che porta ad un numero minimo di 5 satelliti con 10 epoche di misura” (A.Cina “dal GPS al GNSS”, pp 39).

Entrambe le metodologie di acquisizione sono soggette

21. epoche: intervallo di tempo tra due misure GPS consecutive. I valori più comuni variano da 1 a 30 sec, mentre i ricevitori più recenti sono in grado di eseguire acquisizioni anche ogni 0.1 sec (10Hz).

22. errore generato dalla differenza fra i tempi degli orologi atomici del satellite e quelli al quarzo del ricevitore.

a variazioni della precisione dovute al numero di satelliti che si riescono a "vedere"; maggiore sarà il numero di satelliti, migliore sarà, conseguentemente, la precisione dei risultati.

Nella pratica per escludere i molti errori che possono entrare in gioco si fa riferimento ad elevate ridondanze di misure e, inoltre, i satelliti visibili sono generalmente in numero molto superiore al minimo.

Si consideri infine che i sistemi di posizionamento satellitare, oltre che per fini di appoggio topografico sono utilizzati, tra gli altri scopi, anche dai sistemi di navigazione dei droni - largamente usati in ambiti di rilievo e di cui esporremo le caratteristiche più avanti - che per le operazioni di volo automatizzato richiedono un minimo di sette satelliti per poter volare in sicurezza.

1.1.2 MISURE TOPOGRAFICHE DI DETTAGLIO

Una volta identificata la rete topografica o la poligonale di vertici di appoggio, la fase successiva del rilievo topografico è rappresentata dall'acquisizione delle misure di dettaglio dei punti sull'oggetto.

In questa fase si procede con la celerimensura di punti chiave dell'oggetto studiato (colmo del tetto, spigoli, ecc) o di segnali, detti marker, distribuiti precedentemente in maniera omogenea sulla superficie dello stesso che, nelle moderne tecniche di rilievo metrico 3D, hanno la funzione di punti di controllo.

Lo strumento che consente di rilevare queste misure topografiche è la stazione totale; essa permette di misurare gli angoli azimutale e zenitale nonché la distanza inclinata che va dal punto di stazionamento dello strumento al punto che si intende misurare.

Questa tecnologia, sfrutta i principi cardine della topografia, utilizzati fino al secolo scorso e risalenti all'antichità; in particolare nel XVII secolo, il matematico e geodeta Snellius²³, li applicò in Olanda per calcolare la circonferenza meridiana della Terra, partendo da una base nota e ricoprendo il territorio in esame con una serie di punti misurati attraverso il metodo della triangolazione.

Ogni punto misurato tramite la stazione totale viene, dunque, triangolato identificando una distanza e due angoli, ovvero la distanza inclinata, l'angolo azimutale e l'angolo zenitale. I dati che ne derivano riportano, quindi, coordinate sferiche con origine nel centro strumentale; queste coordinate sferiche, in fase di restituzione, verranno convertite nelle corrispettive cartesiane per poter lavorare più agevolmente sul modello ed interfacciarsi univocamente con i software utilizzati.

Queste misure, come detto precedentemente, fungono da punti di controllo per le tecniche fotogrammetriche e di laser scanning, ottimizzando così i processi e garantendo,

23. Willebrord Snel van Royen (1580- 1626), latinizzato come Willebrordus Snellius, matematico e astronomo olandese.

inoltre, un maggiore controllo sulla propagazione dell'errore.

La stazione totale, grazie all'elevato automatismo del sistema di lettura per le direzioni angolari integrato con il distanziometro, permette di misurare, in breve tempo, molti punti distribuiti sull'oggetto e di archiviare le misurazioni all'interno dello strumento stesso, che saranno elaborate dagli operatori in fase di restituzione.

Le moderne stazioni totali basano le loro misurazioni sul calcolo del tempo che impiega l'impulso elettromagnetico, emesso dallo strumento, dal momento in cui viene trasmesso a quando ne fa ritorno, dopo essere stato riflesso sulla superficie dell'oggetto, considerando, inoltre, la differenza di fase tra impulsi.

La misurazione può essere in "infra-red", ossia un impulso elettromagnetico, direzionato verso un prisma, che riflette alla stazione il medesimo raggio, oppure in "reflector-less", ovvero un impulso direzionato verso un qualsiasi punto di interesse, riflesso alla stazione dalla componente materica costituente l'oggetto misurato. I punti di interesse, solitamente, sono particolari dell'oggetto facilmente riconoscibili, come spigoli, dettagli particolari, oppure target.

Il rilievo topografico di dettaglio fino a non molti anni fa era largamente impiegato per tutte le applicazioni a scala architettonica e maggiori; l'introduzione delle nuove tecnologie, con il loro più elevato grado di automatismo, ha determinato l'impiego di questo metodo prevalentemente a integrazione di altri.

1.2 Le tecniche LIDAR

I sistemi a scansione distanziometrici meglio conosciuti come laser scanner, o LIDAR (Light Detection and Ranging), sono strumenti di acquisizione che, tramite un processo di digitalizzazione, convertono informazioni di tipo analogico in digitale.

Questo processo avviene attraverso il puntamento di un sensore che, indiscriminatamente, acquisisce - tramite una selezione di punti che seguono un ordine precostruito - tutto ciò che si trova nel suo raggio di azione, convertendo le forme fisiche in una serie di coordinate note e di informazioni radiometriche.

Le caratteristiche intrinseche di questa tecnologia tra cui l'elevata precisione, l'alta risoluzione dei punti rilevati, la notevole automazione e velocità di acquisizione, nonché le dimensioni compatte dello strumento, consentono di eseguire la fase di misura in tempi molto ridotti rispetto ad altri strumenti, ottenendo rapidamente enormi quantità di dati che, in un secondo momento, saranno selezionati ed interpretati (Spanò, 2016). Tale tecnologia, tuttavia, restituisce una sovrabbondanza di informazioni che, se non correttamente interpretate, possono distrarre dall'obiettivo principale del rilievo.

I sistemi a scansione sono suddivisi in due macrocategorie: i sistemi distanziometrici e i sistemi triangolatori.

I primi si avvalgono del consolidato sistema utilizzato anche dalle stazioni totali, dove ogni punto viene rilevato dalla misura indiretta di una distanza e due angoli mediante onde elettromagnetiche, calcolando la differenza di fase tra l'onda emessa dallo strumento e quella riflessa dall'oggetto, o il tempo di volo dell'onda.

L'onda elettromagnetica utilizzata per questo scopo è un raggio di luce laser in mono frequenza e unidirezionalità, orientato nello spazio utilizzando un dispositivo di rotazione

a specchio che funge da emettitore e ricevitore, coadiuvato da una rotazione dello strumento stesso.

I sistemi triangolatori, invece, sono dotati, oltre che dello specchio rotante, anche di un ricevitore separato; basandosi sui principi propri della fotogrammetria riescono a raggiungere precisioni subcentimetriche (Rinaudo, 2007), identificando il punto come l'intersezione di due raggi di direzione nota - definite dal raggio emesso e da quello riflesso dall'oggetto - che andranno a determinare, utilizzando la distanza tra l'emettitore e il ricevitore del segnale, due angoli.

Questi strumenti, con i dovuti accorgimenti, possono operare sia da mezzi mobili che da postazioni fisse. Gli ambiti applicativi della tecnologia LIDAR non si limitano unicamente al rilievo architettonico ma spaziano anche al rilievo territoriale e urbano, in particolar modo mediante sistemi a scansione mobile, installati su aerei o elicotteri. Nel nostro caso saranno presi in considerazione solo i laser scanner terrestri considerati fissi.

Come in ogni operazione di rilievo, anche durante l'uso del LIDAR è necessaria una attenta fase di progettazione, previa al rilievo stesso, riguardante la precisione, la portata dello strumento, l'obiettivo da raggiungere e il tempo di esecuzione e l'appoggio topografico necessario per il controllo dei risultati e la georeferenziazione.

Durante la progettazione di un rilievo tramite un laser scanner terrestre è importante considerare, oltre i fattori descritti precedentemente, la copertura dell'oggetto e le tecniche che verranno utilizzate successivamente per la rototraslazione delle singole scansioni in un unico sistema di riferimento. Per garantire che la rototraslazione sia accettabile è indispensabile che le scansioni adiacenti abbiano un overlapping²⁴ ideale del 30%, infatti "con ricoprimenti superiori al 30% non si hanno incrementi di precisione significativi tali da giustificare l'adozione di ricoprimenti superiori" (Rinaudo, 2007) Questo approccio attualmente si considera abbastanza superato per via

24. Overlap: si intende la sovrapposizione tra due fotogrammi adiacenti

dell'affinamento degli algoritmi *scan matching* ICP²⁵. Questi algoritmi prevedono che l'unione sia basata sulla forma e la sovrapposizione delle nuvole richiedendo, dunque, overlapping più elevati che, sebbene non aumentino l'accuratezza, sicuramente velocizzano i processi di registrazione e arricchiscono la densità della nuvola stessa. (Spanò, 2018)

Questa tecnologia ha portato una svolta nel concetto di rilievo e nello svolgimento delle procedure operative. Se fino a non molto tempo fa, per eseguire un rilievo, venivano scelti i punti principali da rilevare secondo criteri logici, procedendo poi alla misurazione degli stessi; ora, tramite questa automazione, si ha la possibilità di scegliere i punti in un secondo momento. Vi è, però, il rischio che punti utili al rilievo, come per esempio gli spigoli, non vengano acquisiti poiché non compresi nella sequenza automatica dello strumento.

Occorre, quindi, sottolineare come il risultato di una scansione 3D vada considerato non come un rilievo metrico, bensì come una serie di informazioni acquisite meccanicamente a partire dalle quali è necessaria una fase interpretativa intelligente. (Rinaudo, 2007)

1.3 LA FOTOGRAMMETRIA.

“La fotogrammetria è l’arte e la scienza per determinare la posizione e la forma degli oggetti a partire da fotografie.” (Kraus, 1994)

“La fotogrammetria è la scienza che consente di ottenere informazioni affidabili di oggetti fisici e dell’ambiente attraverso processi di registrazione misura e interpretazione di immagini fotografiche e campioni di energia radiante elettromagnetica e altri fenomeni.” (Slama, C. 1980)

La fotogrammetria, come si evince dalle parole di Kraus e di Slama, è una tecnica di rilievo indiretto che permette di far derivare da immagini di diverso tipo le misure reali e la geometria dell’oggetto studiato senza un contatto con lo stesso.

Ormai fortemente consolidata e fondamentale nel campo della geomatica, la fotogrammetria ha trovato facile applicazione nel campo dello studio del territorio ma si può agevolmente applicare a qualunque oggetto, senza distinzione di forma o dimensione, rilevandone, grazie ad algoritmi molto avanzati, una moltitudine di punti capaci di restituirne una descrizione completa ed esauriente. Oltre che per rilievi architettonici, territoriali e per il censimento forestale e agricolo è utilizzata, infatti, anche in campo industriale, ad esempio in metallurgia per il controllo delle saldature e, ai fini della salvaguardia ambientale, nei rilievi di fondali marini in prossimità delle coste.

La fotogrammetria può essere suddivisa, in base al suo utilizzo, in fotogrammetria terrestre (o *close range*) e fotogrammetria aerea²⁶; i principi restano tuttavia comuni ad entrambi i campi. Nel primo caso le prese avvengono da terra e gli oggetti si trovano a distanze inferiori a 200 m, per questo motivo si definisce anche *“fotogrammetria dei vicini”*. Nel secondo caso, ossia la fotogrammetria aerea, o *“fotogrammetria dei lontani”*, le prese avvengono da un vettore aereo, acquisendo fotogrammi relativi ad oggetti che si trovano a distanze superiori a 200 m. (Cannarozzo, 2012)

26. che sarà approfondita nel testo nella sua variante da UAV

1.3.1 NASCITA ED EVOLUZIONE DELLA FOTOGRAMMETRIA.

L'evoluzione della fotogrammetria si può sommariamente suddividere in tre fasi ben distinte: una prima fase analogica, una intermedia analitica e l'attuale digitale. Le origini scientifiche della fotogrammetria risalgono alla fine del XIX secolo. (Paris 2012)

Questa disciplina nacque nel 1859 quando il colonnello francese A. Laussedat con i suoi scritti "*Iconometria*" e "*Metrofotografia*" presentò all'Accademia delle Scienze di Parigi le sue prime teorie ed esperimenti su un metodo che permetteva la determinazione di coordinate di punti di un oggetto, ricavate da una coppia di fotografie, partendo dalle geometrie proiettive generate dalle stesse. Nello stesso periodo, A. Meydenbauer eseguì, per la prima volta nella storia, un rilievo fotogrammetrico applicato ad architetture. (Kraus 1994)

Lo sviluppo fotogrammetrico ebbe una svolta fondamentale quando, nel 1901, Pulfrich inventò la stereo-fotogrammetria e lo stereo-micrometro, costruito dalla ditta Zeiss, per la restituzione analogica speditiva di opportune coppie di fotogrammi, finalizzati al rilevamento planimetrico e altimetrico. Con questo strumento ottico-meccanico, immagini della medesima area, catturate tramite una camera, venivano esplorate da due indici meccanici dai cui movimenti si ricavano, mediante giochi di viti micrometriche e meccanismi vari, distanze e quote relative dei diversi punti dell'area indagata.

Lo stereo-micrometro e il principio della marca mobile²⁷, permisero di superare le difficoltà dell'ambiguo riconoscimento dei punti omologhi su due fotogrammi diversi e aprirono la strada ad innumerevoli innovazioni che portarono, sette anni più tardi, nel 1908, E. De Orel alla costruzione dello stereo-autografo (Kraus,1994) costituito, fondamentalmente, dall'abbinamento di uno stereocomparatore e di un cartografo mediante l'utilizzo di un meccanismo capace di trasmettere, a una punta scrivente,

27. marca mobile:
nella fotogrammetria analitica
placchette circolari riportate sulle
lastre su cui sono incise le marche di
collimazione stereoscopica.

i movimenti che venivano imposti allo stereocomparatore per collimare un punto dello stereogramma; venne così eliminata la necessità di ogni sorta di calcolo, consentendo anche di ottenere direttamente piani a curve di livello del terreno fotografato, senza più ricorrere alla trasformazione dei piani quotati, riconoscendo così in modo continuo e autonomo i punti omologhi. Questo strumento fu il capostipite di una serie di apparecchi restitutori automatici analogici in cui la ricostruzione degli oggetti rilevati si ottiene con dispositivi fisici, come bacchette metalliche e raggi luminosi, che riproducono all'inverso il fenomeno della presa.

Fu dunque grazie a questo strumento che, per la prima volta, vennero estratte, partendo da due fotogrammi terrestri del terreno, curve di livello e linee planimetriche, in maniera continua.

Durante la Prima Guerra Mondiale (1915-1918) e con l'avvento dei primi aerei nei campi di battaglia, si teorizzò la possibilità di ottenere dati e informazioni di obiettivi militari sensibili dall'alto, introducendo, così, il concetto di "aerofotogrammetria".

Nel 1923, basandosi sui principi dello stero-autografo, venne sviluppato da W. Bauersfeld, sempre con la collaborazione della Zeiss, un nuovo strumento, detto stereo-planigrafo, ossia un restitutore a proiezione ottica schematicamente costituito - nei modelli più recenti - da due camere di restituzione, geometricamente e otticamente identiche alla camera da presa e suscettibili dei tre movimenti angolari, di inclinazione longitudinale, inclinazione trasversale e di sbandamento, da un meccanismo restitutore, da un dispositivo di osservazione stereoscopica, da un tavolo con coordinatografo e, in ultimo, da un registratore di coordinate. (Cannarozzo, 2012)

Verso la fine degli Anni '40 del Novecento, il rapido sviluppo del calcolo elettronico provocò un profondo mutamento nella fotogrammetria; infatti, l'avvento dei calcolatori

ha via via sostituito i componenti ottico-meccanici negli stereo-restituitori, trasferendo anche parte del processo fotogrammetrico su calcolatori esterni. (Kraus, 1994)

La crescente potenza dei calcolatori raggiunta a fine degli anni 50 favorì lo sviluppo della *fotogrammetria analitica*, dove il passaggio dalla coppia stereoscopica di fotogrammi alla relativa proiezione ortogonale avviene grazie alla soluzione di 8 equazioni in 3 incognite, elaborate dal computer; bisognerà, tuttavia, attendere gli anni '70 per assistere ad un notevole aumento della qualità nella fotogrammetria analitica architettonica. (Paris 2012)

La fotogrammetria analitica, in uso tra gli anni '70 e gli anni '90, prevedeva la disponibilità e l'utilizzo di uno stereo-restitutore analitico con annesso personal computer e software dedicato, oltre alla dotazione di una camera metrica²⁸. (Paris 2012)

Nelle ultime due decadi del XX secolo, con l'evoluzione della tecnologia digitale applicata alla fotografia, il fotogramma passò dall'essere analogico (ossia prodotto di una reazione chimica all'esposizione della luce su un supporto flessibile), a digitale, con immagini costituite da una serie di informazioni radiometriche catturate da un sensore rigido, indeformabile, composto da *pixel*²⁹.

Il passaggio dalla tecnologia analitica a quella digitale è avvenuto seguendo due strade parallele: da un lato si è proceduto all'informatizzazione del processo di stereo-restituzione; il computer, prima relegato ad assistente, ha sostituito completamente le macchine ottico-meccaniche. Dall'altro lato *"si è assistito al lento, ma inesorabile, abbandono del fotosensibile alogenuro d'argento, che ha costituito, per più di un secolo, l'anima della tradizionale pellicola fotografica."* (Paris 2012)

Per agevolare l'elaborazione delle immagini digitali la fase di processing fotogrammetrico si trasformò, dunque, nel tempo, portando consistenti innovazioni; le più importanti dal punto di vista metodologico riguardano lo studio e la messa a punto di algoritmi per l'automazione dei processi

28. Camera metrica: fotocamera appositamente costruita per la fotogrammetria, in cui i valori di orientamento interno e distorsione dell'obiettivo vengono determinati dal costruttore e fornite con il relativo certificato di calibrazione.

29. picture element

tramite l'integrazione di strumenti software specifici, basati su principi di computer vision³⁰ (Spanò 2018) e computer graphics, fino alle attuali tecniche di Structure from Motion (SfM). Quest'ultime *"consentono, da una sequenza di immagini, di ricostruire il modello stimando i parametri della camera al momento della presa della sequenza (motion) e il modello geometrico della scena (structure)"*. (Roggero 2013)

Le immagini, quindi, non calibrate e riprese come immagini stereoscopiche multiple, vengono processate al fine di determinare le corrispondenze di punti fra di esse.

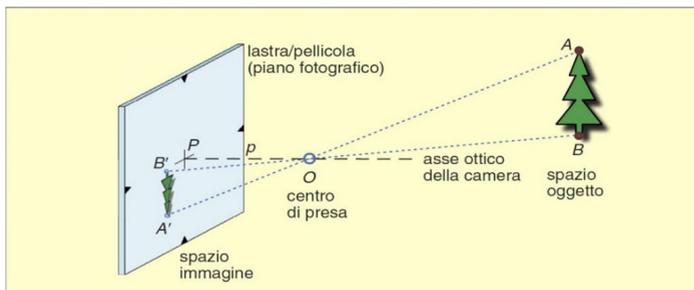
30. Computer vision: quella disciplina che analizza e reinterpreta in chiave informatica la geometria proiettiva della visione.

1.3.2 PRINCIPI GEOMETRICI DELLA FOTOGRAMMETRIA.

La fotogrammetria, come già anticipato, è la tecnica che consente di determinare la posizioni dei punti di un oggetto reale utilizzando le posizioni dei punti corrispondenti sulle immagini acquisite, o per meglio dire, sui *fotogrammi*, in quanto scattati per fini metrici.

Al fine di ricostruire la posizione e la forma degli oggetti a partire dai fotogrammi è indispensabile conoscere le relazioni geometriche in base a cui si sono formate le immagini, ovvero relazioni geometriche tra la posizione dei punti dell'oggetto reale e la posizione degli stessi sul fotogramma facendo corrispondere, dunque, ad ogni punto reale uno corrispondente sul fotogramma. (Cannarozzo, 2012)

I fotogrammi possono essere intesi, con sufficiente approssimazione, come una prospettiva centrale, geometricamente rigorosa, dell'oggetto di studio, in considerazione del fatto che i raggi proiettanti che congiungono i punti dell'oggetto con i corrispondenti sulle immagini, si incontrano tutti in un medesimo punto, definito "centro di proiezione", situato ad una distanza dalla pellicola/sensore pari alla distanza focale dell'obiettivo utilizzato per lo scatto. Si stringe così una corrispondenza biunivoca tra i punti dell'oggetto tridimensionale e le loro



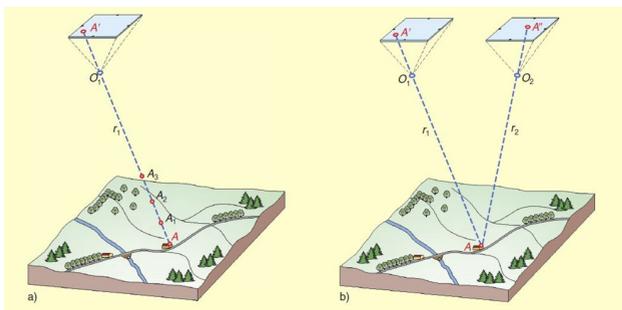
Fonte: Cannarozzo, 2012

proiezioni sul fotogramma (bidimensionale). (Kraus, 1994)
Questa associazione analitico-geometrica che intercorre tra i punti, si basa su una relazione proiettiva tra ogni punto dell'oggetto, il centro di proiezione e il punto sul fotogramma.

Da un singolo fotogramma non sarà possibile, però, estrarre le informazioni necessarie a definire le dimensioni e la posizione di un oggetto tridimensionale. Di fatto sarà presente un solo raggio che collega il punto immagine, il centro di presa e il punto sull'oggetto, rendendo solo certa l'appartenenza del punto oggetto alla retta proiettante, senza però poter stabilire in quale punto della retta si collochi. In questo caso è possibile risalire solamente alle misure bidimensionali, attraverso raddrizzamento fotografico, e soltanto nel caso in cui l'oggetto fotografato risultasse piano. (Roggero 2013)

Il problema, tuttavia, si risolve disponendo di una secondo fotogramma che riprenda lo stesso soggetto da un punto di presa differente, così che, grazie all'intersezione di raggi che derivano dai punti omologhi dei due differenti fotogrammi, sia possibile, attraverso la soluzione geometrico-matematica dei triangoli semplici, determinare la posizione del punto reale corrispondente. (Cannarozzo, 2012)

Questa soluzione, comunque, è applicabile solo nel caso in cui l'orientamento dei fotogrammi e dei centri di proiezione siano conosciuti a priori e siano appartenenti, inoltre, ad un piano parallelo al piano di proiezione, nonché risultino, tra loro, complanari.



Fonte: Cannarozzo, 2012

Come si può notare nell'immagine, il punto A^l , proiettato su un singolo fotogramma con centro di presa O^1 , non sarà l'omologo del solo punto A sul terreno (oggetto), ma anche per tutti gli infiniti altri punti A^1, A^2, \dots , che si trovano sul raggio proiettante $r_1 (AO_1A^l)$, rendendo la soluzione indeterminata

Considerando, invece, un caso più generale e realistico, per la definizione delle informazioni spaziali dei punti oggetto ed immagine, è necessario svolgere operazioni analitiche più complesse, attraverso il calcolo dei parametri di orientamento interno specifici della camera e le equazioni di *collinearità* (ottenute da relazioni geometrico-analitiche), atte a conoscere l'orientamento esterno e dunque la posizione della camera nello spazio rispetto all'oggetto. (Roggero 2013)

"Il problema di esprimere la posizione di detti punti, necessariamente riferiti a diversi sistemi di riferimento, sarà risolto analiticamente mediante una rototraslazione spaziale dei sistemi." (Spanò 2018)

Mentre in passato, nella fotogrammetria analitica e analogica, queste stesse operazioni venivano effettuate con strumenti meccanico-ottici di tipo analogico, come i *fotorestituitori* - che permettevano di stabilire la posizione del generico punto A nell'ambito di uno spazio oggetto ricostruito in scala ridotta - attualmente, nella fotogrammetria digitale, queste operazioni sono svolte direttamente da software capaci di risolvere in breve tempo queste equazioni a più incognite. (Cannarozzo, 2012)

1.3.3 IL PROCESSO FOTOGRAMMETRICO.

Il processo fotogrammetrico, qualunque sia il tipo di tecnica fotogrammetrica utilizzata (analogica, analitica o digitale), si articola in tre fasi fondamentali, atte a garantire la corretta esecuzione dello stesso: fase di presa o acquisizione, fase di orientamento e fase di restituzione. Per poter svolgere un rilievo fotogrammetrico è inoltre indispensabile una fase precedente all'acquisizione: *l'appoggio topografico*, essenziale per l'orientamento e la georeferenziazione. (Roggero 2013)

Durante questa prima fase di georeferenziazione vengono individuati diversi punti d'interesse sull'oggetto, che successivamente verranno collimati sui fotogrammi, identificandone le coordinate piano altimetriche mediante stazione totale e sistemi satellitari. I punti di interesse - identificati a terra o sull'oggetto, e distribuiti omogeneamente su tutta l'area d'interesse - solitamente, sono particolari dell'oggetto facilmente riconoscibili, come spigoli, dettagli particolari, oppure target (cartacei, plastici o lignei), raffiguranti forme a scacchiera o a mirino, che ne facilitano l'identificazione durante le fasi di presa e post-elaborazione.

Fase 1: Acquisizione; è la fase relativa alla ripresa dei fotogrammi mediante le opportune tecniche.

Fase 2: Orientamento; vengono eseguite le operazioni per la determinazione dei parametri che consentono di definire le relazioni geometrico-analitiche tra i centri di presa e i fotogrammi, identificando univocamente la posizione della camera al momento della presa.

Fase 3: Restituzione; questa fase del processo fotogrammetrico è molto articolata e prevede *“l'esecuzione delle misure sul modello stereoscopico conseguente l'orientamento dei fotogrammi, la determinazione delle*

coordinate tridimensionali dei punti oggetto, il controllo e l'integrazione con rilievi ulteriori (editing) e la rappresentazione grafica finale" (Spanò 2018) al fine di effettuare misurazioni sul modello dell'oggetto ricostruito, utilizzando degli strumenti restitutori, capaci di produrre, come risultato finale, una rappresentazione grafica, un insieme numerico di coordinate o un'immagine fotoraddrizzata. (Cannarozzo, 2012)

FASE DI ACQUISIZIONE.

In questa fase vengono acquisiti i fotogrammi che rappresenteranno l'oggetto. Per scongiurare errori di sorta, si esegue uno studio preventivo su dove e come verranno acquisiti i fotogrammi; ciò al fine di garantire un ricoprimento stereoscopico omogeneo dell'oggetto ed una risoluzione adeguata, in base alla finalità del progetto di rilevamento e basandosi sull'osservazione dell'oggetto di studio e del contesto in cui esso si colloca.

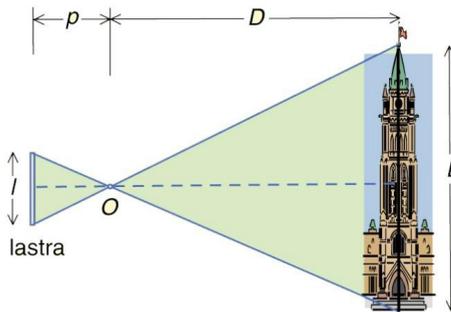
Qualunque sia la tecnica di ripresa fotografica utilizzata, l'esigenza grafica di rappresentazione è un concetto chiave da considerare a priori. Il rilievo dovrebbe essere condotto in funzione di una scala di rappresentazione, ritenuta come la più appropriata alla restituzione grafica delle informazioni raccolte e che definirà il grado di precisione ottenibile in fase di restituzione.

La scala dei fotogrammi si definisce come rapporto tra la dimensione del fotogramma l e la corrispondente dimensione nella realtà L rappresentata da esso.

Non essendo nota, a priori, la dimensione reale L , il valore di scala sarà dunque ricavato da un rapporto equivalente, frutto di una constatazione geometrica, dato dall'uguaglianza tra il rapporto delle basi delle piramidi di proiezione e quello tra la distanza focale e la distanza dell'oggetto dal centro di presa. Tenendo a mente l'impossibilità di variare le caratteristiche della macchina fotografica l e p durante la presa, la variazione della scala del fotogramma potrà avvenire unicamente con il variare

della distanza della camera dall'oggetto.

In funzione dalla complessità geometrica dell'oggetto, dal contesto nel quale è inserito e da altri elementi in prossimità, spesso, una sola tecnica di ripresa fotografica potrebbe non essere sufficiente a garantire un'acquisizione esaustiva dell'oggetto di analisi, rendendo dunque necessaria una strategia di ripresa che combini differenti tecniche di acquisizione.



La scala del fotogramma considerando uno schema di presa terrestre. Fonte: R. Cannarozzo 2012

Dunque, come si è esplicitato nel paragrafo inerente le basi teoriche, se l'obiettivo è quello di ottenere le coordinate spaziali di un punto, è indispensabile, in linea con il concetto di presa stereoscopica, che esso sia visibile su almeno due fotogrammi. Questi, ripresi dalla camera da due centri di presa differenti (la cui distanza viene definita base), avranno una zona comune, definita area di sovrapposizione o overlap, in cui i raggi omologhi definiranno le coordinate spaziali dei punti in comune. In linea generale, al fine di evitare che alcuni punti siano visibili in un solo fotogramma, l'overlap dovrebbe essere intorno al 60%, (fino a raggiungere l'80-90% nel caso della fotogrammetria digitale, che utilizza le tecniche di Image Matching e Structure from Motion); le particolari complessità geometriche dell'oggetto potrebbe, tuttavia, richiedere una percentuale di ricoprimento maggiore.

Per quanto riguarda gli schemi di presa - ovvero come si

devono acquisire le immagini - oltre al ricoprimento citato precedentemente, la disposizione della camera non è soggetta a particolari vincoli restrittivi, fatto salvo il requisito imperativo di variare, sempre e sufficientemente, il centro di presa, così da generare una base, indispensabile affinché l'orientamento possa andare a buon fine. (Roggero 2013)

L'ORIENTAMENTO

In fotogrammetria, quando si fa riferimento all'orientamento, è importante ricordare che questa fase, come sarà meglio precisato di seguito, si identifica con due operazioni distinte: la prima, definita *orientamento interno* è legata alla stima dei parametri della camera; la seconda, definita *orientamento esterno*, è il procedimento mediante il quale viene determinata la posizione della camera al momento della presa in funzione dei raggi proiettanti. (Cannarozzo, 2012)

L'orientamento interno è rappresentato dall'insieme di parametri che consentono di ricostruire la metrica della proiezione centrale, quindi delle stelle di raggi proiettanti. I parametri sono uguali per tutti i fotogrammi, in quanto legati alla camera utilizzata nella presa - che si presuppone essere sempre la stessa - e vengono forniti dal costruttore della camera (metrica) in appositi documenti (certificati di calibrazione) o, nel caso della fotogrammetria digitale, anche se non sono noti a priori - in quanto possono essere utilizzate camere non professionali e non calibrate - vengono stimati "on the fly" tramite algoritmi di SfM. (Spanò, 2018)

Ricostruiti i raggi proiettivi grazie all'orientamento interno, è indispensabile ricollocare i fotogrammi nello spazio nella medesima posizione che avevano al momento della presa. Questo procedimento viene denominato orientamento esterno.

L'orientamento esterno si divide, a sua volta, in due parti, una conseguente all'altra: la prima parte viene chiamata *orientamento relativo* e determina la posizione

dei fotogrammi nello spazio, tramite l'individuazione dei raggi proiettanti i cui parametri sono calcolati grazie alle equazioni di collinearità, generando così un modello tridimensionale, che risulterà restituito, tuttavia, in una scala arbitraria e in un punto generico dello spazio, svincolato, quindi, dal sistema di riferimento di coordinate assolute.

La seconda parte del processo prende il nome di *orientamento assoluto*; con questa operazione, il modello ricavato nella fase precedente, verrà rototraslato e scalato, grazie alla conoscenza della posizione di alcuni punti di appoggio con coordinate note, riferendolo quindi al sistema di coordinate assolute e dimensionandolo alla scala desiderata.

FASE DI RESTITUZIONE

In questa fase il modello stereoscopico diviene una rappresentazione ottico-numerica sulla quale si possono eseguire misure in grado di produrre, come risultato finale, un disegno, una carta topografica, un file numerico di coordinate o un'immagine *ortoproiettata*.

Gli strumenti che permettono la restituzione del modello si chiamano "*restitutori*" e si suddividono in: analogici, analitici e digitali

I restitutori analogici, di cui si è già accennato in precedenza, consentivano la ricostruzione dei raggi omologhi in analogia allo schema di presa.

"I raggi di fatto, dopo aver ricostruito lo schema di presa, venivano ricreati in laboratorio con bacchette metalliche o raggi ottici. Con quest'ultimi il modello ottico veniva realizzato attraverso la proiezione delle due immagini filtrate nel rosso e nel blu. L'osservazione avveniva con appositi occhiali dotati di una lente rossa e una blu. Attraverso tale metodo le immagini venivano osservate separatamente dagli occhi e consentivano la visione stereoscopica del modello." (Roggero, 2013)

Il restitutore analitico, creato successivamente ai restitutori analogici, basato sulle capacità di calcolo dei primi computer, si considera come la combinazione di uno stereocomparatore analogico e un calcolatore elettronico: lo stereocomparatore misurava le coordinate interne dei fotogrammi e l'elaboratore determinava le corrispondenze con le coordinate assolute.

Al giorno d'oggi l'operazione di restituzione si effettua direttamente per mezzo di un computer che, mediante l'utilizzo di immagini digitali e appositi software, impiegano tecniche di geometry processing per definire una mesh poligonale, ovvero un reticolo composto da vertici, spigoli e facce, che permette di ricostruire l'oggetto come un modello tridimensionale solido nello spazio, indagabile digitalmente e dal quale è possibile estrarre numerose informazioni, tra cui modelli di superficie, modelli del terreno (DTM ³¹, DSM ³², DEM ³³), a varie scale di rappresentazione, ortofoto, ecc..

LA FOTOGRAMMETRIA DIGITALE

Sebbene il processo fotogrammetrico descritto nel paragrafo precedente sia comune a tutte le tecniche sviluppatesi nell'ultimo secolo, con l'affermarsi della fotogrammetria digitale, dagli anni '90 in poi, come accennato, si sono fatti passi da gigante per quanto riguarda la semplificazione di tutto il workflow, in particolare delle fasi di orientamento e restituzione.

Le innovazioni del sistema digitale, rispetto alla fase analitica e analogica, riguardano principalmente tre aspetti: il supporto del fotogramma (l'immagine digitale), le procedure di calcolo, e il costo del processo. (Spanò, 2018)

31. DTM: Digital Terrain Model

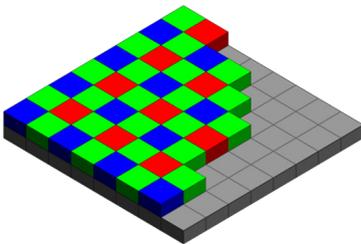
32. DSM: Digital Surface Model

33. DEM: Digital Elevation Model

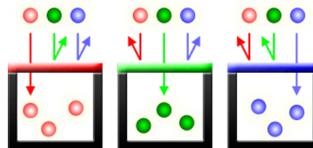
L'IMMAGINE DIGITALE.

Nella fotogrammetria digitale, come è intuibile, il fotogramma passa dunque dall'essere analogico (la pellicola fotografica) a digitale (immagine numerizzata). *"L'energia luminosa che colpisce il piano-immagine della camera non viene registrata fotograficamente, ma mediante dispositivi elettronici"* (Kraus, 1994); questi ultimi sono composti da una matrice di *fotorilevatori* di dimensioni note e capaci di trasformare l'area indagata nel fotogramma, in una matrice numerica (*raster*) in cui ad ogni numero è associato un *pixel* (*picture element*), cioè *"la parte elementare inscindibile dell'immagine"* (Spanò, 2018). Maggiore sarà il numero di pixel in una immagine maggiore sarà la sua risoluzione. Ogni singolo pixel dell'immagine digitale è associato, dal lato hardware, ad un *fotosito* (*photosite*), ossia un chip in silicio composto da un microscopico sistema ottico che concentra la luce incidente (*micro-lente*), e da un elemento fotosensibile (*fotodiodo*) che, quando colpito dalla radiazione luminosa, si carica elettricamente in maniera proporzionale alla quantità di luce che lo colpisce restituendo una immagine monocromatica (Pretini, 2011).

Un sistema di color filter array (CFA), ovvero una matrice tricolorata di filtri per i tre colori fondamentali RGB (Red Green Blue) viene sovrapposto alla griglia di fotodiodi in modo che ognuno venga coperto da un filtro di un solo colore, permettendo così di definire le informazioni cromatiche del fotogramma. La matrice di filtri più nota è



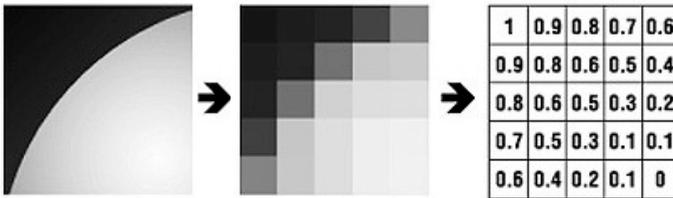
Bayer pattern
(fonte: Wikipedia.org)



Light Cavities
(fonte: cambridgeincolour.com)

la "Bayer pattern" dove ogni cella 2x2 (che quindi copre 4 fotodiodi) contiene due campioni di verde, uno di blu ed uno di rosso. Il pixel, come accennato precedentemente, rappresenta il dato della più piccola parte d'immagine; l'informazione relativa ad ogni pixel deriva dal processo di demosaicizzazione³⁴ dei valori RGB acquisiti da una cella di pixel. Questa informazione è espressa in bit (Binary Digit, unità minima del sistema binario) o, più precisamente, in bpc (bit per colore): maggiore è il numero di bit più finemente saranno espressi i livelli di colore nell'immagine finale. (Bassani)

Le immagini digitali sono registrate su un supporto magnetico ed esportate nel computer sotto forma di file-immagine con diverse estensioni. Tra le varie estensioni possibili per le immagini, quella che conserva il 100% dei dati acquisiti dal sensore è denominata RAW³⁵, e garantisce la massima risoluzione possibile, in quanto riporta il file grezzo prima della demosaicizzazione. Successivamente, in ordine di qualità immagine, vi è il formato TIFF³⁶ che comprime l'immagine ma senza perdite



Conversione dell'immagine in raster. Fonte: <http://profs.sci.univr.it/>

di dati, se non minime. Infine, vi è il formato più diffuso, il JPEG³⁷. Questo tipo di file è il risultato di un algoritmo di compressione, applicato all'immagine ed impone, per sua natura, una perdita di dati, riducendo la profondità colore ed introducendo "rumore digitale" ma garantendo il miglior rapporto tra la qualità dell'immagine ottenibile e le "dimensioni" del file.

34. Demosaicizzazione: Processo di interpolazione, utilizzato nei sensori dotati di filter array, che permette di calcolare per ogni pixel (R, G o B) i valori dei due colori che non ha acquisito (se ha acquisito R calcola G e B), ricostruendo per ogni pixel il valore RGB. La tecnica più rapida di demosaicizzazione è denominata nearest neighbor e prende come riferimento i valore dei pixel adiacenti.

35. Formato immagine, deriva dall'inglese RAW, grezzo. Sono i file risultanti della digitalizzazione dei livelli di carica elettrica proporzionale all'intensità di flusso luminoso incidente su ogni singolo foto-diode del sensore fotografico digitale.

36. Acronimo di Tagged Image File Format, è un formato immagine raster per immagini ad alta risoluzione molto diffuso. Utilizza un algoritmo di compressione che consente di non perdere dati a discapito di una dimensione del file comunque elevata.

37. Acronimo di Joint Photographic Experts Group, è il più diffuso standard di compressione di immagini con perdita di informazione.

LE PROCEDURE DI CALCOLO

Come accennato, le novità più importanti della fotogrammetria digitale sono avvenute dal punto di vista metodologico e riguardano lo studio e la messa a punto di algoritmi per l'automazione dei processi fotogrammetrici. Processi di calcolo innovativi, infatti, tendono a sostituire in maniera automatica operazioni prima assolate dall'operatore umano, in particolare tramite l'applicazione di software in grado di generare nuvole di punti da immagini fotografiche, al pari (o quasi) di un scanner laser 3D. I concetti di base della fotogrammetria, rimasti sostanzialmente invariati per un secolo e mezzo, vengono profondamente innovati con l'utilizzo di tecniche di computer vision e, in particolare, della *structure from motion* (SfM) (Paris, 2012)

La tecnica SfM, come accennato in precedenza, consente, artendo da una sequenza di immagini stereoscopiche, di ricostruire il modello tridimensionale stimando i parametri della camera al momento della acquisizione della sequenza (*motion*) e il modello geometrico della scena (*structure*), processando le immagini al fine di determinare le corrispondenze di punti tra esse. (Roggero 2013)

Per ottenere questi risultati, in prima battuta, il software identifica automaticamente dei punti caratteristici (*tie points*) in ciascuna immagine –*“riconoscibili dal software grazie all'elevato contrasto radiometrico nelle differenti direzioni, che permette di identificare i pixel in maniera univoca”* (Spanò, 2018)- tramite algoritmi SIFT³⁸ o simili: ad ogni punto così individuato viene assegnato un descrittore; i punti con i descrittori più simili vengono riconosciuti dal programma come omologhi.

In seguito, il software, partendo da una coppia di fotogrammi scelti autonomamente, procederà con la determinazione della corrispondenza dei *tie points* tramite *“le regole della geometria epipolare³⁹, che regola le relazioni fra i tiepoints (TP), i centri di presa e la posizione 3D del punto,*

38. Scale-Invariant Feature Transform, featurematching, areamatching

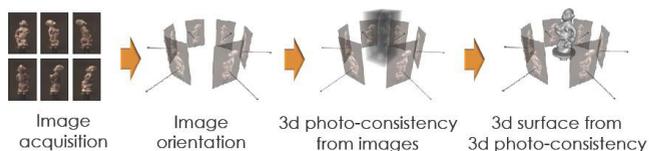
39. geometria epipolare: geometria che descrive le relazioni che sussistono tra i punti corrispondenti a due viste.

per orientare le prese e stimarne gli orientamenti interni ed esterni.” (Spanò, 2018)

Il passaggio successivo del processo consiste nel *bundle adjustment*, una procedura di minimizzazione dell'errore, fase cruciale nei software di SfM. Il programma stima, quindi, la calibrazione della camera, la sua posizione e determina i punti caratteristici nello spazio 3D. Il sistema procede aggiungendo in sequenza i fotogrammi, calcolandone l'orientamento, le coordinate e rifinando i parametri delle camere. Così facendo, per ogni vista aggiuntiva, la ricostruzione di riferimento si amplia, rendendo dunque possibile l'orientamento di tutte le immagini. (Roggero, 2013)

Una volta aggiunti tutti i fotogrammi viene eseguito un ulteriore *bundle adjustment* relativo all'intero modello, il cui risultato sarà la ricostruzione della scena 3D, materializzando il risultato come nuvola di punti a bassa densità (*sparse cloud*), non scalata e non riferita ad un sistema di riferimento assoluto (orientamento relativo). Costituita la *sparse cloud* sarà possibile collimare sulle immagini i punti di controllo identificati nella fase di appoggio topografico ed eseguire il processo di rototraslazione e messa in scala del modello nel sistema di riferimento assoluto. (Spanò, 2018)

Partendo dai punti della *sparse cloud* si procederà



Schematizzazione del processo fotogrammetrico SfM. Fonte: Spanò, 2018

all'infittimento della nuvola in una *“dense cloud”*, estendendo l'analisi delle immagini alle zone adiacenti ai *tie point* individuati, riconoscendo la posizione x,y,z degli elementi circostanti, identificando così un numero maggiore di punti.

Dalla nuvola così densificata sarà possibile procedere con

la creazione delle superfici utilizzano tecniche di geometry processing, capaci di definire una mesh poligonale, ovvero un reticolo composto da vertici, spigoli e facce, che permette di ricostruire l'oggetto come un solido nello spazio.

IL COSTO DEL PROCESSO

La fotogrammetria digitale con i sistemi SfM ha rivoluzionato il campo della fotogrammetria rendendo obsolete le costose strumentazioni per l'acquisizione e la restituzione, riducendo così, notevolmente, i costi di esecuzione. Inoltre, con gli attuali sviluppi in campo informatico, il processo di calcolo del software è facilmente eseguibile da un computer di medie prestazioni e le acquisizioni possono essere eseguite partendo da immagini catturate con gli strumenti più vari (smartphone, camere 360°, actioncam, ecc.), ottenendo ottimi risultati con risorse minime.

1.3.4 AEROFOTOGRAMMETRIA

Come accennato precedentemente, il concetto di fotogrammetria aerea venne introdotto durante la Prima Guerra Mondiale con lo scopo di ottenere dati e informazioni di obiettivi militari sensibili e mantenere in costante aggiornamento la cartografia. Negli anni a seguire la fotogrammetria divenne la sola tecnica utilizzata per produrre rilievi del territorio e cartografia, soprattutto in relazione ai tempi contenuti che garantisce questa tecnica rispetto alla topografia tradizionale, alla precisione metrica ottenibile e alla quantità di informazioni ricavabili, essendo capace di rilevare tutti i punti del terreno a differenza del rilievo topografico che li discretizza. (Riggio, 2015)

La fine del XX Secolo segnò, per la fotogrammetria aerea come per quella close range, un vero e proprio punto di svolta nell'approccio a queste discipline: infatti, come già riferito precedentemente, con l'avvento della fotografia digitale si abbandonarono, progressivamente, le complesse e macchinose apparecchiature analogiche tradizionali - per la presa dei fotogrammi e per la restituzione degli stessi - seguendo la rivoluzione digitale; infatti, grazie al processamento e all'autocalibrazione computerizzati dei dati a posteriori e in un'unica fase di calcolo, tramite l'integrazione di strumenti software specifici, basati su principi di computer vision e image matching- e recentemente SfM -, abbattendo così i costi per la produzione della cartografia.

L'aerofotogrammetria è al momento la più usata metodologia per la produzione della cartografia topografica ufficiale (carta d'Italia IGM, Cartografia Tecnica regionale e Catastale ecc) e per il rilievo di zone di territorio superiori a 30 ha. (Riggio, 2015)

La fotogrammetria aerea, successivamente, ha assunto un ruolo fondamentale nella creazione di modelli 3D che hanno numerose applicazioni: dalla pianificazione

del territorio, alla progettazione urbana, alle indagini ambientali, solo per citare le principali. Inoltre, consente di produrre *“elaborati di nuova generazione come ortofoto o modelli di superficie (DTM, DEM, DSM) Tali modelli identificati da acronimi diversi, si differenziano per il formato dei dati, vettoriale o raster, e per il tipo di superficie che descrivono: i primi due delineano tipicamente il terreno; l’ultimo, oltre al terreno, descrive gli elementi naturali e antropici che vi insistono.”*(Spanò, 2013)

La fotogrammetria aerea, inoltre, è usata attualmente nella realizzazione dei 3Dcity models - modelli tridimensionali delle aree urbane -. Tali modelli possono riportare tutte le informazioni del territorio, fino agli arredi urbani, e che hanno un ruolo fondamentale nella documentazione delle città e, in particolare, dei centri storici.

“L’aerofotogrammetria fa parte delle tecniche di telerilevamento di prossimità (Proximal Sensing) o LARS: low altitude remote sensing. Sotto questo nome viene raggruppato l’insieme delle discipline tecnico-scientifiche finalizzate ad analisi diagnostico-investigative che permettono di estrarre informazioni, quantitative e qualitative, riguardanti oggetti posti a distanza dal sensore, “cercando di descriverne le caratteristiche spettrali alle diverse lunghezze d’onda a cui sono sensibili i diversi sensori, compatibilmente con la loro risoluzione spaziale”. (Gomasasca, 2016)

Le tecniche di raccolta dei dati possono avvenire attraverso l’impiego di vettori che operano a bassa quota (tra cui gli UAV) equipaggiati con sensori di varia natura (camere classiche, multispettrali o termiche).

Le tecniche LARS, prestandosi facilmente ad approcci multiscala, vengono utilizzate principalmente per effettuare rilievi su aree poco estese e in generale nei casi in cui è impossibile o sconveniente utilizzare strumenti convenzionali, ottenendo dati qualitativi e quantitativi degli oggetti posti nei pressi dell’osservatore, misurando la quantità di radiazione elettromagnetica che interagisce con gli oggetti indagati e restituendo, in alcuni casi, le informazioni sub-superficiali.

AEROFOTOGRAMMETRIA DA UAV

L'aerofotogrammetria ha visto una profonda innovazione nell'ultimo decennio: è, infatti, *“una delle scienze che ha beneficiato maggiormente della ricerca e dello sviluppo di soluzioni tecnologicamente innovative in grado di migliorare non solo le condizioni di rilievo e ripresa ma anche i risultati del successivo processo di analisi e di interpretazione.”* (Piani, 2013)

Questo sviluppo è avvenuto soprattutto grazie alla parallela innovazione di software commerciali capaci di garantire un elevato grado di automazione del processo fotogrammetrico (SFM), allo sviluppo di hardware utili a migliorare le modalità e la qualità del rilievo (GNSS), oltre che allo sviluppo sia di sensori fotografici digitali miniaturizzati sia di aeromobili a pilotaggio remoto (APR⁴⁰ anche detti UAV⁴¹).

Questi ultimi strumenti, nati intorno agli anni '50 del Novecento, per scopi militari, sono attualmente *“[...] utilizzati sia in campo militare che civile per operazioni di ricognizione, controllo, misure atmosferiche, valutazione dei danni, mappatura dei rischi naturali e altri fenomeni per i quali non è possibile un accesso diretto al sito.”* (Chiabrando, 2012)

Gli APR, in particolare, hanno reso possibile, operando a quote notevolmente più basse rispetto ai velivoli con pilota, l'acquisizione aerea alla scala del singolo edificio, introducendo così il concetto di *“UAV photogrammetry”*, inteso come un nuovo strumento per il rilievo fotogrammetrico, unendo i caratteri della fotogrammetria aerea e terrestre in un ambito di applicazioni low-cost, e aprendo il campo a nuove e varie applicazioni nell'ambito della fotogrammetria close range. (Eisenbeiß, 2009)

Oggigiorno, infatti, i sensori fotografici e multispettrali digitali di ultima generazione, dal peso e dalle dimensioni estremamente contenuti e dal consumo energetico limitato, possono essere facilmente installati in tali velivoli radiocomandati, mossi da motori elettrici alimentati a batterie, controllabili da un operatore a terra.

40. Areomobile a Pilotaggio Remoto

41. Unmanned Aerial Vehicle

Questi strumenti hanno reso possibile l'acquisizione di un elevato campione di fotogrammi in breve tempo, con costi drasticamente inferiori rispetto alla aerofotogrammetria classica.

Negli ultimi anni sono state molto numerose le applicazioni di questi strumenti nel campo architettonico e dei beni culturali: sono, infatti, in grado di rilevare in brevissimo tempo numerosi dataset di immagini, permettendo l'acquisizione di informazioni in zone spesso inaccessibili ad un operatore, con notevoli benefici i termini di sicurezza degli operatori, affidabilità, risparmio di tempo ed infine accuratezza dei risultati, (Calantropio, 2018) e *"[...]possono essere efficacemente impiegati per aree circoscritte, di interesse dei complessi architettonici e delle loro relazioni con il contesto naturale e antropico nel quale sono inseriti."* (Spanò, 2013)

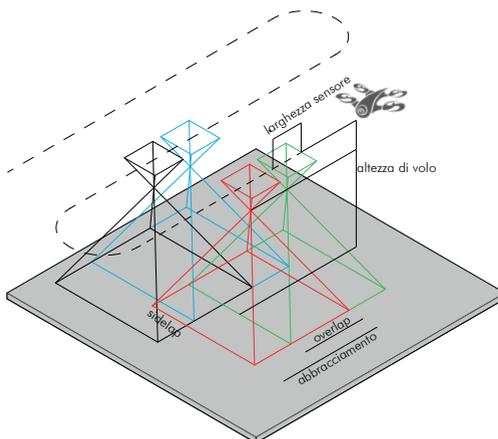
Inoltre, grazie alla programmazione da remoto, una volta impostato il piano di volo, l'operatore, non occupandosi più di pilotare e scattare le immagini, dovrà solo controllare la corretta esecuzione dello stesso e garantire la sicurezza dell'operazione, rimanendo vigile in caso di emergenza. Gli UAV (comunemente detti *droni*) impiegati nel rilievo fotogrammetrico, vengono utilizzati come delle camere volanti, seguendo le stesse regole che si applicano nella aerofotogrammetria classica e nella fotogrammetria close range.

ACQUISIZIONE FOTOGRAMMETRICA DA UAV

Così come per le acquisizioni terrestri, la ripresa di fotogrammi aerei da UAV è realizzata seguendo le medesime linee guida presentate precedentemente, acquisendo le immagini con valori prestabiliti di *overlap*²⁵. Affinché il processo fotogrammetrico vada a buon fine, infatti, è necessaria una corretta sovrapposizione delle immagini. Per raggiungere questo risultato è indispensabile una pianificazione del volo, che potrà avvenire in maniera manuale o automatica a seconda delle condizioni dell'ambiente in cui si opera (per esempio presenza o meno del segnale GPS). La pianificazione dei voli andrà a determinare il numero di scatti da eseguire, in funzione della rappresentazione attesa, della tipologia della fotocamera, della quota e della velocità del mezzo (nel caso in cui gli scatti vengano eseguiti in movimento o per lo spostamento tra una posizione scatto e l'altra).

La scala del rilievo si determina a priori, stabilendo il GSD (ground sampling distance) ovvero la superficie di oggetto acquisita dal singolo pixel.

Stabilito il GSD che si desidera ottenere, e partendo dalle informazioni della fotocamera utilizzata, (dimensione del pixel e lunghezza focale), si ricava l'altezza di volo che il drone dovrà mantenere per garantire il risultato.

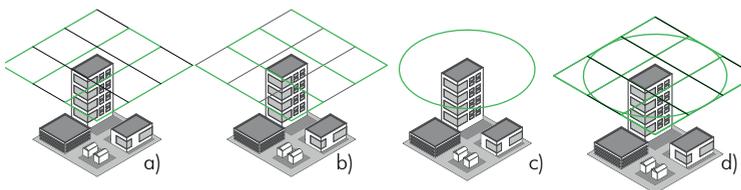


schematizzazione delle acquisizioni
fotogrammetriche da UAV.
Rielaborazione personale.

Ove le condizioni rendano possibile l'uso del volo automatico controllato dal sistema GPS del drone, fortemente consigliato per le operazioni di fotogrammetria, questo potrà essere stabilito ed impostato utilizzando le applicazioni apposite che, dialogando con il radiocomando del drone, gli impartiranno i comandi per eseguire la missione prevista, mantenendo rotta, quota, orientamento della camera e acquisendo i fotogrammi nei punti e con le modalità prestabilite, annullando così l'eventuale errore da parte del pilota a terra, e garantendo, inoltre, un ricoprimento ideale dell'oggetto indagato.

Tra le varie tipologie di piani di volo, la soluzione che ad oggi garantisce le migliori performance è quella che prevede passaggi paralleli, a quota costante lungo ciascuna delle direzioni prescelte; durante queste fasi, vengono catturati i fotogrammi ad intervalli di tempo predeterminati (strisciate), mantenendo l'orientamento della camera nadirale, ovvero orientata perpendicolarmente al terreno.

Nel caso in cui si necessitino risultati particolarmente precisi e/o il soggetto da indagare sia particolarmente complesso, per esempio caratterizzato da numerosi dislivelli, le strisciate sono ripetute seguendo passaggi tra loro ortogonali, così da aumentare il ricoprimento. In aggiunta alle acquisizioni nadirali, per ottenere una maggiormente dettagliata ricostruzione degli alzati di edifici o di terreni particolarmente complessi, si possono eseguire anche prese inclinate, con la camera posta a 45° . Questo tipo di riprese vengono eseguite sempre in maniera parallela, a più passate ortogonali tra loro, oppure seguendo una traiettoria circolare attorno all'oggetto di interesse.



Tipologie di piani di volo.

- a) griglia singola
- b) griglia doppia
- c) circolare
- d) griglia doppia più circolare

Elaborazione personale

Tra i vari modelli di APR più utilizzati in ambito fotogrammetrico se ne possono distinguere due categorie principali: ala fissa e multicotteri. I primi, come suggerisce il nome, sono velivoli con caratteristiche dinamiche simili a quelle di un aereo e vengono utilizzati per acquisire fotogrammi in spazi molto ampi e a quota abbastanza elevata in quanto hanno una notevole autonomia di volo ma necessitano di un ampio spazio per decollo, atterraggio e virata. I secondi, i multicotteri, sono mezzi dotati di tre o più rotori (i più comuni ne hanno quattro e sono denominati quadricotteri) e sono caratterizzati da una notevole stabilità di volo e maneggevolezza che consente loro di muoversi in spazi minimi, decollare e atterrare sul posto ed inoltre rimanere in "hovering"⁴² molto stabile, facilitando operazioni di acquisizione di immagini. Tra le due categorie, i multicotteri sono i più versatili e i più diffusi in ambito fotogrammetrico: sebbene abbiano una autonomia di volo molto inferiore a quelli ad ala fissa, compensano questa lacuna con la praticità di volo e la facilità di manovra e, inoltre, a differenza dei velivoli, i droni multicottero hanno la possibilità di fermarsi ad ogni scatto garantendo, a discapito di un tempo di volo maggiore, una migliore qualità e stabilità delle immagini.

42. Hovering: tecnica di volo che consiste nello stazionare a punto fisso rispetto al suolo ad altitudine costante.

1.3.4.1 Droni e regolamentazione

Gli Aeromobili a Pilotaggio Remoto (APR), comunemente conosciuti come “droni”, rappresentano sicuramente, la principale novità nel settore dell’aviazione civile, sia per la notevole diffusione del loro impiego, sia per la valenza che essi possono avere sullo sviluppo di nuove ed innovative attività economiche. Questo fenomeno è di tale entità che la Commissione Europea, con la comunicazione dell’8 aprile 2014, ha preso impegni per il sostegno allo sviluppo di questo settore, evidenziando i benefici che ogni paese dell’Unione Europea può trarre da esso, sia in termini di sviluppo economico, sia sui livelli occupazionali, con particolare riferimento all’impiego dei SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto).

L’impiego di questi nuovi mezzi ha avuto, e ha tutt’ora, un notevole impatto sul sistema regolatorio dell’aviazione civile, soprattutto in materia di individuazione delle regole più adeguate a fornire, da un lato, le necessarie garanzie di sicurezza sia ai cittadini che si servono del trasporto aereo sia a coloro che vengono sorvolati e, dall’altro, per garantire certezze nell’uso di tali mezzi agli operatori economici che li utilizzano. (Masali, 2019)

Negli stati appartenenti all’Unione Europea, gli enti competenti alla regolamentazione in materia di aviazione civile sono, generalmente due: a livello comunitario opera l’EASA - Agenzia Europea della Sicurezza Aerea -, che ha, come principale compito istituzionale la predisposizione della normativa generale in materia di sicurezza aerea; a livello nazionale, in ogni stato membro, opera quindi il rispettivo ente che regola l’aviazione civile nazionale. Nel caso italiano ad affiancare EASA è l’ENAC, Ente Nazionale Aviazione Civile che, oltre a garantire la sicurezza del volo e dei passeggeri trasportati all’interno del suo spazio aereo, ha il compito di far rispettare le norme europee introducendo, qualora ne notasse la necessità, modifiche restrittive al suo regolamento.

Fino al 2017 gli aeromobili a pilotaggio remoto erano soggetti ad un regolamento nazionale differente per ogni stato membro che, nel caso italiano, era stato redatto da Enac (*Regolamento "Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto" - Edizione 2, Emendamento 1 del 21 dicembre 2015*) e prevedeva norme fortemente restrittive. (Masali, 2019)

Il concetto cardine di tale regolamento, peraltro valido ancora oggi, si basa sulla distinzione, definita all'articolo 1, tra Aeromodelli e Aeromobili a Pilotaggio Remoto.

I primi, gli Aeromodelli, sono destinati ad impieghi di minor rilievo, prevalentemente a scopo ricreativo e sportivo ma sono, comunque, assoggettati a specifiche disposizioni e limitazioni d'uso trattandosi, sempre e comunque, di mezzi a pilotaggio remoto che circolano nello spazio aereo e potenzialmente in grado di causare collisioni e arrecare danni sia a cose e persone sia ad altri mezzi aerei. (ENAC)

I secondi, definiti nel regolamento con l'acronimo SAPR, sono utilizzati per operazioni specializzate e restano vincolati alle disposizioni del Regolamento ENAC nella misura in cui si tratti di aeromobili a pilotaggio remoto di massa operativa al decollo non superiore ai 150 Kg e progettati o modificati per attività di ricerca, sperimentazione e scopi scientifici. E' poi prevista una ulteriore classificazione dei SAPR in tre categorie, distinte in funzione della massa operativa al decollo: compresa tra 300 g e 4kg, tra 4 kg e 25 kg e, infine, tra 25 kg e 150 kg.

Gli aeromobili a pilotaggio remoto e, più in generale, gli aeromobili, sono suddivisi in due categorie in base alle loro caratteristiche di volo:

1-Aerostati, che considera i mezzi più leggeri dell'aria, di cui fanno parte mongolfiere, dirigibili e palloni aerostatici [categoria AS]

2-Aerodina, che comprende tutti i mezzi più pesanti dell'aria.

Questa categoria si suddivide, a sua volta in:

-Ala fissa [categoria AP] di cui fanno parte i velivoli (mezzi ad ala fissa dotati di motore) e gli alianti.

-Ala rotante, suddivisi a loro volta in: Elicotteri [categoria

HC] mezzi con uno o due rotori, e Multicotteri [categoria MC] mezzi con tre o più rotori.

ndr. I SAPR più comunemente utilizzati a scopi professionali fanno parte della categoria AP o MC.)

L'attuale regolamento ("Mezzi aerei a pilotaggio remoto" - Edizione 2 Emendamento 4) prevede, per ogni categoria e per ogni fascia di peso, l'ottenimento, da parte del pilota, di uno specifico brevetto conseguibile a seguito di lezioni teoriche, un esame scritto e lezioni pratiche di volo, seguite da un esame pratico di volo. (ENAC, 2018)

ENAC, inoltre, rilascia due tipologie di attestato che abilitano i piloti a operazioni "non critiche" oppure "critiche".

Per "operazioni non critiche²⁶" il testo di riferimento è il Regolamento ENAC "Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto" del Luglio 2015, emendato a Dicembre 2016 e a Aprile 2017. In base a questo documento, per operazioni specializzate "non critiche" si intendono quelle operazioni condotte in VLOS, Visual Line Of Sight (ossia con mezzo in vista e in uno spazio di volume massimo pari a 150 metri di altezza e 500 metri di raggio), che non prevedono il sorvolo, anche in caso di avarie e malfunzionamenti, di:

-Aree congestionate: aree o agglomerati usati come zone residenziali, industriali, commerciali, sportive o in generale aree dove si possono avere assembramenti, anche temporanei, di persone;

-Assembramenti di persone;

-Agglomerati urbani;

-Infrastrutture sensibili: ad esempio installazioni militari, i depositi di carburanti, le linee di comunicazione, gli ospedali, ripetitori di segnali radiotelevisivi.

Il volo dovrà comunque sempre avvenire nel rispetto di:

- una distanza orizzontale di sicurezza mai inferiore a 150 m da aree congestionate;
- una distanza di almeno 50 m da persone e cose che non siano sotto il controllo dell'operatore;
- in condizioni di luce diurna;
- al di fuori dalle zone ATZ – Aerodrome Traffic Zone

(zona di traffico aeroportuale);

- fuori dalle aree sottostanti le traiettorie di decollo e atterraggio di aerei oltre i limiti dell'ATZ stessa.

In aggiunta, dovrà essere mantenuta una distanza superiore a 5 Km dagli aeroporti, laddove non sia istituita una ATZ a protezione delle operazioni di volo.

In aggiunta il pilota dovrà mantenersi al di fuori delle zone regolamentate attive e dalle zone proibite, riportate in AIP (Servizio Informazioni Aeronautiche).

Per "operazioni specializzate critiche" si intendono quelle missioni che non rispettano, anche solo parzialmente le limitazioni precedenti; necessitano della preventiva autorizzazione, ove richiesta, e devono rispettare le norme che regolano la compilazione della documentazione relativa a ogni singola missione;

Con l'attestato per operazioni critiche è consentito:

-Avvicinarsi ai centri cittadini;

-Volare in prossimità degli elettrodotti;

-In alcuni casi non prevedere il buffer di sicurezza;

- Consentire la presenza di altre persone nelle aree di volo (solo se sotto il diretto controllo dell'operatore);

-Il sorvolo di centri urbani con drone in vista del pilota se dimostrata l'effettivo livello di sicurezza sufficiente attraverso analisi dei rischi dettagliata e se avvisati gli organi competenti. (ENAC, 2018)

Nel 2019 in Europa è entrato in vigore il nuovo regolamento EASA (REGOLAMENTO DI ESECUZIONE (UE) 2019/947 DELLA COMMISSIONE del 24 maggio 2019) che sancisce regole comuni per tutti i Paesi dell'UE e per l'Islanda, il Liechtenstein, la Svizzera e la Norvegia.

Il regolamento ENAC, come quello di ogni altro stato membro, dovrà quindi necessariamente convergere alle nuove regole EASA entro tre anni; ciò porterà così, al termine della fase di transizione, ad avere, entro fine 2022, regole effettivamente comuni in tutto (o quasi) il continente.

NB. L'attestato per operazioni non critiche è propedeutico all'abilitazione allo svolgimento delle operazioni critiche.

Le novità introdotte dal nuovo regolamento europeo saranno essenzialmente tre:

- L'attuale distinzione tra volo amatoriale e professionale verrà rimossa;
- Tutti gli APR con peso al decollo maggiore a 250 dovranno essere registrati presso un apposito portale web ed essere equipaggiati di transponder⁴³;
- Tutti gli UAV dovranno possedere una marchiatura CE che ne stabilisce le caratteristiche e la classe di appartenenza;

Comesi può notare, a differenza del precedente regolamento che aveva alla sua base la natura dell'operazione, l'identificazione del rischio che l'operazione di volo comporta sarà il focus del nuovo regolamento. Quindi, se con il regolamento ENAC alla base vi era la dicotomia volo professionale/volo amatoriale, con il recepimento del regolamento EASA conterà solo la rischiosità delle operazioni. (Masali, 2019)

Il regolamento europeo prevede anche una nuova e differente classificazione degli APR base principalmente al "peso al decollo" che li divide in cinque categorie e, attraverso l'apposizione della marcatura CE⁴⁴, il fabbricante dell'apparecchio attesterà, assumendosene la responsabilità, la conformità del suo prodotto ai requisiti essenziali di sicurezza previsti da una o anche più Direttive comunitarie ad esso applicabili.

Dunque, tutti i "droni" che saranno commercializzati in Europa dopo il 2022 avranno assegnato un marchio CE con un numero compreso tra 0 e 4, che specificherà la classe a di appartenenza (C0, C1, C2, C3 e C4).

Per appartenere ad una di queste classi il velivolo dovrà rispettare i seguenti standard:

Classe C0:

Peso massimo al decollo: 250 grammi esclusi i paraeliche.

43. sistema di identificazione elettronica che consentirà alle forze dell'ordine e ad altri velivoli di conoscere sempre chi è in volo in una determinata zona.

44 . I principi della marcatura CE sono stabiliti dal Regolamento Europeo 765/2008 che prevede che questa debba essere apposta solo sui prodotti per i quali la relativa direttiva lo preveda. Nell'ipotesi in cui un prodotto sia disciplinato da più direttive, la marcatura CE attesta la sua conformità a tutte le direttive applicabili.

Velocità massima: 19 m/sec, cioè 68 km/h.
Altezza massima: Limitabile a 120 metri.
Voltaggio massimo: 24 volt corrente continua.
Registrazione e transponder: NO.

Classe C1:

Peso al decollo: inferiore a 900 grammi, di più se rispettano gli 80 Joule.

Velocità massima: 19 m/sec, cioè 68 km/h.
Altezza massima: Limitabile a 120 metri.
Voltaggio massimo: 24 volt corrente continua.
Registrazione e transponder: Sì.

Classe C2:

Peso massimo al decollo: 4 kg.
Velocità massima: Illimitata.
Altezza massima: Limitabile a 120 metri.
Voltaggio massimo: 48 volt corrente continua.
Registrazione e transponder: Sì.

Classe C3:

Peso massimo al decollo: 25 kg.
Velocità massima: Illimitata.
Altezza massima: Limitabile a 120 metri.
Voltaggio massimo: 48 volt corrente continua.
Registrazione e transponder: Sì.

Classe C4:

Peso massimo al decollo: 25 kg.
Velocità massima: Illimitata.
Altezza massima: Non è obbligatorio il limitatore.
Voltaggio massimo: 48 volt corrente continua.
Registrazione e transponder: Sì.

Come accennato precedentemente, il regolamento EASA, prevederà la suddivisione delle operazioni con i APR in base al il rischio potenziale per chi sta a terra, per gli aeromobili e per la collettività, suddividendo le operazioni in tre macrocategorie: open, specific, certified.

La categoria Open, non prevede la necessità di certificare il drone al di là del marchio CE e non richiede nessuna autorizzazione al volo. La formazione sarà limitata a test e corsi online.

All'interno di questa categoria si potrà svolgere il volo hobbistico, le operazioni che attualmente sono classificate come non critiche e anche alcune operazioni che finora sono state considerate critiche.

Ci si potrà quindi avvicinare fino a un massimo di 5 metri dalle persone, si potranno effettuare tutte le operazioni che prevedono il sorvolo delle stesse e, inoltre, sarà consentito il volo all'interno dei centri abitati.

Questa categoria, che copre la maggior parte degli scenari d'uso, sarà però suddivisa in tre sottocategorie, denominate A1, A2 e A3, che potranno essere affrontate a seconda del drone della tipologia di drone e delle capacità minime richieste al pilota. (EASA, 2019)

A1: è consentito il volo a droni appartenenti alle classi C0 e C1, considerati droni inoffensivi. Si potrà volare all'interno di centri abitati e sorvolare persone non assembrate. Dovranno rispondere a specifiche tecniche che ne garantiscano l'inoffensività e un massimo di 80 Joule di energia dissipata in caso di impatto.

Per volare in questa categoria al pilota sarà richiesto il conseguimento di un attestato ottenibile attraverso la partecipazione ad un corso e il superamento di un test online.

A2: consente il volo ad aeromobili appartenenti alla classe C2 che si potranno avvicinare fino a 5 metri dalle persone se dotati di limitatore di velocità a 3 m/s, altrimenti saranno tenuti a mantenere una distanza di 50 metri dalle stesse.

Per poter volare in questa categoria sarà necessario l'attestato per volare in A1 e, in aggiunta, un secondo test online nonché un periodo di autoapprendimento, con voli eseguiti autonomamente e autocertificati.

A3: è la categoria tipica dell'aeromodellismo. Vede vietata la presenza di persone non coinvolte nell'attività di volo che

deve avvenire a non più di 150 metri di distanza da aree residenziali, commerciali, industriali o ricreative. Potranno volare in questa categoria droni appartenenti alle classi C3, e C4 e sarà richiesto l'attestato per volare in A1.

Specific, che comprende operazioni più complesse di quelle consentite in categoria open, tali da richiedere delle procedure specifiche per la mitigazione del rischio (simili alle attuali "operazioni critiche" del Regolamento ENAC attualmente in vigore). Le operazioni richiederanno autorizzazione, a meno che il pilota non abbia il "patentino europeo", o LUC, - Light Uas Operator Certificate (ottenibile presso le scuole di volo). Le missioni saranno soggette ad autorizzazione o a dichiarazione preventiva. Il drone non richiede alcuna certificazione oltre al marchio CE.

In questa categoria ricade tutto quello che non è consentito eseguire in categoria Open. Per esempio, si potrà volare con un drone da 4 kg in città o fare riprese dinamiche a velocità superiori a 10 km/h vicino alle persone. I requisiti operativi sono definiti negli scenari standard EASA o dalle autorizzazioni che rilascerà ENAC.

Certified, ovvero operazioni troppo rischiose per rientrare in Open e Specific, come le missioni BVLOS, volo autonomo, sciame di droni e simili, che attualmente sono proibite dal regolamento ENAC.

Per poter operare in questa categoria sarà richiesta una certificazione EASA del drone, oltre al marchio CE. Il pilota dovrà avere necessariamente il certificato LUC e il volo dovrà essere gestito da un operatore riconosciuto e certificato.

Le operazioni in Certified saranno guidate dagli scenari standard rilasciati da EASA o dalle autorizzazioni che rilascerà ENAC. (Masali, 2019)

2

LA TERMOGRAFIA

LA TERMOGRAFIA

La termografia è una tecnica diagnostica non distruttiva *“per la visualizzazione delle radiazioni infrarosse”* (Romeo, 1996) con la quale è possibile determinare la temperatura della superficie indagata - con una sensibilità che può arrivare fino a pochi centesimi di grado (Roche, 2012) - , attraverso la misurazione della radiazione infrarossa a onda lunga che esso emette, trasmette o riflette.

Le temperature così acquisite sono visualizzabili graficamente in una mappa, che viene riprodotta sullo schermo dello strumento utilizzato, rappresentata in scala di grigi o in *falsi colori* . Ogni pixel rappresenta tramite un colore o tono di grigio la quantità di radiazione elettromagnetica misurata ed è rappresentativo del valore di temperatura corrispondente ad uno specifico punto sulla superficie indagata.

Le mappe così generate, dunque, non sono nient'altro che associazioni di colori RGB (palette), o tonalità di grigio, proporzionali ad una temperatura.

“La tecnica consente di inquadrare l'elemento in studio sotto inaspettati punti di osservazione, poiché nella stessa figurazione confluiscono informazioni che usualmente sono raccolte con metodiche e strumenti pertinenti ad aree disciplinari differenti, quali le analisi chimico fisiche per la caratterizzazione dei materiali e del loro stato di conservazione, e le analisi storico/documentarie per la determinazione dell'evoluzione storica del manufatto.”
(Rosina, 2004)

Il termogramma, infatti, è una rappresentazione dell'oggetto indagato, nel quale si possono facilmente riconoscere le forme, le proporzioni e le dimensioni approssimative di quanto ripreso.

Tuttavia, poiché la colorazione della superficie e la distinguibilità delle forme e dei componenti dipendono strettamente dalle caratteristiche termiche dei materiali che li costituiscono, l'immagine generata dalla termocamera

è, di fatto, rappresentativa di entità che non sono altrimenti visibili e visualizzabili, se non attraverso l'impiego di grafici o descrizioni verbali. La simultaneità con cui questa ampia mole di dati giunge all'operatore è uno dei punti di forza che caratterizza la termografia; i risultati infatti sono immagini immediatamente fruibili ed interpretabili, in quanto richiedono solo un rapido colpo d'occhio per individuare le aree di discontinuità termica e non occorre una lunga elaborazione per ottenere un primo livello informativo. (Rosina, 2004)

La lettura in tempo reale della distribuzione e delle anomalie termiche della superficie inquadrata dal sensore, è il principale vantaggio di questa tecnica di indagine.

La trasformazione dei valori numerici di radianza o temperatura in immagini è dunque estremamente vantaggiosa per migliorare l'intelligibilità di fenomeni.

Per quanto concerne l'ambito delle prove non distruttive per i beni culturali, la termografia, come documentato negli atti dei convegni del settore⁴⁵, ha trovato terreno fertile, sin dall'inizio degli anni Ottanta, sebbene inizialmente si avvallesse di tecniche e strumenti messi a punto per altri scopi, adattati e convertiti con bassi costi di investimento. Questo approccio, portato avanti per molto tempo, ha però costituito un notevole limite operativo in quanto, l'utilizzo di strumenti progettati per rilevare differenze di temperature ben più elevate rispetto a quelle che si riscontrano negli interventi sui beni culturali e, soprattutto, con una risoluzione geometrica delle immagini molto bassa - in particolare se paragonate a video o fotocamere nello spettro del visibile - non consentiva di ottenere la precisione necessaria a svolgere un'indagine accurata. (Romeo, 1996)

Oggi, grazie all'evoluzione degli strumenti, la termografia viene impiegata frequentemente durante il processo di conoscenza dell'edificio, a cominciare dalle acquisizioni preliminari, fino alla redazione del progetto di conservazione, per arrivare al controllo in fase di esecuzione dell'intervento, al collaudo ed infine al programma di manutenzione. (Roche, 2012)

45. Già nel 1981 Maurizio Seracini (1946), ingegnere specializzato in diagnostica dei beni culturali, presenta al Primo Congresso Nazionale Consolidamento e Restauro Architettonico una memoria dal titolo "La termovisione come strumento di indagine non invasiva nella diagnostica architettonica", a testimonianza che la tecnica era comunque già sperimentata.

2.1 STORIA DELLA TERMOGRAFIA

L'evoluzione scientifica alla base di questa tecnologia ha avuto inizio con la formulazione della teoria dell'infrarosso, basata, a sua volta, sulla scoperta dello "spettro infrarosso" come forma di irradiazione di calore.

La scoperta, ad inizio dell'800, da parte di Sir William Herschel della radiazione infrarossa avvenne in maniera del tutto accidentale; questi, astronomo rinomato e già famoso all'epoca per la scoperta del pianeta Urano, era alla ricerca di filtri colorati che riducessero luminosità e calore durante le osservazioni astronomiche del sole. Durante queste ricerche, si rese conto che alcune delle lenti che stava testando filtravano grandi quantità di calore, mentre altre ne lasciavano passare quantità tali da rischiare danni permanenti agli occhi dopo solo pochi secondi di osservazione. (Roche, 2012)

Herschel, allora, si convinse della necessità di condurre un esperimento sistematico per individuare il materiale adatto ai suoi scopi di osservazione. A questo scopo ripercorse l'esperimento fatto da Newton nel 1670, scomponendo mediante l'uso di un prisma di vetro la luce solare nei sette colori dello spettro visibile e, grazie ad un termometro a bulbo annerito, misurò la temperatura dei diversi colori. Presto si accorse che a colori differenti corrispondevano temperature differenti; in particolare, i valori della temperatura mostravano un aumento costante passando dal violetto al rosso e oltre la zona del rosso, fuori dallo spettro del visibile, vi era un ulteriore aumento della temperatura con un punto di calore massimo individuato ben oltre l'estremità rossa, in quelle che oggi chiamiamo le "lunghezze d'onda infrarosse". Egli attribuì a questo fenomeno il nome di "spettro termometrico". (Roche, 2012)

Il tipo di vetro utilizzato come prisma da Herschel durante il suo esperimento sollevò alcune dispute tra i contemporanei sull'esistenza effettiva degli infrarossi. Diversi studiosi, infatti, nel tentativo di confermare o screditare i risultati

ottenuti dallo scienziato inglese, utilizzarono vari tipi di vetro, ottenendo trasparenze diverse all'infrarosso. Herschel, nei suoi esperimenti successivi, si rese così conto che il vetro non era trasparente a questo spettro, generando infatti una attenuazione al passaggio del calore. Fu solo nel 1830 che il fisico Macedonio Melloni, conducendo esperimenti sulla trasparenza del vetro, scoprì che i cristalli di salgemma (NaCl) risultavano notevolmente trasparenti alla radiazione infrarossa. Fu così che il salgemma divenne il principale materiale ottico per lo studio dell'infrarosso nel successivo secolo, finché non venne perfezionata la produzione di cristalli sintetici durante gli anni Trenta del XX secolo. (Roche, 2012)

Un ulteriore passo avanti nell'evoluzione dei sistemi di misurazione della temperatura, si deve a un altro fisico, Leopoldo Nobili, che, nel 1829, inventò uno strumento chiamato "*termocoppia*", una evoluzione del termometro, in grado di misurare la temperatura con precisioni che si avvicinavano al decimo di grado.

Fu grazie alla precisione fornita dallo strumento inventato da Nobili, che Melloni, collegando in serie differenti termocoppie, realizzò il primo sistema di misurazione del calore a distanza, la *termopila*, un dispositivo quaranta volte più sensibile del miglior termometro disponibile all'epoca per il rilevamento dell'irradiazione termica, ed in grado di rilevare, grazie all'ottica in salgemma, il calore di un individuo a metri di distanza.

La paternità delle moderne termocamere, invece, può essere attribuita a Samuel Langley, inventore nel 1880 del *bolometro*. L'invenzione di Langley consisteva in uno strumento formato da una sottile striscia di platino annerito collegata ad un circuito elettrico. Il platino, infatti, esposto a luce infrarossa, produce una risposta elettrica; questa scoperta gli consentì, durante un famoso esperimento, di rilevare la presenza di un animale di grossa taglia a ben 400 metri di distanza. (FLIR, 2013)

Tra il 1900 e il 1920 la ricerca sulla componente infrarossa dello spettro elettromagnetico ebbe un rapido sviluppo spinto da interessi militari, e in questo periodo furono rilasciati molti brevetti per dispositivi in grado di rilevare individui, artiglieria, velivoli, navi e perfino iceberg a distanza.

In questo primo periodo di sviluppo della tecnologia ad infrarosso, tutti i sistemi più sensibili si basavano sul bolometro, ma fu nel periodo tra le due guerre che si assistette allo sviluppo di due rilevatori di raggi infrarossi rivoluzionari: il convertitore di immagini e il rilevatore di fotoni.(FLIR, 2013)

In una prima fase, il convertitore di immagini ricevette grande attenzione da parte del settore militare perché consentì, per la prima volta nella storia, di vedere letteralmente al buio. Tuttavia, la sensibilità del convertitore di immagini era limitata alle lunghezze d'onda dell'infrarosso vicino e le superfici indagate dovevano essere illuminate artificialmente con radiazione infrarossa ma ciò comportava il rischio di annullare il vantaggio dell'osservatore poiché il nemico, che poteva essere analogamente equipaggiato, individuava facilmente chi utilizzava il raggio di ricerca (ndr. Su questa tecnologia sono basate le attuali telecamere di sorveglianza ad infrarossi).

Inevitabilmente gli svantaggi tattici dei sistemi di imaging termico "attivi", fornirono l'occasione dopo la Seconda Guerra Mondiale per ulteriori ricerche sugli infrarossi, ovviamente coperte da segreto militare, mirati allo sviluppo di sistemi "passivi", basati sul rilevatore di fotoni. Durante questo periodo, i brevetti coperti da segreto militare impedirono, per un lungo periodo, la diffusione della tecnologia di imaging a infrarossi che, solo dalla metà degli anni '50 con la rimozione del segreto militare, venne resa pubblica ed immessa sul mercato.(Roche, 2012)

2.2 I PRINCIPI FISICI ALLA BASE DELLA TERMOGRAFIA

La teoria riguardante le radiazioni infrarosse e la relativa tecnica termografica è spesso poco nota a molti utilizzatori di termocamere a infrarossi, anche a causa dell'estrema facilità di utilizzo che questi moderni strumenti hanno acquisito e che, attualmente, possono essere utilizzati, con pochi accorgimenti, anche da mani inesperte, con risultati soddisfacenti.

La termografia, misurando la banda dello spettro elettromagnetico compresa tra il visibile ($0.75 \mu\text{m}$) e le microonde (1 mm), è un metodo per misurare il flusso delle radiazioni elettromagnetiche che ogni corpo, avente una temperatura superiore a 0 K^{46} (-273.15°C), emette nella lunghezza d'onda dell'infrarosso. (Romeo, 1996)

Nel 1864 fu il fisico James Clerk Maxwell⁴⁷ il primo a teorizzare l'esistenza dell'irraggiamento ponendo le basi della teoria della trasmissione del calore per irraggiamento. Egli ipotizzò che le cariche accelerate o le correnti elettriche variabili nel tempo producano campi elettrici e magnetici in rapido movimento, che prendono la forma di onde, chiamate *onde elettromagnetiche*, che rappresentano l'energia emessa dalla materia in conseguenza ai cambiamenti nelle configurazioni elettroniche di atomi e molecole.

Alcuni anni dopo Heinrich Hertz⁴⁸, dimostrò sperimentalmente l'esistenza di onde elettromagnetiche e scoprì il legame che intercorre tra le tre caratteristiche fondamentali delle onde elettromagnetiche:

$$\lambda = c / f$$

λ , lunghezza d'onda.

c , la velocità della luce.

f , la frequenza.

Da questa formula si deduce che frequenza e lunghezza

46. Zero assoluto, la temperatura più bassa che teoricamente si può ottenere in un qualsiasi sistema termo-dinamico.

47. James Clerk Maxwell (1831-1879) matematico e fisico scozzese. Elaborò la prima teoria moderna dell'elettromagnetismo, raggruppando in una teoria tutte le precedenti osservazioni, esperimenti ed equazioni non correlate di questa branca della fisica unificandole con le note equazioni di Maxwell. Diede anche un importante contributo alla termodinamica statistica con le relazioni di Maxwell.

48. Heinrich Hertz (1857-1894) fisico tedesco, per primo dimostrò sperimentalmente l'esistenza delle onde elettromagnetiche previste teoricamente da James Clerk Maxwell con un apparato di sua costruzione, il dipolo hertziano, in grado di emettere e ricevere onde radio.

d'onda sono inversamente proporzionali e che la velocità di propagazione dell'onda è indipendente dal mezzo in cui si propaga ma dipende unicamente dalla sorgente.

Prima di continuare si ritiene opportuno accennare, per completezza, le caratteristiche dello spettro elettromagnetico.

Lo spettro elettromagnetico (EM) si può definire come: *“il continuo monodimensionale consistente in un insieme di radiazioni ordinato secondo la lunghezza d'onda, la frequenza o l'energia fotonica; comprende onde di ogni lunghezza d'onda, dalle frazioni Angstrom ($\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$) fino a molti chilometri”* (Gomarasca, 2004) che si propagano alla velocità della luce e secondo il moto armonico, ovvero ad intervalli regolari nel tempo.

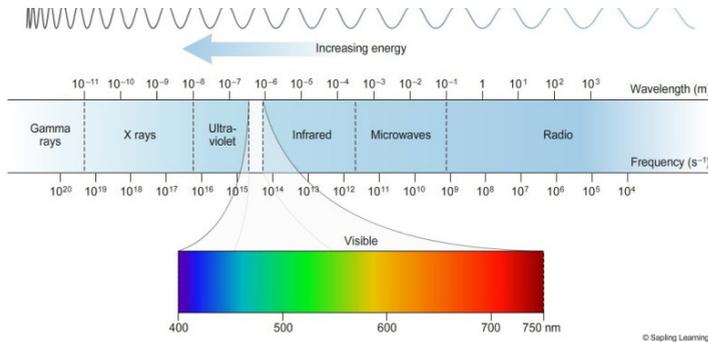
Per queste sue peculiarità di estensione non esiste una singola sorgente o sistema di rilevamento adatto a definire tutto lo spettro elettromagnetico, che viene perciò suddiviso arbitrariamente per comodità in “regioni spettrali” o bande, a seconda degli strumenti capaci di isolare e rilevare le radiazioni emesse.

Non esiste alcuna differenza sostanziale tra le radiazioni presenti nelle diverse bande dello spettro elettromagnetico, infatti tutte sono governate dalle stesse leggi e le uniche differenze sono quelle determinate dalla differente lunghezze d'onda, e dunque frequenza, che le contraddistingue.

Tra le regioni spettrali si individua, convenzionalmente, in posizione centrale la luce visibile, definita come l'intervallo di sensibilità spettrale dell'occhio umano, che si estende dal viola al rosso nella lunghezza d'onda compresa tra i 400 nm ai 700 nm. Allontanandosi dallo spettro del visibile, oltre il viola, lo spettro elettromagnetico è suddiviso, in ordine decrescente, in raggi ultravioletti (UV), i raggi X, i raggi gamma e i raggi cosmici. Viceversa, allontanandosi dallo spettro del visibile, oltre il rosso, si

identificano i raggi infrarossi (IR), le microonde (MW) e le onde radio. (Gomasasca, 2004)

La luce e il calore sono, infatti, forme di energia che si propagano sotto la medesima forma di radiazioni elettromagnetiche, ognuna caratterizzata da precisi valori di lunghezza d'onda e frequenza



Lo spettro elettromagnetico.
fonte: igcseaid.files.wordpress.com

Lo spettro dell'infrarosso, che si estende da fra 1 mm e $0,7 \mu\text{m}$, può essere suddiviso, a sua volta, in tre zone principali a seconda del livello di agitazione molecolare che suscita in: vicino IR ($0,78 \mu\text{m} - 1,5 \mu\text{m}$), medio IR ($1,5 \mu\text{m} - 20 \mu\text{m}$), lontano IR ($20 \mu\text{m} - 1000 \mu\text{m}$).

Per scopi di indagine non distruttiva e indagine del patrimonio architettonico i campi più interessanti sono ottenuti dall'analisi del medio IR, infatti "[...]dato che la trasmissione della radiazione IR è correlata alle proprietà termiche dei materiali, dalla sua misurazione sarà possibile ottenere la temperatura superficiale dei corpi". (Roche, 2012)

2.2.1 LA TRASMISSIONE DEL CALORE.

In base al secondo principio della termodinamica, la trasmissione del calore avviene spontaneamente dal corpo più caldo al corpo più freddo finché i due corpi non raggiungono l'equilibrio termico. Il corpo caldo, quindi, comunica parte della sua energia termica a quello freddo intensificando l'agitazione atomica di quest'ultimo; è quindi la differenza di temperatura la forza che attiva il trasferimento di calore. Questo trasferimento può avvenire in 3 modalità: conduzione, convezione ed irraggiamento.

La prima modalità, la conduzione termica, *“consiste nella trasmissione del calore tra parti di un mezzo continuo”* (Corrado, 2014) e si verifica, dunque, quando un corpo più caldo entra in contatto diretto con un corpo più freddo, riscaldando quest'ultimo tramite cessione diretta di energia termica.

La seconda modalità, la convezione, *“consiste nella trasmissione del calore tra parti di un mezzo continuo in presenza di un movimento macroscopico di materia”* (Corrado, 2014), ovvero avviene quando un corpo più caldo riscalda un corpo con una temperatura inferiore indirettamente, senza contatto diretto, ma tramite un fluido intermedio che circola tra i due corpi (aria o acqua, per esempio).

L'irraggiamento, invece, *“consiste nell'emissione di energia da una superficie, nella propagazione dell'energia attraverso onde elettromagnetiche e nell'assorbimento da parte di una superficie ricevente”* (Corrado, 2014) e sfrutta, dunque, un meccanismo di trasmissione del calore indipendente dalla presenza di fluidi termovettori ed avviene anche nel vuoto tramite emissione ed assorbimento di radiazioni elettromagnetiche. Qualsiasi corpo che ha una temperatura superiore allo 0 termico (0 K) emette, in virtù e in proporzione all'agitazione degli atomi che lo costituiscono, radiazioni elettromagnetiche; si deduce,

pertanto, che maggiore sarà l'agitazione molecolare maggiore sarà l'emissione elettromagnetica e quindi la temperatura. Proprio su questo principio di trasmissione del calore che è basata l'indagine termografica. (Roche, 2012)

2.2.2 LA QUANTITÀ DI ENERGIA EMESSA DA UN CORPO

Come visto precedentemente, ogni corpo, che si trova ad una qualunque temperatura superiore a 0 K, è in grado di emettere energia per irraggiamento.

In relazione a questo principio Kirchhoff, determinò una legge secondo la quale se una superficie viene colpita da un'onda elettromagnetica a cui è associata una certa quantità di energia E , una parte del fascio delle radiazioni verrà rinviata verso la sorgente (E_r), una parte verrà assorbita (E_a), e la restante parte attraverserà il corpo (E_t). Queste frazioni di energia sono definite dai coefficienti α , ρ e τ che sono funzioni della lunghezza d'onda, della temperatura e della natura della superficie del corpo e sono legati tra loro dalla relazione: $\alpha + \rho + \tau = 1$

Un corpo che presenta un coefficiente $\alpha=1$ per tutte le lunghezze d'onda, e coefficienti $\rho=0$ e $\tau=0$ (quindi assorbe tutte le lunghezze d'onda senza riflettere o trasmettere alcuna radiazione), viene definito corpo nero; ovvero, secondo la legge di Kirchhoff, *“quel corpo ideale che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica che incide su di esso, indipendentemente dalla lunghezza d'onda e dalla direzione della radiazione incidente.”*(Corrado, 2014)

Inoltre, la stessa legge afferma che un corpo in grado di assorbire tutte le radiazioni ad una lunghezza d'onda qualsiasi è ugualmente in grado di emettere, per una certa temperatura e lunghezza d'onda, la massima radiazione elettromagnetica possibile.

Il corpo nero è una astrazione teorica a cui si approssimano alcune sostanze reali, come la carta nera che, riflettendo solo l'1% della radiazione solare, può essere usata per

ricreare un corpo con proprietà molto prossime a quelle teorizzate.

Nelle applicazioni tecniche, molti oggetti possono essere assimilabili a corpi grigi. Questi corpi non presentano un $\alpha=1$, ma si presentano con valori leggermente inferiori che, tuttavia, rimangono costanti per ogni valore di lunghezza d'onda alla quale sono sottoposti, a differenza dei corpi colorati che variano la loro risposta in base alla lunghezza d'onda della radiazione che li colpisce.

I corpi grigi, inoltre, presentano una radiazione emessa identica a quella di un corpo nero ma con un'ampiezza inferiore. (Roche, 2012)

Come detto in precedenza, un corpo nero assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente senza rifletterla, quindi, per la legge di Kirchoff (anche conosciuta come legge della conservazione dell'energia), per ogni superficie in equilibrio con l'ambiente che la circonda, vale la relazione:

$$\varepsilon = \alpha$$

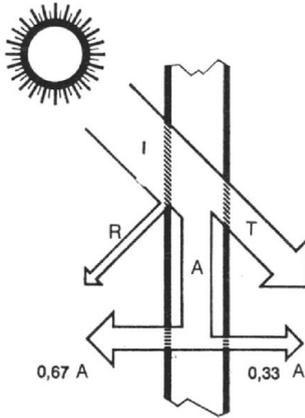
dove:

ε : fattore di emissione o emissività

α : coefficiente di assorbimento

Il corpo nero dunque, avendo un coefficiente di assorbimento $\alpha=1$, per la legge di Kirchoff dovrà re-irradiare tutta l'energia assorbita, presentando quindi un coefficiente di emissività $\varepsilon=1$.

Dopo la teorizzazione del corpo nero da parte di Kirchoff, il fisico tedesco Max Planck ha fornito, a questo punto, un grande contributo allo studio dell'infrarosso quando, elaborando la sua teoria quantistica, sostenne che gli atomi emettono ed assorbono radiazioni in modo discontinuo per quanti di energia, ovvero quantità di energia finita e discreta e non in forma continua, come si sosteneva in precedenza, permettendo di rappresentare l'energia sotto forma granulare. (Roche, 2012)



Schematizzazione della trasmissione del calore.

Fonte Roche 2012

$\alpha = E_a / E$ (coefficiente di assorbimento)

$\rho = E_r / E$ (coefficiente di riflessione)

$\tau = E_t / E$ (coefficiente di trasmissione)

In base al valore che assumono questi parametri, si possono identificare tre tipologie di superfici: le riflettenti, le trasparenti e le opache.

-Superfici riflettenti $\rho=1$

-Superfici opache $\tau=0$

-Superfici trasparenti $\tau=1$

Le onde elettromagnetiche, che come abbiamo detto hanno la proprietà di trasportare energia durante la loro propagazione, e possono quindi essere considerate come trasportatrici di un insieme di quanti (pacchetti discreti di energia), ciascuno caratterizzato da una precisa frequenza ν ed energia:

$$e = h\nu = hc / \lambda$$

dove:

h : costante di Planck.

c : velocità della luce

Dunque, essendo h e c costanti, l'energia di ogni quanto è

inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda che lo trasporta, e perciò una radiazione con lunghezza d'onda più lunga possiede minore energia di una a lunghezza d'onda più corta.

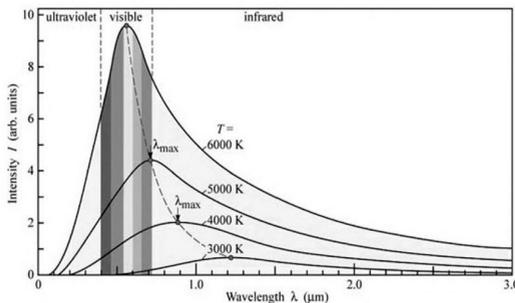
Planck, inoltre, fu capace di descrivere la radiazione emessa dal corpo nero in base alla lunghezza d'onda mediante la formula:

$$W_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{hc/\lambda kT} - 1 \right)} \times 10^{-6} [\text{Watt} / \text{m}^2, \mu\text{m}]$$

dove:

- $W_{\lambda b}$: Emittanza energetica spettrale del corpo nero.
- c : Velocità della luce = 3×10^8 m/s.
- h : Costante di Planck = $6,6 \times 10^{-34}$ Joule sec.
- k : Costante di Boltzmann = $1,4 \times 10^{-23}$ Joule/K.
- T : Temperatura assoluta (K) di un corpo nero.
- λ : Lunghezza d'onda (μm).

Lo spettro elettromagnetico di un corpo nero, descritto dalla formula di Planck, se rappresentato graficamente, è caratterizzato da una forma a campana, più o meno asimmetrica e schiacciata, direttamente dipendente dal valore della temperatura (T) e dell'energia irradiata, funzione, quest'ultima, della lunghezza d'onda; quindi più la temperatura sarà elevata, più il picco di energia apparirà alto e ben marcato, spostandosi verso la sinistra del diagramma in corrispondenza delle lunghezze d'onda più corte e dunque minore sarà la lunghezza d'onda alla quale raggiungerà la massima temperatura.



L'andamento delle curve di Planck.
Fonte Roche 2012.

Successivamente alle teorie di Planck, Wilhelm Wien, descrisse la legge grazie alla quale fu possibile relazionare la lunghezza d'onda per la quale è massima la radiazione emessa da un corpo e la temperatura assoluta della sorgente, ovvero il corpo nero.

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} [\mu\text{m}]$$

in cui:

T: temperatura assoluta espressa in K

λ : lunghezza d'onda espressa in μm

La formula rappresenta in forma matematica il variare dei colori, dal rosso al giallo o al bianco, all'aumentare della temperatura di un corpo.

La lunghezza d'onda del colore è la stessa lunghezza calcolata per λ_{\max} . Una buona approssimazione del valore di λ_{\max} per una data temperatura del corpo nero si ottiene applicando la regola empirica $3\,000/T \mu\text{m}$.

Secondo questo principio, una stella di media temperatura come il sole (6.000 K), che emette una luce gialla, irradia con il picco di emittanza energetica spettrale che si sviluppa all'interno dello spettro del visibile, alla lunghezza d'onda di circa $0,5 \mu\text{m}$, corrispondente alla parte centrale di tale spettro.

In linea teorica, secondo la legge enunciata da Josef Stefan (1835-1893) e Ludwig Boltzmann (1844-1906), la quantità di energia irradiata da un corpo nero per quantità di superficie è espressa dalla formula:

$$Eb = \sigma T^4$$

Dove:

Eb : emittanza radiante totale

σ : costante di Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

T: temperatura del corpo nero in K

Dunque, il calore trasmesso per irraggiamento sarà proporzionale alla temperatura assoluta elevata alla quarta potenza.

Tralasciando le astrazioni teoriche del corpo nero, e riferendosi ad un corpo reale, la formula precedente si configura:

$$qR = \sigma \varepsilon S (T_1^4 - T_2^4)$$

dove:

qR : energia ceduta per irraggiamento [W]

σ : costante di Stefan-Boltzmann
(5.67×10^{-8} W/m²K⁴)

ε : emissività relativa del corpo considerato (tra 0 e 1)

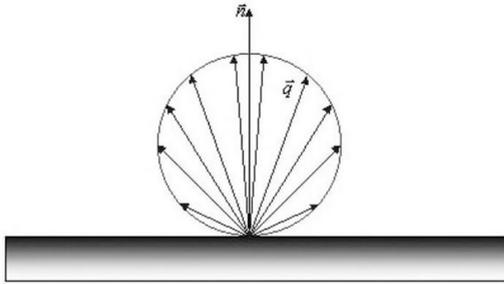
S : superficie del corpo radiante [m²]

T_1 : temperatura assoluta del corpo più caldo [K]

T_2 : temperatura assoluta dei corpi circostanti [K]

Bisogna aggiungere che le emissioni elettromagnetiche sono uniformi in tutte le direzioni solo nel corpo nero, anche definito "radiatore perfetto", mentre negli altri corpi non sono uniformi. Per spiegare questo fenomeno si deve far riferimento alla legge di Lambert che descrive l'andamento angolare di i in funzione del coseno dell'angolo che la normale alla superficie di riflessione forma con la direzione delle emissioni elettromagnetiche. (Roche, 2012)

Quindi, se si considera un caso semplice come una superficie piana, calcolando il potere emissivo q in ogni direzione, si può constatare che tanto più ci si allontana dal vettore normale n , tanto più il valore diminuisce.



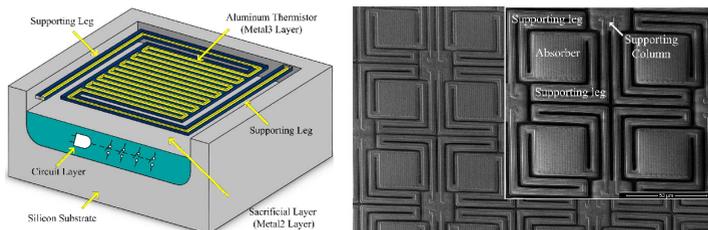
comportamento del potere emissivo
Fonte: (Roche, 2012)

Quanto detto fino ad ora è importante da considerare quando si svolge una indagine termografica perché, affinché si ricavino dei dati attendibili, è necessario che la termocamera sia orientata con un angolo non superiore a $\pm 45^\circ$ rispetto alla normale dell'oggetto che si sta rilevando.

2.3 LE TERMOCAMERE.

Fino al 1997 tutti i sistemi termografici furono caratterizzati, sostanzialmente, da un rilevatore capace di misurare la radiazione infrarossa e da un sistema di raffreddamento del sensore che garantisse la temperatura più bassa possibile dello stesso, così da fornire una precisione migliore. Per risolvere il problema di refrigerazione del sensore vennero usati gas liquefatti come agenti refrigeranti e, in particolare, l'azoto liquido⁴⁹ che riusciva a raffreddare il sensore fino alla temperatura di -196°C . L'uso di questo agente refrigerante richiedeva, però, che l'operatore, ad intervalli regolari, introducesse azoto dentro il sistema di refrigerazione, una pratica per nulla semplice sia per quanto riguarda il trasporto e l'immagazzinamento dell'azoto sia dal punto di vista della sicurezza e della trasportabilità in cantiere di tale strumentazione molto ingombrante.

Dal 1997 arrivarono sul mercato le prime termocamere non raffreddate, anche chiamate microbolometriche, che ancora oggi sono le più diffuse per usi civili, il cui sensore è costituito da una matrice di rilevatori, del tutto simile al sensore delle attuali macchine fotografiche digitali, e che garantisce una correlazione diretta 1:1 tra elementi sensibili del sensore e pixel rappresentati sull'immagine termica; infatti, la risoluzione geometrica del sensore, cioè il numero di pixel sull'immagine, corrisponde al numero di microbolometri di cui è composto il sensore. Questa tecnologia ha permesso di ridurre gli interventi di manutenzione dello strumento agevolando, inoltre, la miniaturizzazione delle termocamere micro-bolometriche rispetto ai modelli refrigerati, e ha favorito sensibilmente la portabilità degli strumenti, semplificandone molto l'utilizzo quotidiano.



49. Il raffreddamento dei sensori delle termocamere si ottenne grazie allo scienziato James Dewar (1842-1923), fisico e chimico britannico, le cui ricerche si concentrarono sulla produzione del vuoto in laboratorio che gli consentirono di realizzare un contenitore, il Vaso di Dewar, utilizzato per la conservazione dei gas liquefatti.

da sinistra:
Schematizzazione di un microbolometro non raffreddato con indicate le componenti principali.

Una sensore composto da una griglia di microbolometri analizzato al microscopio.

Fonte: Shen, 2015

2.4 BASI DI TERMOGRAFIA APPLICATA

Al fine di eseguire una corretta interpretazione delle immagini termiche è indispensabile conoscere il modo in cui i vari materiali sottoposti a differenti circostanze ambientali influenzano i dati acquisiti dalle termocamere.

Tra i fattori fisici che maggiormente influenzano le letture vi sono la conducibilità termica o conduttività e l'emissività.

Conduttività termica:

La conduttività termica identificata con λ , [W/(m•K)] è una proprietà specifica di ogni materiale, ed è usata per caratterizzare il trasporto di calore stazionario. Si può calcolare grazie all'equazione:

$$\lambda(T) = \rho(T) \cdot c_p(T) \cdot \alpha(T)$$

Dove:

α : Diffusività termica

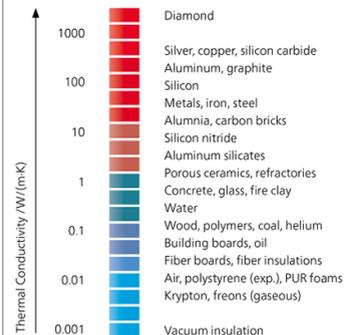
c_p : Calore specifico

ρ : Densità

Ogni materiale è dunque caratterizzato da specifiche proprietà di conducibilità termica che lo rendono più o meno propenso alla trasmissione del calore. Un chiaro esempio di questo principio sono i materiali metallici, che per loro natura tendono a trasmettere e disperdere rapidamente il calore, a differenza dei materiali isolanti che, viceversa, si riscaldano e raffreddano molto lentamente. (Lanzoni, 2012)

Conduttività termica dei principali materiali da costruzione.

Fonte: netzsch.com



Emissività termica:

L'emissività, rappresentata dalla lettera ϵ , può essere definita come la misura dell'efficacia con cui un materiale emette o riflette radiazioni infrarosse. Si misura come il rapporto tra la radiazione termica della superficie di un oggetto e la radiazione di una superficie nera opaca ideale (corpo nero) (Casana 2017).

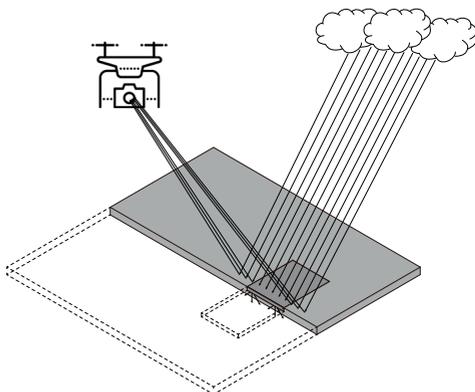
Si definisce dunque su una scala da 0 a 1 dove a $\epsilon = 1$ corrisponde un corpo nero, mentre qualunque oggetto reale, è compreso nell'intervallo $0 < \epsilon < 1$ (corpi grigi). Come per la conduttività, l'emissività dipende fortemente dalle proprietà del materiale, oltre che dalla temperatura, dall'angolo di emissione e dalla finitura superficiale dell'oggetto osservato. In linea generale, tra i materiali più comuni nell'ambito indagato, i metalli sono caratterizzati da valori di emissività piuttosto bassi, viceversa, i non metalli -tra cui si annoverano anche gli ossidi metallici- sono contraddistinti da valori elevati.

I valori di emissività sono facilmente consultabili dalla "tabella delle emissività"⁵⁰ che riporta i valori per diversi materiali, oltre che la lunghezza d'onda corrispondente e la temperatura di riferimento.

Oltre a questi due fattori vi sono altre cause che possono influenzare la corretta interpretazione dei dati termografici: i riflessi, le differenze di temperatura interne ed esterne, fenomeni climatici, i materiali e le metodologie di costruzione.

I riflessi sono tra le cause più comuni che possono portare ad errori interpretativi. Questi sono causati dalle proprietà dei materiali a bassa emissività; infatti come spiegato precedentemente, i metalli, il vetro, ma anche verniciature particolarmente rifrangenti, riflettono le radiazioni termiche di ciò che hanno intorno. Questa proprietà influenzerà la lettura della termocamera, che restituirà informazioni poco attendibili, poichè la temperatura apparente dell'oggetto indagato sarà prossima a quella degli oggetti che riflettono su di esso (compreso lo stesso operatore). (Roche, 2012)

50. ALLEGATO 1 "tabella emissività"
fonte Ludwig, 2015



Assorbimento della radiazione fredda del cielo da parte dell'area in alluminio dipinta di nero e rifrazione della parte grezza. Fonte: Luthmann et al. in "Thermal Infrared Remote Sensing: Sensors, Methods, Applications" p32. a cura di C. Kuenzer, S. Dech. 2013

Questo tipo di riflessione termica è identico a quello che avviene nello spettro della luce visibile (NB. le onde elettromagnetiche rispondono indistintamente alla loro lunghezza alle medesime leggi) per cui l'angolo di incidenza risulterà uguale all'angolo di riflessione. Per questi motivi all'indagare di un oggetto riflettente, è importante identificare un'angolazione di presa che minimizzi i riflessi sul termogramma. (Roche, 2012)

Le differenze di temperatura, come è facilmente intuibile, sono alla base delle tecniche termografiche; è indispensabile, infatti, che al momento dell'indagine, in particolare di murature, vi sia una differenza di temperatura tra la parte interna ed esterna. Per indagini approfondite è consigliabile una differenza di almeno 10°C tra le due parti, sebbene con temperature inferiori sia comunque possibile ottenere risultati soddisfacenti. Bisogna prestare, inoltre, attenzione anche a fattori costruttivi che possono influenzare i risultati: pareti ventilate o intercapedini non sono, infatti, idonee a rilevamenti dall'esterno.

(Manuale ITC)

Per quanto concerne invece l'analisi del terreno con fini di studio del costruito ed individuazione di aree interessate dalla presenza in un passato più o meno remoto di edificazioni, i principi termografici da tenere in considerazione sono pochi e relativamente semplici. Infatti,

il terreno a seconda della differente composizione, densità, umidità, presenza di materiali sulla superficie o sotto la stessa, assorbe, emette, trasmette e riflette la radiazione termica diversamente. Le proprietà termiche più rilevanti per questo scopo sono la conducibilità termica, l'emissività, la capacità termica volumica e l'inerzia termica.

La temperatura del suolo nella maggior parte dei terreni è stabile a pochi metri di profondità, poiché i materiali che lo compongono, essenzialmente silicatici e carbonatici, come rocce e sedimenti non consolidati, sono caratterizzati da alta capacità termica volumica e buone capacità di conducibilità termica.

La prima (il prodotto del calore specifico per la densità del materiale), descrive la quantità di calore che un materiale deve assorbire per aumentare la sua temperatura di un grado Kelvin, proprietà questa, strettamente correlata alla densità e composizione del materiale considerato.

La seconda, la conducibilità termica, come visto precedentemente, descrive la capacità di un materiale di trasferire calore. Nel caso del terreno questa capacità è in funzione delle caratteristiche intrinseche dello stesso.

Negli strati più superficiali del terreno, contrariamente a quanto accade in profondità, la variazione della temperatura, in funzione delle caratteristiche di capacità termica volumica e conducibilità termica, è più elevata, e dipende fortemente dal tipo di suolo e dal tempo di esposizione alla radiazione solare (Tinti 2012). Terreni caratterizzati da conducibilità termica relativamente elevate, come quelli composti da sabbia umida (2,0-4,0 W/mK) garantiranno un maggiore trasferimento di energia termica al di sotto della superficie, e ad una profondità maggiore. Differentemente, terreni con bassa conducibilità come i terreni secchi e ricchi di materiali argillosi (0,15-0,18 W/mK) inibiranno il trasferimento di calore agli strati sottostanti.

Correlata a questi fattori vi è l'inerzia termica, una variabile chiave ai fini dei rilevamenti termografici del terreno. Questa descrive la velocità di variazione della temperatura di un materiale. Un chiaro esempio è la presenza di acqua nel terreno. L'acqua, come noto ha una inerzia termica relativamente elevata rispetto al terreno, e la sua presenza in quest'ultimo ne influenza l'inerzia riducendo la trasmissione del calore. La temperatura dei terreni umidi, infatti, rimane più costante nell'arco della giornata rispetto ai terreni aridi che avranno una variazione termica molto maggiore durante l'arco della giornata. (Kuenzer and Dech, 2013) (grafico 1 e 2).

Conoscendo dunque le caratteristiche del suolo e il periodo durante il quale è stato esposto al flusso di calore, si potrà determinare il momento ottimale della giornata per la raccolta delle immagini termiche, nonché il più adatto affinché particolari caratteristiche occulte siano, se presenti, maggiormente visibili.

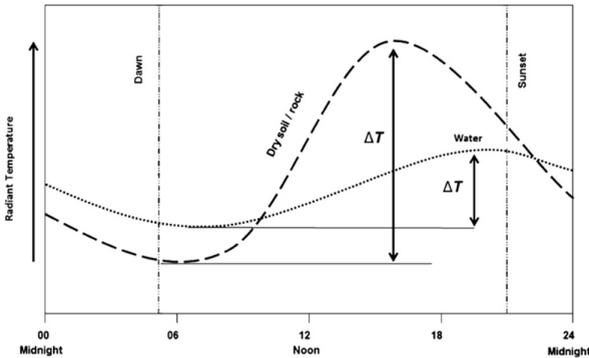


Grafico 1: Variazione diurna della temperatura del suolo umido o asciutto in funzione della radiazione solare.

Fonte: Kuenzer and Dech, 2013

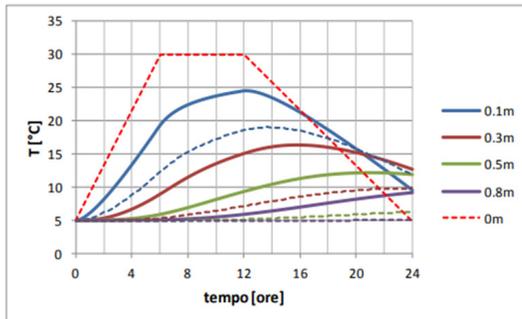
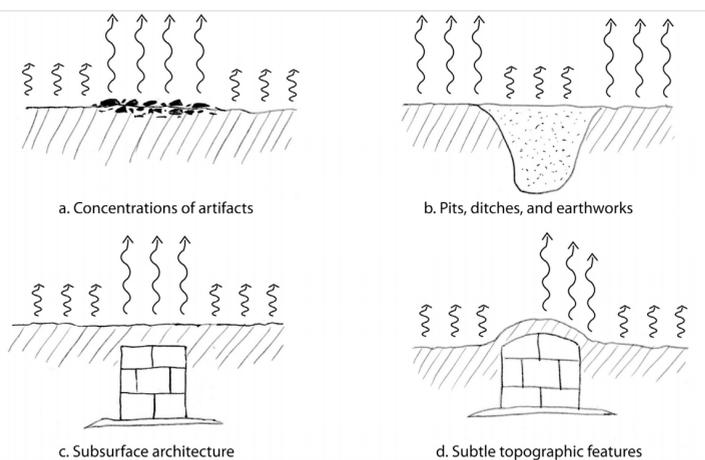


Grafico 2: Andamento temporale della temperatura al variare della profondità (in tratteggiato il terreno umido e in continuo il terreno asciutto)

Fonte: D. Corti 2012

Infine, come già trattato in precedenza, l'emissività termica è uno dei parametri principali per la determinazione di presenze sul suolo. Materiali, come la litica o la ceramica, ad esempio, o conformazioni di pietre disposte in maniera non casuale, hanno emissività con valori sostanzialmente differenti da quelli del terreno circostante, e possono, quindi, essere facilmente individuabili nelle immagini termiche. (cfr. Casana 2017)

Generalmente, in condizioni di terreni per lo più pianeggianti, soggetti ad illuminazione costante durante l'arco della giornata, a seconda delle proprietà termiche del terreno, della presenza, spessore e composizione della copertura vegetale, nonché dell'entità del flusso termico, le caratteristiche topografiche del territorio saranno facilmente individuabili ed evidenti nei termogrammi. Un terrapieno sopraelevato, ad esempio, si riscalderà e si raffredderà ad una velocità superiore a quella del terreno circostante, acquisendo dunque proprietà termiche differenti da quelle di una superficie altrimenti pianeggiante. Inoltre, rilievi o avvallamenti si riscalderanno in modo differenziato durante il dì, a cominciare dall'alba, quando la radiazione che giunge con una forte inclinazione rispetto al suolo pianeggiante li colpirà perpendicolarmente, passando per il culmine della giornata, quando riceveranno una illuminazione tangente, e per terminare al tramonto ricevendo nuovamente un flusso di calore perpendicolare.

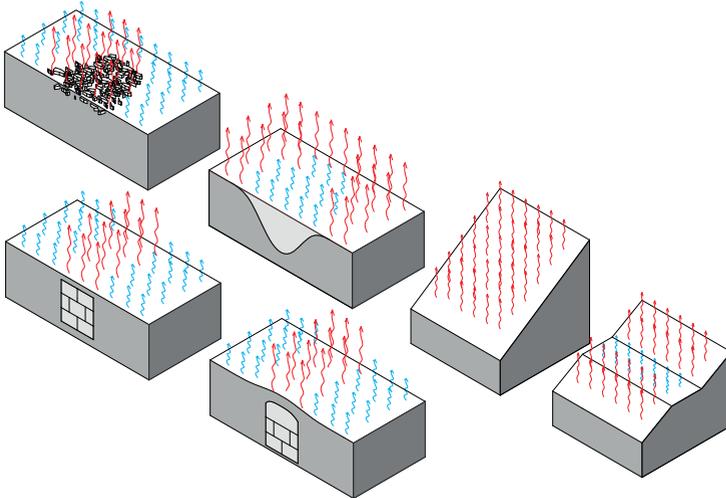


Schematizzazione della risposta termica del suolo esposto ad irraggiamento solare in presenza di materiali lapidei sulla superficie(a), in presenza di movimentazioni di terra (b), e in presenza di murature interrate (c,d).

Fonte: Casana 2017

(Casana 2017). Si può inoltre affermare che scavi e movimentazioni di terreno, sebbene ricoperti, avranno una risposta differente dal punto di vista termico, in quando la inevitabile differenza nella matrice del suolo assorbirà differentemente il calore e l'umidità.

Queste considerazioni possono applicarsi similamente anche in presenza di terreni scoscesi, ma con le dovute considerazioni: Infatti, a seconda dell'esposizione, e di ostacoli dati da presenze montuose nelle vicinanze, la radiazione solare colpirà il suolo con angolazioni più favorevoli nelle ore iniziali o finali della giornata, accentuando dunque avvallamenti e aree pianeggianti che riceveranno minore radiazione luminosa durante il dì, risultando più freddi. Nel caso studio, la collocazione dell'area indagata all'interno di una valle, ridurrà ulteriormente la radiazione solare al suolo, limitando così il calore potenzialmente trasferibile al substrato, e condizionando conseguentemente l'indagine agli strati più superficiali del terreno.



Schematizzazione della risposta termica del suolo esposto ad irraggiamento solare in ambito montano (e,f) in presenza di materiali lapidei sulla superficie(a), in presenza di movimentazioni di terra (b), e in presenza di murature interrato (c,d). Reinterpretazione personale di Casana 2017

Infatti, sebbene Casana, suggerisca che:

“ITA[...] se il nostro obiettivo è quello di documentare elementi archeologici con espressione topografica, come campi rialzati, muri, o tumuli di terra, è meglio raccogliere immagini intorno all'alba. Le caratteristiche topografiche si riscaldano in modo differenziato sotto l'irraggiamento solare, e le immagini termiche raccolte in questo momento possono quindi rivelare tali caratteristiche con grande chiarezza”.

(Casana et al. 2014)

si è proceduto al rilievo dopo il tramonto, proprio in funzione dell'inclinazione del terreno, e agendo all'inverso, con l'intento, dunque, di identificare le aree pianeggianti.

Con l'analisi di immagini termiche sarà dunque possibile, in condizioni favorevoli, rilevare la presenza di attività antropiche sul terreno, e resti di tipo architettonico nel substrato, nel caso in cui, i materiali che li compongono, presentino una sufficiente differenza di proprietà termiche rispetto alla matrice del suolo in cui sono sepolti.

In terreni montuosi saranno inoltre facilmente individuabili discontinuità termiche attribuibili a terrazzamenti attribuibili ad attività umane di coltivazione, costruzione o allevamento.

3

CASO STUDIO

3.1 LA RICOSTRUZIONE DI MODELLI DIGITALI TRIDIMENSIONALI DA ACQUISIZIONI RGB E TERMOGRAFICHE

La campagna di rilievo è stata eseguita dal Team DIRECT, affiancato dal team di Geomatica del Politecnico di Torino, in un contesto montano e con l'intento di documentare il patrimonio storico architettonico delle Alpi italiane sempre più sensibile allo spopolamento e all'abbandono delle borgate più isolate, che rischiano, senza la manutenzione adeguata, di scomparire per sempre, assorbite dalla vegetazione.

Bout du Col, 1700-1711 m slm, si colloca sul versante est dell'alta val Germanasca, in una conca protetta dai venti e affacciato sul torrente. L'esposizione ad Ovest-Sud-Ovest gli garantisce un buon soleggiamento durante tutto l'anno, sebbene, le alte cime del versante opposto (2300 mslm) limitano l'esposizione nelle ore più tarde della giornata, soprattutto in inverno.

La borgata si presenta in stato di abbandono avanzato; solo una baita risulta abitata, mentre numerose sono le costruzioni crollate e scoperciate. La borgata è fittamente ricoperta di vegetazione che si insinua dentro i casolari abbandonati e in tutti gli interstizi tra una baita e l'altra. Si tratta di vegetazione tipicamente montana di alta quota, a basso fusto, caratterizzata per lo più da piante infestanti che sfruttando la protezione delle macerie ha proliferato ricoprendo l'intera area. Sono inoltre presenti alberi ad alto fusto cresciuti tra le case, indizio di un abbandono prolungato.

Bout du Col si configura come uno dei tanti casi di borghi montani e altocollinari che a causa del fenomeno di spopolamento e abbandono dei luoghi - cominciato nei decenni successivi al secondo conflitto bellico con le migrazioni interne e culminato oggi con la perdita di attrattività di questi luoghi - sono spesso privi anche dei

servizi essenziali alla vita dei suoi abitanti.

Eppure, la piccola realtà del paese è stata per lungo tempo una presenza estremamente viva e identitaria della nostra penisola, in cui viveva più del 70% della popolazione.

Negli ultimi tempi l'attenzione verso queste aree è diventata più forte, spesso connessa a strategie rigenerative di respiro nazionale, spesso risultato di una singola opera di progettazione. Non tutti i borghi però vengono interessati da queste azioni. Alcuni, come il caso di Bout du Col, vengono semplicemente dimenticati. A queste borgate potrebbe, invece, come già è avvenuto per quelle di Paraloup¹, Castelmagno, Prad' Mill² e Campofei³, essere riservato un destino diverso: studiate nella fase conoscitiva dai metodi geomatici, e approcci di integrazione tra analisi termografiche e tecniche fotogrammetriche (come quelli presentati in questa tesi), mappate nelle loro presenze e assenze, e restituite in modelli tridimensionali che potrebbero fornire, in un futuro prossimo, delle basi utili alla riqualificazione o più semplicemente alla conservazione della loro memoria identitaria.

Il processo di rilievo di questa borgata è seguito a una fase di pianificazione in laboratorio, nella quale si è studiato come distribuire i punti di controllo della rete topografica di appoggio e come strutturare i voli UAV, generando un primo piano di volo, basato su immagini satellitari e il DTM con la miglior risoluzione possibile reperibile.

Dopo questa fase si è proceduto al rilievo in loco, durante il quale sono stati posizionati vertici e marker, poi rilevati per mezzo di ricevitori GNSS e della stazione totale, al fine di creare una rete di georeferenziazione. I punti così misurati sono definiti GCPs (Ground Control Points) e saranno poi utilizzati nel successivo processo di orientamento fotogrammetrico delle immagini e di georeferenziazione del modello.

51. REGIS 2007a; REGIS 2012

52. FALETTI 2006

53. "Il progetto di recupero della borgata Campofei, opera degli architetti Valeria Cottino, Dario Castellino e del prof. Daniele Regis, premiato alla Rassegna Architetti Arco Alpino 2016 dà "avvio alla rivitalizzazione economica del borgo, permettendo la realizzazione di un progetto completo e omogeneo che si integra nel paesaggio rispettando le tipologie architettoniche del luogo. Nel processo si sono coinvolti gli studenti universitari che con le simulazioni d'intervento, le ricerche sul patrimonio architettonico e le analisi economiche hanno messo le basi per le linee guida di progetto, rendendo Campofei un caso pilota, dove la centralità del momento progettuale diventa strumento di riflessione multidisciplinare", REGIS 2017

(da *Riabitare le alpi*, Prof. Cuneo Regis, Spanò, testo non ancora pubblicato)

Infine, sono avvenuti i rilievi per mezzo di APR che si sono svolti in due tempi.

La prima acquisizione è stata eseguita alcune ore dopo il tramonto, al fine di ottenere dati non influenzati da riflessi del sole ed eliminare aree di discontinuità causate da ombre. Inoltre, durante le ore diurne, una gran parte della radiazione termica infrarossa ripresa da una telecamera deriva dalla luce solare riflessa (cfr. Kuenzer e Dech 2013).

La seconda acquisizione, invece, per questioni organizzative è avvenuta il giorno seguente; qui le condizioni di illuminazione non erano ottimali per il rilievo fotogrammetrico, in quanto il forte irraggiamento solare ha generato alcune zone ombreggiate sul modello, causate principalmente dai fronti delle baite e dagli alberi.

La terza ed ultima fase è avvenuta nuovamente in laboratorio, dove si è provveduto ad analizzare i dati grezzi, procedendo con il bundle adjustment per l'orientamento del blocco dei fotogrammi e termogrammi, la ricostruzione del modello ottico, tramite generazione delle nuvole di punti grazie alle già citate tecniche SfM ed infine la generazione di ortofoto, mappe della radianza termica, ecc...

3.2 GLI STRUMENTI

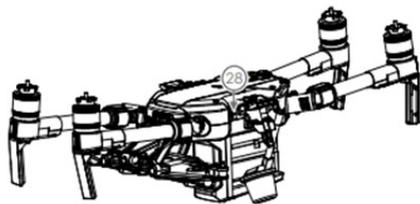
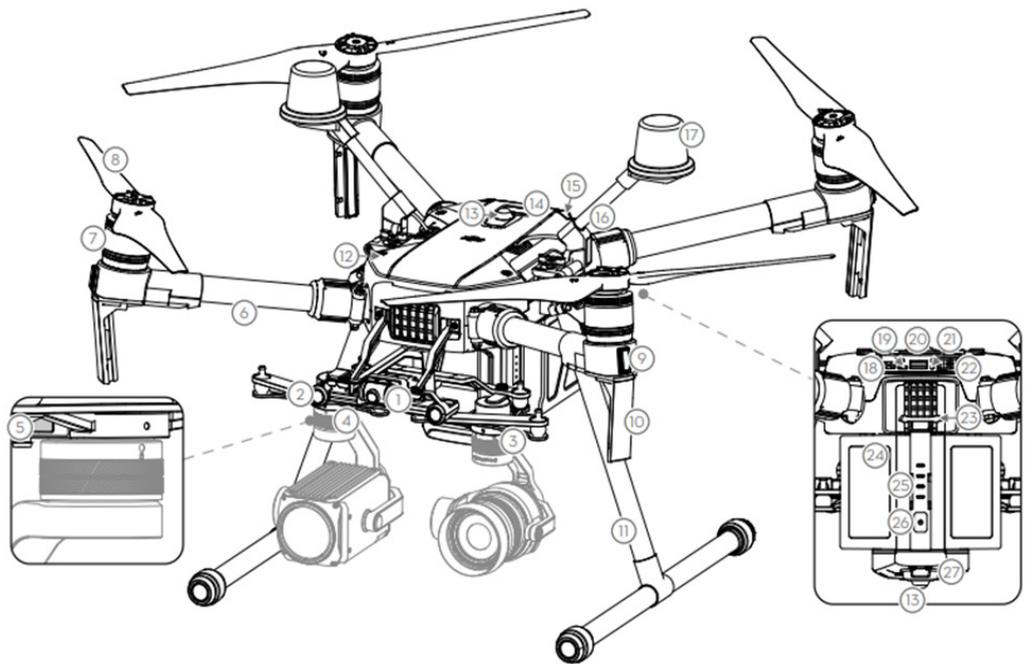
Per questo rilievo è stata utilizzata come piattaforma UAV un quadricottero professionale per uso industriale della DJI, e due camere: una termica e una RGB.

3.2.1 Il modulo UAV



DJI Matrice 210 v2

Si tratta di un drone di medie dimensioni che misura da aperto, eliche e carrello di atterraggio inclusi, 883×886×398 mm, per un peso al decollo di 4.8 kg e una capacità di carico di 1.34 kg, capace di azionare contemporaneamente fino a due camere.



Folded

- | | |
|--|----------------------------------|
| 1. FPV Camera | 15. Aircraft Status Indicators |
| 2. Forward Vision System | 16. D-RTK Mounting Bracket** |
| 3. DJI Gimbal Connector v2.0 (DGC2.0) I | 17. D-RTK Antennas** |
| 4. DJI Gimbal Connector v2.0 (DGC2.0) II | 18. Extended Power Port (XT30) |
| 5. Gimbal Detachment Button | 19. USB Mode Switch |
| 6. Frame Arms | 20. USB Port |
| 7. Motors | 21. Linking Button and Indicator |
| 8. Propellers | 22. Expansion Ports |
| 9. ESC LEDs | 23. Battery Removal Button |
| 10. Transmission Antennas | 24. Intelligent Flight Batteries |
| 11. Landing Gears | 25. Battery Level Indicators |
| 12. Upward Gimbal Mounting Position | 26. Power Button |
| 13. Beacons | 27. Downward Vision System |
| 14. Upward Infrared Sensor | 28. microSD Card Slot |

SCHEDA TECNICA:

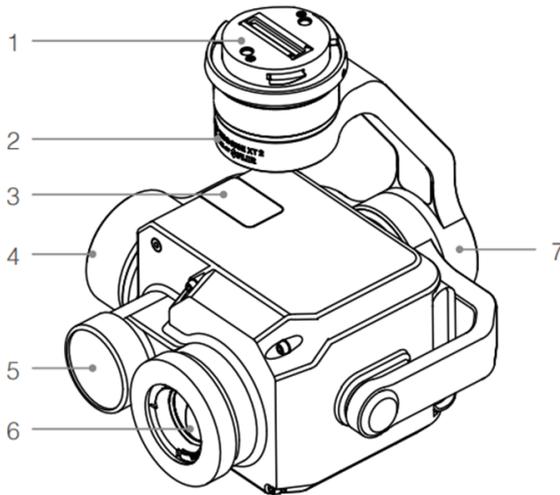
Dimensioni	Aperto, eliche e carrello inclusi, 883×886×398 mm interasse diagonale 643mm
Peso	ca. 4,8 kg max al decollo 6.14
Accuratezza di volo stazionario (con GPS)	Verticale: $\pm 0,5$ m o $\pm 0,1$ m, con sistema di posizionamento visivo attivato Orizzontale: $\pm 1,5$ m o $\pm 0,3$ m, con sistema di posizionamento visivo attivato
Massima resistenza al vento	12 m/s (39,4 ft/s)
Autonomia di volo	34 min. (nessun carico), 24 min. (massimo carico)
Fotocamere DJI supportate	Zenmuse X4S/X5S/X7/XT/XT2/Z30
Configurazioni di carico	Carico doppio in basso, carico singolo in alto
GNSS	GPS+GLONASS.

3.2.2 I SENSORI UTILIZZATI

-Termocamera: DJI Zenmuse XT2.

Questa termocamera, ingegnerizzata per l'uso specifico su droni DJI Enterprise, integra in un unico corpo macchina un sensore termico FLIR Tau 2 e un sensore RGB CMOS di dimensioni 1/1.7, 4k da 12Mpx.

La camera è inoltre stabilizzata da un giunto cardanico a tre assi che le consente una rotazione orizzontale di 320° e inclinazioni da +30° a -90°



1. Gimbal Connector
2. Pan Motor
3. MicroSD Card Slots
4. Tilt Motor
5. Visual Camera
6. Infrared Thermal Camera
7. Roll Motor

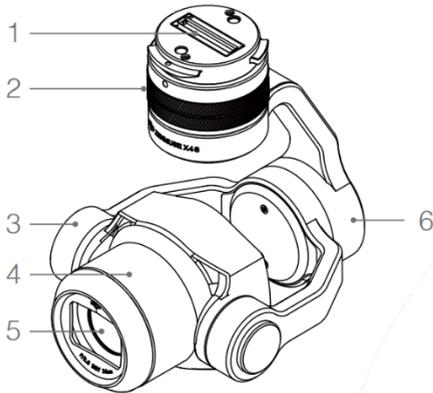
SCHEDA TECNICA:

Sensore termico.

Ottica	13 mm
Imager termico	Microrbolometro VoX non raffreddato
dimensione immagine	640x512
Formato esportazione	JPEG, TIFF, R-JPEG
Banda spettrale	7.5-13.5 μm
Frequenza	30 Hz
FoV, iFoV	1.25 45° \times 37° 1.308 mr
Distanza minima di messa a fuoco	7.6 cm
Distanza iperfocale	4.4 m
Profondità di campo iperfocale	2.2 m
Sensore RGB.	
Sensore	1/1.7" CMOS, Pixel effettivi: 12 Mpx
Obiettivo	8 mm, FOV 57.12° \times 42.44°
Formato esportazione	JPEG

- Camera RGB: DJI Zenmuse X4S

X4S è una fotocamera, ingegnerizzata per l'uso specifico su droni DJI; è dotata di un sensore da 1 pollice da 20Mpx, e un obiettivo 24 mm corrispondente, con una notevole gamma dinamica.



1. DJI Gimbal Connector 2.0
2. Pan Motor
3. Tilt Motor
4. Lens
5. Camera
6. Roll Motor

SCHEDA TECNICA:

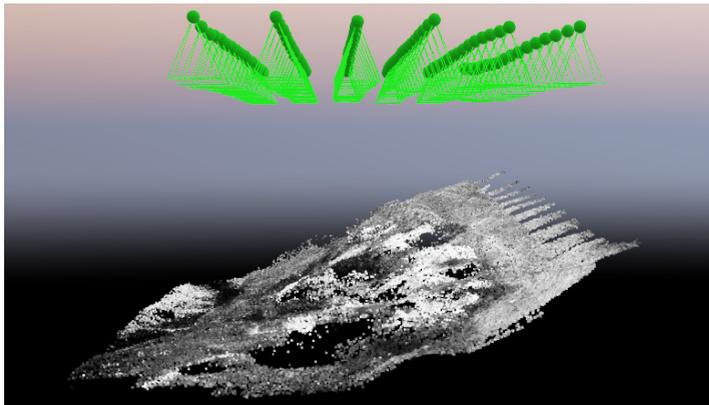
Sensore	1" CMOS, Pixel effettivi: 20 Mpx
Obiettivo	8.8mm, FOV 84°
Risoluzione fotografica	16:9, 5472×3078
Formato esportazione	DNG, JPEG, DNG+JPEG
Velocità otturatore	Mechanical Shutter: 8 – 1/2000s Electronic Shutter: 1/2000 – 1/8000s
ISO	100-12800

3.3 PIANO DI VOLO E ACQUISIZIONI

Il piano di volo, pianificato in fase di studio viene poi perfezionato in loco, prendendo coscienza degli ostacoli che presenta il terreno, quali alberi e dislivelli locali e di elevato dettaglio, non riportati nel DTM a media scala usato per la pianificazione. Nel caso di Bout Du Col, l'importante dislivello tra la zona bassa e quella alta e la presenza di un albero ad alto fusto ha imposto una quota di volo di 60 metri rispetto al punto più basso, con un GSD 2.1 cm per la camera RGB (X4S) e 5.8 per la camera termica (XT2).

Come accennato in precedenza le acquisizioni si sono svolte in due momenti separati con piani di volo differenti. Il primo volo, eseguito con il Matrice 210 v2 è stato quello con installata la termocamera ed ha seguito uno schema di volo a griglia semplice con un solo passaggio a camera nadirale. Questo volo è avvenuto all'imbrunire al fine di acquisire una risposta termica del terreno il più veritiera possibile, evitando i riflessi dati dalla radiazione solare diretta.

Durante questo volo ci si è concentrati sull'edificato e sono stati acquisiti 96 termogrammi, tutti e 96 orientati con overlapping medio di 5 termogrammi per ogni punto dell'area d'interesse.

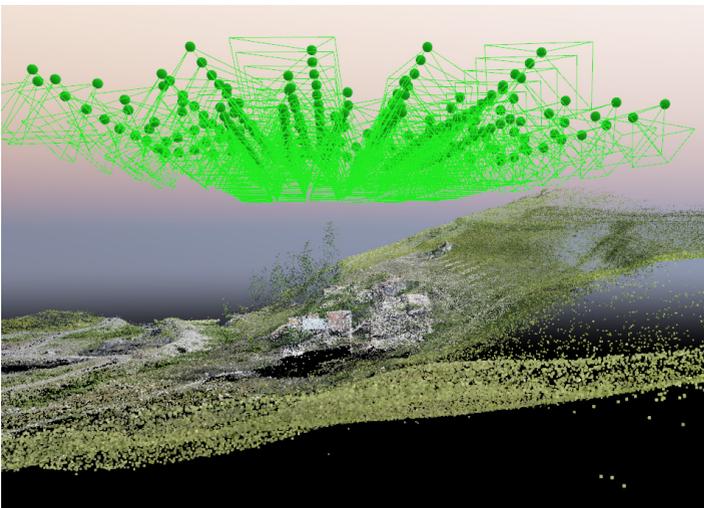


Piano di volo da pix4d capture

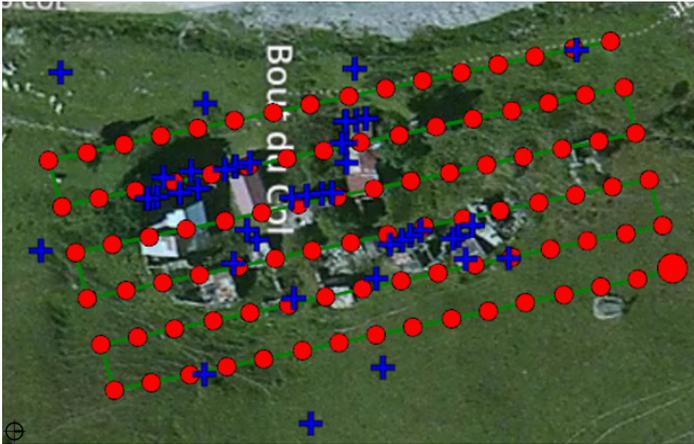
Sparse cloud derivata dal volo con termocamera e centri di presa dei termogrammi nadirali.

Complice la scarsa risoluzione della termocamera (in rapporto alle camere RGB) la media di punti di legame individuata si è attestata su una media di appena 9749, un risultato non ottimale; ciononostante il risultato ottenuto in fase di elaborazione è da considerarsi soddisfacente.

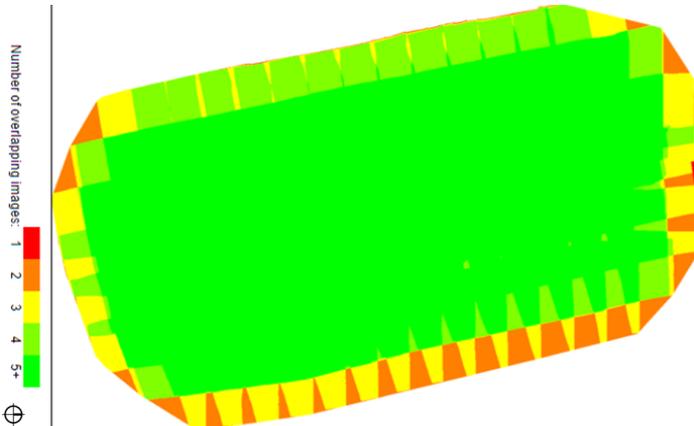
La seconda acquisizione dell'area, eseguito il giorno successivo è stata eseguita con la camera RGB Zenmuse X4T. Si è preferito eseguire questo rilievo il giorno successivo al rilievo termico al fine di sfruttare le migliori condizioni di illuminazione per utilizzare tempi di scatto più rapidi e lunghezza focale maggiore così da garantire la massima qualità fotografica possibile. Durante questa acquisizione sono stati eseguiti due piani di volo, uno a griglia singola con la camera in posizione nadirale e un secondo a griglia doppia con la camera rivolta a 45° così da acquisire con maggiore overlapping i dislivelli e gli alzati degli edifici. Questi voli hanno abbracciato una superficie leggermente più ampia intorno alla borgata, rispetto al volo precedente, acquisendo 235 fotogrammi con un ricoprimento ottimale anche nelle aree periferiche. Da queste acquisizioni sono stati riconosciuti in fase di processamento una media di ben 68629 punti di legame per immagine; garantendo un risultato ottimale.



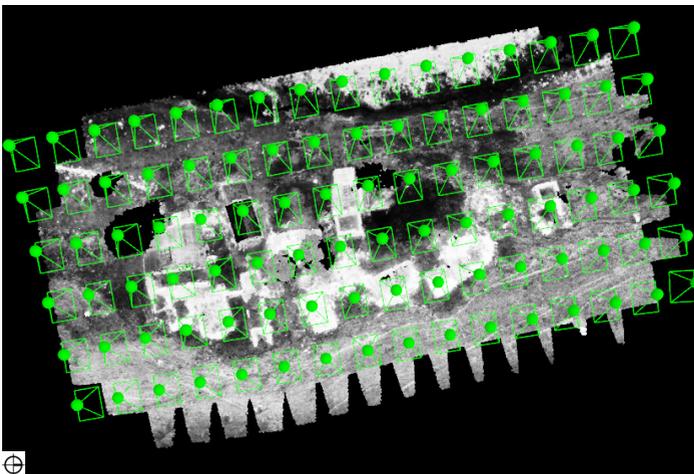
Sparse cloud derivata dal volo con camera RGB e centri di presa dei fotogrammi nadirali e inclinati.



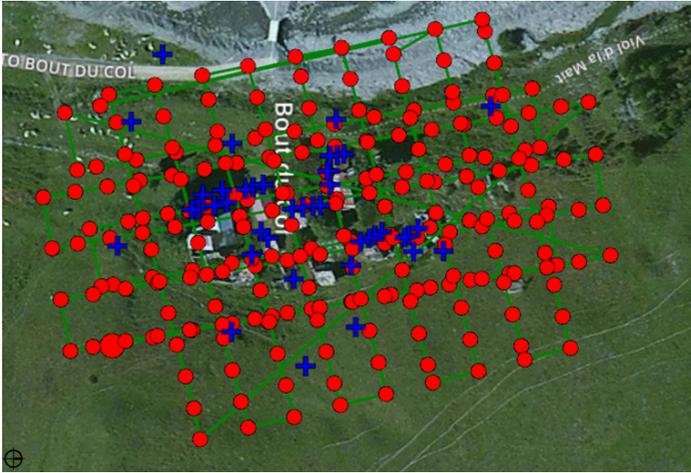
Schema acquisizione camera termica Zenmuse XT2



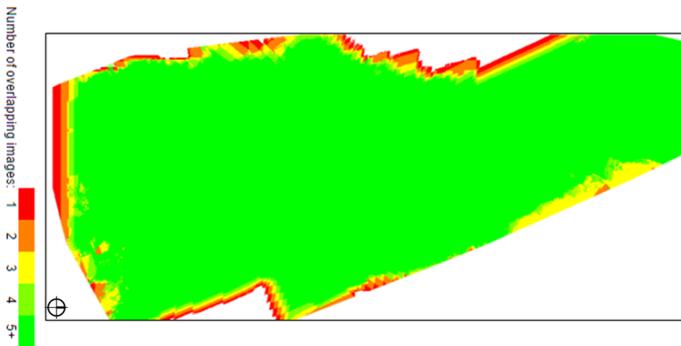
Report overlapping camera termica Zenmuse XT2



Dense cloud e centri di presa camera termica Zenmuse XT2



Schema acquisizione camera RGB
Zenmuse x4S



Report overlapping camera RGB
Zenmuse x4S



dense cloud e centri di presa camera
RGB Zenmuse x4S

3.4 ELABORAZIONE FOTOGRAMMETRICA

Una volta in laboratorio si è scelto di processare i acquisiti durante la campagne per mezzo del software pix4d mapper utilizzando la versione 4.5.2.

Per questo progetto si è deciso di utilizzare questo programma poiché è l'unico al momento sul mercato che implementa al suo interno alcuni *template* specifici per la fotogrammetria termica da UAV e supporta il sensore termico utilizzato (Flir Tau2), consentendo così di ottenere -senza una calibrazione della camera, poiché già integrata dal software- in fase di restituzione, ortomosaici e mappe di indici termografici facilmente indagabili, fornendo inoltre la possibilità di texturing dei termogrammi su una mesh generata da fotogrammi RGB.

Opzioni di elaborazione del modello

Standard 3D Maps 3D Models Ag Multispectral	Camera ThermoMAP Genera una mappa di riflettanza termografica.
Rapida 3D Maps - Rapid/Low Res 3D Models - Rapid/Low Res Ag Modified Camera - Rapid/Low Res Ag RGB - Rapid/Low Res	Acquisizione Immagini volò nadir camera thermoMAP
Avanzata Ag Modified Camera Ag RGB Thermal Camera ThermoMAP Camera	Qualità/Attendibilità degli Output Bassa Alta
	Velocità di elaborazione Lenta Veloce
	Suggerimenti per le Immagini di Input Immagini aeree da termocamera thermoMAP, acquisite con elevato overlap e piano di volo a griglia.
	Output Generati Mappa di Riflettanza Mappa di indice termografica

Il processo di elaborazione fotogrammetrica si è svolto indipendente mente ed egual maniera per i dataset termografici e per le immagini RGB.

La procedura seguita per i due dataset è stata la seguente.

3.4.1 ELABORAZIONE DATASET TERMICO

Si è deciso di iniziare l'elaborazione dal dataset termico per verificare se il software, nonostante la bassa risoluzione dei termogrammi (640x512 pixel), fosse in grado di orientarli correttamente, anche in relazione al fatto che non sono supportate immagini con risoluzioni inferiori a 640x480 pixel.

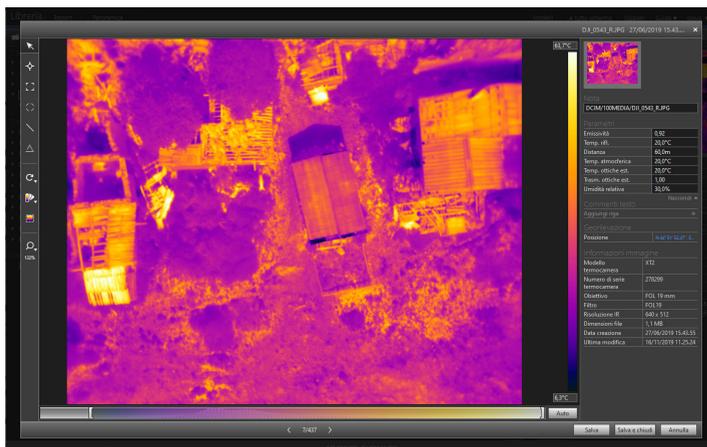
I termogrammi sono stati acquisiti dal drone in formato JPG radiometrico⁵⁴, sono stati successivamente impostati, grazie al software Flir Tools + con i seguenti parametri: fattore di distanza pari a 60 metri (l'altezza di volo media), valore di emissività generico pari a 0.92, considerando che il costruito indagato è composto prevalentemente di pietre di varia natura, e con una palette colore "IRON".

TABELLA EMISSIVITA'

MATERIALE	LUNGHEZZA D'ONDA	TEMPERATURA	EMISSIVITA'
	$\lambda, \Delta\lambda$	T (°)	$\epsilon_n(\lambda, T)$
Ottone ossidato	5	30	0.5
Ottone satinato	5	30	0.3
Ottone satinato	8÷12	30	0.3
Ottone satinato	2	100	0.4
PIETRA			
Pietra	2÷5	20	0.92
Pietra da calce	5	36	0.96
PIOMBO			
Piombo brillante	2÷5	250	0.08
Piombo greggio	8÷12	30	0.4÷4

54. Un JPG radiometrico rappresenta sia le immagini, sia i dati radiometrici mediante file in formato standard JPG.

ALLEGATO 1 "tabella emissività"
fonte: Ludwig, 2015



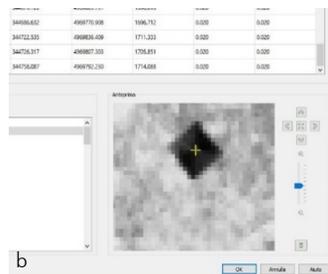
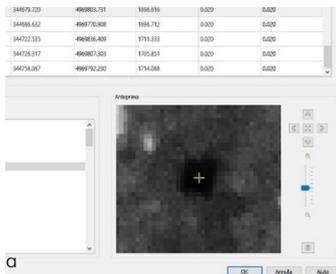
schermata del software Flir Tools + rappresentate le impostazioni attribuite ai termogrammi in fase di pre-elaborazione

I termogrammi così impostati sono stati importati in pix4d. ed elaborati tramite il template “Camera Thermo Map” in quanto, tra quelli disponibili, l’unico capace di generare come output la mappa di indici termografici (immagine pag. precedente).

Seguendo la procedura standard che applica il Laboratorio di Geomatica del Politecnico di Torino, sono stati eliminati i dati Exif⁵⁵ dei termogrammi per eliminare le informazioni GPS dei centri di presa acquisite dal drone che saranno ristimate attraverso la collimazione dei GCPs sui fotogrammi, così da garantire l’ottimizzazione del processo fotogrammetrico di calcolo dei centri di presa così come la conseguente rototraslazione e georeferenziazione nel sistema di riferimento desiderato. Purtroppo questa procedura non si è potuta applicare in quanto al momento il software non accetta per i template termici termogrammi non georeferenziati. Si è deciso così di importare i file con i relativi dati Exif e di collimare i GCPs sui termogrammi prima di eseguire l’“Elaborazione Iniziale” ma sfortunatamente l’anteprima non era visualizzabile per nessun file rendendo dunque impossibile procedere.

Per risolvere il problema si è eseguita l’“Elaborazione Iniziale” utilizzando i dati Exif. Al termine di questa prima elaborazione sono stati collimati i 10 GCPs sui termogrammi -che questa volta erano visualizzabili- ed è stata rieseguita la procedura di “Elaborazione iniziale”^{n.b.}.

Si segnala, inoltre, che durante questa fase di identificazione dei marker a terra sono stati riscontrati alcuni problemi. In particolare, l’impiego di marker in plastica telata, idonei per acquisizioni da UAV con sensori ottici, sebbene



55. Exchangeable image file format

n.b. Si fa presente che questo procedimento ha creato nel report^{xxx} un “warning” rispetto alla differenza tra il primo allineamento ed il finale a sottolineare la scarsa accuratezza, soprattutto sull’asse Z, del modulo GPS installato a bordo del quadricottero.

Collimazione di un target non visibile (a) ed uno meglio distinguibile (b). si noti come la scarsa risoluzione influenzi notevolmente questa fase

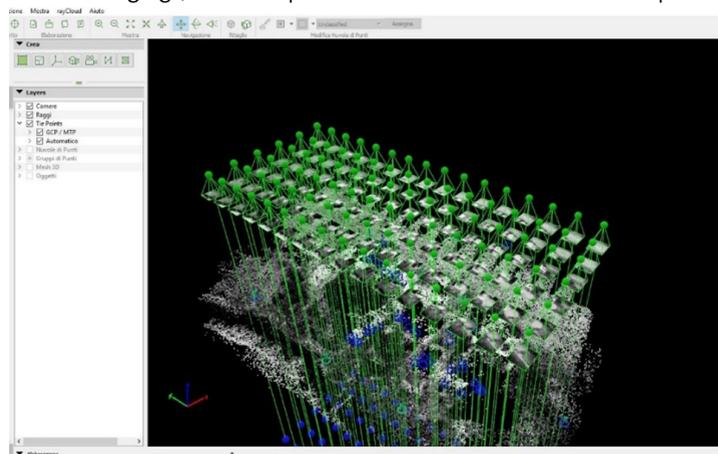
caratterizzati da un disegno a scacchiera con caselle nere alternate da caselle con colori sgargianti (bianco, giallo, arancione), risultavano poco visibili nelle immagini termiche in scala di grigi (imposte dal software), soprattutto in fase di individuazione precisa del punto centrale del marker. Queste criticità è imputabile al fatto che la risposta termica degli oggetti è conseguenza, per la maggior parte, dalle caratteristiche di emissività del materiale di cui è composto, nel caso della plastica, caratterizzata da un coefficiente di emissività alto (0,95): solo in minima parte il colore influenza la risposta infrarossa termica.

In fase di collimazione, quindi, i marker a terra risultavano come corpi neri uniformi, non consentendo di distinguere adeguatamente il punto centrale costituito dal punto di incrocio della griglia.

Ne consegue, quindi, che target realizzati con l'utilizzo di caselle a risposta termiche molto differenti, permetterebbero l'identificazione molto più accurata del punto centrale, soprattutto in applicazioni di tipo aereo.

Nonostante queste difficoltà, con molta attenzione si ottenuto un errore residuo di appena 0.031m⁵⁶

Durante questa fase di collimazione si è potuto notare, inoltre, che il software, sebbene abbia acquisito come input termogrammi pre-elaborati, li abbia riconvertiti autonomamente nel formato "grezzo" radiometrico in scala di grigi, senza possibilità di interazione da parte



56. Report "termica fin." Allegato 2

Sparse cloud termografica in scala di grigi, cui si possono notare i raggi verdi che rappresentano la differenza tra il primo allineamento e quelli basato sui GCPs

dell'operatore con gli stessi impedendo di modificare i valori di emissività o lo stile rappresentazione.

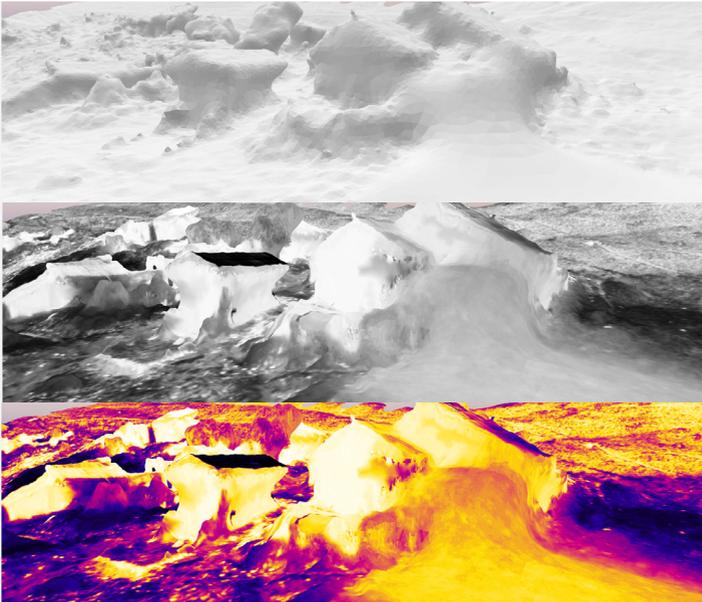
Si presuppone dunque che i dati inseriti nella fase di pre-elaborazione dei termogrammi siano stati ignorati dal programma e sia stato impostato un valore di emissività standard pari a 1.

Terminata la fase di collimazione e generata la sparse cloud, il passaggio successivo è stato la generazione della nuvola di punti densa e la mesh.

La mesh generata, complice lo scarso numero di tie points individuati, è risultata di scarsa qualità, soprattutto nella riproduzione degli alzati con forme molto smussate e poco precise e una risoluzione complessiva molto bassa.

Viceversa la risoluzione della stessa mesh rispetto ad una vista a volo d'uccello risulta soddisfacente e un buon dato da integrare all'ortofoto visibile (RGB)

Insieme alle mesh il programma prevede la texturizzazione dei termogrammi sulle stesse riportando così i dati radiometrici rappresentati in scala di grigi poi visualizzabili



mesh monocromatica

mesh texturizzata con termogrammi

mesh texturizzata palette "termico"

nella palette tipica della termografia.

Nell'ultimo step di elaborazione, si andranno a ricostruire DSM e Ortofotoper la visualizzazione e consultazione dei dati di temperatura su una base metrica in un sistema di riferimento cartografico noto.

Le mappe di radianza graduate, così create, sono personalizzabili e consentono il riconoscimento visivo degli elementi rilevati tramite l'applicazione di palette di colori, in funzione dei valori radiometrici di ogni pixel, consentendo di indagare l'area nella sua totalità e avere un quadro generale del territorio analizzato.



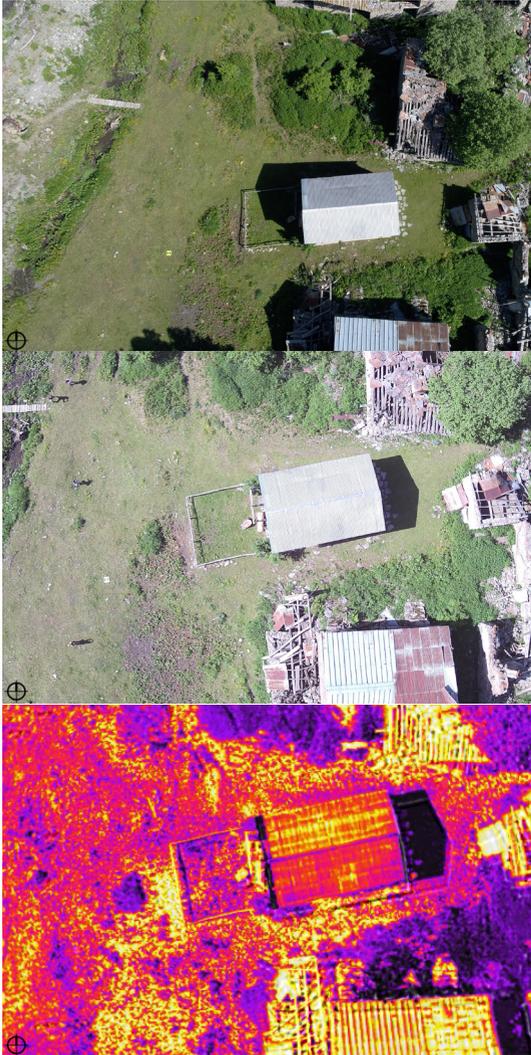
Mappa di radianza termica

Colore	Min	Max
	25.57	39.40
	21.94	25.57
	20.25	21.94
	19.14	20.25
	18.37	19.14
	17.87	18.37
	17.52	17.87
	17.25	17.52
	17.01	17.25
	16.77	17.01
	16.55	16.77
	16.33	16.55
	16.12	16.33
	15.91	16.12
	15.71	15.91
	15.52	15.71
	15.32	15.52
	15.12	15.32
	14.92	15.12
	14.72	14.92
	14.52	14.72
	14.32	14.52
	14.11	14.32
	13.90	14.11
	13.66	13.90
	13.38	13.66
	13.06	13.38
	12.68	13.06
	12.25	12.68
	11.70	12.25
	10.65	11.70
	-7.30	10.65



3.4.2 ELABORAZIONE DATASET RGB

Successivamente all'elaborazione dei dataset termici si è applicato il medesimo workflow ai dati acquisiti dalla camera RGB. Come già accennato la camera utilizzata ha alcune caratteristiche che le consentono una resa fotografica di ottima qualità, molto superiore alle classiche camere installabili su UAV ed immediatamente apprezzabile già nella fase di importazione dei dati su pix4d.



il medesimo soggetto inquadrato dalla stessa altezza con:

Dji Zenmuse x4s alla risoluzione massima di 5472x3648

Dji Zenmuse XT2 camera RGB alla risoluzione massima di 4000x3000

Dji Zenmuse XT2 camera termica (Flir Tau 2) alla risoluzione massima di 640x512

Differentemente da quanto avvenuto per i termogrammi, le immagini acquisite con la Zenmuse x4s non sono state pre-processate e sono state importate direttamente in formato JPG nel software di elaborazione fotogrammetrica.

Per ottenere dei dati maggiormente paragonabili al dataset termico si è adottato il medesimo procedimento, basando il primo allineamento su gli Exif file e la fase di imposizione dei GCPs posteriormente al primo allineamento. Questa procedura ha generato nel report finale⁵⁷ errori di posizionamento paragonabili a quelli ottenuti nell'analisi del dataset termico.

I risultati ottenuti dall'allineamento sono stati subito di ottima qualità, come si può evincere dal report allegato, anche in relazione ad un maggior numero di fotogrammi acquisiti e degli schemi di volo con camera inclinata a 45°.

L'ottima qualità di questo dataset si è ovviamente trasferita alla mesh e alla texturizzazione che in relazione ad un GSD di 3,22 cm sono state perfettamente generate riportando informazioni molto accurate anche sugli alzati.



mesh monocromatica x4s



mesh texturizzata con fotogrammi



mesh monocromatica XT2 termica

57. report "RGB zenmuse x4s"
Allegato 3

Similmente le ortofoto hanno restituito risultati notevoli, riportando, grazie agli ottimi parametri di profondità colore della camera, un gran numero di dettagli sia sull'edificato sia riguardo al contesto.

ortofoto x4s, immagine fuori scala



3.4.3 UNIONE DEI DATASET RGB E TERMICO

Durante le elaborazioni fotogrammetriche dei termogrammi, come anticipato, ci si è reso conto che le mesh generate non avevano un sufficiente livello di dettaglio degli alzati. Per risolvere questo problema, ed aumentare in generale la risoluzione del modello tridimensionale generato dalle immagini termiche, si è operata una procedura di texturizzazione delle informazioni termiche sul modello generato tramite camera RGB. Unendo dunque i dati acquisiti da due voli distinti avvenuti in due giorni differenti e con piani di volo diversi.

Questa procedura, resa possibile da pix4d prevede che venga utilizzato il dato geometrico della nuvola ottenuta dal dato visibile (che si presuppone abbia una risoluzione maggiore rispetto alla termica) sul quale viene interpolato il dato radiometrico acquisito dal termocamera.

All'atto pratico il procedimento prevede che si esegua una "Elaborazione Iniziale" per entrambi i dataset separatamente. Successivamente si crea un progetto di unione in cui si caricano i progetti precedentemente

Process dataset with both thermal and RGB imagery (A better 3D mesh/ model)

Thermal cameras usually have much lower resolution than RGB cameras, and thus the 3D model is of much lower quality. The idea is to use the higher resolution RGB images to compute a detailed 3D model (mesh) and to project the thermal texture on top of it.

This greatly improves the final thermal 3D model. To process a dataset with both thermal and RGB imagery:

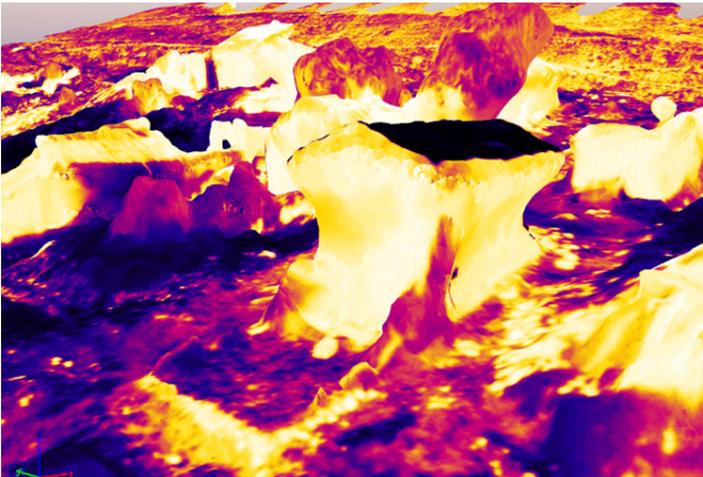
1. Run step 1. *Initial Processing* for the thermal dataset following the instructions above.
2. Run step 1. *Initial Processing* for the RGB dataset in a separate Pix4D project.
3. Merge the RGB and the thermal projects. For more information about merging project: [Merging projects](#).
4. On the menu bar, click **Process > ProcessingOptions**. Select **2. Point Cloud and Mesh** and the tab **Advanced**. Ensure that for the *Point Cloud* and *Mesh Geometry* image groups, *Thermal IR* is unchecked and that *group1* is checked. Ensure that for the *Mesh Texture* image group, *Thermal IR* is checked and *group1* is unchecked. For more information: [Menu Process > Processing Options... > 2. Point Cloud and Mesh > Advanced](#).

il processo esplicito dal supporto online di pix4d <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/360000173463-Processing-thermal-images>

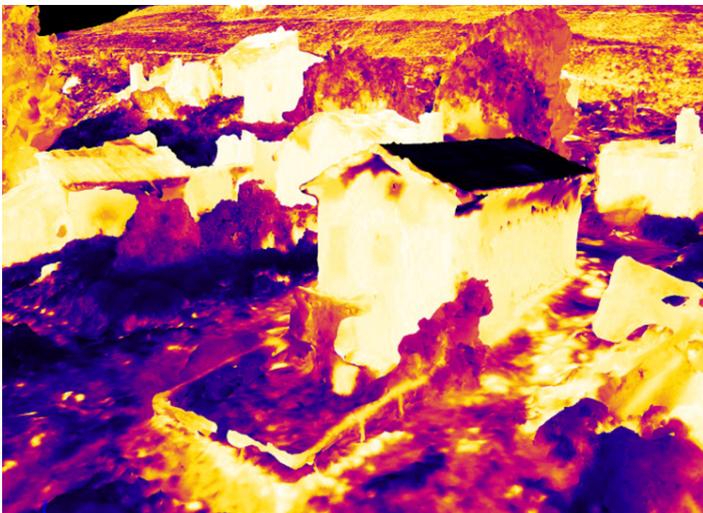
elaborati, dunque quello derivato dall'elaborazione dei fotogrammi RGB e il progetto derivato dall'elaborazione dei termogrammi.

A questo punto, tramite le opzioni avanzate si imposta che i soli dati RGB (nello spettro del visibile) vengano utilizzati per le elaborazioni fino alla generazione della mesh, e che la texturizzazione di quest'ultima avvenga tramite l'interpolazione del dato termico.

Questa procedura ha permesso di ottenere risultati molto interessanti, ed incrementare notevolmente la risoluzione e la fruizione del modello termografico.



Mesh generata dai soli termogrammi con texturizzazione termica.



Mesh generata dalle sole immagini RGB texturizzata con i termogrammi

3.5 STUDIO DELL'ORTOFOTO E DEL MODELLO TERMOFOTOGRAMMETRICO

Dopo la lunga serie di funzioni semiautomatizzate che hanno contraddistinto il processo di rilievo e restituzione dei dati acquisiti durante i voli, fino ad ora, questa fase di studio è avvenuta in maniera manuale, andando ad indagare dall'ortofoto termica, dalle mappe di radianza, e dal modello delle temperature tridimensionale, le aree di discontinuità termica, interpretando i dati visuali, e selezionando le aree di maggiore interesse, dove i valori evidenziavano variazioni notevoli.

Partendo dalla conoscenza della borgata di Bout du Col, e dal suo avanzato stato di abbandono, anche in relazione alla posizione degli edifici rimanenti, è legittimo pensare che la borgata fosse molto più densamente edificata di quel che appare oggi. Con questo studio si è voluto sperimentare se mediante queste tecniche di rilievo non invasivo e questa metodologia sperimentale di termografia abbinata alla fotogrammetria, fosse possibile risalire alla collocazione degli edifici mancanti della borgata al fine di arricchire la conoscenza dell'area; in una fase successiva si sono verificate poi le conclusioni tratte per mezzo della documentazione storica.

Per facilitare questa operazione ci si è avvalsi delle immagini in falsi colori.

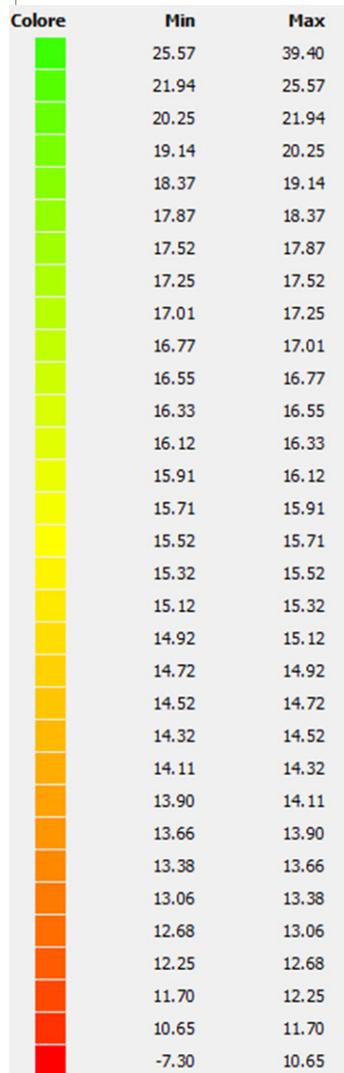
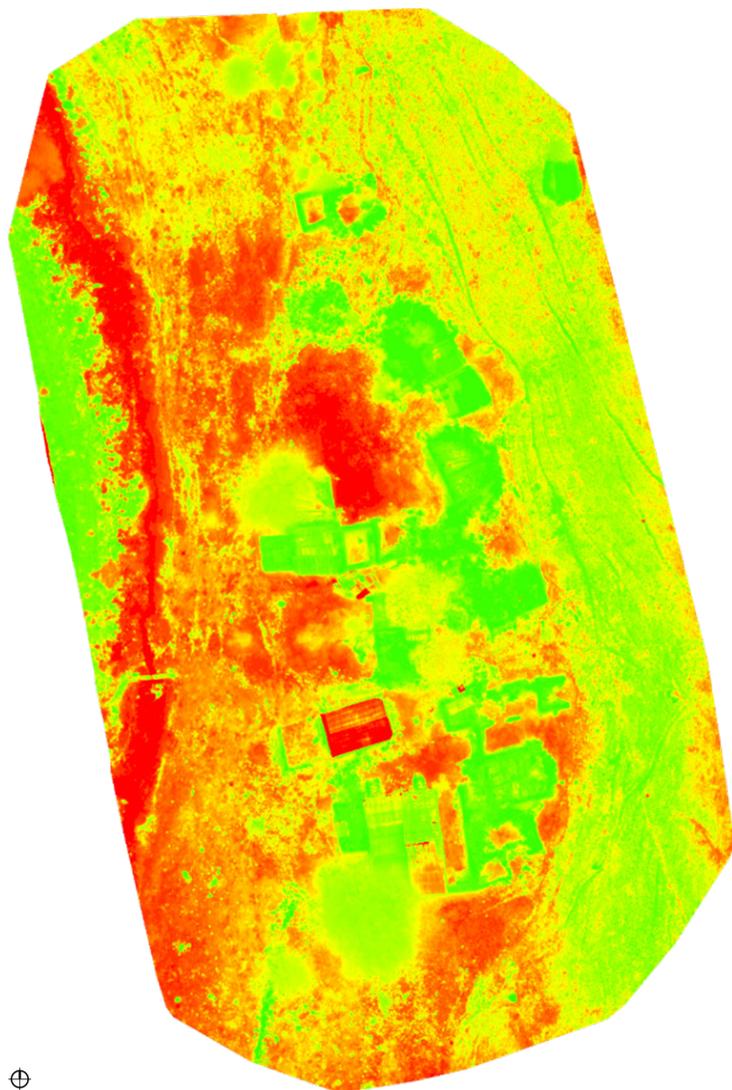
Queste attribuiscono ad ogni intervallo di temperatura un colore tra i 32 disponibili. Tra i possibili algoritmi, offerti da pix4d, che definiscono l'intervallo di temperatura, quello scelto, in base alla possibilità di notare meglio le discontinuità, suddivide le temperature in 32 classi, una per colore in base all'area che occupano i pixel appartenenti a quel determinato intervallo.

Suddividendo dunque gli intervalli di temperatura in 32 classi che rappresentano la medesima quantità di area nel modello. (pix4d support⁵⁸).

58. <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/204631495-Menu-View-Index-Calculator-Sidebar-4-Color-Maps-and-Prescription>

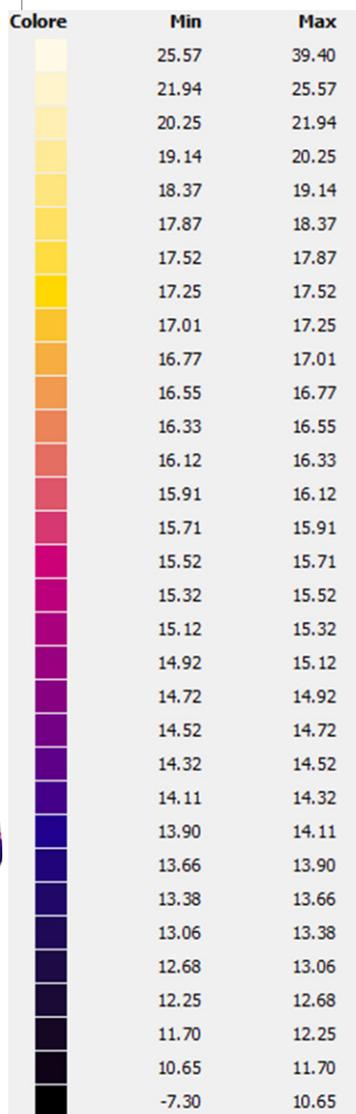
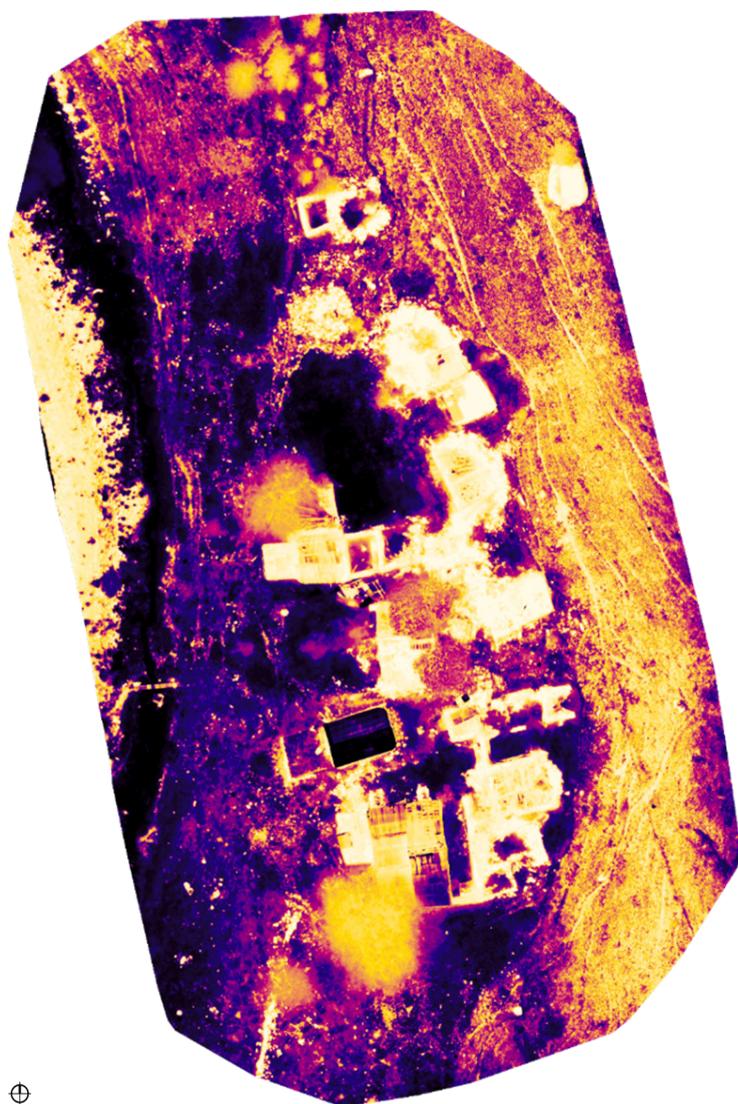


Ortofoto termica

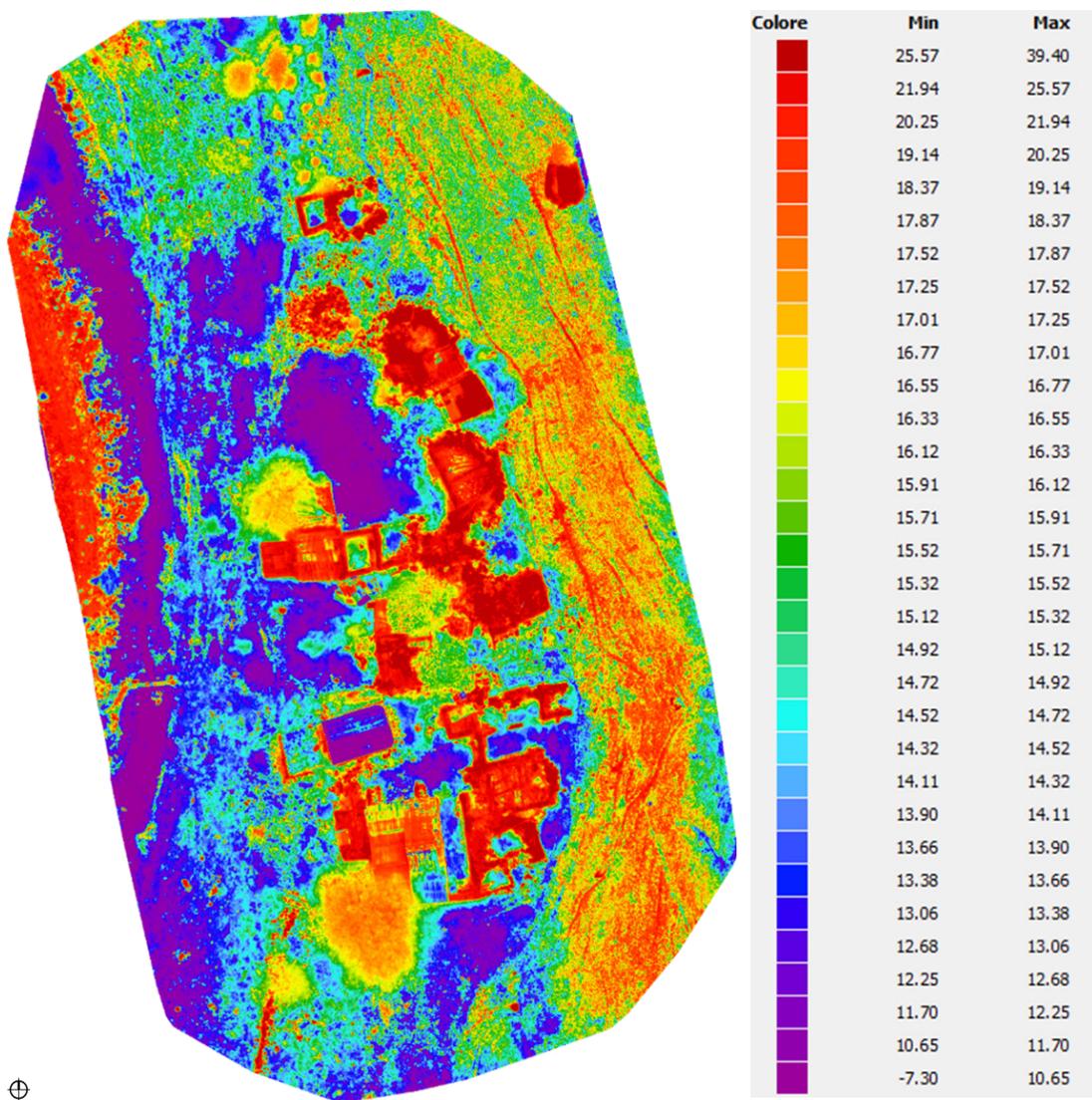


⊕

Mappa di riflettanza RYG



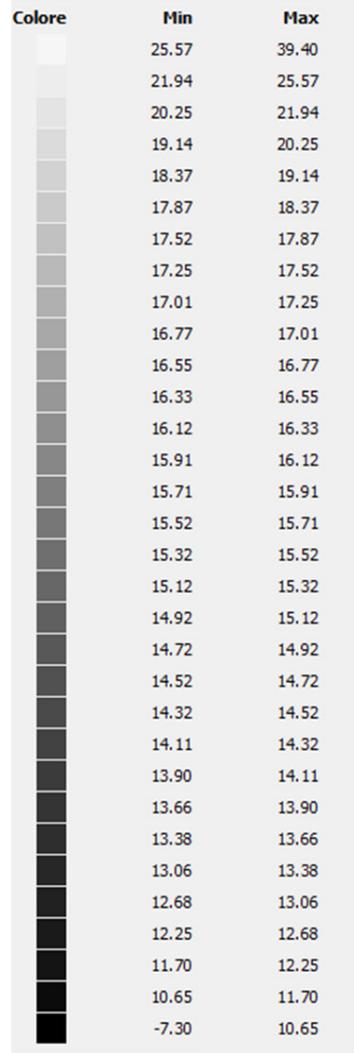
Mappa di riflettanza termica



⊕
Mappa di riflettanza spettrale

3.5.1 AREE DI INTERESSE

Da questa prima analisi sono state identificate sette zone, ritenute meritevoli di indagini più approfondite in base alla loro discontinuità termica, nonché in relazione alla forma e all'orientamento congruenti con il tessuto antropizzato.



Identificazione delle aree di interesse su ortofoto

3.6 ANALISI DEI TERMOGRAMMI

Al fine di approfondire l'analisi di queste zone si è voluto procedere allo studio dei singoli termogrammi che identificano le aree, poiché garantiscono una maggiore libertà di analisi rispetto all'ortofoto.

ANALISI INTERPRETATIVA.

L'analisi delle discontinuità termiche è avvenuta tramite l'individuazione dei termogrammi raffiguranti le aree da indagare, i quali sono stati analizzati singolarmente tramite l'impiego del software "FLIR Tool +". Tramite questo software, messo a punto dall'azienda FLIR per lo studio dei termogrammi catturati con le sue termocamere, è possibile indagare ogni termogramma modificandone i parametri di emissività al fine di ricercare determinati materiali. Inoltre, il software mette a disposizione numerosi stili di palette colore da applicare ai valori per facilitarne l'interpretazione. A questo proposito si è operata una selezione di palette tra quelle disponibili, con il criterio di massima informazione fornita e facilità di interpretazione.

IMPOSTAZIONE VALORE DI EMISSIVITÀ.

Come primo step di questa analisi si è impostato per ogni termogramma indagato un valore di emissività⁵⁹ appropriato allo scopo di indagine. Si è selezionato un valore di 0.92⁶⁰ al fine di indagare con più interesse la risposta termica delle pietre, che componevano gli ipotetici muri perimetrali delle costruzioni.

59. vedi capitolo 2

60. vedi tabella emissività, allegato 1

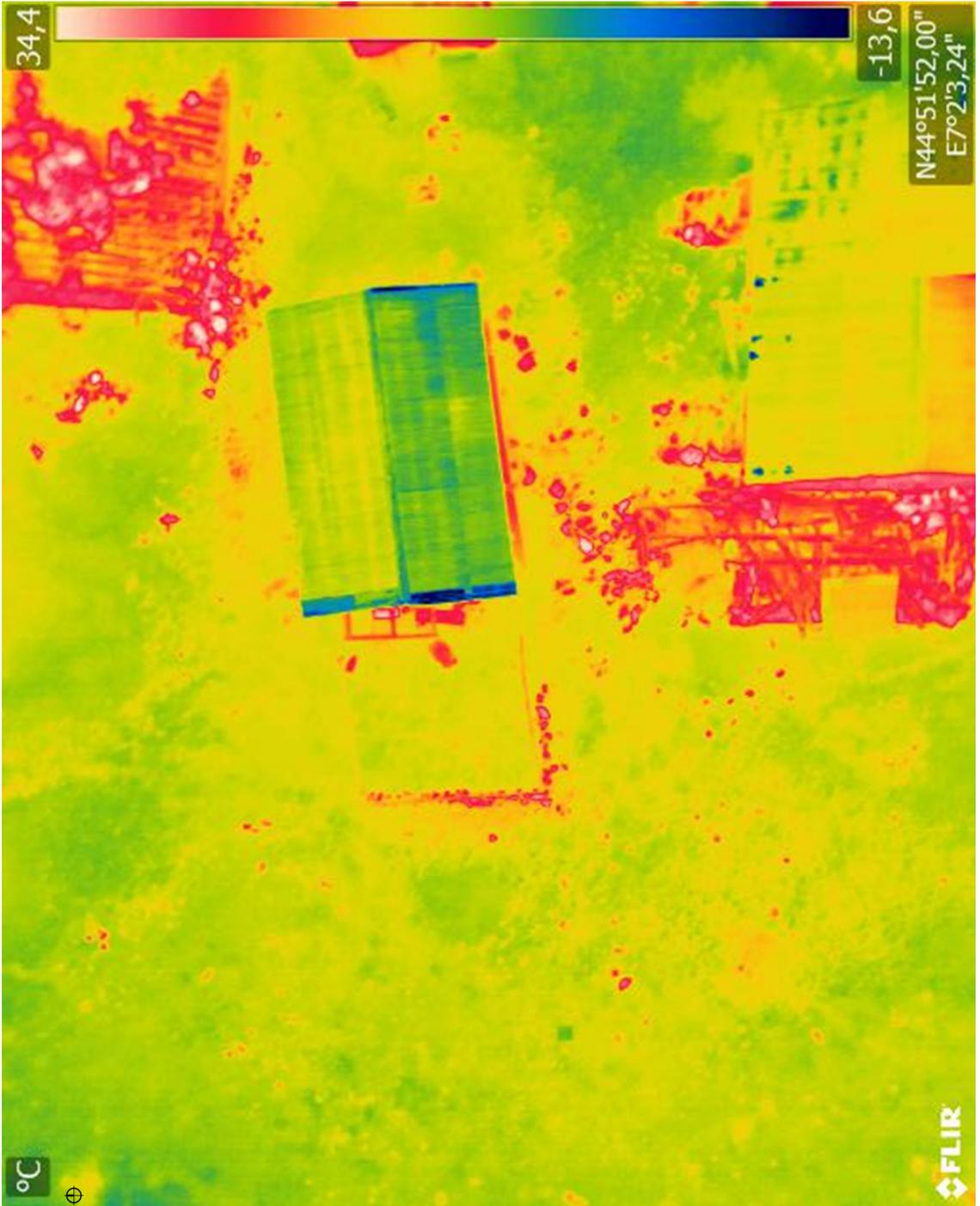
ZONA 1



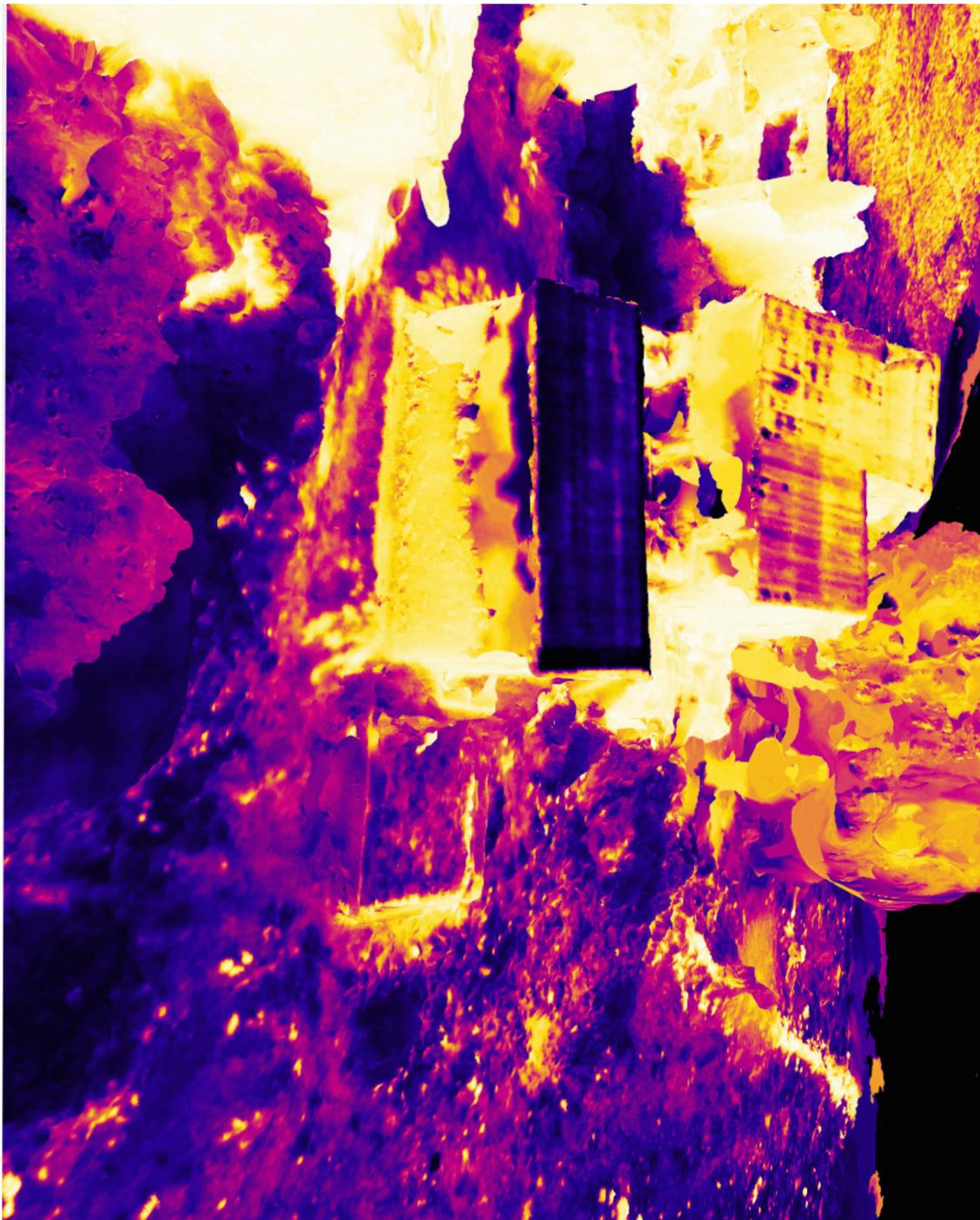
ZONA 1



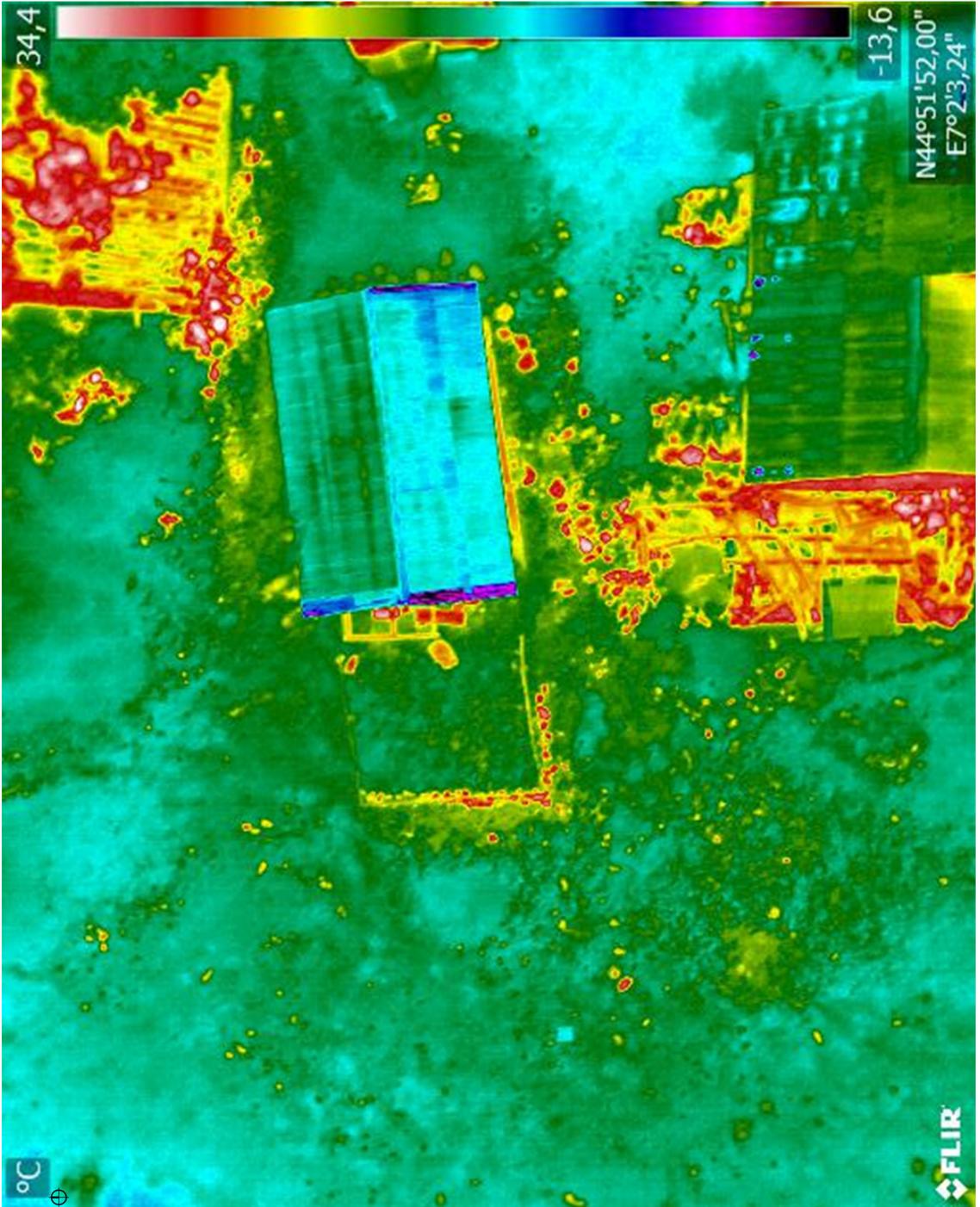
ZONA 1



ZONA 1



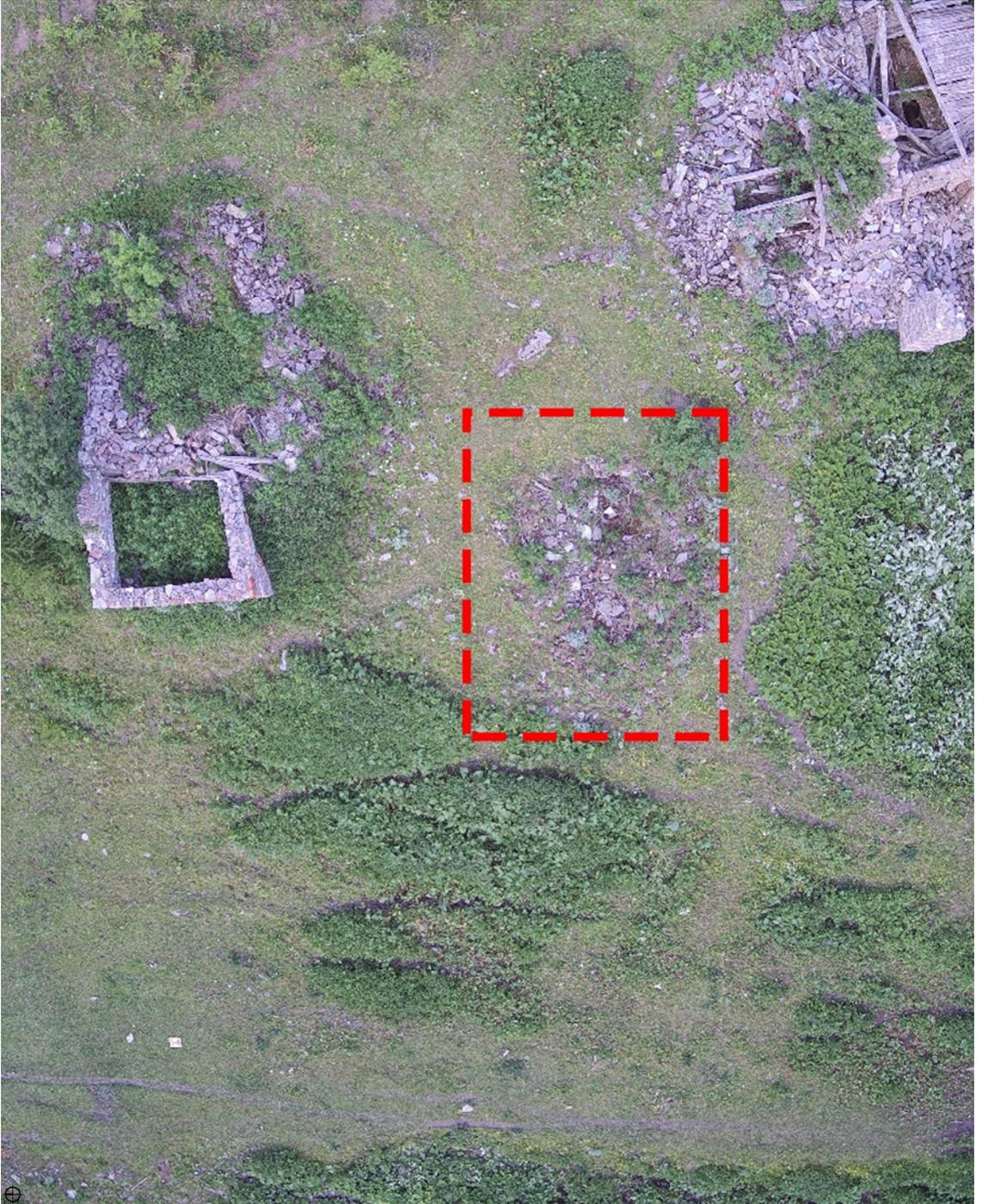
ZONA 1



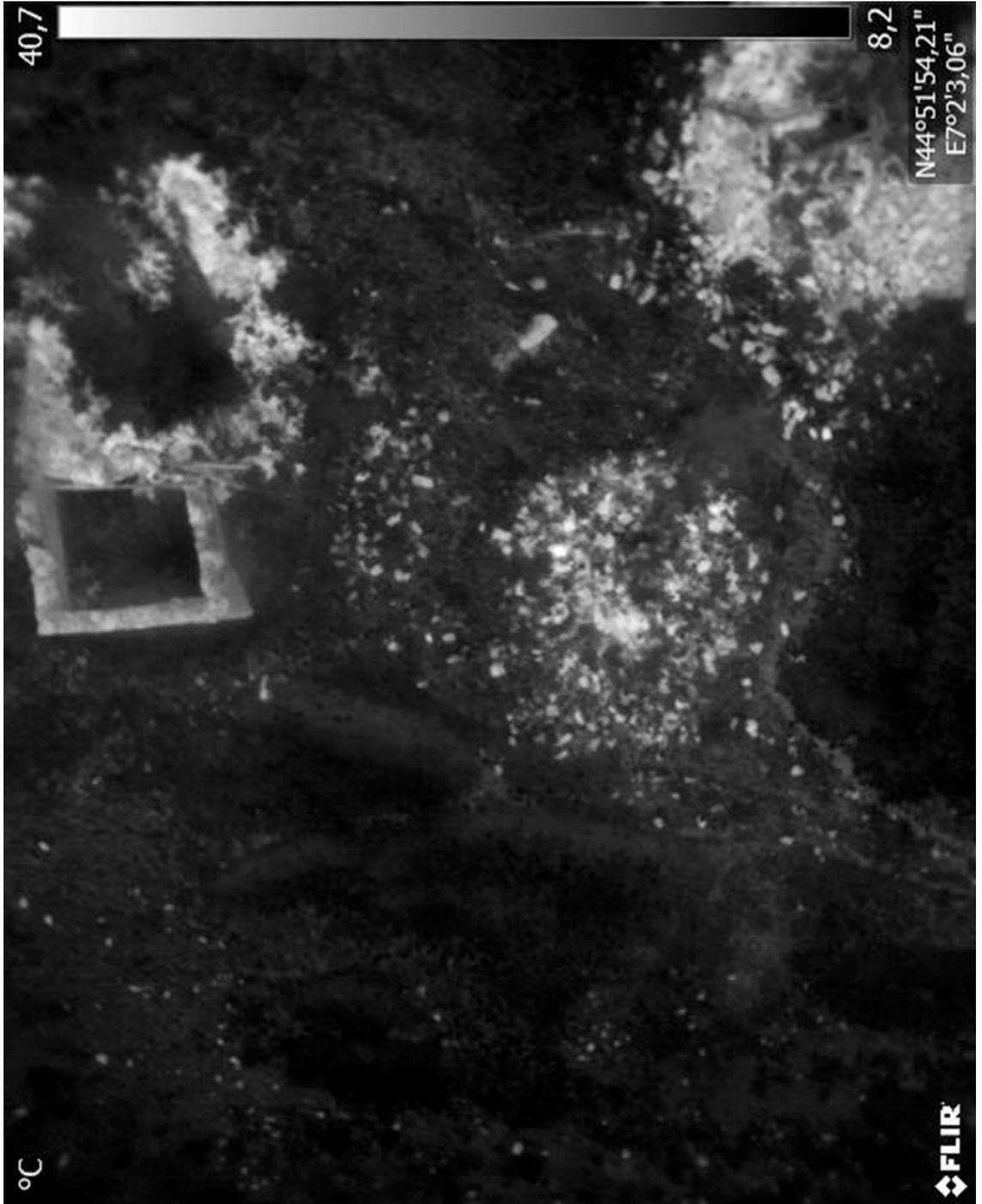
Zona 1: risulta subito evidente la risposta insolita della copertura, questa risposta è attribuibile a recenti opere di rifacimento del tetto, utilizzando un materiale metallico con elevata riflettanza, infatti, alcuni materiali come la maggior parte dei metalli e il vetro, riflettono le radiazioni infrarosse in modo simile ad uno specchio (cfr. FLIR). I riflessi riportano, una volta indagati, valori di temperatura molto bassi. Questi valori risultano forvianti, in quanto non sono altro che la temperatura del cielo riflessa dal materiale.

Si può inoltre notare, analizzando con attenzione il termogramma, della presenza di alcune zone in prossimità alle linee di bordo particolarmente "fredde". Basandosi su queste osservazioni e considerando i valori di temperatura particolarmente bassi - attribuibili a una riflettanza più elevata, e quindi imputabili ad un materiale meno usurato - che siano avvenute recentemente opere di sostituzione o riparazione della copertura degli sporti.

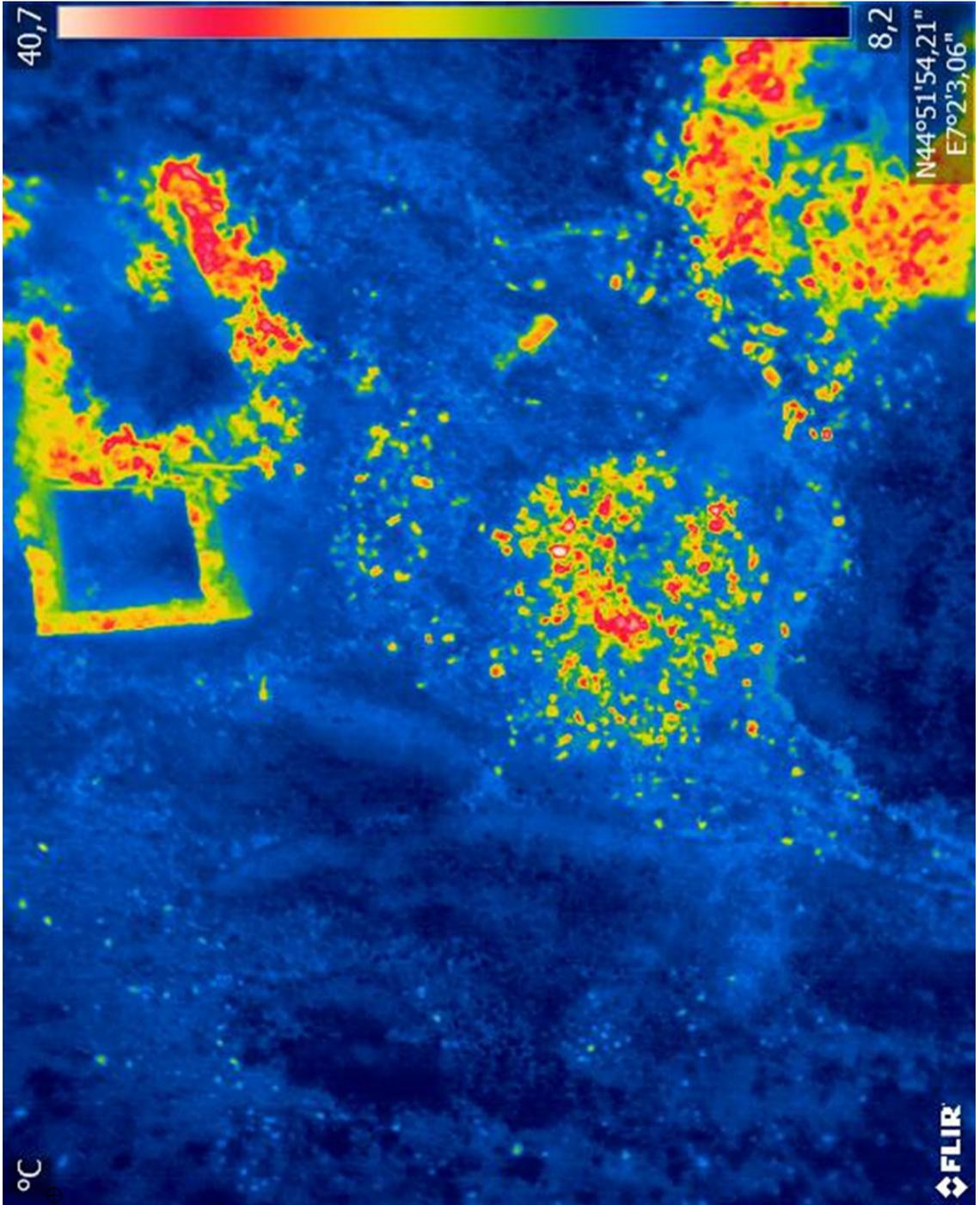
ZONA 2



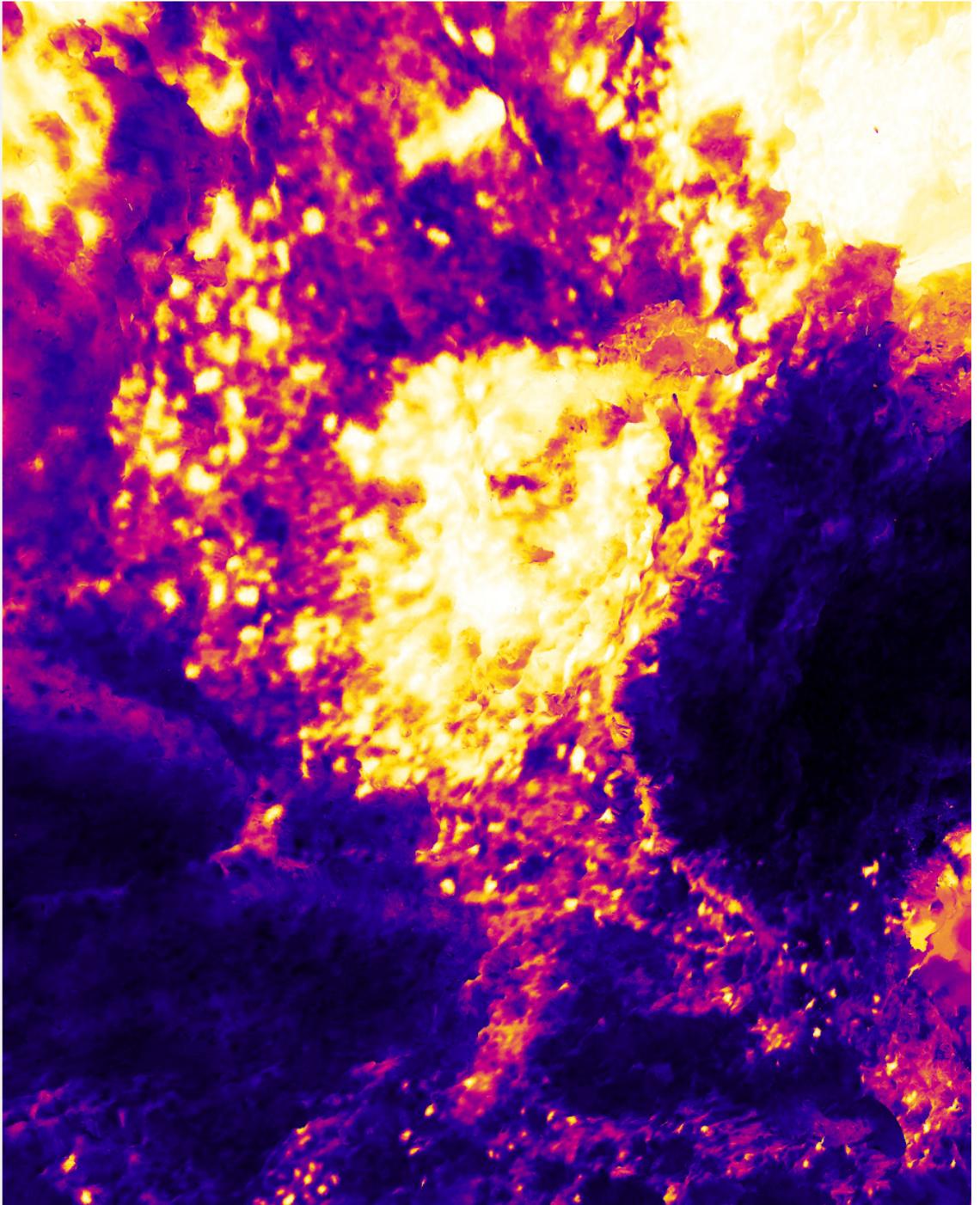
ZONA 2



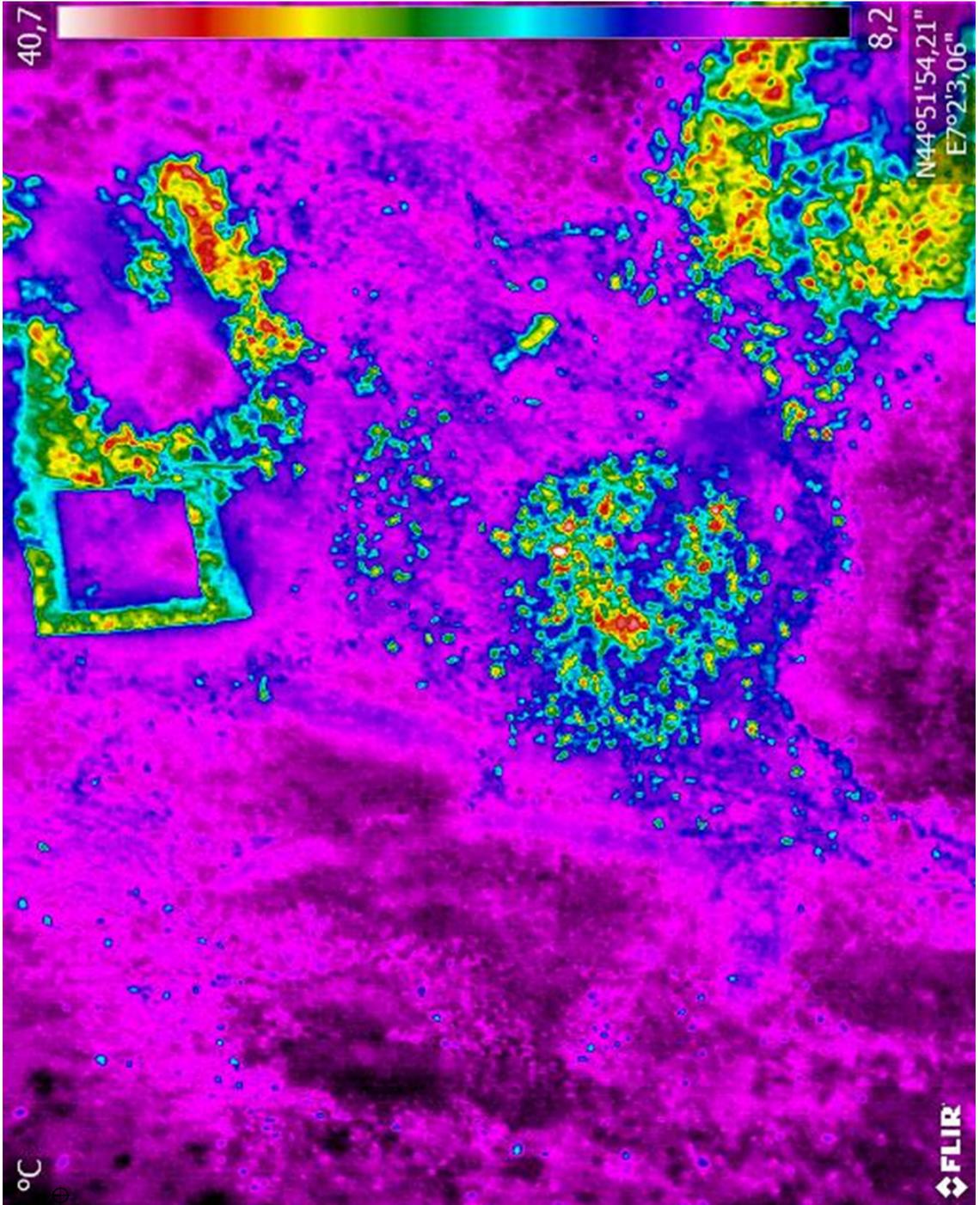
ZONA 2



ZONA 2

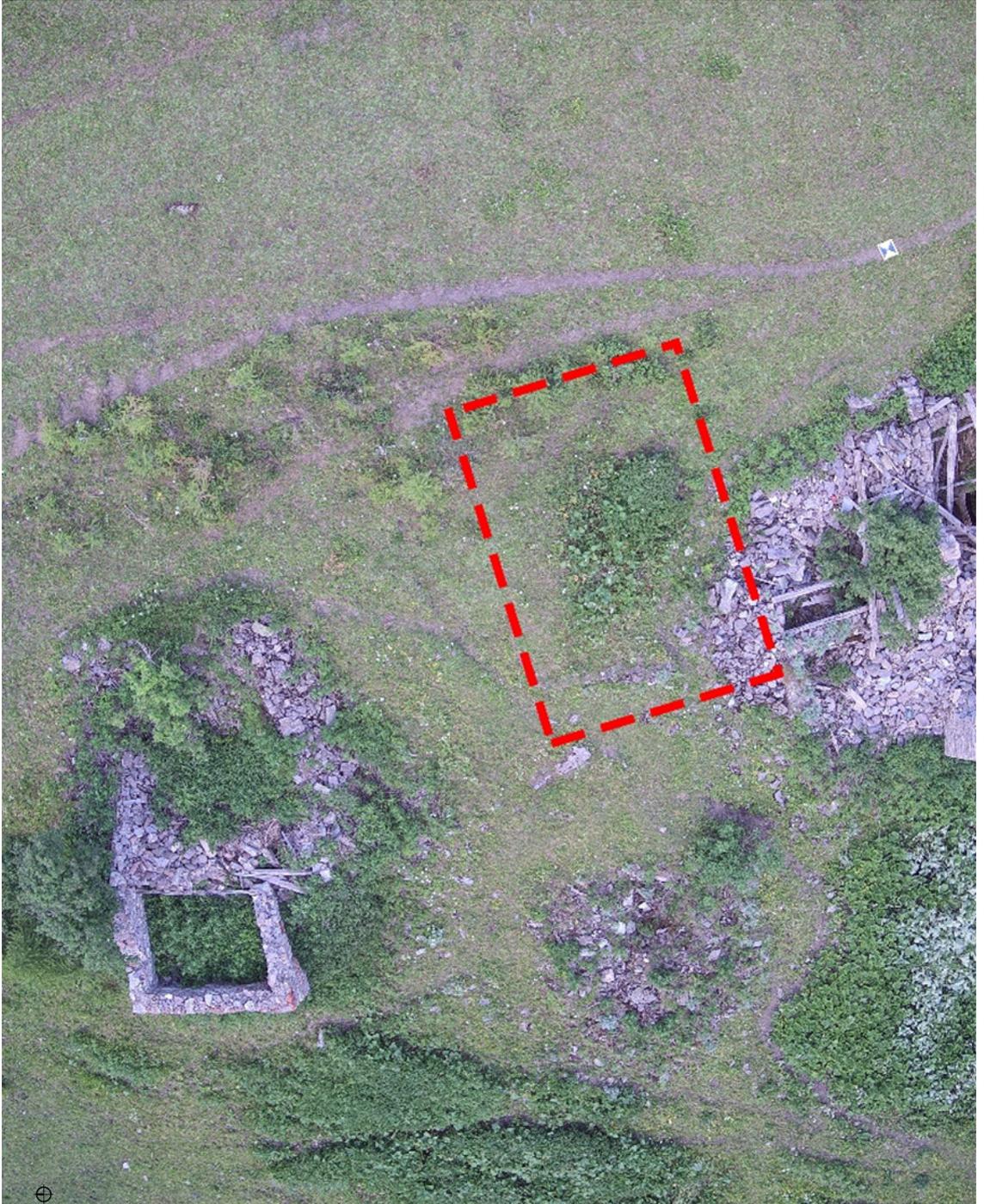


ZONA 2



Zona 2: risulta facilmente intuibile dall'analisi dei termogrammi e dallo studio delle foto RGB che in questa area fosse presente un edificio. La grande quantità di pietre che rispondono ad una temperatura più alta dell'intorno è un segnale inequivocabile; si apprezza inoltre la presenza di uno scavo identificabile dal modello 3d e di pietre disposte a circondarlo. La posizione delle pietre in maniera uniforme intorno allo scavo fa presumere sia avvenuto un collasso della struttura.

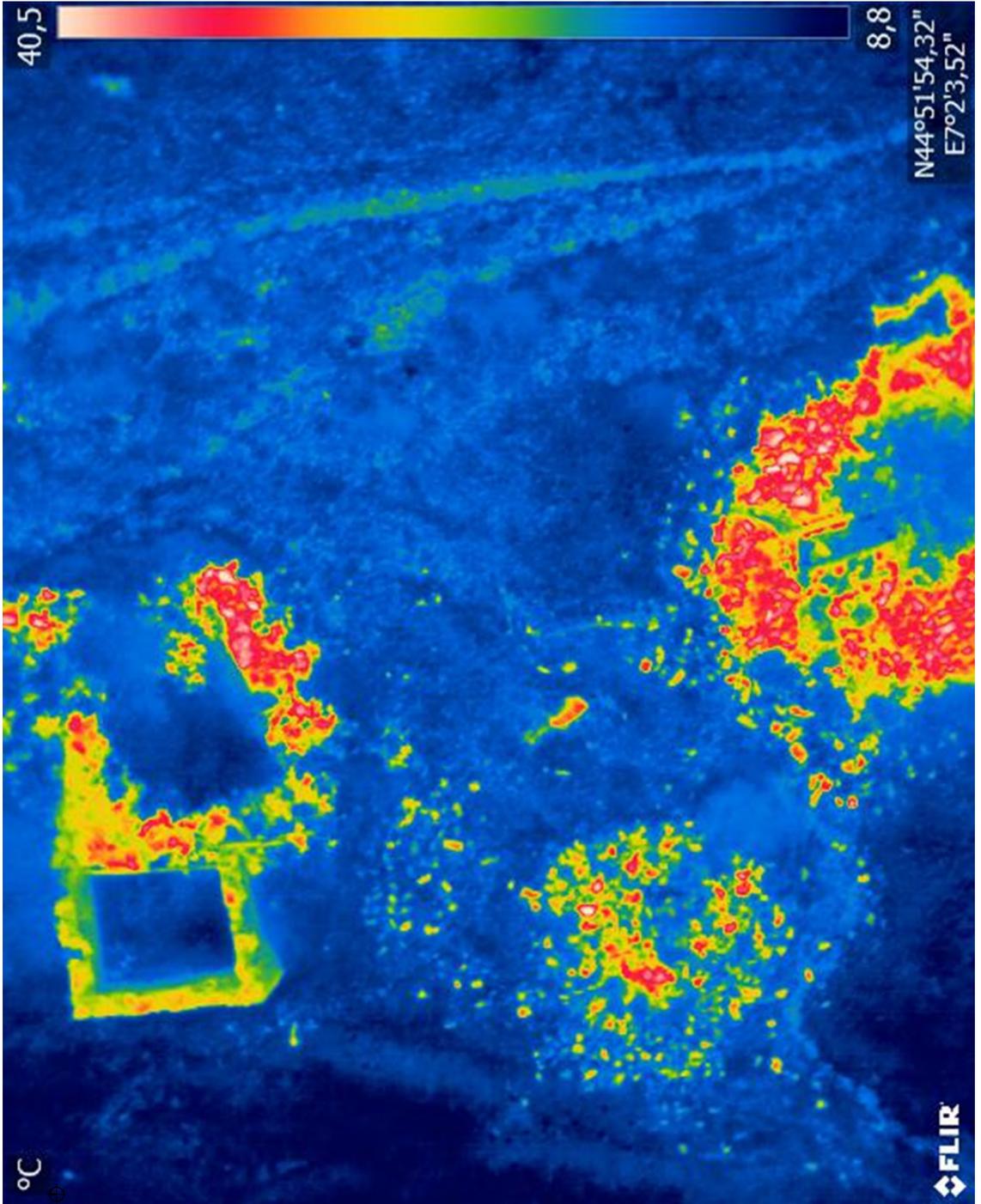
ZONA 3



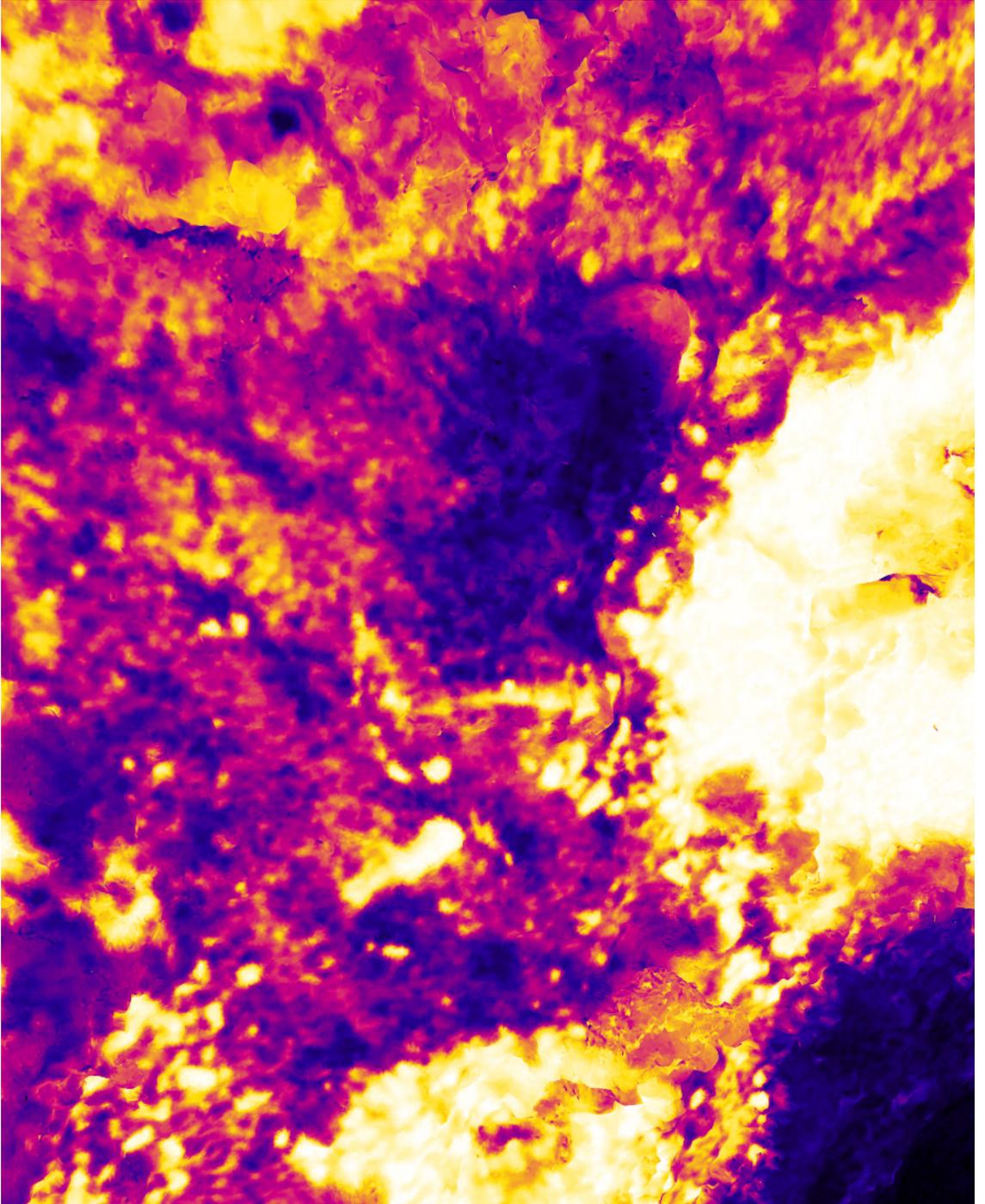
ZONA 3



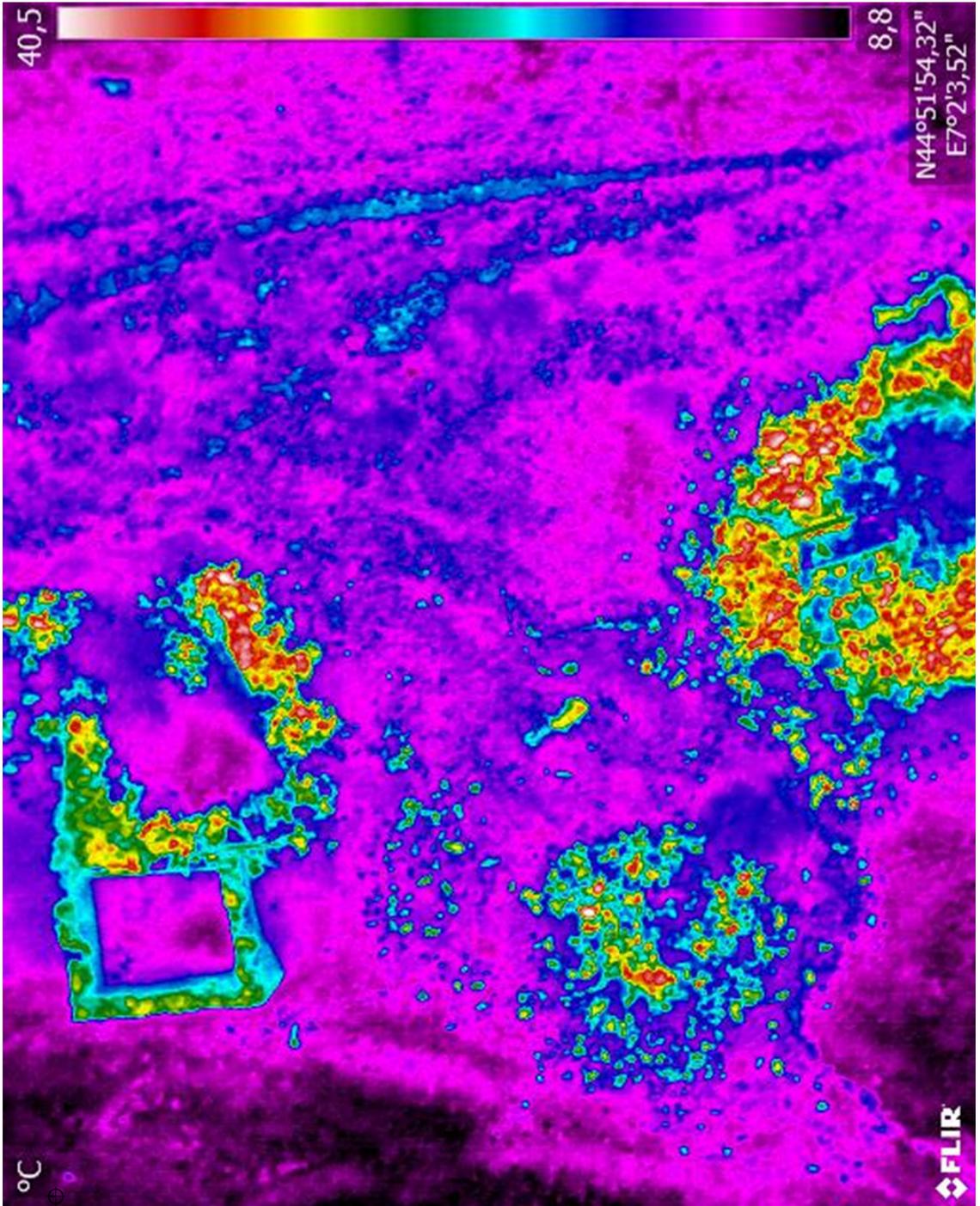
ZONA 3



ZONA 3



ZONA 3



Zona 3: Si è ritenuta quest'area di interesse poiché la risposta termografica identifica una zona ben circoscritta e uniforme, bordata su almeno un lato da una struttura in pietra caratterizzata da una risposta termica evidente ed un dislivello chiaramente identificabile nel modello tridimensionale. Inoltre, la presenza di vegetazione differente rispetto all'intorno fa presumere movimentazioni di terra. Quest'ultima osservazione potrebbe far pensare che la discontinuità termica sia da attribuire unicamente alla presenza di vegetazione, ma se si osserva con attenzione l'area interessata dalla vegetazione è inferiore rispetto all'area di discontinuità, imputabile dunque alla risposta termica del suolo.

ZONA 4



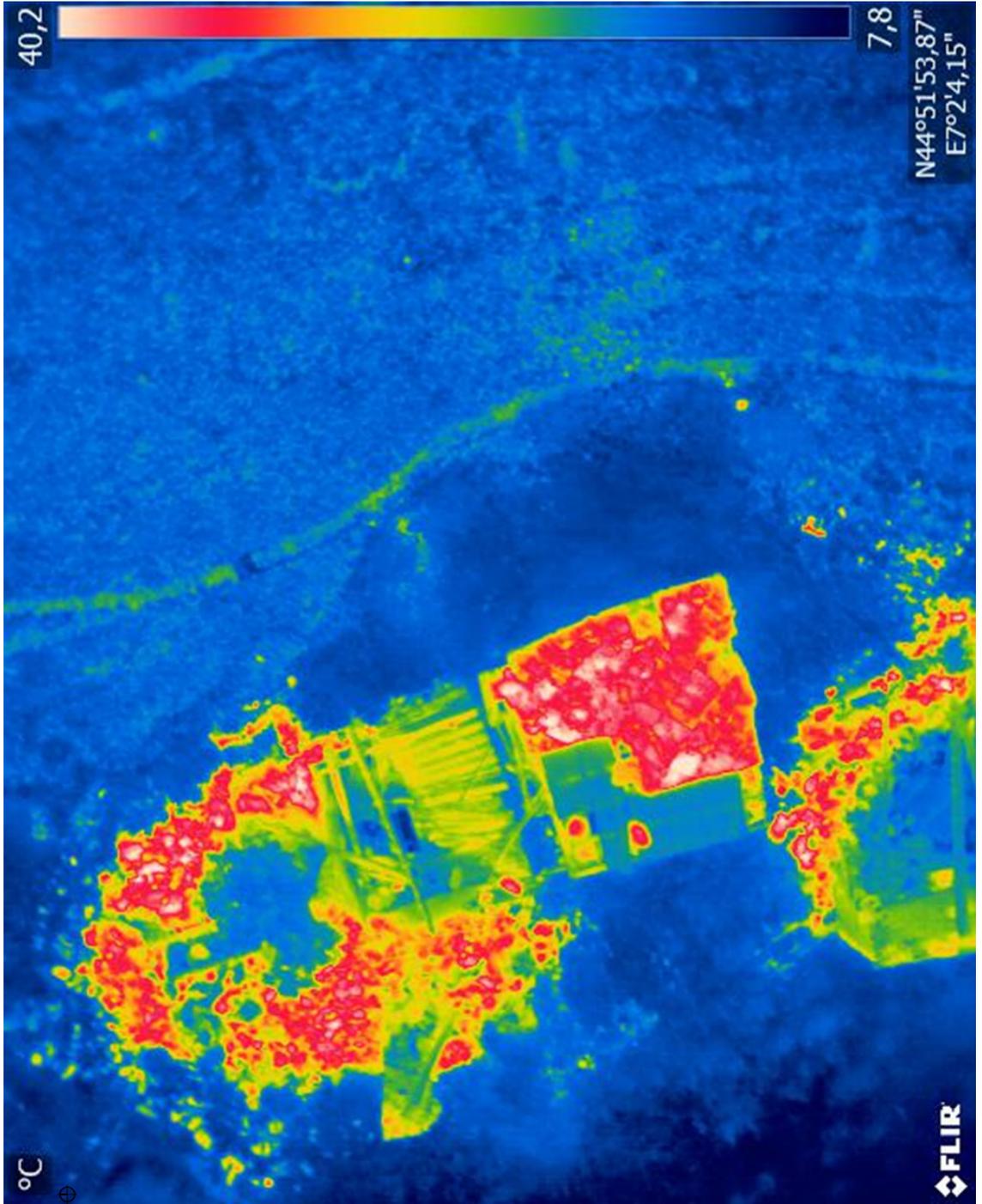
ZONA 4



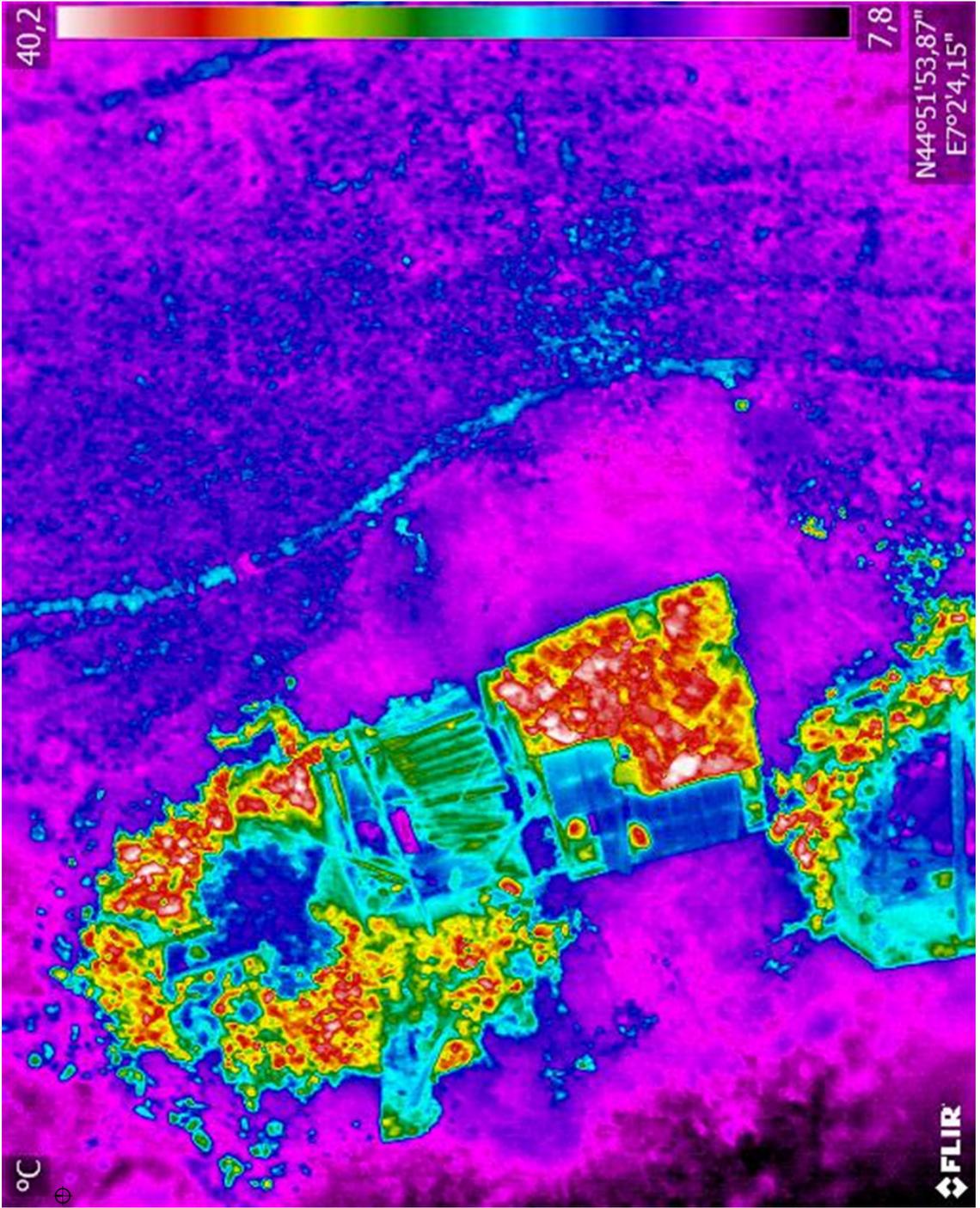
ZONA 4



ZONA 4

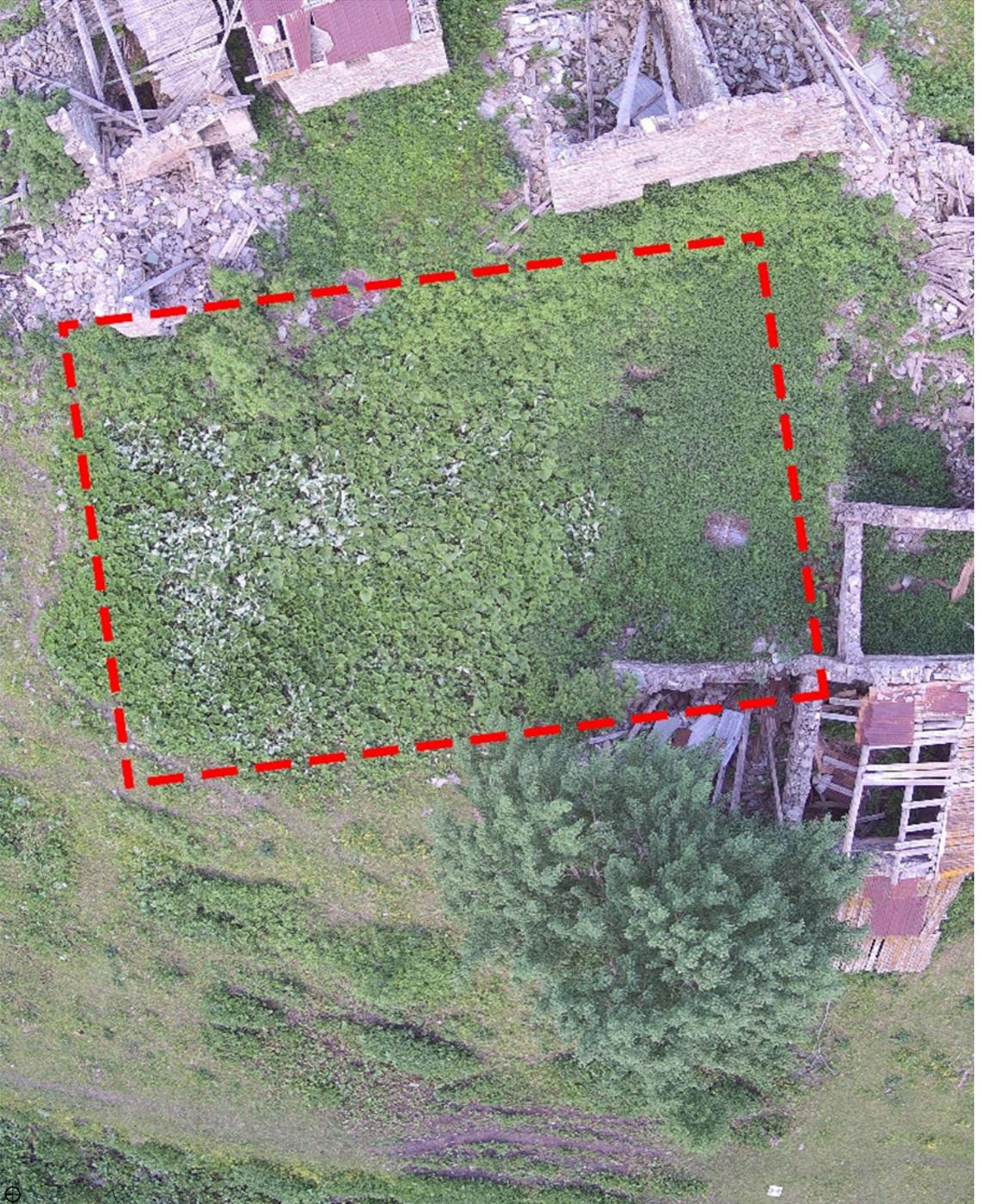


ZONA 4



Zona 4: Quest'area presenta caratteristiche simili, alla zona 3, ed è caratterizzata da una risposta termografica molto uniforme con temperature più basse rispetto all'immediato intorno. Presenta, nel modello tridimensionale, delle forme relativamente ben definite, riconducibili all'opera dell'uomo. Non è infine da sottovalutare la presenza di fitta vegetazione, circoscritta che può essere ricondotta a particolari caratteristiche del terreno sottoposto ad attività umane, come avviene all'interno degli altri fabbricati abbandonati presenti nella borgata.

ZONA 5



ZONA 5



35,8

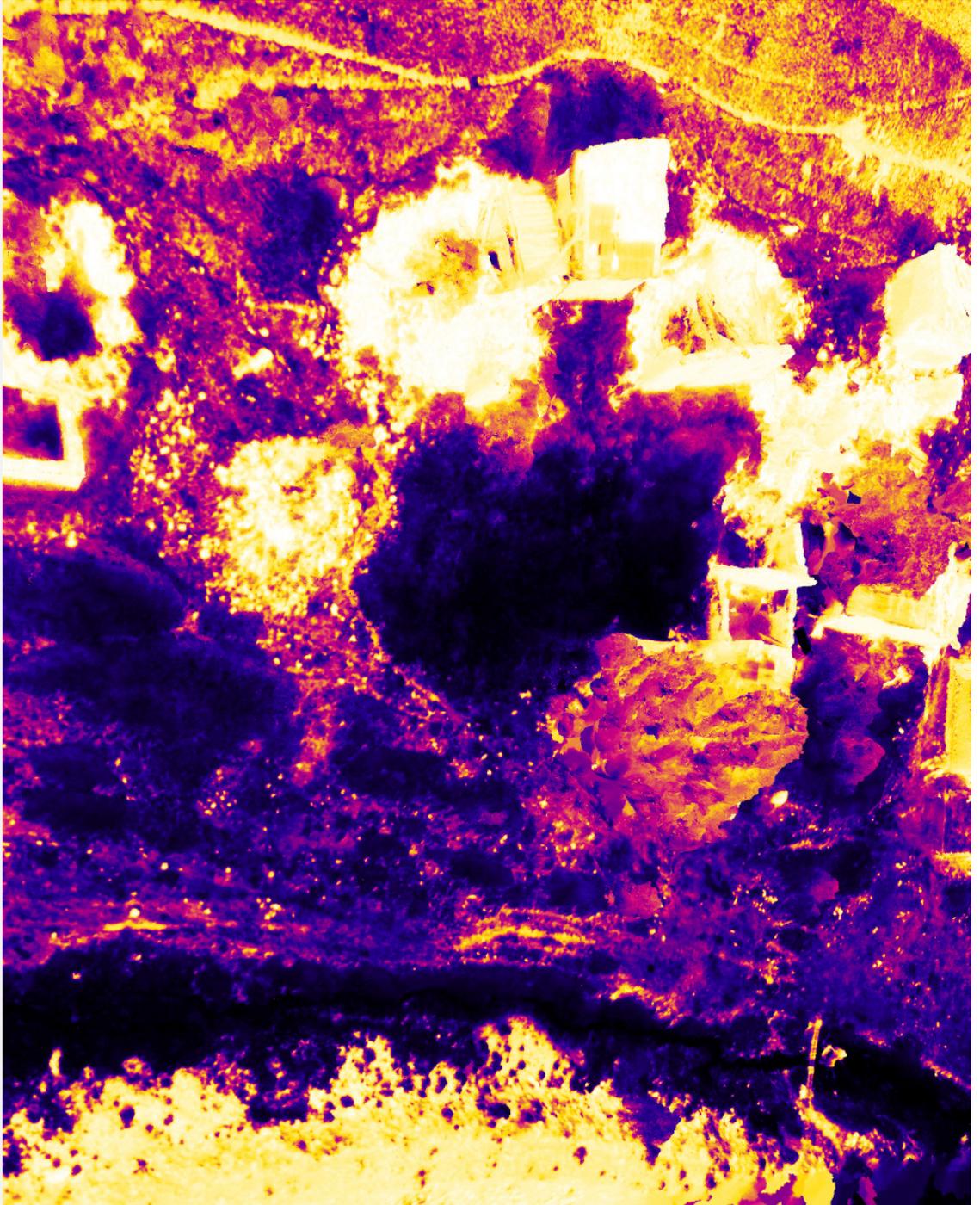
7,9

N44°51'53,42"
E7°23'31"

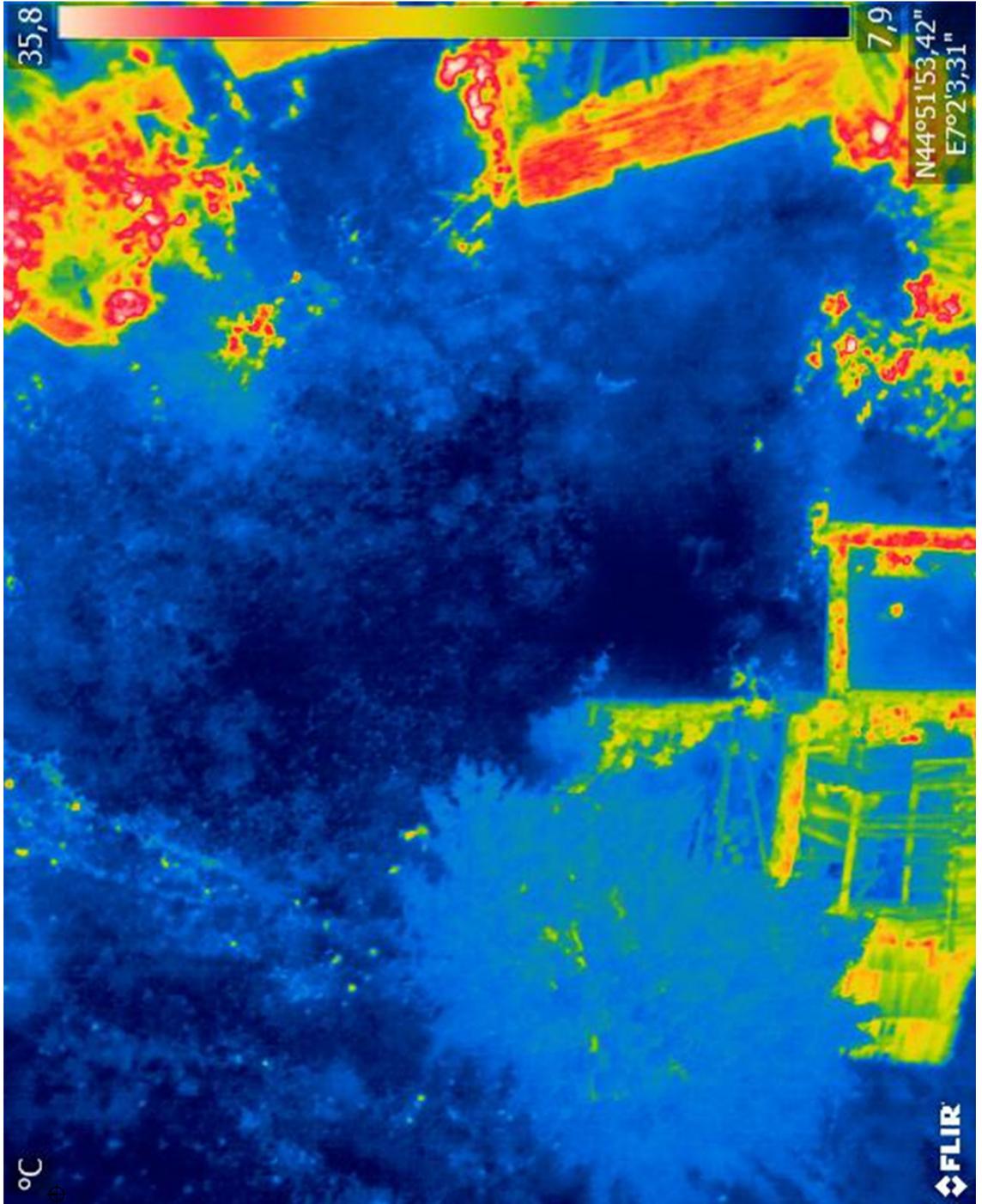
°C

FLIR

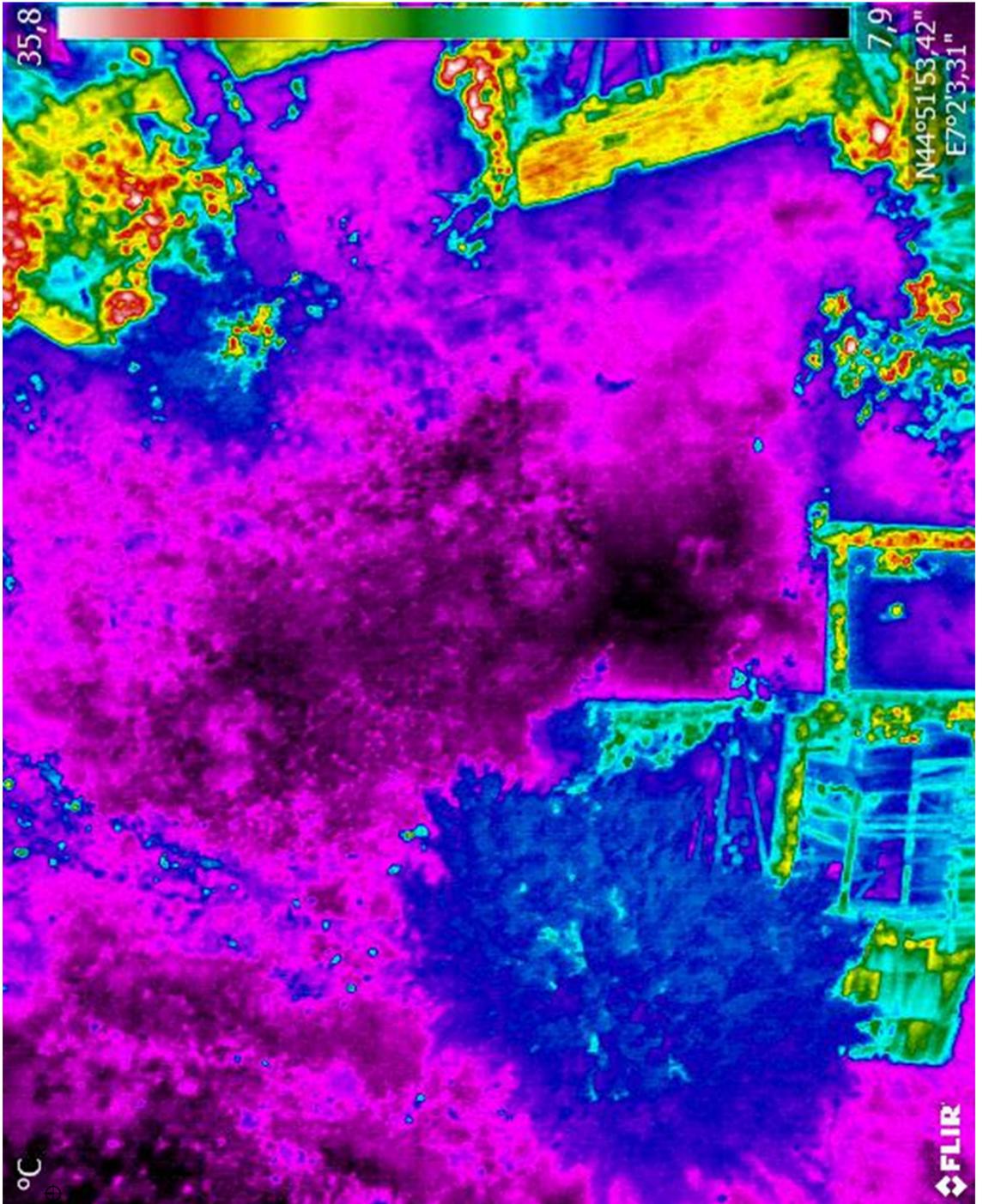
ZONA 5



ZONA 5



ZONA 5



Zona 5: Quest'area, di maggiori dimensioni rispetto alle altre, è circoscritta su tre lati da residui di edificazioni ed è identificabile da una risposta termografica molto uniforme e sensibilmente inferiore rispetto al contesto, come per la precedente. E caratterizzata dalla presenza di una fitta vegetazione che può essere attribuibile, sia ad una movimentazione di terra - che modificando la matrice del terreno, favorisce la crescita più rigogliosa della vegetazione in quanto sottoposta a stress ambientali minori - sia alla differente pendenza, rispetto al terreno circostante, che può favorire la permanenza di un maggior livello di umidità durante l'anno.

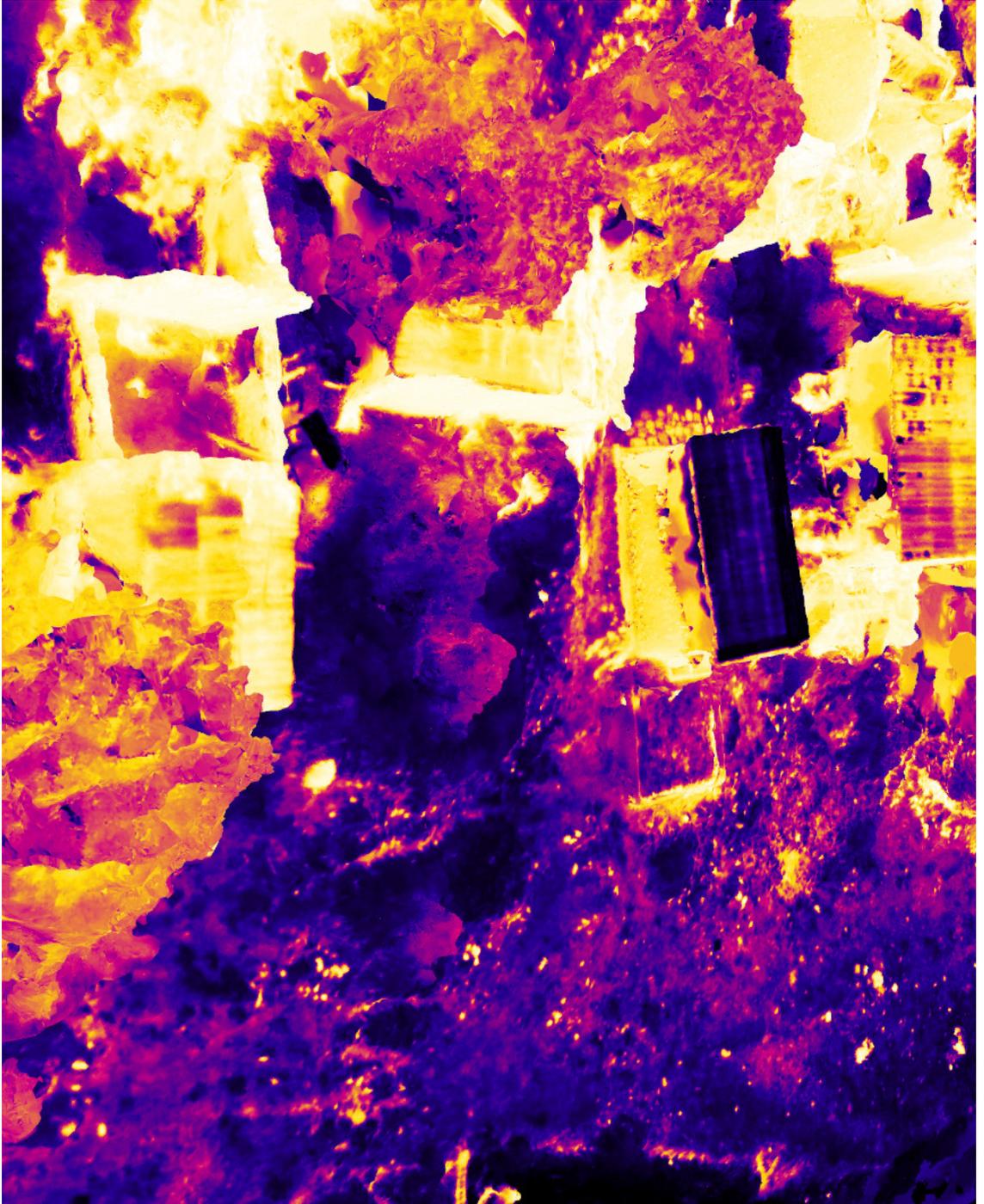
ZONA 6



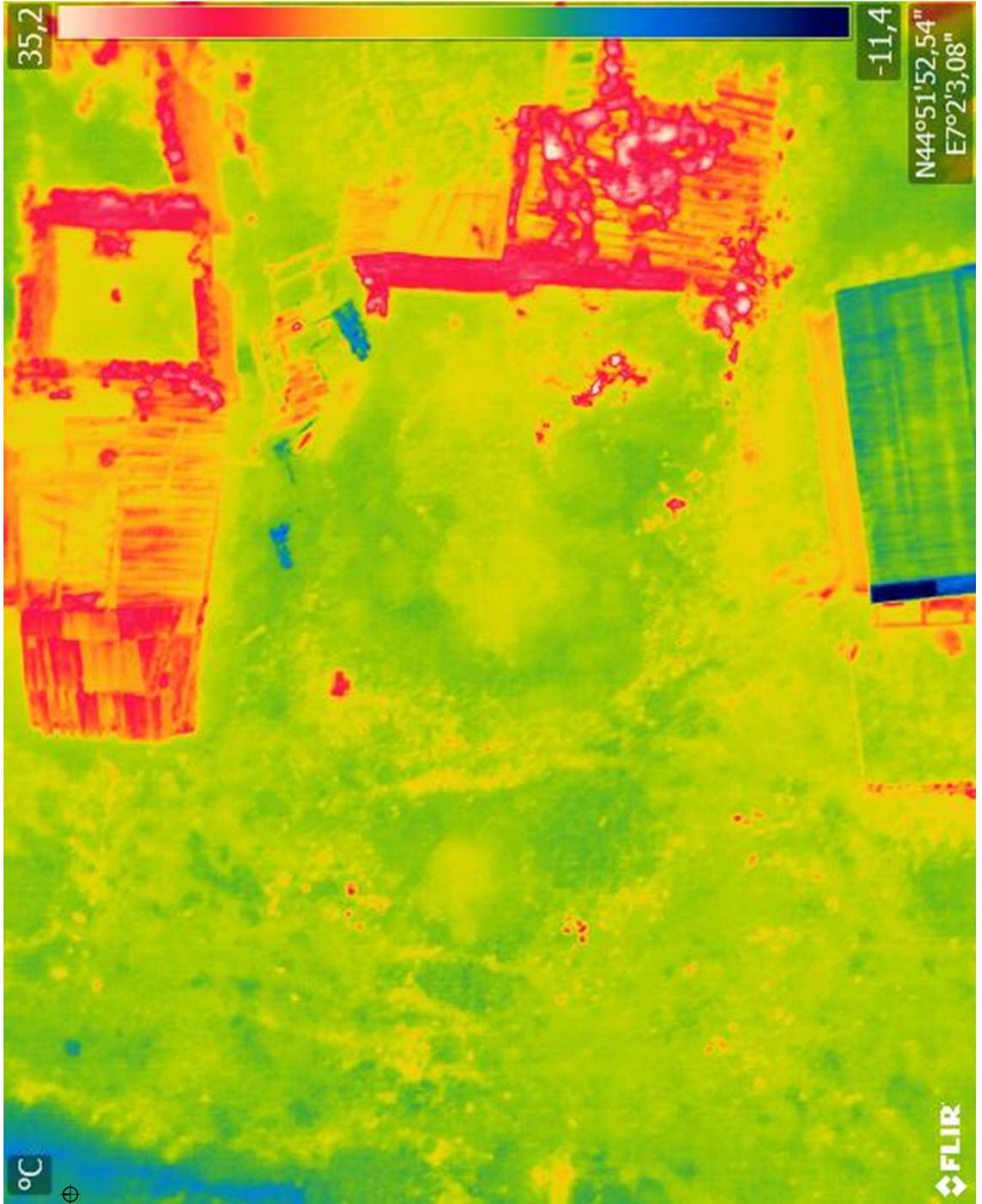
ZONA 6



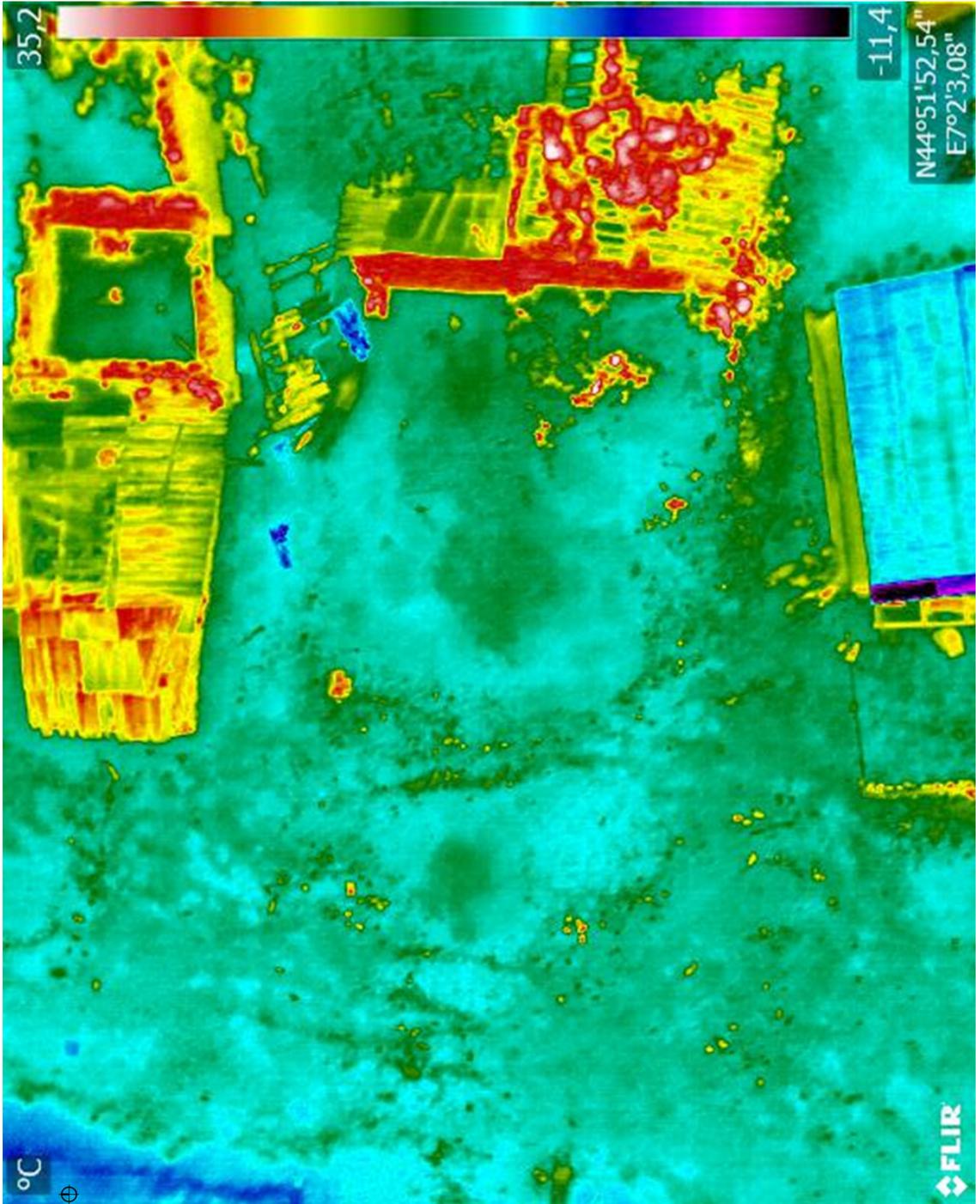
ZONA 6



ZONA 6



ZONA 6



Zona 6: Quest'area presenta una risposta termica ben evidente a forma di U, che si collega ad una porzione di edificio, tuttora esistente, e in stato di evidente degrado. Anche in questo caso è presente una zona di vegetazione delimitata per le quali valgono le considerazioni già riportate a commento delle zone precedenti.

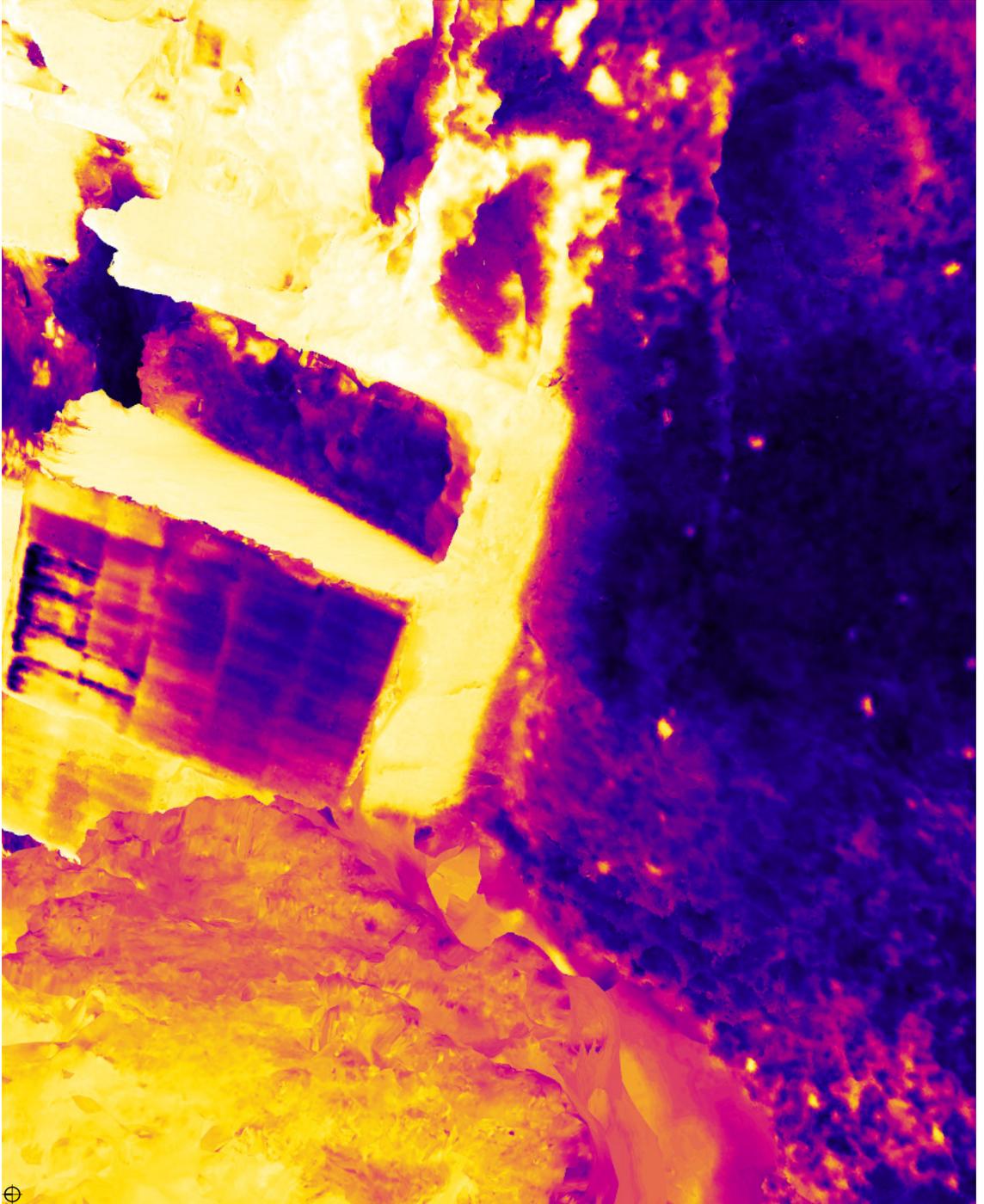
ZONA 7



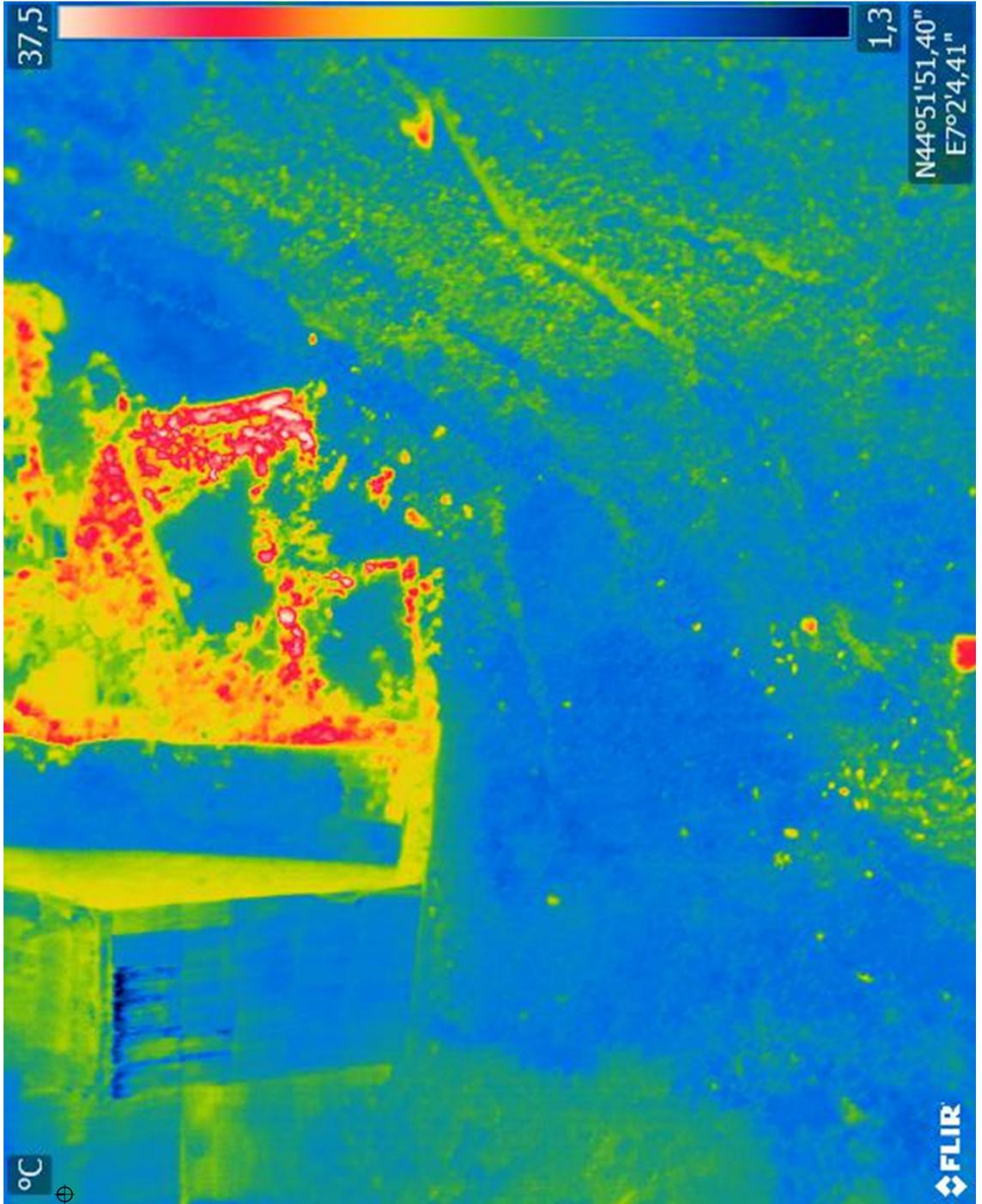
ZONA 7



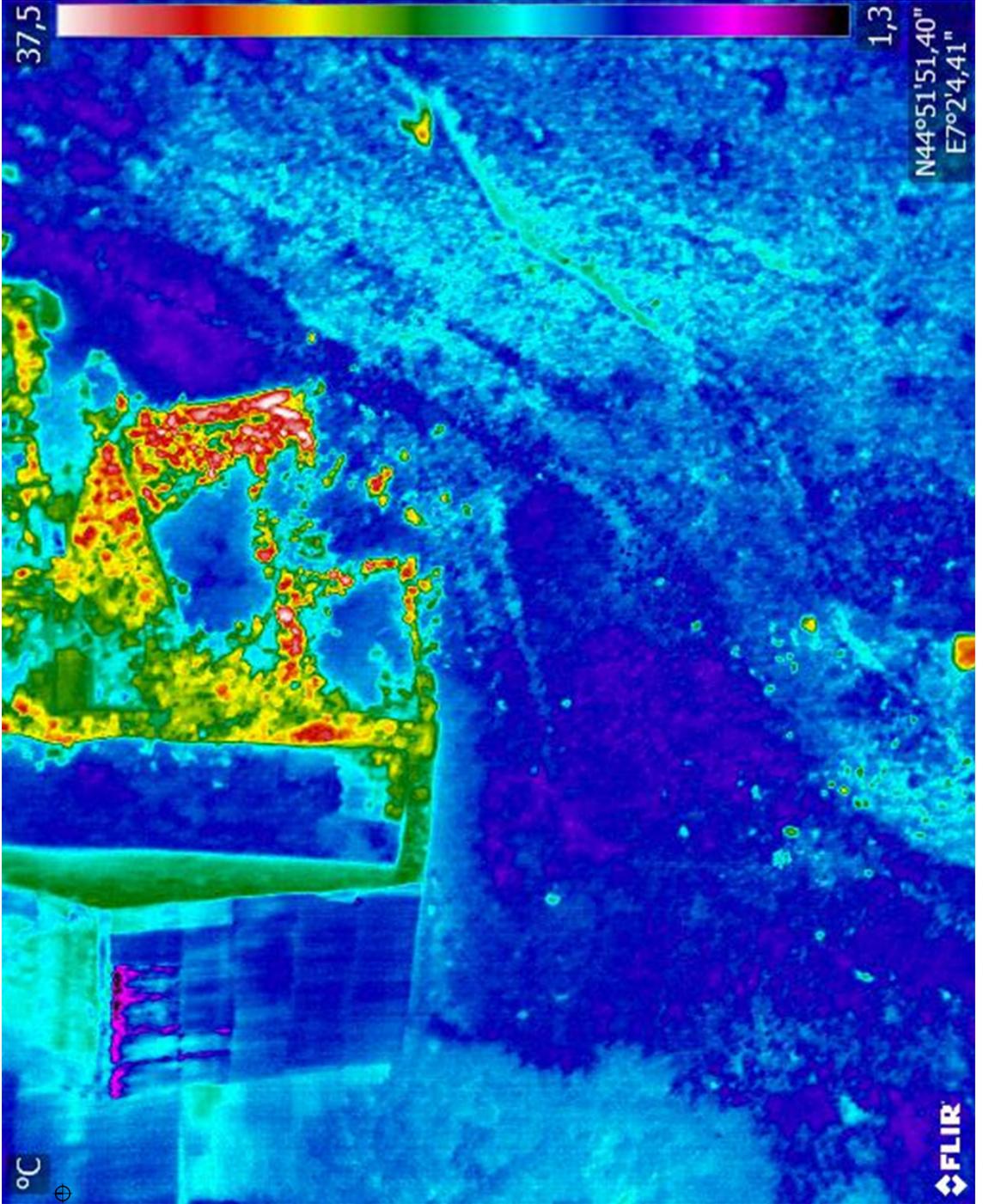
ZONA 7



ZONA 7



ZONA 7



Zona 7: quest'area presenta superficie di discontinuità termica maggiormente evidente nel modello tridimensionale, differentemente dalle precedenti non è influenzata dalla presenza significativa di vegetazione, tuttavia si evidenzia la presenza di geometrie apprezzabili ed attribuibili verosimilmente ad una passata antropizzazione.

3.6.1 Confronto con il catasto Rabbini 1850-70

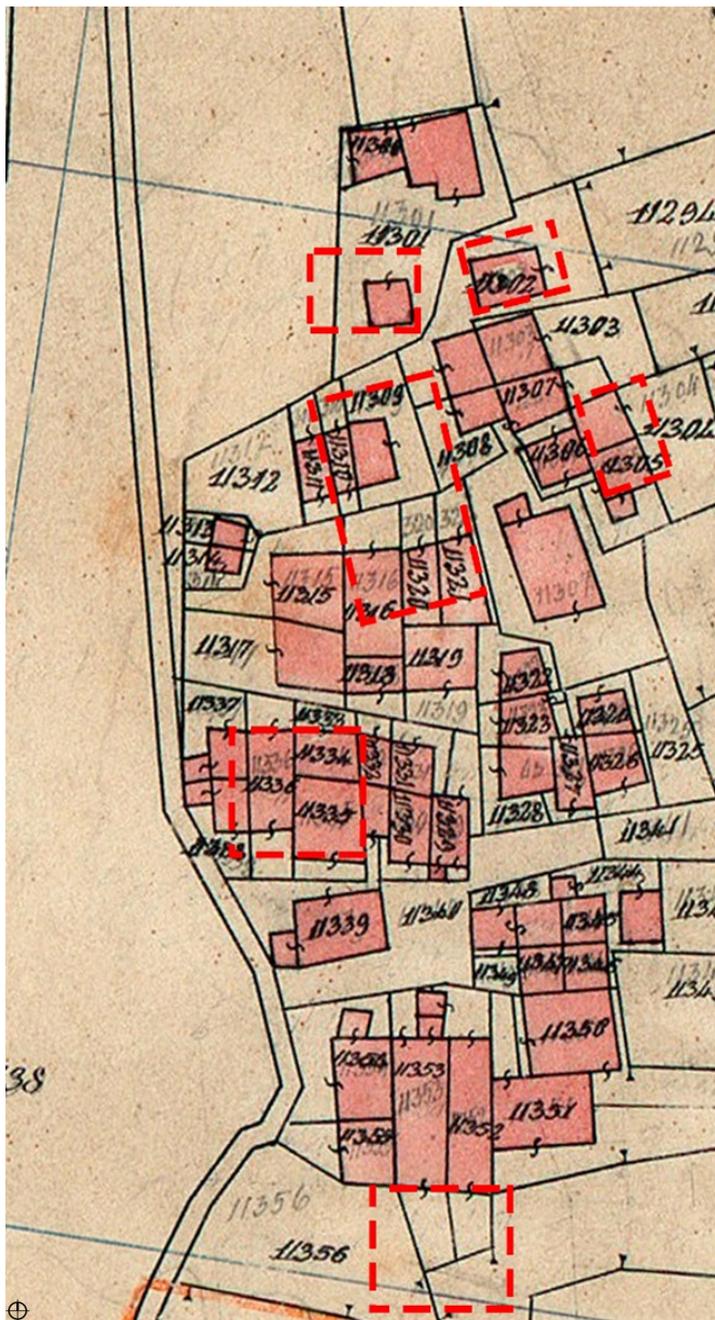
Al fine di verificare le ipotesi avanzate tramite l'interpretazione del rilievo termografico si è fatto uso del catasto storico Rabbini redatto tra il 1855 e 1870. Questo comprende mappe parcellari, redatte con metodo trigonometrico, che riporta le presenze edilizie sul territorio all'epoca.

Dall'analisi del suddetto catasto, mediante consultazione online e la sovrapposizione alle ortofoto, si è appreso che tutte le ipotesi sono state confermate ad eccezione della zona 7, anche se la parcellizzazione nell'area identificata segue un perimetro simile a quello ipotizzato. Potrebbe essere lecito pensare che la zona 7 identifichi non un edificio ma un confine di proprietà.

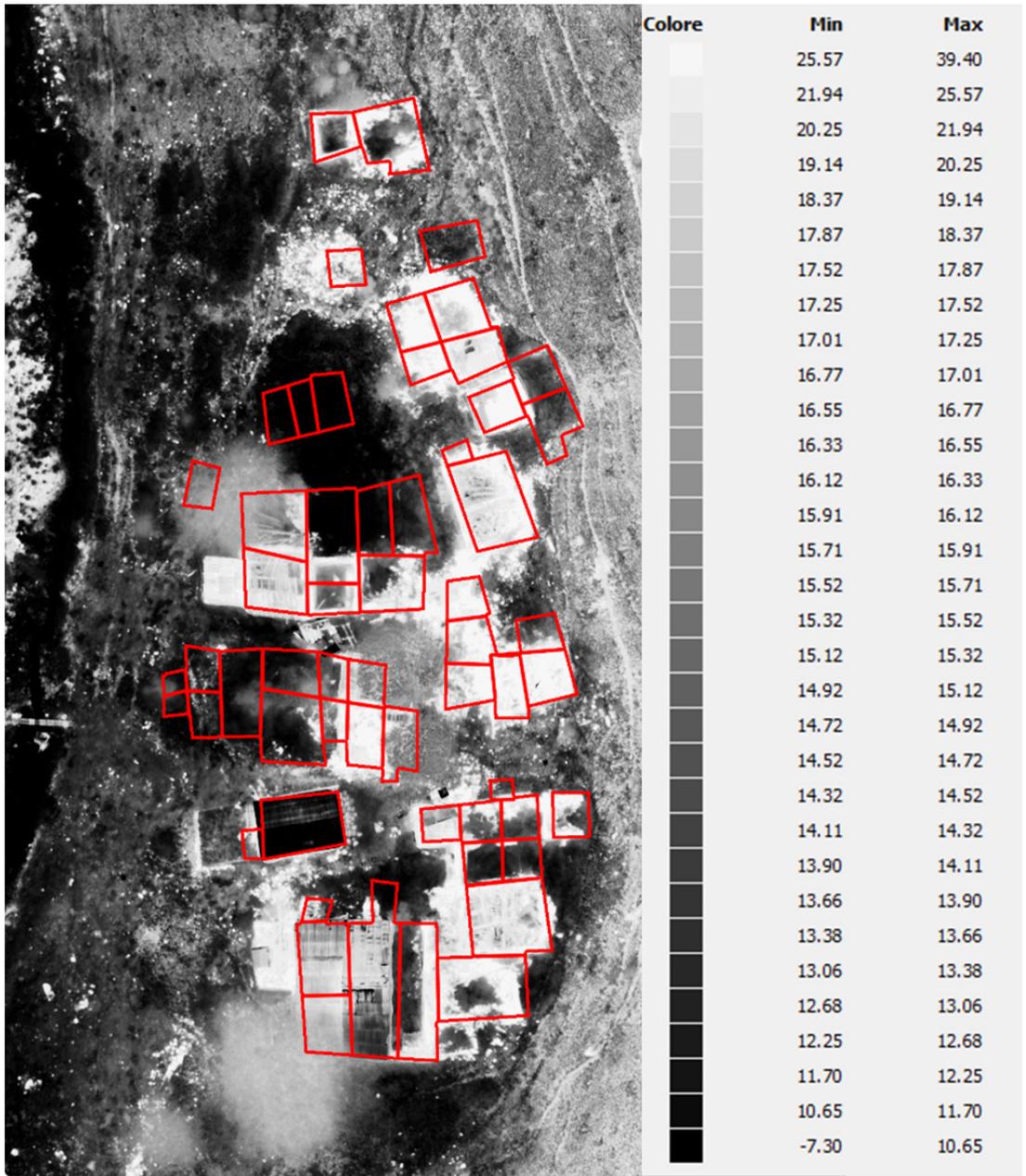
Si nota inoltre che la zona 5 presentava al suo interno, dalle informazioni reperite dal catasto, due edifici distinti e notevolmente distaccati tra loro. Queste caratteristiche non si erano evinte dal rilievo termografico, probabilmente a causa della fitta vegetazione che copre in maniera uniforme l'intera creando rumore termico e rendendo impalpabili le possibili differenze tra le caratteristiche più o meno pronunciate del suolo.



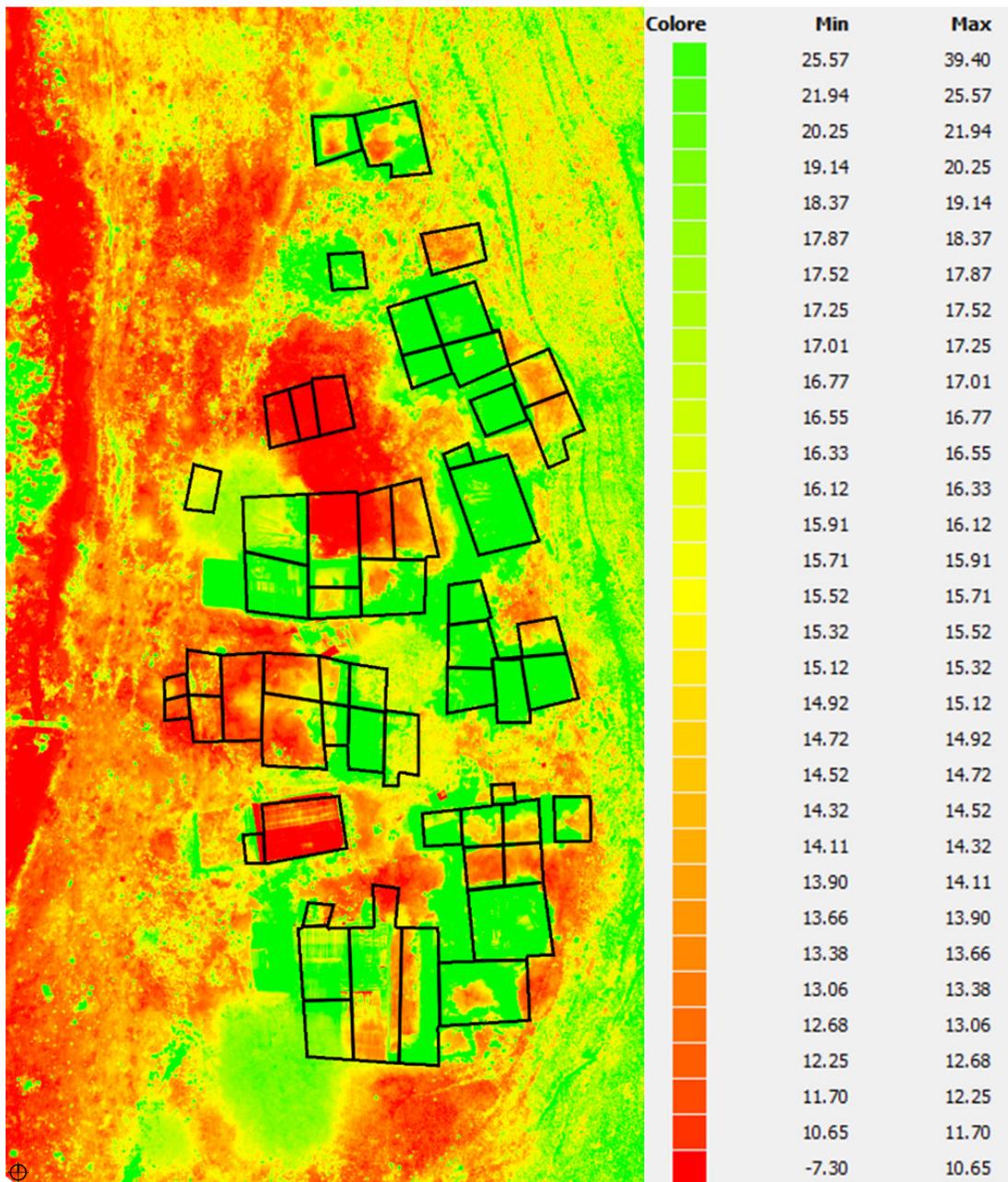
Estrapolazione da catasto rabbini 1855-1887, allegato I



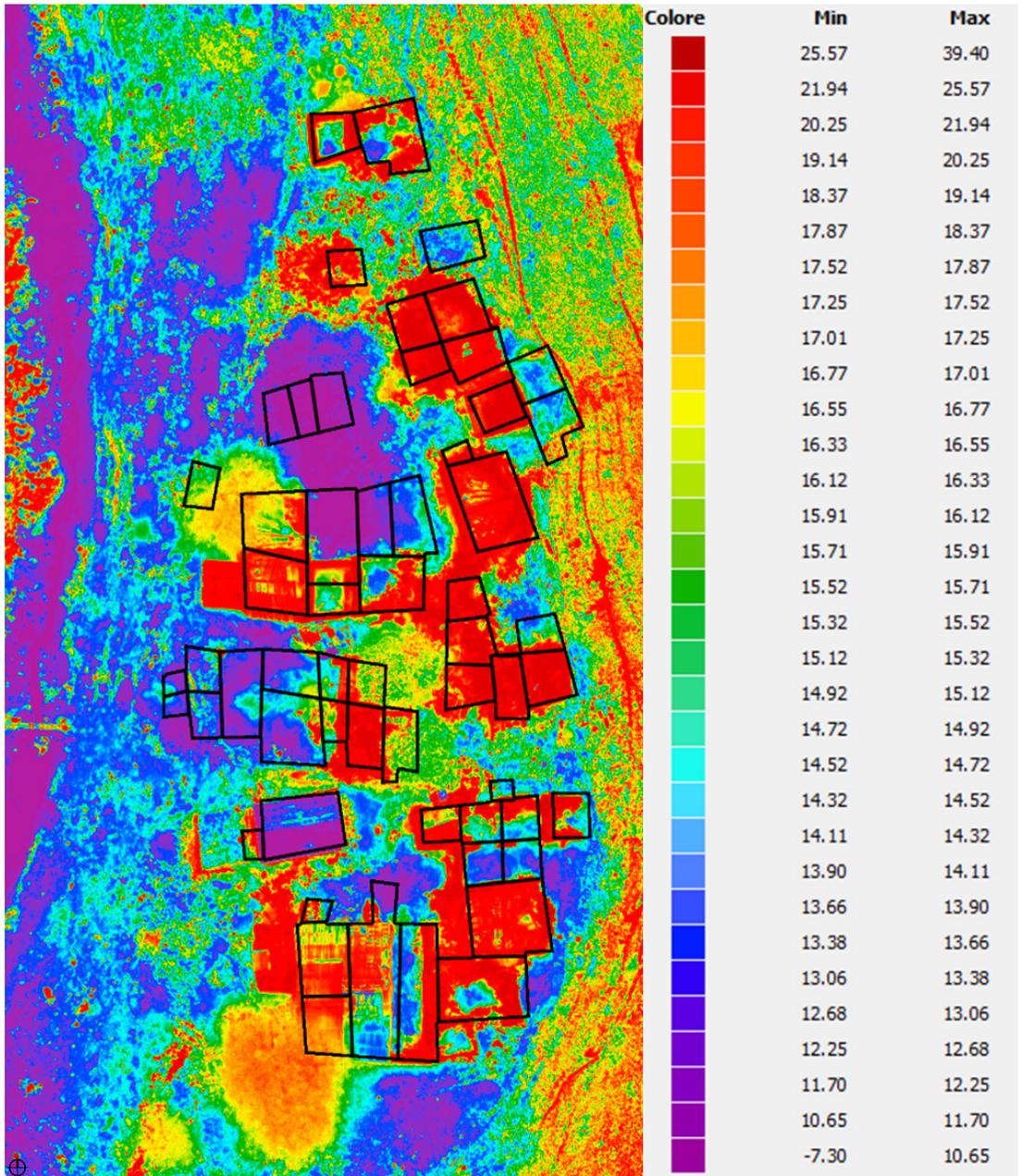
Estrapolazione da catasto rabbini 1855-1887, allegato I



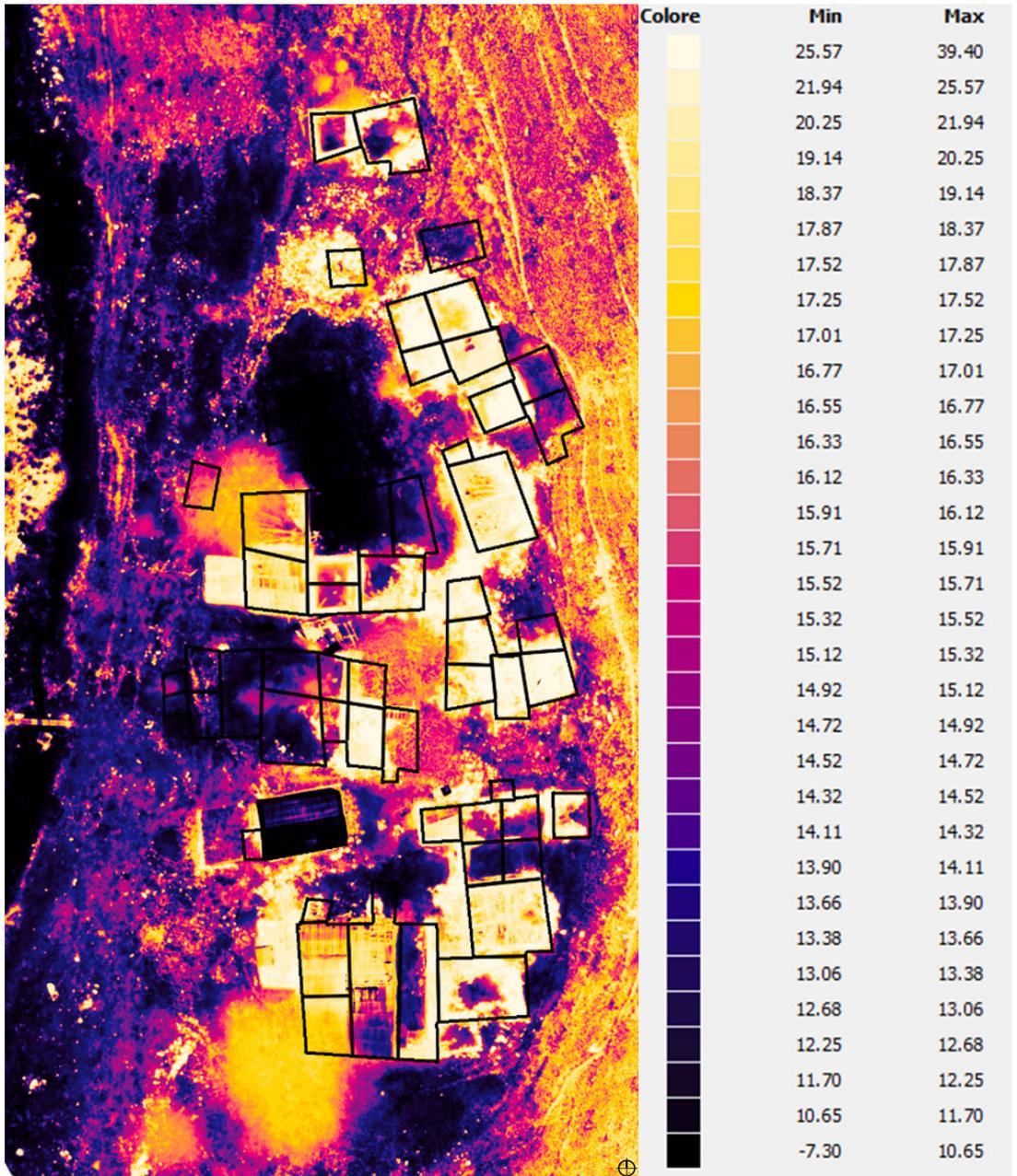
Estrapolazione da catasto rabbini 1855-1887, allegato I sovrapposto a mappa di riflettanza.



Estrapolazione da catasto rabbini 1855-1887, allegato I sovrapposto a mappa di riflettanza.



Estrapolazione da catasto rabbini 1855-1887, allegato I sovrapposto a mappa di riflettanza.



Estrapolazione da catasto rabbini 1855-1887, allegato I sovrapposto a mappa di riflettanza.

4

CONSIDERAZIONI FINALI E SVILUPPI FUTURI

Dai risultati ottenuti, si evince come questa semplice e rapida metodologia di analisi qui sperimentata, possa portare a risultati interessanti a fini investigativi e a supporto delle tecnologie di rilievo per il patrimonio costruito già consolidate. Soprattutto in relazione alla rapidità di questa di questa metodologia che con l'uso di termogrammi scattati complessivamente nell'arco di nove minuti ha portato all'acquisizione di molti dati dall'indubbio valore che hanno arricchito notevolmente il rilievo, dando la possibilità di individuare aree soggette ad attività umane passate altrimenti impossibili da identificare con metodologie di rilievo tradizionali.

Per quanto concerne gli sviluppi futuri di questa metodologia si ritiene interessante sperimentare l'introduzione di una variabile temporale all'interno del processo, di uso consueto nelle analisi termografiche, eseguendo rilievi ad intervalli costanti e anche durante le ore notturne. Infatti, dai dati raccolti (Corti 2012) si evince come la profondità fino alla quale il calore della radiazione solare influenza il substrato è intorno ai 40-50 cm. Queste influenze come si nota nei grafici (1 e 2 a pag. 86) si evidenziano a tali profondità a molte ore di distanza e sono fortemente influenzate dalle caratteristiche termiche del terreno.

Da queste considerazioni è logico ritenere la tempistica di un'indagine termica aerea come un punto chiave per determinare il suo successo, in quanto le immagini raccolte a un'ora di distanza tra loro, soprattutto una volta terminata la radiazione solare, potranno riportare caratteristiche sorprendentemente diverse (Casana 2017). Purtroppo, prevedere il momento ottimale per la raccolta dei dati, sia stagionalmente che nel corso di un particolare ciclo diurno, rimane una sfida, soprattutto considerando gli innumerevoli fattori che possono influenzare le proprietà termiche del suolo.

5

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

A.

Agisoft LLC, *Agisoft PhotoScan Manuale d'uso Versione Professional, Versione 1.2*, 2016.

M.I. Alba, L. Barazzetti, E. Di Flumeri, M. Previtali, E. Rosina, M. Scaioni, *Un sistema integrato per la mappatura automatica di immagini IR su scansioni laser di edifici*, Atti 15a Conferenza Nazionale ASITA - Reggio di Colomo 15-18 novembre 2011.

R. Alfieri, *L'invasione dei droni, il futuro è sopra di noi*, Hoepli 2019.

G. Amadio, *Introduzione alla geomatica*, Dario Flaccovio Editore, 2015.

B.

D. Baraccani, Tesi di Laurea, *LA TERMOGRAFIA: UNA TECNICA DI CONTROLLO NON DISTRUTTIVO*, Università di Bologna, 2012.

M. Bini, S. Bertocci, *Manuale di rilievo architettonico*, CittàStudi, 2012.

P. A. Brivio, G. Lechi, E. Ziliola, *Principi e metodi di Telerilevamento*, CittàStudi, 2006.

G. Bitelli, M. Mannina, *Geomatica e Beni Culturali: tecniche integrate per la documentazione e per la gestione del rischio*, in Atti 14a Conferenza Nazionale ASITA - Brescia 9-12 novembre 2010

C.

A. Calatropio, F. Chiabrando, A. Spanò, *UAV Photogrammetry and thematic maps for environmental risk assessment in construction safety*, EGU General Assembly, 2018.

A. Cina, *dal GPS al GNSS*, Celid, 2014.

R. Cannarozzo, L. Cucchiaroni, W. Meschieri, *Misure, Rilievo, Progetto*, Zanichelli, 2012.

P. Condoleo, F. Guerini, *Rilievo, classificazione e metodologie*, POLIMI Laboratorio di rappresentazione 1, 2017.

J. Casana, J. Kantner, A. Wiewel, J. Cothren, *Archaeological aerial thermography: a case study at the Chaco-era Blue J community, New Mexico*, Journal of Archaeological Science, Pages 207-219, Volume 45, May 2014.

J. Casana, J. Kantner, A. Wiewel, J. Cothren, *Archaeological Aerial*

Thermography in Theory and Practice, pp. 310–327, *Advances in Archaeological Practice* 5(4), 2017.

V. Corrado, E. Fabrizio, *Fondamenti di termofisica dell'edificio e climatizzazione 2ª edizione*, CLUT, 2014.

F. Chiabrando, A. Lingua, P. Maschio, F. Rinaudo, A. Spano', *Mezzi aerei non convenzionali a volo autonomo per il rilievo fotogrammetrico in ambito archeologico*, 2012.

REGOLAMENTO DI ESECUZIONE (UE) 2019/947 DELLA COMMISSIONE del 24 maggio 2019 relativo a norme e procedure per l'esercizio di aeromobili senza equipaggio

D.

Disposizione GENDISP-DG-01/07/2019-0000025-P - Provvedimento di sospensione del Regolamento "Mezzi Aerei a Pilotaggio remoto"

E.

H. Eisenbeiß, *UAV Photogrammetry*, ETH Zurich - Institute of Geodesy and Photogrammetry, 2009.

D. Einaudi, *Tesi di Laurea Magistrale, Utilizzo di sistemi UAV multi-sensore per la modellazione 3D e la realtà virtuale*, Politecnico di Torino, 2018.

ENAC, 21 maggio 2018, emendamento 4 edizione 2 Regolamento "Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto"

F.

R. Félix Pinto, *Geomática, Tecnologías De Punta: 1ª Edición*, Palibrio, 2012.

S. Franceschi, L. Germani, *Manuale Operativo per il Restauro Architettonico*, DEI, 2010.

J.E. Fuentes Guzman, *Topografía*, Red Tercer Milenio 2012.

G.

M. A. Gomasca, *Elementi di Geomatica*, Associazione Italiana di Rilevamento (AIT), 2004.

M.A. Gomasca, *Basics of Geomatics*, Springer, 2009.

M.A. Gomasasca, *Il Telerilevamento*, in *GEOmedia Vol.2*, 01 January 2016.

E. Grinzato, P.G. Bison, S. Marinetti, *Monitoring of ancient buildings by the thermal method*, *Journal of Cultural Heritage*, p 21–29, 2002.

E. Grinzato, *IR Thermography Applied to the Cultural Heritage Conservation*, 18th World Conference on Nondestructive Testing, 2012.

H.

B.S. Haley, J.K. Johnson, R. Stallings, *The utility of low cost thermal sensors in archaeological research*, Report Prepared for the Office of Naval Research, 2012.

I.

ITC, *manuale di termografia ad infrarossi per il mercato delle costruzioni e delle energie rinnovabili*, FLIR system, 2011.

ITC, *Manuale dell'utente Serie FLIR Exx*, FLIR system, 2013.

J.

G. Jimenez Cleves, *Topografía para ingenieros civiles*, Facultad de Ingeniería Programa de ingeniería civil Armenia, 2007.

K.

K. Kraus, *Fotogrammetria Vol. 1-Teoria e Applicazioni*, Libreria Universitaria Levrotto & Bella Editrice, 1994.

C. Kuenzer, S. Dech, *Thermal Infrared Remote Sensing: Sensors, Methods, Applications*, Springer 2013.

L.

S Laguela, H Gonzalez-Jorge, J Armesto and J Herraiez, *High performance grid for the metric calibration of thermographic cameras*, IOP PUBLISHING, 11-11-2011.

D. Lanzoni, *Diagnosi e certificazione energetica : prove strumentali sugli edifici*, Maggioli, 2012.

J.L. Lerma, C. Mileto, F. Vegas, M. Cabrelles, *visible and thermal ir documentation of a masonry brickwork building*, XXI International CIPA Symposium, 01-06 October, Athens, Greece, 2012.

N. Ludwig, F. Luzi, *La termografia. Teoria e applicazioni*, Le Point Veterinaire Italie, 2015.

M.

L. Masali, S. Orsi, *#In Rotta Verso EASA v1*, DronEzine Editore, 2019.

L. Masali, S. Orsi, *#In Rotta Verso EASA v2*, DronEzine Editore, 2019.

F. Miraglia, *La termografia come tecnica diagnostica non invasiva per il moderno esercizio della tutela: alcuni casi di studio*, ArcheomaticA N°1 marzo 2019.

C. Monti, A. Selvini, *Topografia, fotogrammetrica e rappresentazione all'inizio del ventunesimo secolo*, Maggioli, 2015.

A. Moropoulou, N. P. Avdelidis, M. Karoglou, E. T. Delegou, E. Alexakis and V. Keramidis, *Multispectral Applications of Infrared Thermography in the Diagnosis and Protection of Built Cultural Heritage*, Antonia Moropoulou, Applied Sciences 2018.

N.

Nikon Trimble, *GPS, guida all'uso del GPS per il rilevamento del territorio*, Maggioli, 1999.

P.

L. Paris, *Fotogrammetria e/o Fotomodellazione*, La Sapienza, 2012.

S. Perri, *Tesi di Laurea Magistrale, Metodi di Rilievo metrico 3D multiscala per il patrimonio costruito. Applicazioni aeree e terrestri in differenti scenari*, Politecnico di Torino, 2018.

P. Piani, *la strumentazione uav nel rilievo e nella modellazione tridimensionale di un sito archeologico*, ArcheomaticA N°1 marzo 2013.

M. Pinto, *Tesi di Laurea, Rilievo fotogrammetrico da drone per la generazione di modelli termici di porzioni di territorio*, Università di Bologna, 2016.

P. S. Pretini, F. Tapinassi, *Fotografia digitale*, Giunti Demetra, 2015.

R.

A. Rabbia, *Tesi di Laurea Magistrale, Indagini sulle necropoli etrusche nel parco archeologico di baratti e popolonia, Integrazione di strumenti avanzati per il rilievo metrico 3D e la rappresentazione dei dati in*

ambiente cartografico tramite strumenti GIS, Politecnico di Torino, 2018.

T.Rakha, A. Liberty, A. Gorodetsky, B. Kakillioglu, S. Velipasalar, *Heat Mapping Drones: An Autonomous Computer Vision-based Procedure for Building Envelope Inspection using Unmanned Aerial Systems (UAS)*, Technology|Architecture + Design, Volume 2, 2018.

S. Rando, Tesi di Laurea Magistrale, *Analisi tematiche di immagini multispettrali per la documentazione del patrimonio*. Politecnico di Torino, 2018.

D. Regis et al., *Costruire nel paesaggio rurale alpino, il recupero di Paraloup*, luogo simbolo della Resistenza, Fondazione Nuto Revelli, 2007.

D. Regis, V. Cottino, D. Caselino, G. Barberis, *Costruire nel Paesaggio Rurale Alpino: il recupero di Paralup luogo simbolo della Resistenza*, Fondazione Nuto Revelli, Cuneo 2007

D. Regis, *La mostra A.L.P.S. Atelier e Laboratori per il Progetto Sostenibile* in ARCHALP, vol. 14, pp.79-80, 2017.

A. Riggio, R. Carlucci, *Topografia di base*, EPC editore, 2015.

C. Riminesi, dispense *“Tecniche e metodologie diagnostiche non invasive, termografia IR”*, Consiglio Nazionale delle Ricerche, istituto per la conservazione e valorizzazione dei beni culturali- Firenze.

F. Rinaudo, M. Bini, V. Bonora, G. Forlani, A. Guarnieri, G. Tucci, A. Vettore, D. Visintini, *Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio*, Alinea Editrice, 2007.

G. Roche, *La termografia per l'edilizia e l'industria*, Maggioli Editore, 2012.

M. Roggero, *Tecniche fotogrammetriche per il rilievo*, POLITO, 2013

C. Romeo, *La termografia all'infrarosso*, Celid, 2002.

C. Romeo, *LA TERMOGRAFIA ed il suo impiego nell'analisi del manufatto architettonico*, ESITI, 1996.

E. Rosina, *La percezione oltre l'apparenza, l'architettura all'infrarosso*, Alinea Editrice, 2004.

S.

J. Santamaría Peña, T. Sanz Méndez, *Manual de prácticas de topografía*

y cartografia, universidad de La Rioja, 2005.

D. Santaresiero, *Droni per l'innovazione, sistemi UAV e RPV*, myGeo Edizioni, 2015.

A. Selvini, *Principi di fotogrammetria*, Clup, 1988.

N. Shen, J. Yu, Z. Tang, *Uncooled Infrared Microbolometer Array for Low-Cost Applications*, IEEE Photonics Technology, 2015.

A.T. Spanò, *Celerimensura / Polari cartesiane*, POLITO, Dispense, a.a. 2014/2015.

A.T. Spanò, Dispense Workshop "Fotogrammetria digitale e scansioni 3D per il rilievo di Beni Culturali", POLITO, a.a.2017/2018.

A.T. Spanò, A. Massa, P. Testa, M. Violinia, *Integrazione e confronto di dati termografici e fotogrammetrici per la diagnosi e la conservazione dei beni culturali*, SIFET, 2005.

A.T. Spanò, *Versatilità di metodi e tecniche della Geomatica per la documentazione del patrimonio costruito. Approcci sostenibili per la valutazione sismica*. In: R. Ientile, M. Naretto (a cura di) *Patrimonio architettonico e rischio sismico. Un percorso tra conoscenza e obiettivi di conservazione*, Celid, 2013.

D. Spano, Dispense, *Funzione del suolo(entità dinamica di natura fisico-chimica e biologica)*, Università di Sassari, 2010.

T.

H. Thomas, E. Williams, *High resolution terrestrial thermography of archaeological sites*, Wiley, 2018.

W.

W.S. Warner, R.W. Graham, R.E. Read, *Small format aerial photography*, Interprint Ltd, 1996.

SITOGRAFIA

<https://3d-archeolab.it/2017/04/tutorial-la-fotogrammetria-automatizzata-come-funziona-a-cosa-serve/>

A.

http://abfotografia.it/articoli/Quale_Formato_Utilizzare_Jpeg_Raw.htm

<https://aemmesurveying.it/stazione-totale/>

<https://archeomatica.it/eventi/conferenza-internazionale-su-geomatica-e-beni-culturali>

B.

<https://biografieonline.it/biografia-william-herschel>

C.

<https://cambridgeincolour.com/tutorials/camera-sensors.htm>

<http://cartadelrischio.it/>

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.461.3781&rep=rep1&type=pdf>

<https://corsitermografia.com/corso-termografia/linfluenza-dei-riflessi-e-come-compensare-gli-errori-lezione-16/>

D.

<http://dm.unife.it/matematicainsieme/matcart/triang.htm>

E.

<https://easa.europa.eu/easa-and-you/civil-drones-rpas/drones-regulatory-framework-background>

https://easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/205933-01-EASA_Summary%20of%20the%20ANPA.pdf

<https://easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Explanatory%20Note%20for%20the%20UAS%20Prototype%20regulation%20final.pdf>

<https://easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/UAS%20Prototype%20Regulation%20final.pdf>

https://enac.gov.it/ContentManagement/information/N122671512/Regolamento_APR_ed2_em2.pdf

<https://enac.gov.it/la-normativa/normativa-enac/regolamenti/regolamenti-ad-hoc/regolamento-mezzi-aerei-pilotaggio-remoto>

<https://enac.gov.it/sites/default/files/allegati/2018/REGOLAMEN-TO%20EASA%20n379%202014%20PDF.pdf>

https://enac.gov.it/sites/default/files/allegati/2018-Lug/Regolamento_APR_Ed2_Em4_180704.pdf

<http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/>

<https://eratostene.vialattea.net/tempesti/1-snellius.html>

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=OJ:L:2019:152:TOC>

F.

<https://fr.slideshare.net/FelizianiAntonio/introduzione-alla-fotogrammetria>

<http://frednet.crs.inogs.it/ItalianSite/XFReDNetHome.htm>

G.

<https://glonass-iac.ru/en/guide/potrfaq.php>

<https://gocamera.it/blog/differenze-corsi-drone-sapr-come-scegliere/>

<https://gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/>

<https://gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss>

[https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Open_Service_\(OS\)](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Open_Service_(OS))

I.

<https://igmi.org/it/descrizione-prodotti/elementi-geodetici-1/rete-igm95>

L.

<http://lab.leica-camera.it/portfolio-articoli/simone-bassani-il-sensore-digitale/>

M.

https://mondogeo.it/Pagine_200/pagina_02.html

N.

<https://netzsch-thermal-analysis.com/it/landing-pages/definizione-di-conduttivita-termica/>

O.

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

http://online.scuola.zanichelli.it/cannarozzomisure-5ed-files/Zanichelli_Cannarozzo_Orientamento_e_restituzione.pdf

P.

<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/360000173463-Processing-thermal-images>

<https://community.pix4d.com/t/toggling-between-thermal-and-rgb-layer-possible/6164>

Q.

<https://quadricottero.com/2019/02/nuovo-regolamento-enac-droni-2019-2020.html>

R.

https://rimble.com/OEM_ReceiverHelp/V4.44/en/PositionModes_CriticalFactorsRTK.html?source=post_page

T.

<https://tesionline.it/glossario/5684/emissivit%C3%A0>

<https://termocam.it/pdf/manuale-completo-flir-a3xx-a6xx.pdf>

<https://termocamerafacile.com/cose-la-termografia-2/>

<https://termografiatop.it/>

<http://topografia.it/CaseHistory/qualitarilievi/teoriaerrori.htm>

<http://treccani.it/enciclopedia/fotogrammetria/>

<http://treccani.it/enciclopedia/infrarosso/>

<http://treccani.it/enciclopedia/james-clerk-maxwell>

<http://treccani.it/enciclopedia/macchina-fotografica/>

<http://treccani.it/enciclopedia/max-karl-ernst-ludwig-planck>

<http://treccani.it/enciclopedia/ricerca/topografia/>

<http://treccani.it/enciclopedia/sensore/>

<http://treccani.it/enciclopedia/sir-james-dewar>

<http://treccani.it/enciclopedia/stereoautografo/>

http://treccani.it/enciclopedia/stereocomparatore_%28Dizionario-delle-Scienze-Fisiche%29/

<http://treccani.it/enciclopedia/stereofotogrammetria/>

http://treccani.it/vocabolario/geomatica_%28Neologismi%29/

<http://treccani.it/vocabolario/stereoplanigrafo/>

6

ALLEGATI