



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

***ANALISI DI RESIDUI DI POLVERE DA SPARO MEDIANTE TECNOLOGIA
MULTISPETTRALE***

ANALYSIS OF GUNSHOT RESIDUES USING MULTISPECTRAL TECHNOLOGY

Relatrice:

Prof. Martarelli Milena

Candidato:

Diomedì Federico

Correlatrice:

Medici Vittoria

A.A. 2023/2024

INDICE:

INTRODUZIONE	5
<i>1-MATERIALI</i>	8
1.1 TELECAMERE	8
1.1.1 GENIE NANO M2420 MONO	9
1.1.2 ALIEN VISION – GOLDEYE CL-130 TEC ₁	11
1.2 ILLUMINATORE	12
1.3 PROGETTAZIONE DEL BANCO	14
<i>2-METODI</i>	17
2.1 ACQUISIZIONE DELLE IMMAGINI	17
2.1.1 ACQUISIZIONE DELLE IMMAGINI CON TELECAMERA GENIE NANO.....	17
2.1.2 AQUISIZIONE DELLE IMMAGINI CON TELECAMERA ALIEN-VISION.....	19
2.2 ELABORAZIONE DELLE IMMAGINI	20
<i>3-RISULTATI</i>	25
3.1 IMMAGINI ACQUISITE CON TELECAMERA GENIE NANO	25
3.1.1 TELA BIANCA CON DISTANZA DI SPARO DI 30 CM	25
3.1.2 TELA BIANCA CON DISTANZA DI SPARO DA 40 CM.....	27
3.1.3 TELA BIANCA CON DISTANZA DI SPARO DI 50 CM	29
3.1.4 TELA VERDE COSPARSA CON POLVERE DI CARBONE.....	31
3.1.5 TELA BLU COSPARSA CON POLVERE DI CARBONE	33
3.2 CONFRONTO TELE ANALIZZATE CON TELECAMERA GENIE NANO	35
3.3 IMMAGINI TELA COLORATA ACQUISITE CON TELECAMERA GOLDEYE	38
3.3.1 RIQUADRO BIANCO	38
3.3.2 RIQUADRO BLU	40
3.3.3 RIQUADRO VERDE	42
3.3.4 RIQUADRO ROSSO	44
3.3.5 RIQUADRO GIALLO	46
3.3.6 RIQUADRO NERO.....	48
3.4 CONFRONTO RISULTATI TELA ANALIZZATI CON TELECAMERA GOLDEYE	49

CONCLUSIONI 52

INTRODUZIONE

I residui di polvere da sparo (Gun Shot Residue, GSR) sono una traccia forense e la loro analisi è uno degli strumenti più utilizzati nell'ambito delle indagini per determinare se un sospetto ha recentemente utilizzato un'arma da fuoco, con quale arma ha sparato e da che distanza. Per risalire a tutto questo però bisogna prima capire cosa avviene durante lo sparo e su quali materiali sono stati depositati i residui di polvere da sparo. Per la scienza forense i GSR sono tracce, definite come "vestigia o il segno di una presenza, di un'esistenza o di un'azione di qualcuno o qualcosa in un luogo o in uno spazio che inizialmente non apparteneva a quello spazio" [1].

Nel 1963 si determinò che "la dispersione dei residui di sparo è influenzata da due meccanismi diversi: entro i primi 100 cm di distanza i residui si propagano per inerzia; tra 1-3 m di distanza si disperdono a causa della depressione che si forma alla base del proiettile in volo" [2]. Successivamente gli studiosi differenziarono queste tracce sui bersagli, in una zona interna, più concentrata e visibile, e una zona esterna, dove i residui sono meno densi e quindi più difficili da vedere. Con l'aumentare della distanza di tiro, entrambe le zone si espandono, ma la densità dei residui diminuisce. Sulla pelle umana, specialmente a distanze maggiori, i residui potrebbero non essere visibili. Inoltre, nei tiri angolati, l'alone di fuliggine nella zona interna assume una forma eccentrica ed ellittica, che si orienta verso la volata dell'arma. Questo fenomeno si osserva indipendentemente dal tipo di munizione, calibro o lunghezza della canna. Al contrario, la zona esterna tende a puntare lontano dalla volata nei casi di colpi ravvicinati o a contatto [3]. La corretta individuazione e identificazione di queste tracce è fondamentale per stabilire un legame tra un sospetto, un'arma e una scena del crimine, contribuendo a fornire prove essenziali nei procedimenti penali.

Un altro argomento fonte di molti studi è la composizione di queste polveri, perché da essa si arriva a capire quale tecnologia sia migliore per l'analisi. A seguito di essi si è arrivati a dire che i residui rilasciati a seguito dello sparo sono composti principalmente da [4]:

- residui carboniosi;
- particelle di polvere più o meno bruciata;
- metalli e loro composti.

Quest'ultimi provengono principalmente da due fonti:

1. dalla miscela di innesco: piombo (Pb), bario (Ba) e antimonio (Sb);

2. dal proiettile: piombo, leghe del rame-zinco, acciaio dolce, nichel, rame o stagno.

Grazie a queste conoscenze sono stati sviluppati metodi di diversa natura per analizzare la composizione e distribuzione delle polveri: metodi chimici come la spettrometria a fluorescenza a raggi X (XRF), la microscopia elettronica a scansione (SEM) e l'analisi tramite spettrometria di massa. Pur essendo altamente sensibili e accurate, queste tecnologie presentano alcuni svantaggi come: strumenti costosi e complessi, tempi di preparazione e analisi del campione relativamente lunghi e inoltre molti hanno natura distruttiva, tale per cui impediscono ulteriori analisi successivamente.

Focalizzando l'attenzione sulla determinazione della distanza di sparo e tornando ai primi studi effettuati su residui di polvere da sparo, all'inizio della seconda metà del '900, si notò che all'aumentare della distanza di sparo si verificava un calo di concentrazione di Sb.

Negli anni a seguire si sviluppò un metodo per intuire un intervallo di distanza tra sparo e bersaglio, basato su modelli comparativi, senza però arrivare a individuarne la distanza esatta [5].

Proseguendo con gli studi si notò che forma, dimensione e tipo di arma sono fattori fondamentali per determinare la distanza di sparo, e si valutò l'utilizzo della visione nell'infrarosso per studiare GSR anche su indumenti scuri e ricoperti di sangue. Quest'ultima fu un'importante scoperta nell'ambito dell'analisi delle polveri da sparo; infatti, successivamente ad essa vennero elaborati diversi metodi per l'analisi visiva dei GSR per risalire alla distanza. Alcuni esempi di studi sono:

- rilevamento di residui di arma da fuoco su indumenti di colore scuro prima dell'analisi chimica: con questo studio sono state sperimentate tutte le lunghezze d'onda da 390 nm a 630 nm utilizzando un filtro giallo e un filtro arancione per la proiezione della luce, arrivando a dimostrare che nell'UV la lunghezza d'onda ottimale è 445 nm [6];
- immagini iperspettrali NIR per l'identificazione di residui di proiettili da munizioni marcate: con questo metodo si affianca la tecnologia multispettrale all'incorporazioni di alcuni marcatori luminescenti per dare una firma ottica e chimica ai GSR. Con esso si è riusciti a identificare il 72,2% dei campioni [7];
- imaging multispettrale per la stima delle distanze di ripresa: nello studio sono state confrontate sette distanze di sparo a 18 lunghezze d'onda nell'UV. I risultati dimostrarono

che la quantità di pixel nelle immagini contenenti GSR diminuiscono esponenzialmente con la distanza di ripresa da 30 a 220 cm seguendo una particolare equazione esponenziale [8];

- applicazione di metodi di imaging iperspettrale e apprendimento automatico per il rilevamento di modelli di residui da sparo: tale ricerca dimostra che l'utilizzo di algoritmi avanzati per la ricerca automatica di GSR affiancata a una fotocamera iperspettrale può essere uno strumento prezioso a supporto della raccolta e dell'analisi delle prove [9].

Il presente studio è focalizzato sull'applicazione della tecnologia multispettrale nell'infrarosso per l'analisi della polvere da sparo su tessuti di colori differenti, al fine di valutare l'efficacia di tale metodo, o di individuare eventuali migliorie necessarie, per visualizzare la distribuzione delle particelle di residuo da sparo (GSR) e, conseguentemente, per determinare la distanza di sparo.

Questa metodologia utilizza un sistema di imaging multispettrale, cioè l'accoppiamento di un emettitore di luce a diverse lunghezze d'onda, che vanno dal visibile all'infrarosso, e una telecamera in grado di acquisire immagini a tutte le lunghezze d'onda utilizzate. Con la tecnologia multispettrale non serviranno preparazioni preliminari dei provini, tempi di analisi elevati e successivamente ad essa i provini potranno essere sottoposti ad altri studi visto che non si entrerà a stretto contatto con essi e quindi non si andranno a contaminare o distruggere. Questo metodo consentirà di analizzare la distribuzione delle polveri in maniera ottimale sulle prove, in modo poi da poter risalire a distanza, direzione e inclinazione dello sparo; ma non permetterà di risalire alla composizione dei materiali rilevati, perciò sarà necessario effettuare altre analisi in grado di verificare la composizione chimica delle prove (questo non verrà trattato nella presente ricerca).

1-MATERIALI

1.1 TELECAMERE

Per questo studio sono stati utilizzati in successione due modelli differenti di telecamere: in un primo momento le acquisizioni sono state effettuate con una Genie Nano M2420 Mono della Teledyne DALSA, successivamente con una Alien Vision – Goldeye. Queste telecamere appartengono a due classi differenti, la prima appartiene al gruppo delle telecamere ad alta definizione, la seconda alle SWIR (Short Wave Infrared). Queste due tipologie di sensori hanno un range dello spettro elettromagnetico più ampio rispetto a quelle comuni che sono sensibili solo alle lunghezze d'onda comprese nello spettro visibile. La prima telecamera osserva nel vicino infrarosso (Near Infrared, NIR), invece la seconda fino al Short Wave Infrared (SWIR). In questo modo si possono avere più informazioni spettrali catturando immagini a lunghezze d'onda molto più elevate.

L'immagine catturata da queste telecamere, non solo rende gli oggetti distinguibili per le loro forme e trame come fa la luce visibile, ma beneficia anche delle caratteristiche della luce infrarossa e grazie ad essa si hanno i seguenti vantaggi [10]:

- l'infrarosso penetra alcuni materiali, permettendo di vedere in trasmissione. Ad esempio grazie ad esso il sangue non interferisce con la ricerca di residui da sparo, perché nell'infrarosso è invisibile.
- alcuni materiali trasparenti nel visibile, diventano opachi nell'infrarosso, permettendo di rilevare l'umidità negli oggetti.
- con lunghezze d'onda elevate è possibile effettuare osservazioni a lunga distanza;
- la riflettanza e l'assorbimento nel campo infrarosso variano a diverse lunghezze d'onda da un materiale all'altro, permettendo di distinguere materiali che nel visibile sembrerebbero uguali.

L'immagine catturata da questi sensori viene visualizzata in scala grigi, dove la tonalità dipende principalmente dal tipo di materiale, dall'umidità e dal suo colore reale; nel caso della presente ricerca, le immagini acquisite avranno una tonalità più chiara nella zona della tela senza polvere da sparo e una tonalità più scure in quella contenente le polveri.

1.1.1 GENIE NANO M2420 MONO



Figura 1 Telecamera GENIE NANO M2420 MONO [11]

Questo sensore, prodotto dalla Teledyne DALSA, in Figura 1, il primo utilizzato nella presente analisi, sfrutta una tecnologia CMOS di ultima generazione che consente l'acquisizione delle immagini anche nel vicino infrarosso (700 - 1000 nm).

Inoltre offre alta velocità d'esecuzione, basso rumore, pur mantenendo i costi ridotti.

Le caratteristiche tecniche della M2420 MONO sono riportate in Tabella 1.

Risoluzione Attiva	2448 x 2048
Modello del Sensore	Sony IMX264
Frame Rate	35 fps
Dimensioni Pixel	3.45
Dynamic Range	76.4 dB
Formato Dati	8 or 12 Bit Mono
Part Number	G3-GM11-M2420
Pixels Totali	5.1 MP
Velocità di Interfaccia	1 Gbps
Temperatura Operativa	20-65 °C
Tipo di Otturatore	Global Shutter
Potenza Richiesta	PoE or 10-36 VDC

General Purpose I/O	2 digital input, 2 digital output
Dimensioni	21 x 29 x 44 mm
Massa	46 Kg

Tabella 1 Specifiche tecniche GENIE NANO M2420 MONO

Le caratteristiche prestazionali del sensore sono descritte in Tabella 2.

Sfoglia di sensibilità assoluta (y)	4.7
Gamma dinamica dB	76
Gamma di guadagno	Da 1x a 251x (da 0 dB a 48 dB)
QE (Mono)	62 @530nm
Capacità di saturazione (e⁻)	10400
Rumore scuro temporale (rumore di lettura)	2.3

Tabella 2 Specifiche prestazionali GENIE NANO M2420 MONO

1.1.2 ALIEN VISION – GOLDEYE CL-130 TEC₁



Figura 2 ALIEN VISION – GOLDEYE

La telecamera Alien Vision – Goldeye CL-130 TEC1 della Sony, in Figura 2, è una telecamera dotata di sensori InGaAs che la rende sensibile nello spettro infrarosso a onde corte, che vanno da 900 nm a 1700 nm. Essa offre un'ottima qualità di immagine a frame rate molto elevati e basso rumore [12].

Con il suo utilizzo nel presente studio è stato possibile acquisire immagini a 1650 nm, mantenendo un'eccellente qualità dell'immagine grazie alla sua risoluzione elevata.

In Tabella 3, vengono mostrate le principali caratteristiche tecniche e prestazionali.

Interfaccia	IEEE 802.3 1000BASE-T, IEEE 802.3af (PoE)
Risoluzione	1280 (altezza) x 1024 (vertical)
Sensore	Sony IMX990/InGaAs
Dimensioni sensore	Tipo ½ VSWIR
Dimensione pixel	5 x 5 micron
Modalità otturatore	GS (Otturatore globale)
Frequenza fotogrammi massima a piena risoluzione	94 fotogrammi al secondo
ADC	12 bit
Buffer di immagini (RAM)	256 MByte
Rumore scuro temporale	250 e ⁻ , 210 e ⁻

Capacità di saturazione	165 ke ⁻ , 17.2 ke ⁻
Gamma dinamica	56.4 dB, 38.2 dB
Requisiti di alimentazione (CC)	Da 10,8 V CC a 30 V o tramite PoE
Consumo energetico	Massimo: 10.8 W (a 12 VDC), <12.95 W (PoE)
Massa	340 grammi
Dimensioni	78 x 55 x 55

Tabella 3 Specifiche tecniche GOLDEYE

1.2 ILLUMINATORE

Le telecamere SWIR, di cui si è parlato precedentemente, possono essere utilizzate per osservare il comportamento degli oggetti in un ampio range spettrale e, come si farà nella presente analisi, trovare la lunghezza d'onda migliore per il caso studiato.

Per farlo è necessario filtrare le lunghezze d'onda e analizzare per ognuna di esse l'immagine risultante. Per estrapolare le informazioni necessarie delle immagini alle specifiche lunghezze d'onda, è possibile procedere in due modi:

- Utilizzando filtri passa-banda a specifiche lunghezze d'onda;
- Illuminando la scena a lunghezze d'onda note.

In quest'analisi è stato applicato il secondo metodo, utilizzando l'illuminatore multispettrale RINGH LIGHT GEST220-MS, mostrato in

Figura 3 [13].



Figura 3 RINGH LIGHT GEST220-MS

L'illuminatore utilizzato è stato sviluppato dalla Genesi Elettronica per rispondere alle necessità di numerosi clienti, a seguito di richieste per applicazioni di vario genere, come:

- Determinazione dell'illuminazione più adatta per un determinato oggetto con un unico illuminatore;
- Nei macchinari volti alla revisione dei prodotti;
- Nei laboratori d'analisi per evidenziare campioni di materiali con particolari lunghezze d'onda (come in questo caso).

Questo illuminatore permette di illuminare la scena con luce a 12 lunghezze d'onda differenti, ognuna di esse con intensità regolabile da 0% a 100%, e consente anche l'accensione simultanea delle luci alle diverse lunghezze d'onda. L'illuminazione che può emettere va dallo spettro del visibile, quindi 400-700 nm, allo spettro dell'infrarosso, per una lunghezza d'onda massima di 1650 nm.

Per comunicare con l'illuminatore, quest'ultimo è dotato di un software personalizzato per Pc, in

Figura 4, tramite il quale viene gestito.

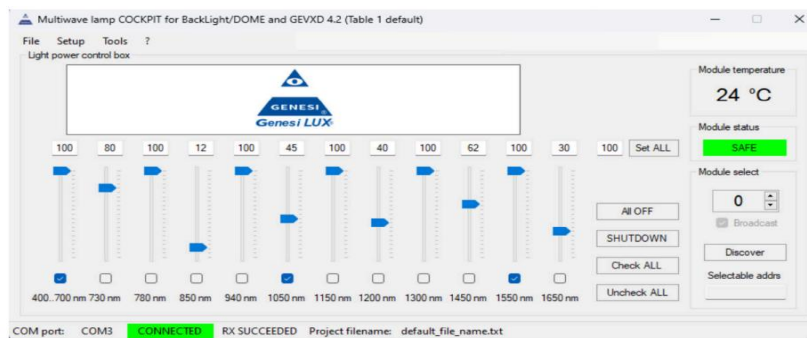


Figura 4 Software di gestione illuminatore

La sua forma ad anello con fori lungo la circonferenza interna consente il montaggio della telecamera SWIR senza interferire con l'illuminazione, in

Figura 5.

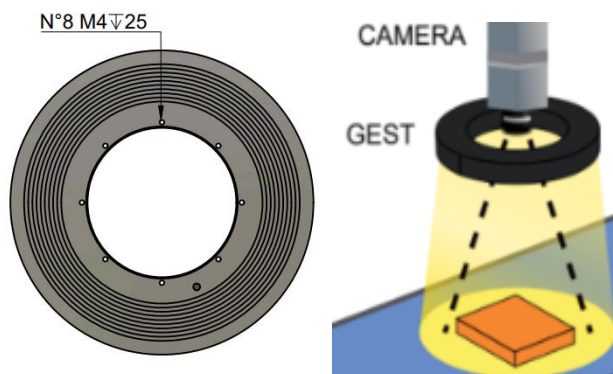


Figura 5 Fissaggio e assemblaggio illuminatore - telecamera

Le caratteristiche tecniche dell'illuminatore sono riportate in Tabella 4.

Diametro	220 mm
Configurazioni lunghezze d'onda	400 – 1650 nm
Alimentazione standar a 24V	4.0 A Max
Consumo energetico	100 W Max
Power led total N.	12 x 12
Type of use	Visible + Nir + Swir
Range temperatura di lavoro	Da 0 °C a 40 °C

Tabella 4 Caratteristiche tecniche RINGH LIGHT GEST220-MS

1.3 PROGETTAZIONE DEL BANCO

La prima parte del presente studio ha richiesto la progettazione e realizzazione di un setup ottimale per l'acquisizione delle immagini delle tele.

Il banco è stato progettato rispettando i seguenti requisiti:

- capacità di sostenere e mantenere stabili illuminatore e telecamera;
- distanza tela–telecamera regolabile;
- la telecamera non deve interferire con l'illuminazione della tela;
- facile sostituzione e posizionamento delle tele,
- agevole accessibilità alle ghiera di regolazione di messa a fuoco e diaframma della telecamera senza interferire con l'illuminazione.

Rispettando i punti precedentemente elencati si è proceduto a realizzare un disegno CAD 3D del setup, come in Figura 6.

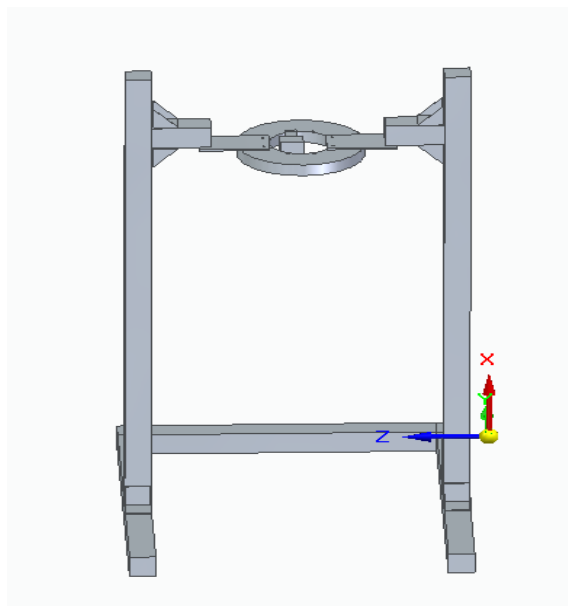


Figura 6 Disegno CAD banco di misura

Successivamente, come da progetto, viene realizzato il telaio utilizzando principalmente travi Bosch. Per le telecamere vengono utilizzati due sostegni differenti; la telecamera GENIE NANO viene montata direttamente sull'illuminatore grazie a una piastra ad L, come mostrato in Figura 7, così facendo è possibile regolare la distanza telecamera – tela attraverso lo scorrimento dei sostegni dell'illuminatore lungo le travi verticali.

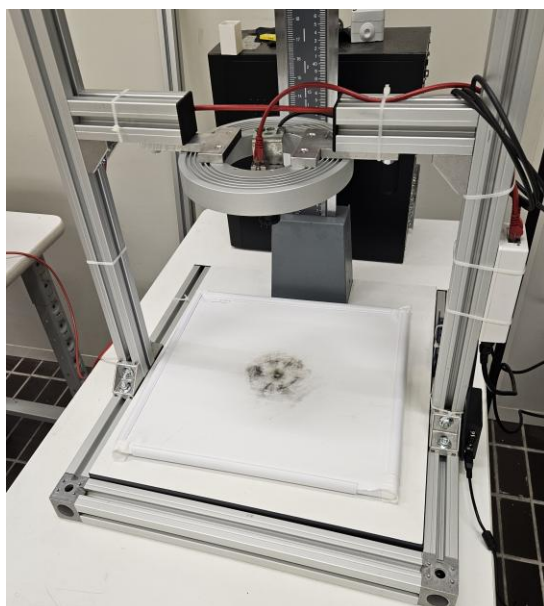


Figura 7 Banco di misura con GENIE NANO

Nel secondo caso invece, la telecamera Alien Vision, viene montata su un sostegno apposito, regolabile in altezza, mostrato in Figura 8.

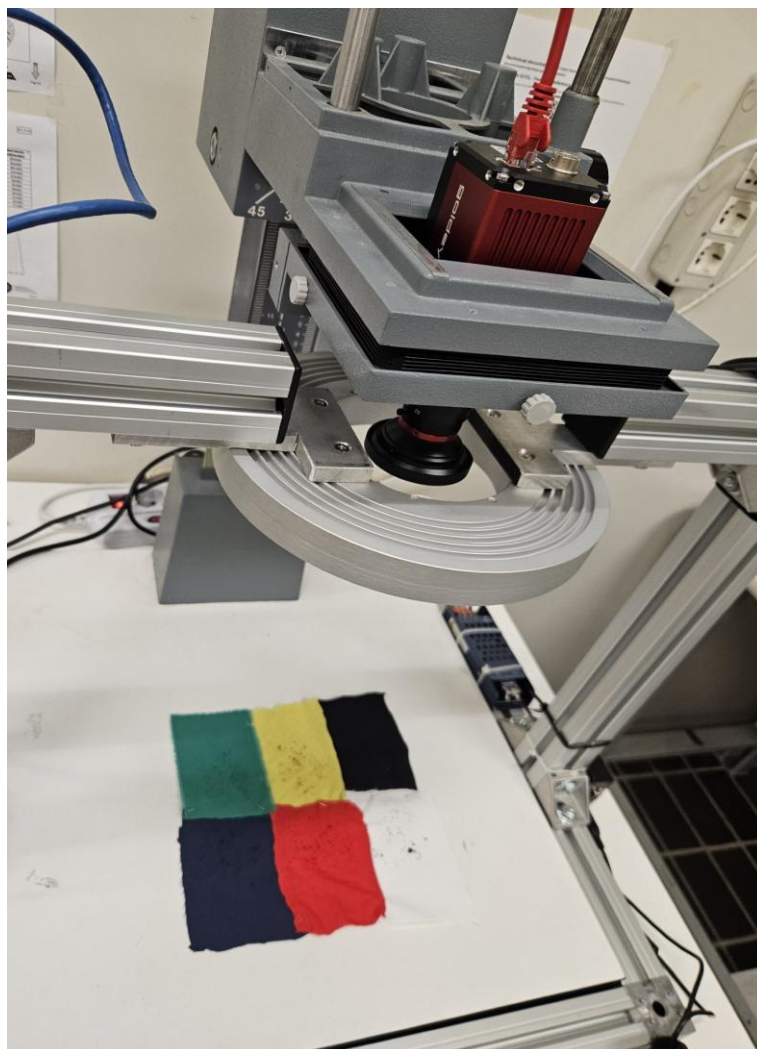


Figura 8 Banco di misura con Alien Vision

Gli alimentatori e il cablaggio vengono fissati tramite fascette in plastica sulla struttura, in modo che non si danneggino e non si posizionano nel campo di vista delle telecamere.

2-METODI

2.1 ACQUISIZIONE DELLE IMMAGINI

Per l'acquisizione delle immagini in un primo momento viene stabilita la distanza telecamera – tela, tale per cui la telecamera riesca a riprendere un'area sufficientemente grande da comprendere l'intera tela. Vengono così impostati due setup differenti:

- setup con telecamera Genie Nano, la quale viene posizionata a una distanza dalla tela di 27,5 cm, in modo da riprendere un'area di 2516 cm²;
- setup con telecamera Alien Vision, la quale viene montata a una distanza dalla tela di 42 cm, in modo da poter riprendere un'area di 968,63 cm².

In entrambi i casi, le tele in esame vengono esposte ad un'illuminazione a diverse lunghezze d'onda per tutta la durata del processo di acquisizione delle immagini.

Recenti studi hanno dimostrato che, per lunghezze d'onda superiori nel lontano infrarosso, anche l'utilizzo di un'illuminazione flash potrebbe offrire una qualità dell'immagine migliore rispetto a un'illuminazione a lunga esposizione, come quella utilizzata nel presente studio [14].

2.1.1 ACQUISIZIONE DELLE IMMAGINI CON TELECAMERA GENIE NANO

Con il primo setup vengono analizzati i residui da sparo su otto tele bianche, una verde e una blu. Su ciascuna delle tele bianche è stato sparato un proiettile dello stesso tipo, variando la distanza di sparo. Le distanze considerate sono: 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 30 cm, 35 cm, 40 cm e 50 cm.

Utilizzando la Genie Nano, che ha come range di lunghezza d'onda dal visibile al vicino infrarosso, vengono acquisite immagini a sei diverse lunghezze d'onda emesse in successione dall'illuminatore.

Le lunghezze d'onda utilizzate sono: 400-700 nm (visibile), 730 nm, 780 nm, 850 nm, 940 nm e 1050 nm. Oltre quest'ultima lunghezza le immagini perdono notevolmente qualità, essendo totalmente scure, a causa della mancata sensibilità del sensore a lunghezze d'onda così elevate.

Per ogni lunghezza d'onda viene effettuato il seguente procedimento:

1. Accensione illuminatore a lunghezza d'onda nota, tramite software apposito;

2. Regolazione manuale messa a fuoco della telecamera, tramite ghiera;
3. Regolazione manuale diaframma della telecamera, tramite ghiera;
4. Acquisizione immagine nera per successiva calibratura delle immagini. Essa viene ottenuta grazie all'otturazione dell'obiettivo della telecamera con l'apposito coperchio. Per ogni tela viene acquisita una sola immagine nera per diminuire la probabilità di spostare l'obiettivo erroneamente;
5. Acquisizione immagine bianca per successiva calibratura delle immagini; ricavata con il posizionamento di una tavola bianca, per la taratura delle telecamere, davanti all'obiettivo.
6. Acquisizione immagine tela con GSR, come in Figura 9.

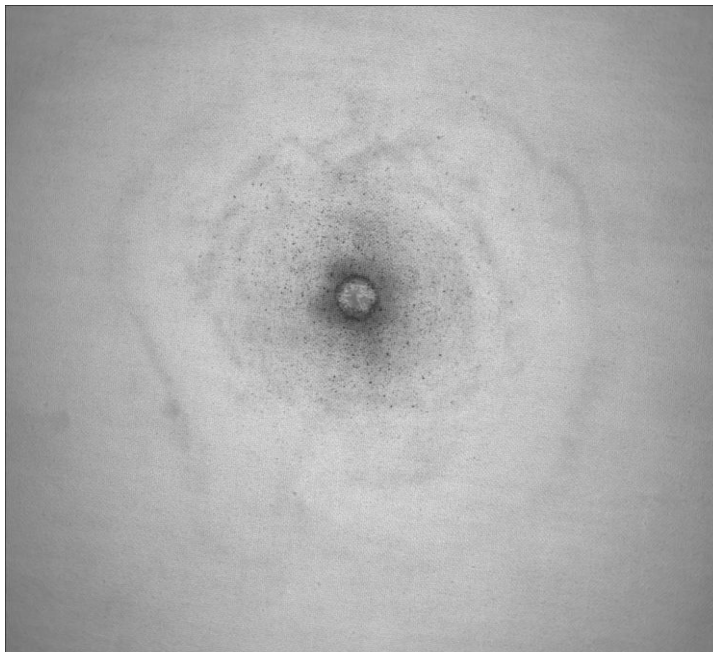


Figura 9 Immagine tela bianca con distanza di tiro da 10 cm illuminazione a lunghezza d'onda di 940 nm.

Un metodo per ridurre il margine di errore, utilizzato in recenti studi, è quello di utilizzare una regolazione del diaframma e della messa a fuoco motorizzata; così facendo non si entra in contatto con la telecamera, rischiando di spostare l'obiettivo.

Gli scopi di questa prima analisi sono:

- individuare quale lunghezza d'onda offre il migliore contrasto tra tela e GSR;

- osservare come varia la distribuzione della polvere da sparo al variare della distanza di tiro.

2.1.2 AQUISIZIONE DELLE IMMAGINI CON TELECAMERA ALIEN-VISION

Con il secondo setup invece, utilizzando il sensore Alien-Vision, è stata analizzata una tela composta da sei riquadri di colore differenti, bianco, giallo, nero, blu, rosso e verde, e ognuno di essi è stato cosparsa di polvere di carbone, come in Figura 10, per simulare la polvere da sparo.



Figura 10 Tela colorata cosparsa con polvere di carbone

Il procedimento utilizzato per l'acquisizione delle immagini è lo stesso della precedente analisi, ad eccezione per il fatto che con questa telecamera si ha il vantaggio di un range di lunghezza d'onda più ampio, in modo da acquisire immagini anche nell'infrarosso. Le immagini vengono acquisite alle seguenti lunghezze d'onda: 400-700 nm (visibile), 730 nm, 780 nm, 850 nm, 940 nm, 1050 nm, 1050 nm, 1200 nm, 1300 nm, 1450 nm, 1550 nm e 1650 nm (in Figura 11).

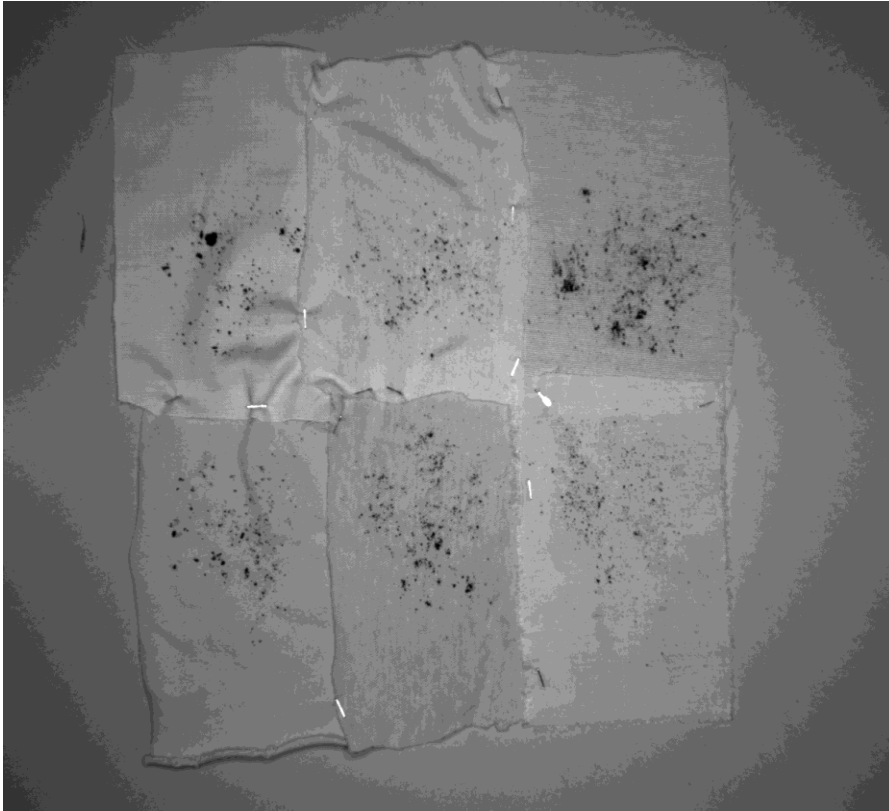


Figura 11 Immagine tela colorata con illuminazione a 1650 nm.

L'obiettivo di questa seconda analisi è di individuare la lunghezza d'onda che offre maggiore contrasto tra tela e polvere, per ogni colore della tela, e capire se è necessario utilizzare illuminazioni a lunghezze d'onda nel campo dell'infrarosso per avere maggiore contrasto.

2.2 ELABORAZIONE DELLE IMMAGINI

Le immagini una volta acquisite vengono nominate e salvate in modo opportuno, in modo che durante l'elaborazione sia più facile trovarle e distinguerle; nel presente studio le immagini sono state raccolte in più sottocartelle in modo da distinguerle in base al tipo di tela e a loro volta sono state caricate all'interno di un'unica cartella. Le immagini sono state nominate nel seguente modo:

- Immagini nere: lunghezza d'onda + _n + .png
- Immagini bianche: lunghezza d'onda + _b + .png
- Immagini tele: lunghezza d'onda + .png

In oltre per avere le immagini elencate in ordine crescente dalla lunghezza d'onda più bassa a quella più alta è stato messo uno zero davanti alla cifra indicativa delle lunghezze d'onda inferiori a 1000 nm.

Dopo aver ordinato correttamente le immagini acquisite si passa all'elaborazione tramite codice Python.

L'elaborazione viene suddivisa in tre fasi principali:

1. **Calibrazione delle immagini:** in questa prima fase tutte le immagini acquisite vengono caricate nel software e suddivise in tre raccolte, dove in una ci sono le immagini nere, in una le immagini bianche e in una le immagini delle tele. Quest'ultime poi, con l'ausilio delle immagini bianche e nere, vengono calibrate. La calibrazione è fondamentale nel presente studio, perché a seguito della variazione dell'illuminazione durante l'acquisizione delle immagini non si ha più corrispondenza tra i colori, cioè quello che appare bianco o nero nell'immagine, nella realtà non è tale; perciò prima si va a stabilire qual'è il vero bianco e il vero nero, grazie alle foto monocromatiche acquisite, così da realizzare una scala cromatica percentuale, dove lo 0% corrisponde al nero e il 100% al bianco, in questo modo ogni colore viene associato a un valore percentuale che corrisponde a quanto il colore stesso si avvicini al bianco o al nero.

Successivamente, per avere una differenziazione più ampia dei colori, si va a dividere la scala percentuale in 255 livelli; così facendo si ha una sensibilità maggiore delle tonalità di colore, perché ai colori non sono più attribuiti valori che vanno da 0 a 100, ma valori che vanno da 0 a 255, mantenendo sempre lo stesso criterio che si ha nella scala precedente, cioè il valore più basso corrisponde al nero e il valore più alto al bianco.

Come è possibile notare in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e in Figura 13**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, dopo la calibrazione è molto più facile notare le particelle di polvere da sparo.

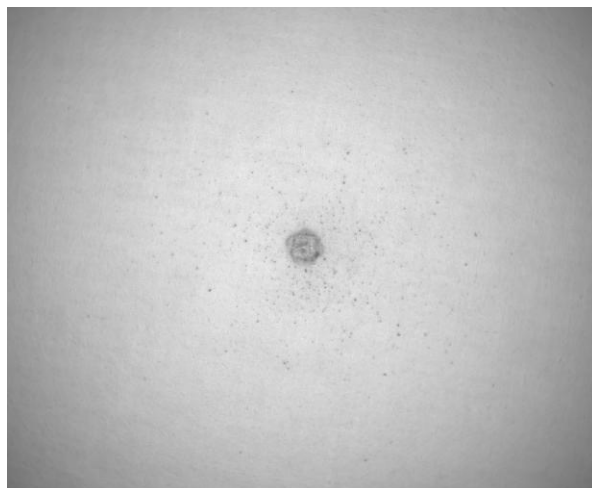


Figura 12 Immagine tela bianca con sparo da 30 cm, a lunghezza d'onda di 1050 nm.

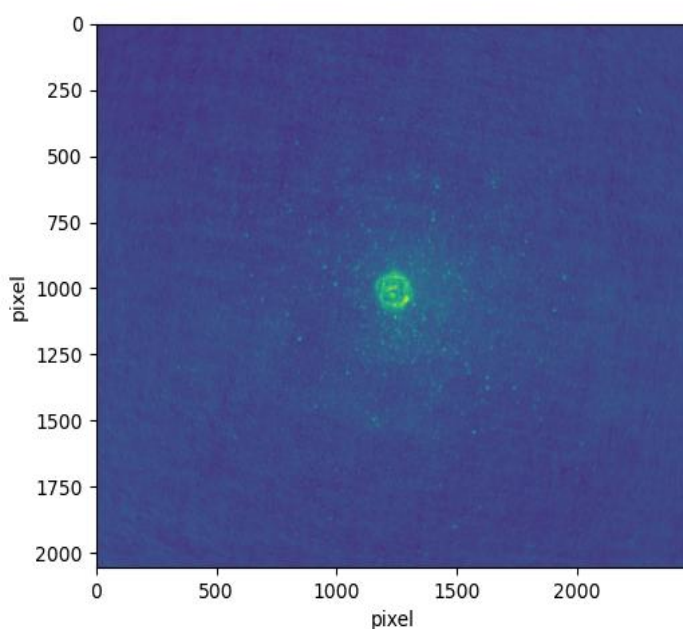


Figura 13 Immagine calibrata tela bianca con sparo da 30 cm, a lunghezza d'onda di 1050 nm

2. **Analisi tele:** lo studio è basato sui valori cromatici che si hanno nelle immagini. Questa fase, viene effettuata dopo la calibrazione perché i valori presi in esame sono quelli attribuiti dalla scala cromatica precedentemente applicata.

Si procede prendendo in esame sei aree differenti delle immagini di ogni tela, queste aree devono contenere, come in Figura 14:

- una e una sola particella di polvere da sparo;
- una superficie di tela notevolmente elevata rispetto alla grandezza del residuo da sparo.

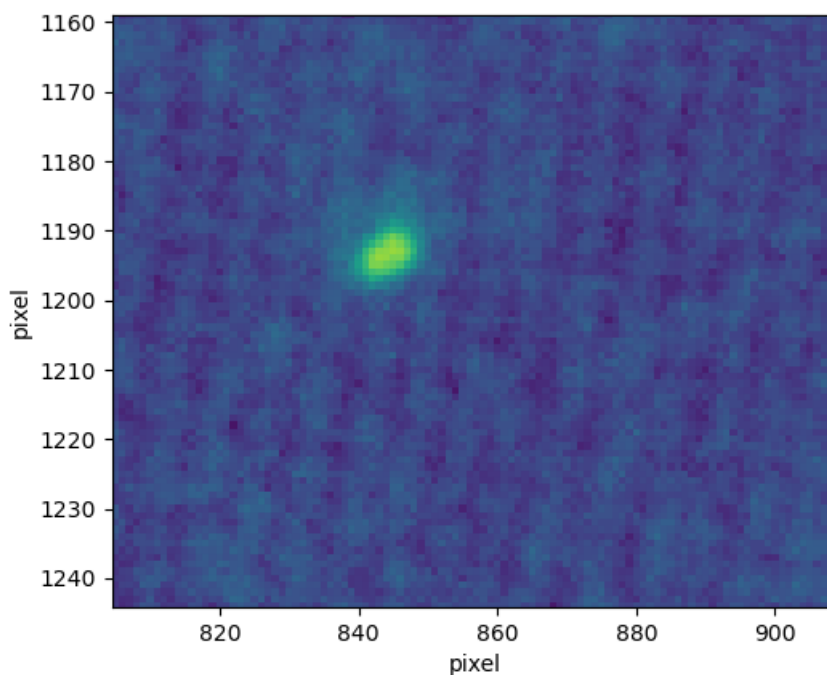


Figura 14 Area immagine tela bianca con sparo da 30 cm, a 1050 nm

Per ognuna di queste aree ad ogni lunghezza d'onda verrà calcolato, il valore massimo di intensità, che corrisponde a quello del residuo di polvere da sparo; poi verrà calcolato il valore medio, che essendo l'area della tela molto più grande rispetto a quella ricoperta da polvere da sparo, allora sarà una buona approssimazione del valore d'intensità della tela stessa. Così facendo, per ogni tela e a sua volta per ogni lunghezza d'onda, avremo sei valori di intensità delle particelle di polvere da sparo e sei valori d'intensità della tela.

3. Visualizzazione dei residui:

Per ogni tela vengono ricavati due grafici, entrambi basati sui valori d'intensità associati ai colori grazie alla scala cromatica applicata nella fase iniziale.

Da essi è possibile vedere:

- nel primo, l'andamento dell'intensità della tela e dei GSR in ogni area studiata, alle diverse lunghezze d'onda;
- nel secondo, l'andamento del contrasto tra polvere e tela alle diverse lunghezze d'onda. Il contrasto è la differenza d'intensità che c'è tra residui da sparo e tela, quindi è il fattore che identifica la visibilità dei GSR. Più il contrasto è elevato e maggiore è la differenza di intensità tra i due elementi, motivo per cui vengono distinti più facilmente.

In questo secondo grafico vengono inseriti dei range di incertezza, dovuti dal fatto che la differenza tra polveri e tele è frutto di due medie; cioè viene fatta una prima media tra i sei valori delle tele a quella lunghezza d'onda e una seconda tra i sei valori delle polveri alla stessa lunghezza d'onda. Una volta calcolate queste due medie viene calcolata la differenza. Infine vengono estrapolati due grafici di confronto tra le tele acquisite con la stessa telecamera, dove:

- nel primo, sono riportati tutti gli andamenti dei contrasti, ottenuti nelle immagini delle diverse tele;
- nel secondo, è rappresentato l'andamento della media di tutti i contrasti ottenuti nelle immagini delle tele.

3-RISULTATI

Dai grafici ottenuti durante l'elaborazione delle immagini vengono ricavati i risultati mostrati di seguito.

3.1 IMMAGINI ACQUISITE CON TELECAMERA GENIE NANO

3.1.1 TELA BIANCA CON DISTANZA DI SPARO DI 30 CM

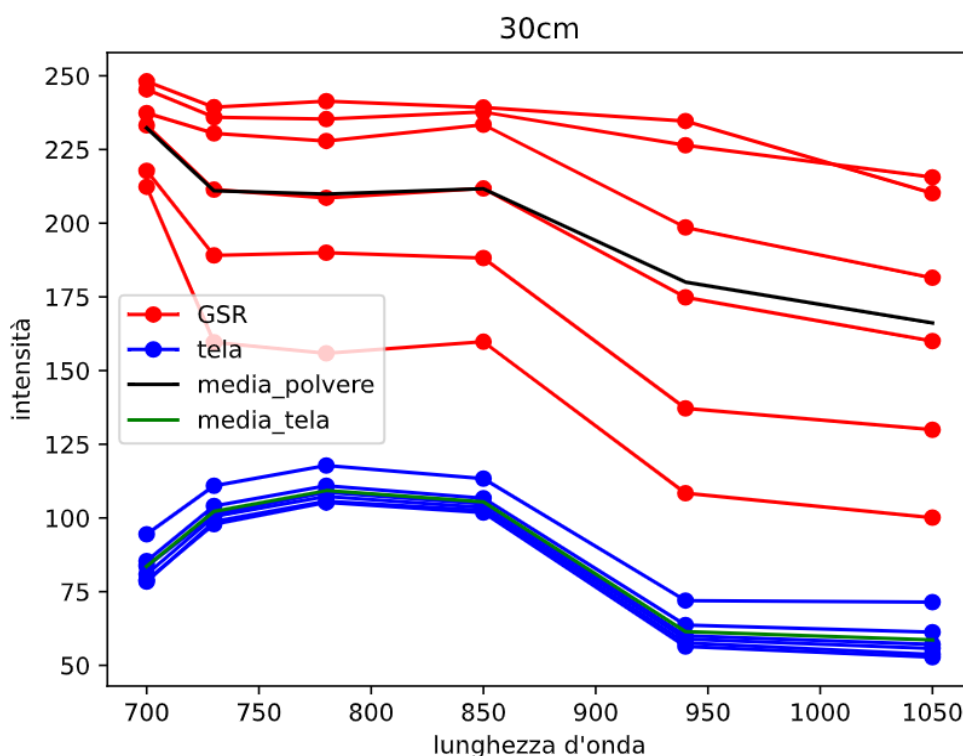


Figura 15 Andamento intensità aree, tela bianca con distanza di sparo di 30 cm

Dal grafico in **Figura 15** si osserva che l'andamento e i valori dell'intensità della tela restano pressoché costanti nelle diverse aree. Analogamente, anche per la polvere da sparo l'andamento dell'intensità appare simile tra un'area e l'altra, ma i valori mostrano una maggiore variabilità sia in funzione dell'area che della lunghezza d'onda.

Calcolando la media dei valori di intensità della polvere da sparo e, successivamente, della tela per le diverse lunghezze d'onda, e determinando la differenza tra le due medie, si ottiene l'andamento del contrasto alle diverse lunghezze d'onda, in Figura 16.

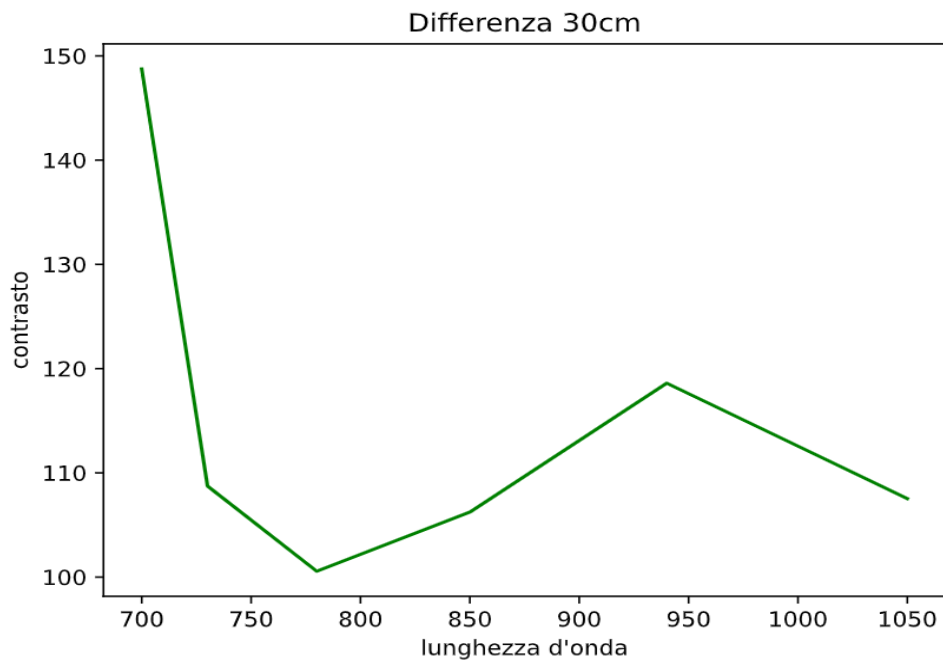


Figura 16 Andamento contrasto in funzione della lunghezza d'onda, per tela bianca con distanza di sparo di 30 cm.

Dal grafico si nota che il contrasto è massimo nella regione del visibile, per poi decrescere progressivamente fino a circa 780 nm. Successivamente, torna a crescere fino a 980 nm, senza però superare i valori rilevati nel visibile. Pertanto la lunghezza d'onda che evidenzia maggiormente la presenza dei residui da sparo è quella nel visibile.

3.1.2 TELA BIANCA CON DISTANZA DI SPARO DA 40 CM

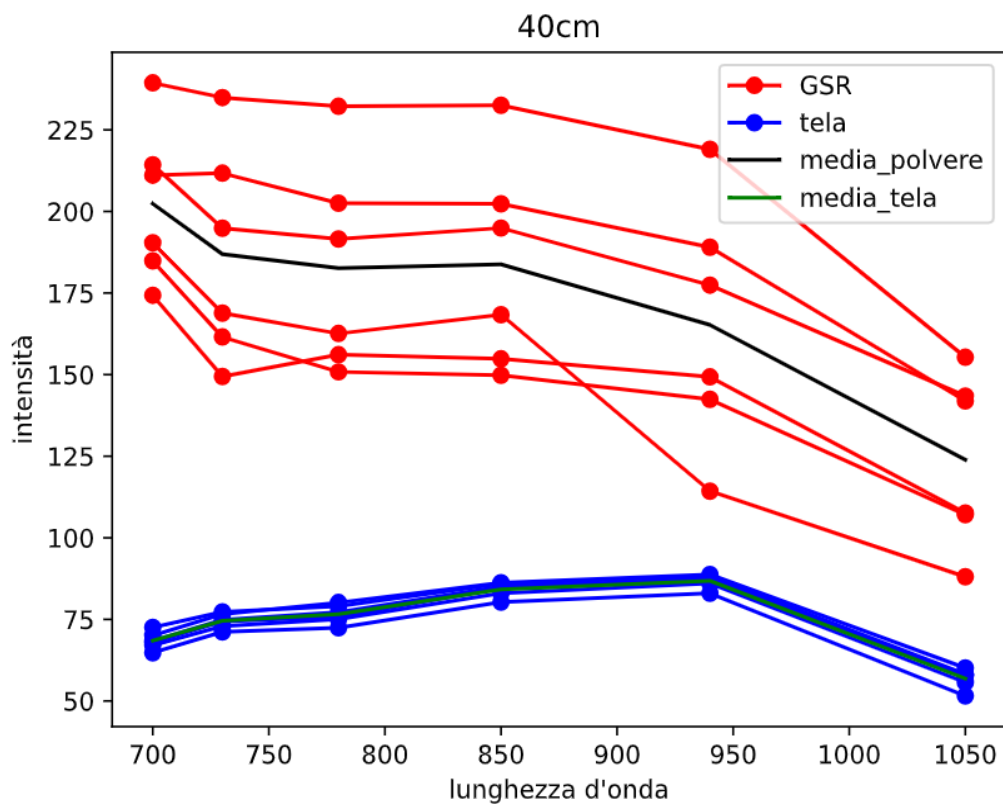


Figura 17 Andamento intensità aree, per tela bianca con distanza di tiro di 40 cm.

Per questa tela, è possibile osservare nel grafico in Figura 17, che l'intensità della tela nelle diverse aree resta costante e rispetto alle diverse lunghezze d'onda subisce una lieve variazione; al contrario dell'intensità dei GSR che con il crescere della lunghezza d'onda diminuisce notevolmente e tra le diverse aree ci sono lievi variazioni.

Nel grafico in Figura 18, si può notare che il contrasto è massimo con lunghezza d'onda nel visibile, e successivamente ad essa, presenta un continuo andamento decrescente.

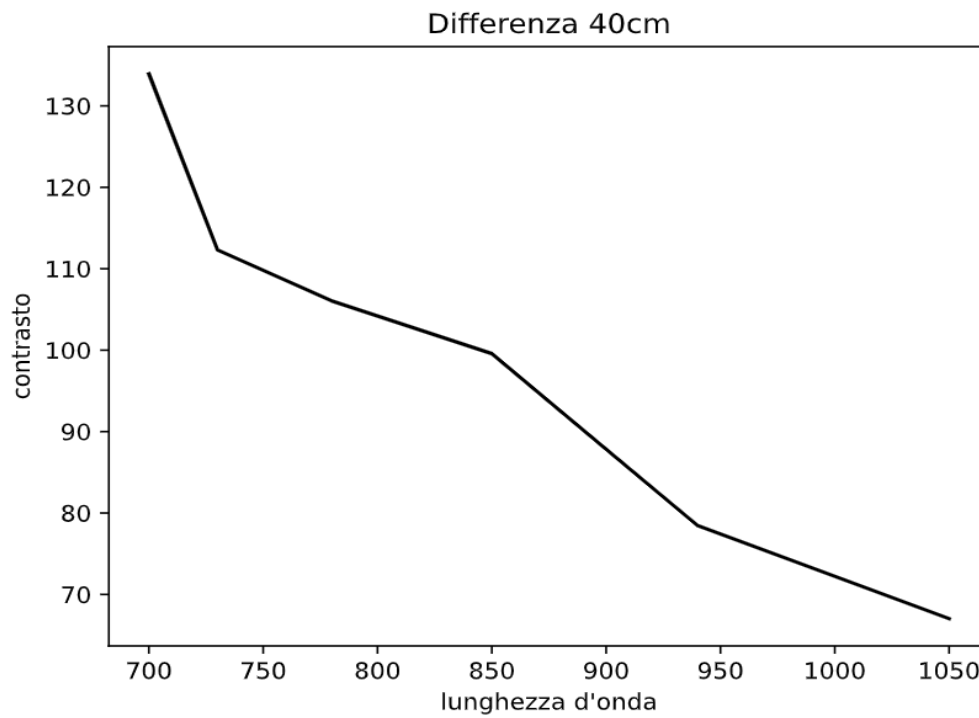


Figura 18 Andamento contrasto in funzione della lunghezza d'onda, per tela bianca con distanza di tiro di 40 cm.

3.1.3 TELA BIANCA CON DISTANZA DI SPARO DI 50 CM

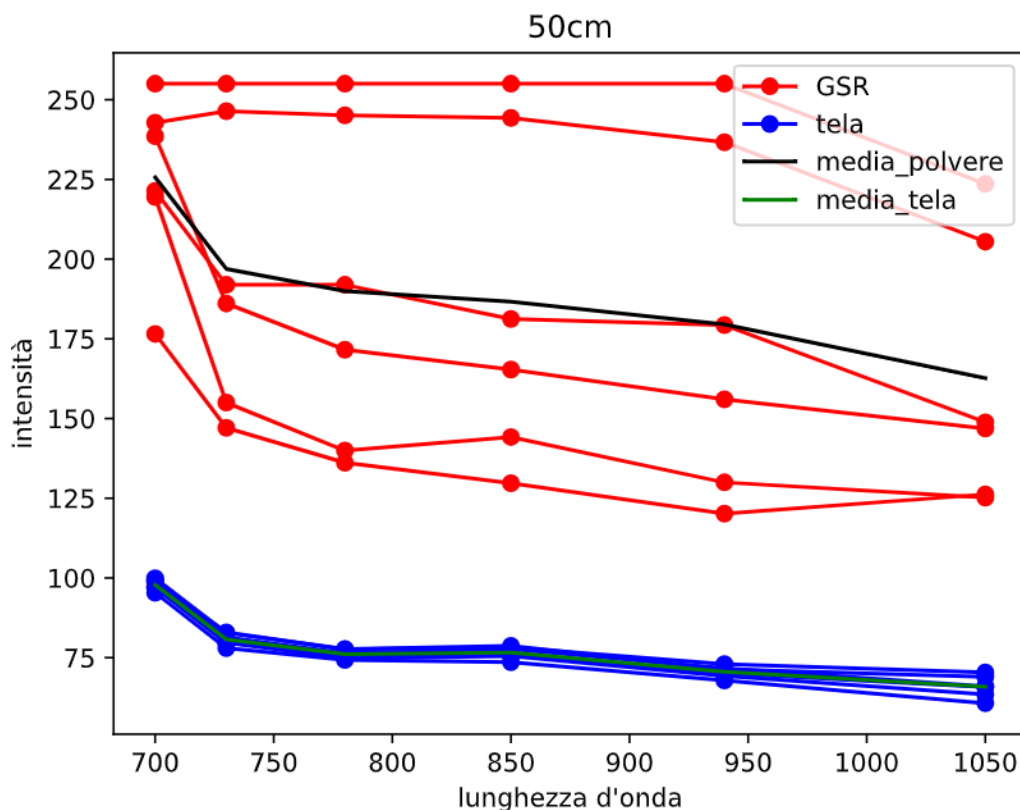


Figura 19 Andamento intensità aree, per tela bianca con distanza di tiro di 50 cm.

Nella tela bianca con sparo da 50 cm, possiamo osservare dal grafico in Figura 19, che l'ondamento dell'intensità della tela nelle diverse aree non subisce variazioni, invece considerando la lunghezza d'onda, all'aumentare di quest'ultima l'intensità subisce una lieve diminuzione. L'intensità della polvere invece nelle diverse aree ha principalmente due tipi di andamento, cioè per due aree l'intensità è pressoché costante fino a 950 nm e successivamente decresce; invece per le altre quattro aree l'intensità ha una repentina diminuzione nelle lunghezze d'onda del visibile e successivamente decresce regolarmente.

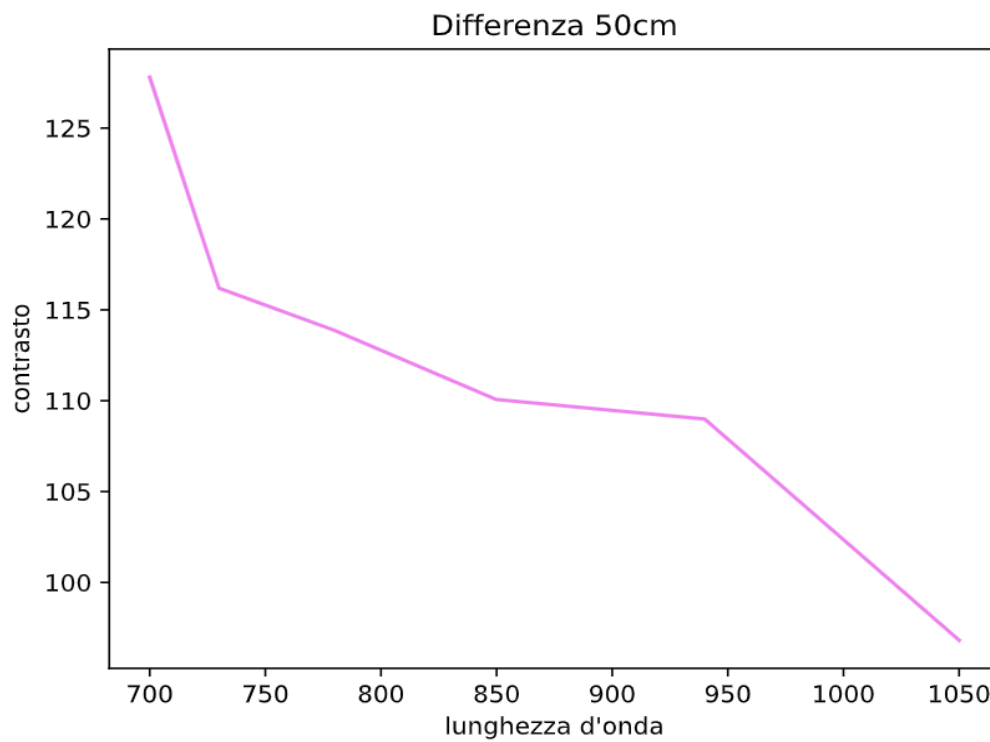


Figura 20 Andamento contrasto in funzione della lunghezza d'onda, per tela bianca con distanza di tiro di 50 cm.

Nel grafico in Figura 20, possiamo osservare invece l'andamento decrescente del contrasto tra tela e GSR in funzione della lunghezza d'onda, dove quindi ho un picco massimo a 730 nm, cioè nel visibile.

3.1.4 TELA VERDE COSPARSA CON POLVERE DI CARBONE

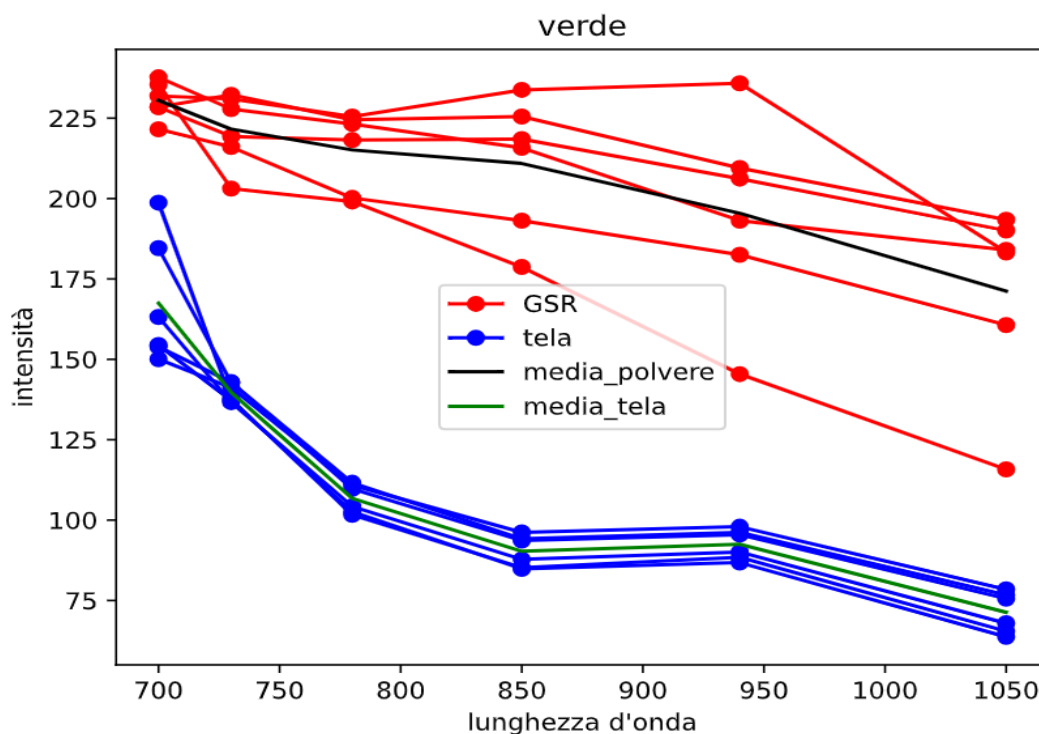


Figura 21 Andamento intensità aree, per tela verde cosparsa con polvere di carbone

Dalla tela verde cosparsa con polvere di carbone, quest'ultima utilizzata per simulare dei GSR, è stato estrapolato il grafico Figura 21, dal quale si può osservare che, tra le diverse aree l'andamento dell'intensità resta invariato, invece quello della polvere di carbone ha delle piccole variazioni tra un'area e l'altra. In entrambi i casi si ha un andamento decrescente con l'aumentare della lunghezza d'onda, e si può notare una pendenza più accentuata per l'intensità della tela nelle lunghezze d'onda del visibile.

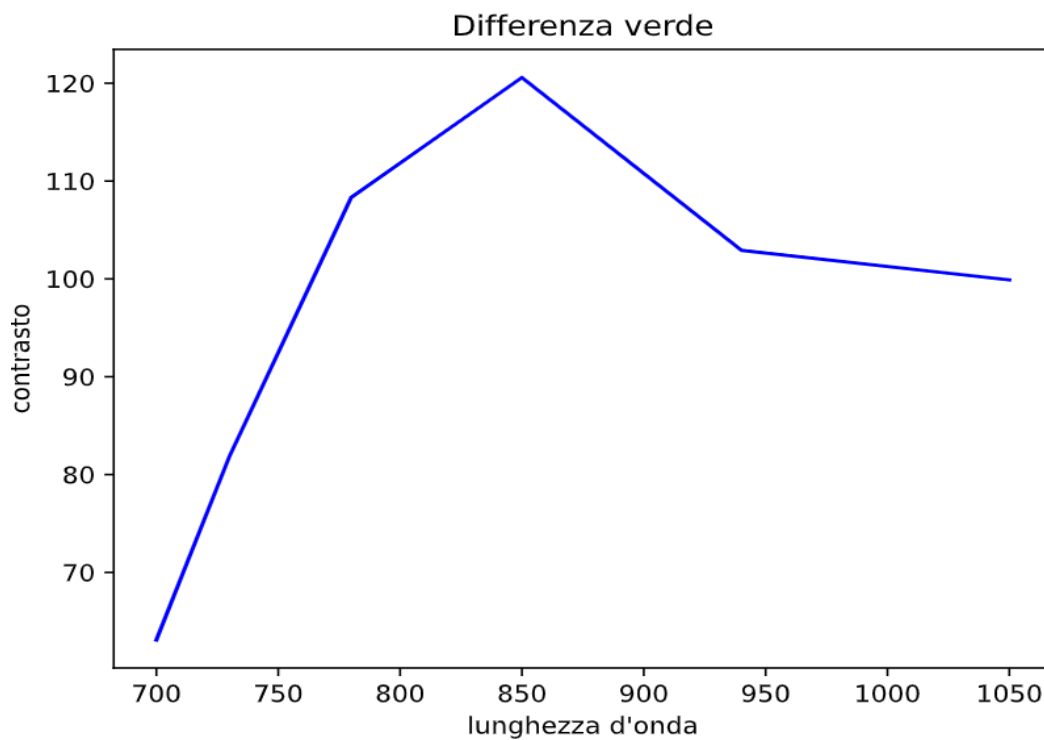


Figura 22 Andamento contrasto in funzione della lunghezza d'onda, per tela verde cosparsa di polvere di carbone.

Nel grafico in Figura 22 si può notare un andamento crescente del contrasto tra tela e polvere, con l'aumentare della lunghezza d'onda, fino ad arrivare ad un picco massimo a 850 nm, dopo il quale va a decrescere.

3.1.5 TELA BLU COSPARSA CON POLVERE DI CARBONE

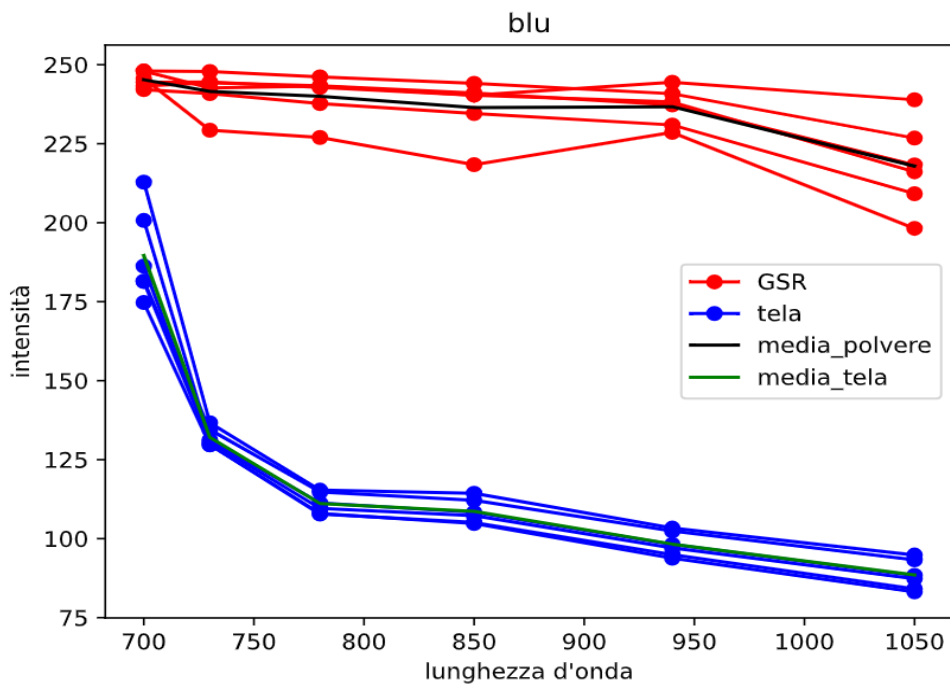


Figura 23 Andamento intensità aree, per tela blu cosparsa con polvere di carbone.

Dall'analisi delle aree della tela blu cosparsa con polvere di carbone, è stato ricavato il grafico in Figura 23. Come è possibile notare, l'andamento sia della tela che della polvere, in funzione della lunghezza d'onda, resta invariato per tutte le aree prese in analisi. Considerando gli andamenti medi, l'intensità della tela ha un andamento fortemente decrescente nelle lunghezze d'onda del visibile, per poi continuare a decrescere nel vicino infrarosso, ma in modo meno significativo; invece per la polvere dal visibile all'infrarosso si ha una diminuzione d'intensità molto meno rilevante rispetto alla tela.

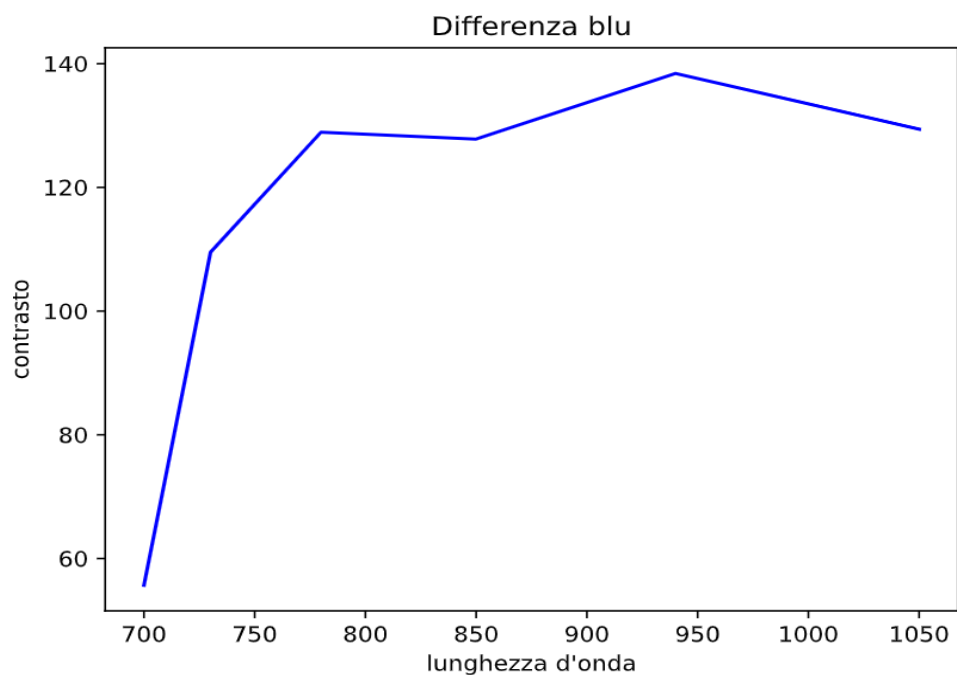


Figura 24 Andamento contrasto in funzione della lunghezza d'onda, per tela blu cosparsa di polvere di carbone.

Andando ad osservare l'andamento del contrasto tra tela e polvere, rappresentato nel grafico in Figura 24, è possibile osservare un aumento repentino nel visibile, per continuare a crescere fino a 950 nm, dove si ha il picco massimo, dopo di che va a decrescere con l'aumentare della lunghezza d'onda.

3.2 CONFRONTO TELE ANALIZZATE CON TELECAMERA GENIE NANO

Per confrontare i risultati ottenuti dalle tele bianche, vengono estrapolati due grafici.

Il primo in Figura 25, rappresenta l'andamento medio del contrasto nelle tre tele bianche, prese in analisi precedentemente, in funzione della lunghezza d'onda.

È possibile notare un picco massimo a 730 nm, cioè nel visibile, per poi avere un andamento più o meno decrescente fino a 1050 nm.

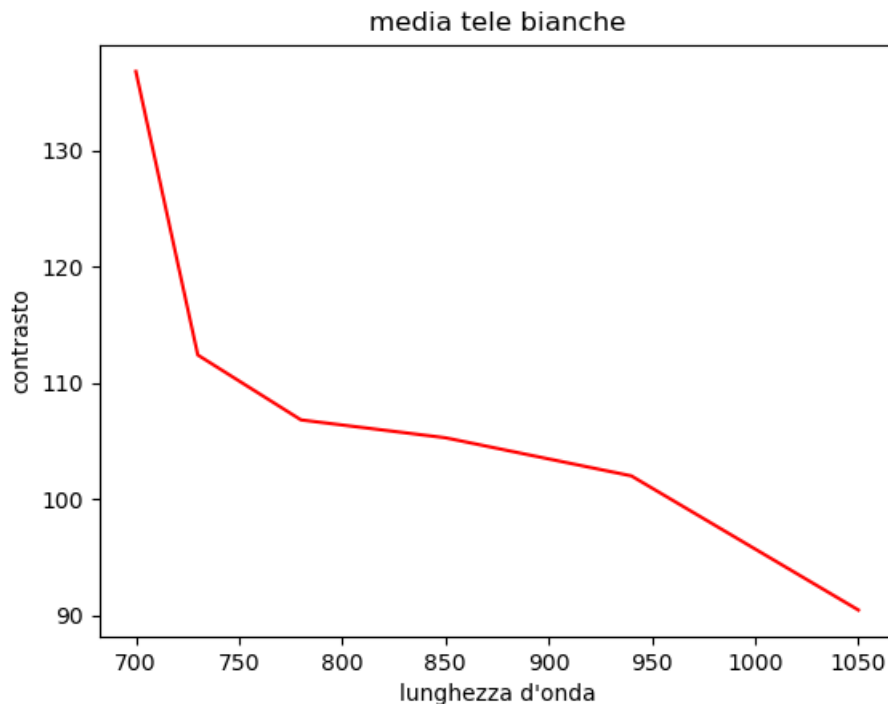


Figura 25 Andamento medio del contrasto nelle tele bianche in funzione della lunghezza d'onda.

Il secondo grafico ottenuto dal confronto delle tre tele, rappresentato in Figura 26, rappresenta gli andamenti del contrasto delle tre tele. Da esso è possibile notare che in tutti e tre i casi si ha un andamento principalmente decrescente del contrasto, con un picco massimo a 730 nm.

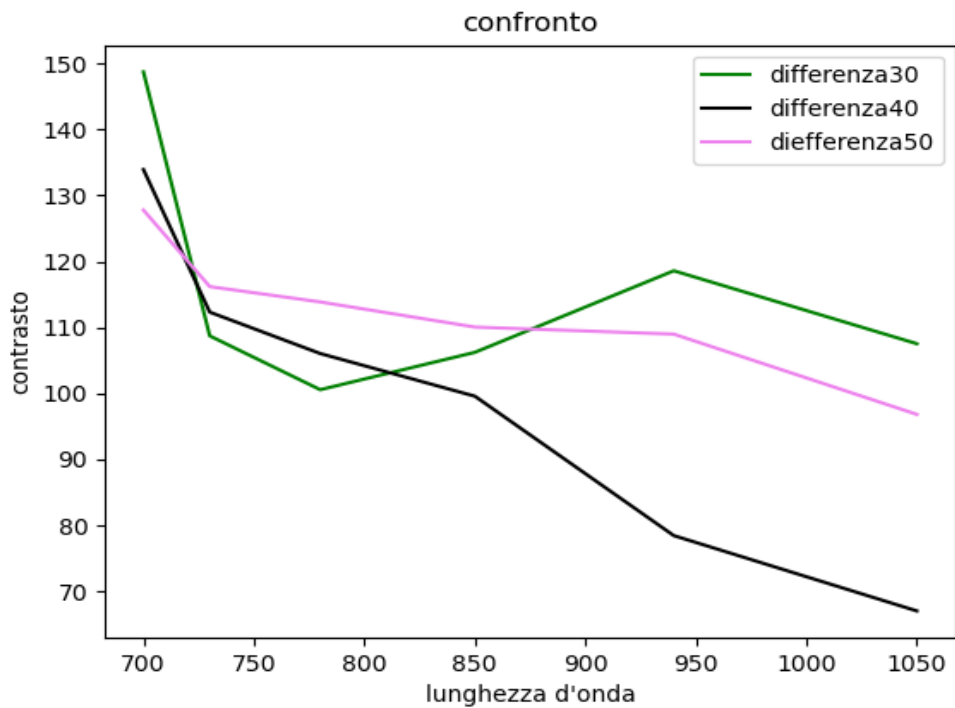


Figura 26 Andamento contrasto in funzione della lunghezza d'onda, delle tele bianche con distanza di sparo di 30 cm, 40 cm, 50 cm.

Effettuando invece un confronto tra le tele bianche, la tela verde e la tela blu, si ottengono i seguenti risultati.

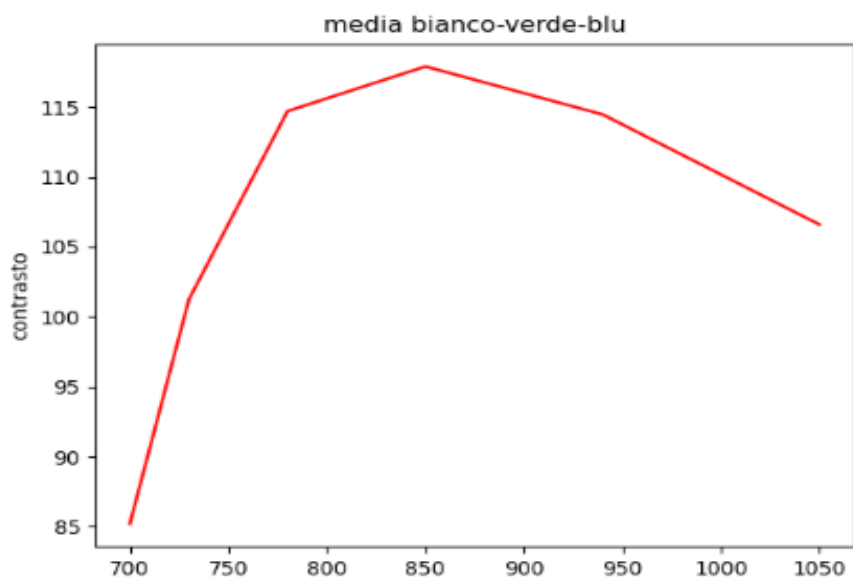


Figura 27 Andamento media contrasto tele bianche, verde e blu.

Nel grafico in Figura 27, dove è rappresentato l'andamento medio dei contrasti nelle tele bianche, verde e blu, in funzione della lunghezza d'onda, è possibile notare un andamento crescente fino a 850 nm dove si ha il picco massimo, cioè la lunghezza d'onda che permette di avere il maggiore contrasto, per poi andare a decrescere fino a 1050 nm.

Invece nel grafico in Figura 28, nel quale sono rappresentati gli andamenti dei contrasti della tela verde, della tela blu e la media del contrasto nelle tele bianche. In esso è possibile vedere che: le tele bianche hanno un picco massimo nel visibile, cioè a 730 nm e poi si ha un andamento decrescente; la tela verde e blu hanno un andamento crescente, simile nel campo del visibile, per poi avere due picchi massimi differenti, la tela blu fornisce un contrasto massimo a 940 nm, invece la tela verde a 850 nm.

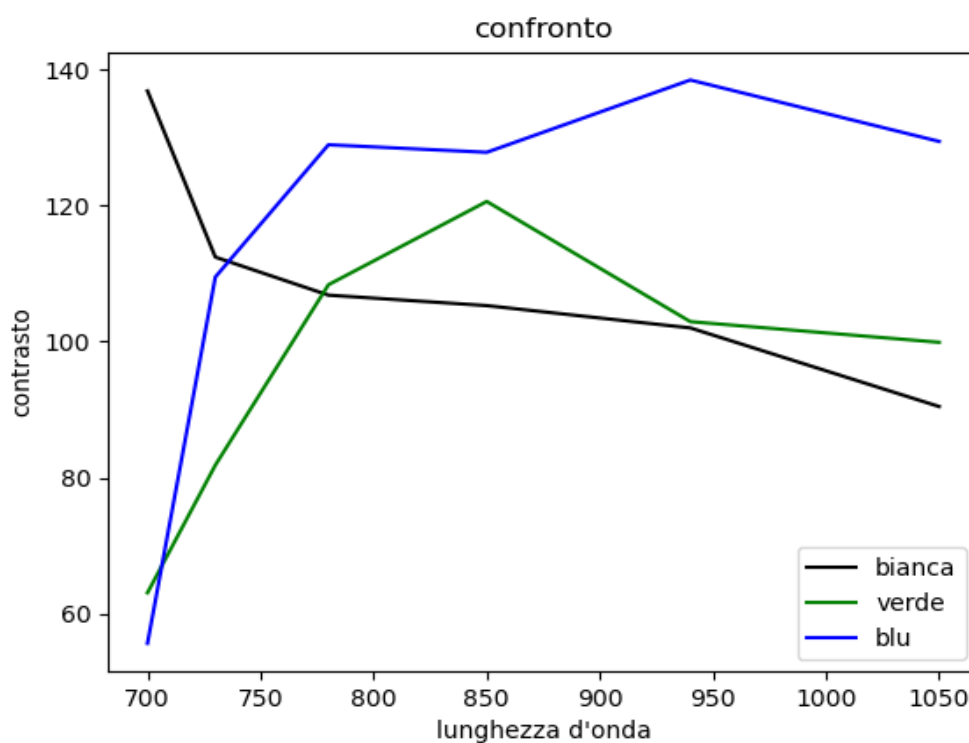


Figura 28 Confronto andamento contrasto in tela verde, blu e bianche.

3.3 IMMAGINI TELA COLORATA ACQUISITE CON TELECAMERA GOLDEYE

A seguito dell'analisi della tela composta da sei riquadri, di colore: bianco, nero, blu, rosso, verde e giallo; tutti cosparsi con polvere di carbonio, per simulare dei GSR, sono stati ricavati i seguenti grafici e risultati:

3.3.1 RIQUADRO BIANCO

Dallo studio dell'intensità di polvere e tela, nelle diverse aree del riquadro bianco, alle diverse lunghezze d'onda, vengono ricavati i seguenti risultati:

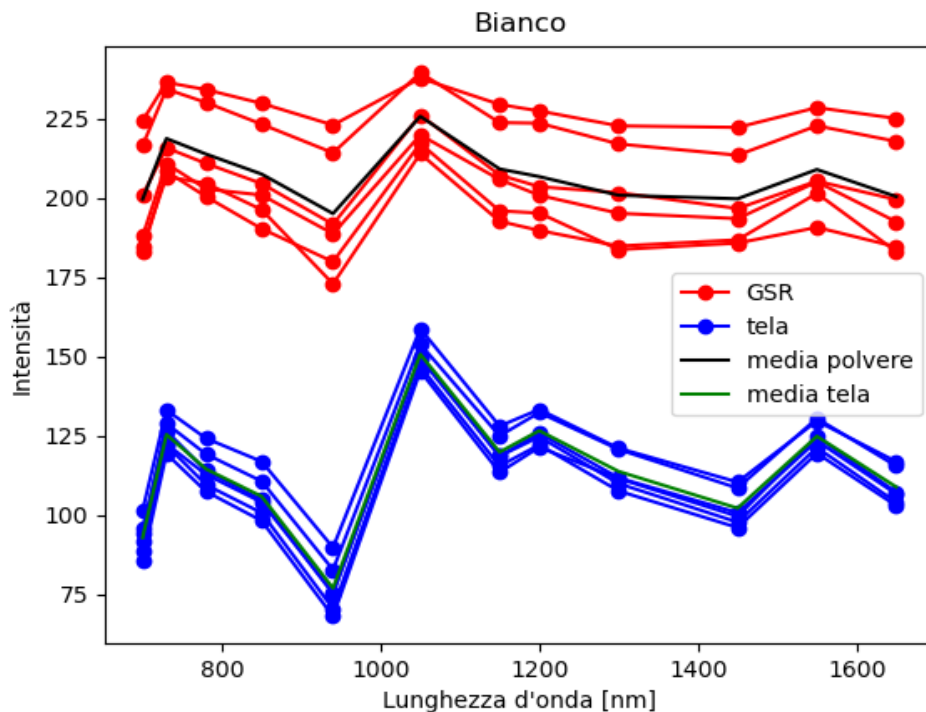


Figura 29 Andamento intensità aree, per riquadro bianco cosparsi con polvere di carbone.

Come è possibile notare dal grafico in Figura 29, l'andamento dell'intensità al variare della lunghezza d'onda, resta pressoché invariato tra le diverse aree. Considerando l'andamento medio delle polveri e della tela, è facile vedere che si hanno oscillazioni molto simili, ma con entità differenti visto che le variazioni della tela sono maggiori.

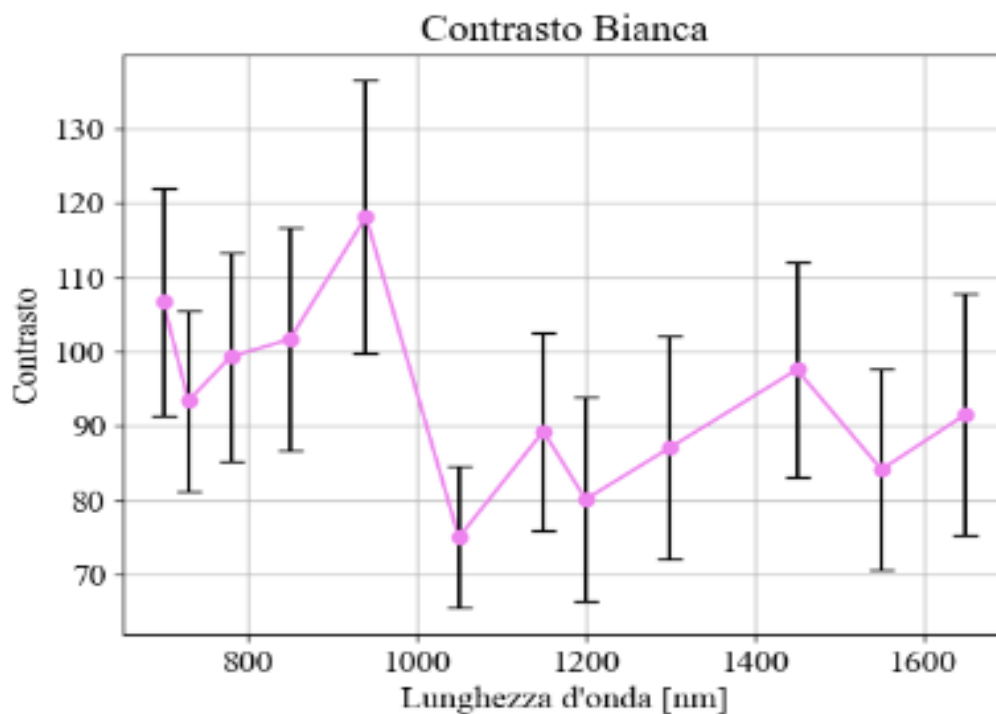


Figura 30 Andamento contrasto in funzione della lunghezza d'onda, per riquadro bianco cosparsa di polvere di carbone.

Calcolando la differenza tra intensità della particella di polvere e della tela ad ogni lunghezza d'onda utilizzate, si ottiene l'andamento del contrasto nel grafico in Figura 30. Da quest'ultimo si può dire, che si ha contrasto massimo con illuminazione a lunghezza d'onda di 950 nm, e successivamente ad esso si hanno oscillazioni con picchi massimi molto inferiori a quello ottenuto in precedenza.

Analizzando l'incertezza ad ogni lunghezza d'onda si è ricavato un valore di deviazione standard che oscilla tra 10 e 18, per ottenere una deviazione standard media di 13.15.

3.3.2 RIQUADRO BLU

Dallo studio dell'intensità di polvere e tela, nelle diverse aree del riquadro blu, alle diverse lunghezze d'onda, vengono ricavati i seguenti risultati:

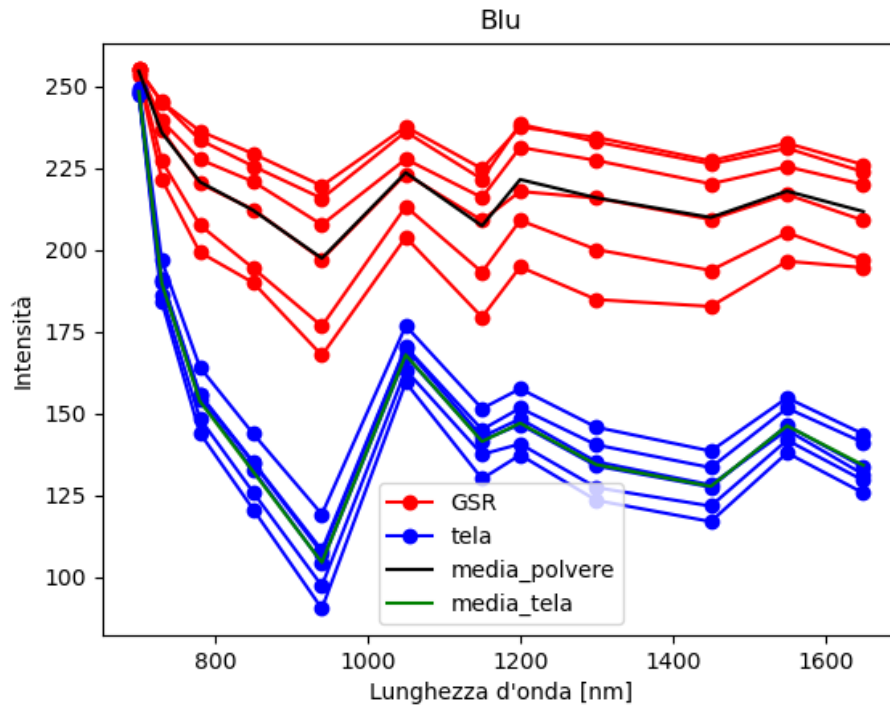


Figura 31 Andamento intensità aree, per riquadro blu cosparso con polvere di carbone.

Per confrontare i valori dell'intensità nelle diverse aree, si ricava il grafico in Figura 31. Da questo si nota che nel visibile l'intensità della tela e delle diverse particelle di polvere, assumono valori molto simili, per andare a discostarsi con l'aumentare della lunghezza d'onda. Al variare dell'area in analisi l'andamento dell'intensità della tela resta costante, invece quello delle particelle di polvere subisce delle piccole variazioni.

Calcolando la differenza ad ogni lunghezza d'onda, tra l'intensità media della tela e quella della particella di polvere, si ottiene il grafico in figura Figura 32.

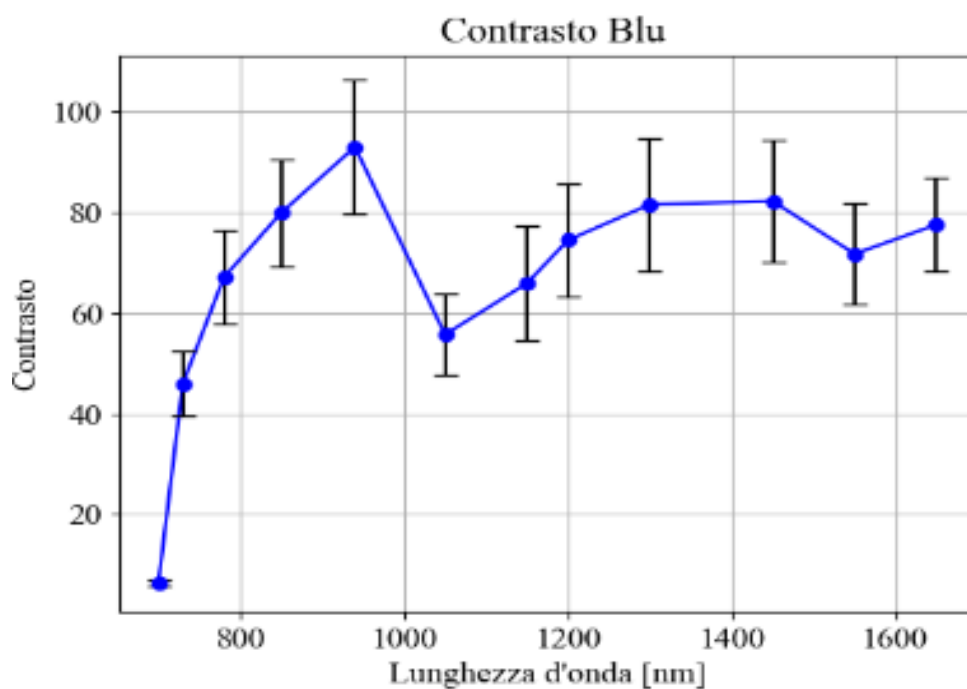


Figura 32 Andamento contrasto in funzione della lunghezza d'onda, per riquadro blu cosparsa di polvere di carbone.

Da questo grafico è possibile notare un andamento crescente del contrasto, nel campo del visibile, fino al raggiungimento di un valore massimo a 950 nm, dopo il quale resta a valori piuttosto elevati rispetto a quelli iniziali, ma senza superare il picco precedentemente ottenuto.

Andando ad analizzare i discostamenti che si ha tra i valori di intensità nelle diverse aree, nel grafico iniziale, si è calcolata una deviazione standard per ogni lunghezza d'onda, che oscilla tra 1 e 13, ottenendo una deviazione standard media di 8.8.

3.3.3 RIQUADRO VERDE

Raccogliendo e analizzando i dati ottenuti dalle diverse aree del riquadro verde, vengono estrapolati i seguenti grafici:

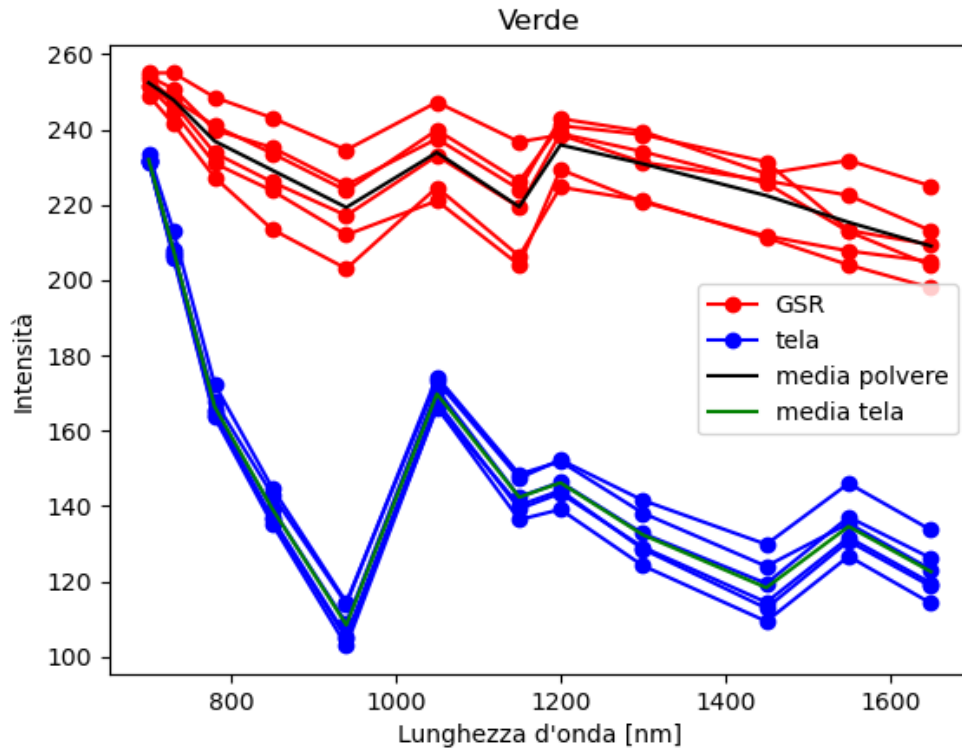


Figura 33 Andamento intensità aree, per riquadro verde cosparso con polvere di carbone.

Dall'intensità della tela e delle particelle di polvere di carbone nelle diverse aree, viene ricavato il grafico in Figura 33.

Da quest'ultimo è possibile notare che i valori d'intensità sia della tela che delle particelle di polvere, mantengono lo stesso andamento variando l'area in esame; per la tela si ha un'intensità massima nel visibile, con valore molto vicino a quello delle particelle di polvere, per poi andare a decrescere sensibilmente con l'aumentare della lunghezza d'onda. L'intensità delle particelle di polvere in maniera analoga, partono da un valore massimo di intensità nel visibile, per poi andare a decrescere nell'infrarosso, ma in maniera meno accentuata rispetto alla tela.

Calcolando il contrasto tra particella di polvere e tela, ad ogni lunghezza d'onda, si ottiene il grafico in Figura 34.

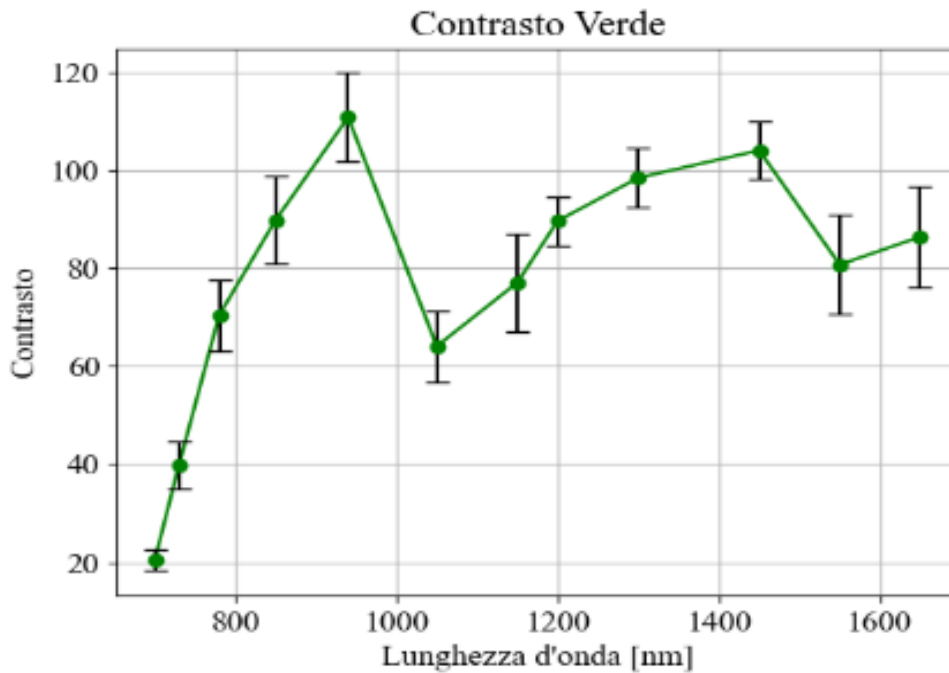


Figura 34 Andamento contrasto in funzione della lunghezza d'onda, per riquadro verde cosparsa di polvere di carbone.

In questo caso, come è possibile notare, si ha un andamento fortemente crescente nel campo del visibile per arrivare a un picco massimo a 950 nm. Successivamente va a decrescere nel vicino infrarosso, e continuando ad aumentare la lunghezza d'onda il contrasto subisce un'oscillazione nell'infrarosso, ma senza mai superare il picco massimo precedentemente raggiunto.

A seguito dell'analisi per valutare l'incertezza del contrasto ad ogni lunghezza d'onda, si ottiene che la deviazione standard per tutto il range di lunghezza d'onda analizzato oscilla tra 2 e 10, per ottenere una deviazione standard media di 6.6.

3.3.4 RIQUADRO ROSSO

A seguito dello studio delle intensità delle particelle di polvere e della tela, nelle diverse aree del riquadro rosso, si ottengono i seguenti risultati:

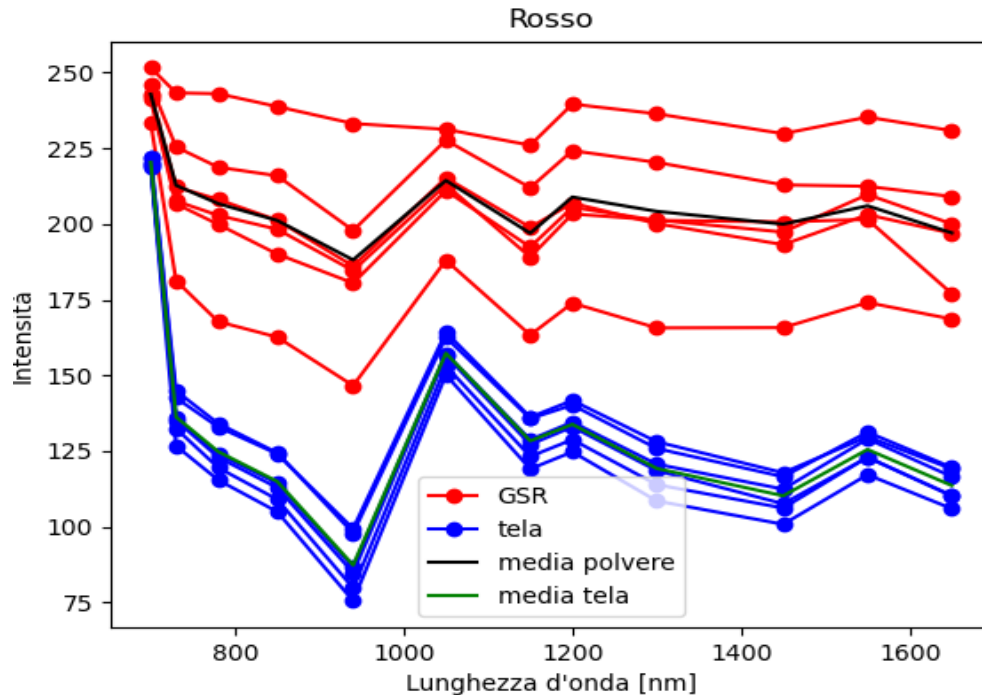


Figura 35 Andamento intensità aree, per riquadro rossa cosparso con polvere di carbone.

Inserendo in un grafico i valori d'intensità ottenuti in funzione della lunghezza d'onda, si ottiene il grafico rappresentato in Figura 35. Da quest'ultimo è possibile osservare che l'andamento d'intensità della tela, variando l'area in analisi, non cambia; a differenza di quello delle particelle di polvere, che invece si discostano in maniera più o meno accentuata da un'area all'altra.

Si può anche vedere che l'intensità della tela subisce oscillazioni più accentuate al crescere della lunghezza d'onda, a differenza di quella delle particelle di polvere che resta più costante, nonostante entrambi gli andamenti medi partano da valori molto simili.

Per lo studio del contrasto in funzione della lunghezza d'onda invece viene estrapolato il grafico in Figura 36.

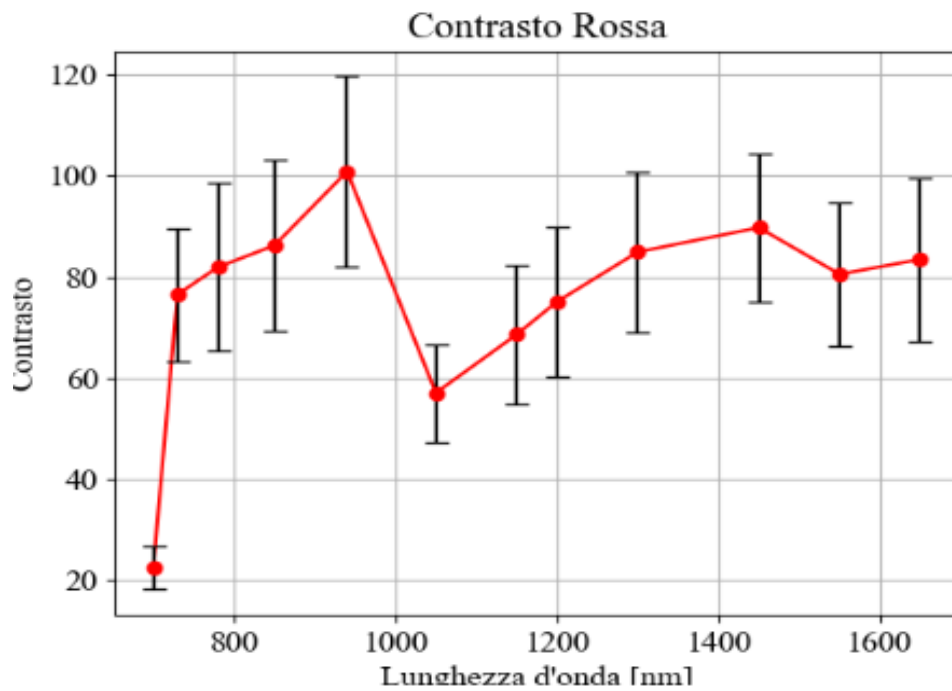


Figura 36 Andamento contrasto in funzione della lunghezza d'onda, per riquadro rosso cosparso di polvere di carbone.

Da quest'ultimo si nota che, il contrasto ha un andamento crescente fino al vicino infrarosso, dove raggiunge il picco massimo a 950 nm, per poi subire un'oscillazione nell'infrarosso, però a valori più bassi.

Con lo studio dell'incertezza del contrasto alle diverse lunghezze d'onda, si può dire che si ha una deviazione standard che varia tra 4 e 19, influenzata principalmente dalle variazioni di intensità delle particelle tra le diverse aree, con una deviazione standard media di 13.07.

3.3.5 RIQUADRO GIALLO

Dall'analisi dell'intensità delle particelle di polvere e della tela, nel riquadro giallo, vengono ricavati i seguenti risultati:

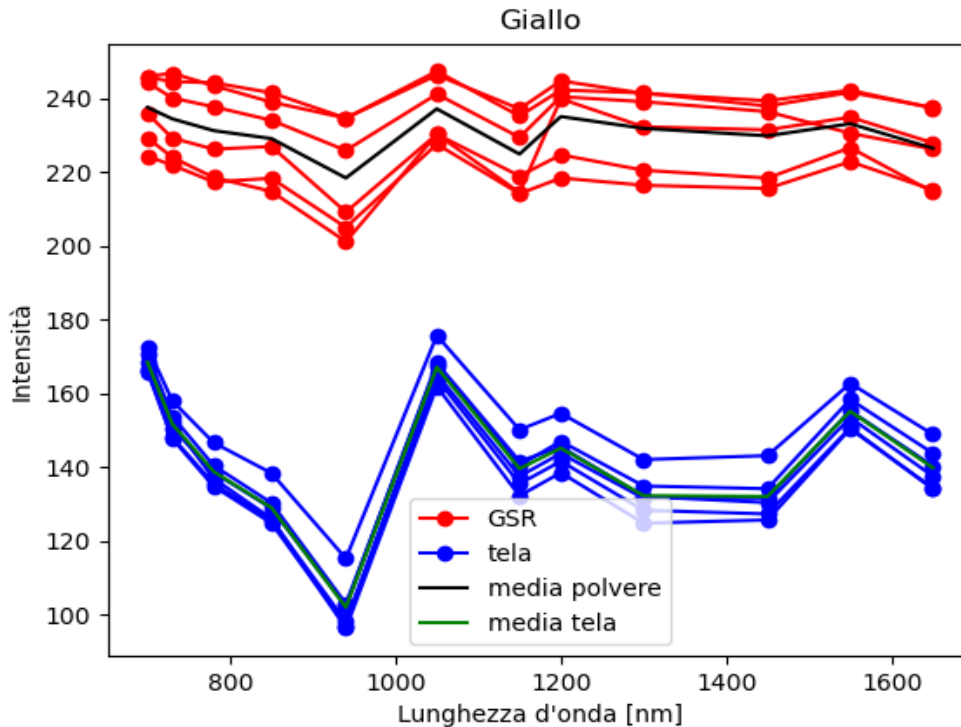


Figura 37 Andamento intensità aree, per riquadro giallo cosparso con polvere di carbone.

Nel grafico in Figura 37, è possibile osservare l'andamento dell'intensità in funzione della lunghezza d'onda, delle particelle di polvere e della tela in sei aree differenti. Si può notare come l'andamento tra le diverse aree rimanga costante sia per la tela che per le particelle di polvere, anche se per quest'ultime nonostante l'andamento sia lo stesso, però tra un'area e l'altra l'andamento si discosta di qualche valore, traslando più in alto o più in basso rispetto alla media.

Analizzando il contrasto, invece si ottiene il grafico in Figura 38.

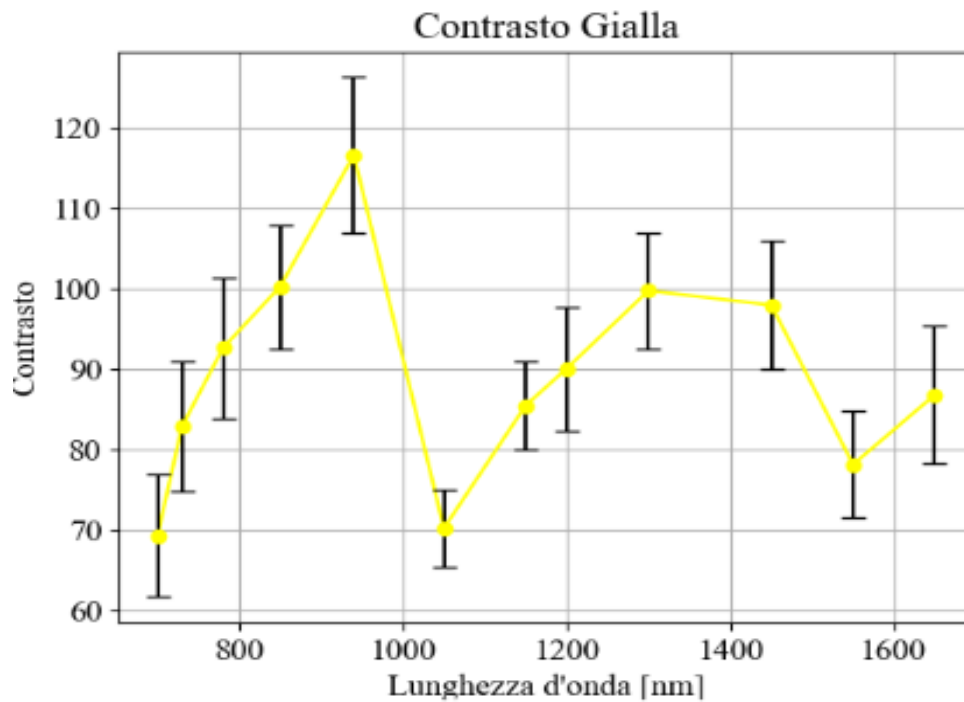


Figura 38 Andamento contrasto in funzione della lunghezza d'onda, per riquadro giallo cosparso di polvere di carbone.

Da esso è possibile dire che, si ha contrasto massimo a una lunghezza d'onda pari a 950 nm, fino alla quale si ha un andamento crescente. Dopo questo picco l'andamento del contrasto presenta due oscillazioni, che mantengono sempre un valore più basso di quello ottenuto nel picco precedente.

Esaminando l'incertezza del contrasto è possibile dire che, si ha una deviazione standard che oscilla tra 5 e 10, per una media di 7.07.

3.3.6 RIQUADRO NERO

Dall'analisi dell'intensità delle particelle di polvere di carbonio e della tela nelle diverse aree del riquadro nero, vengono ottenuti i seguenti risultati:

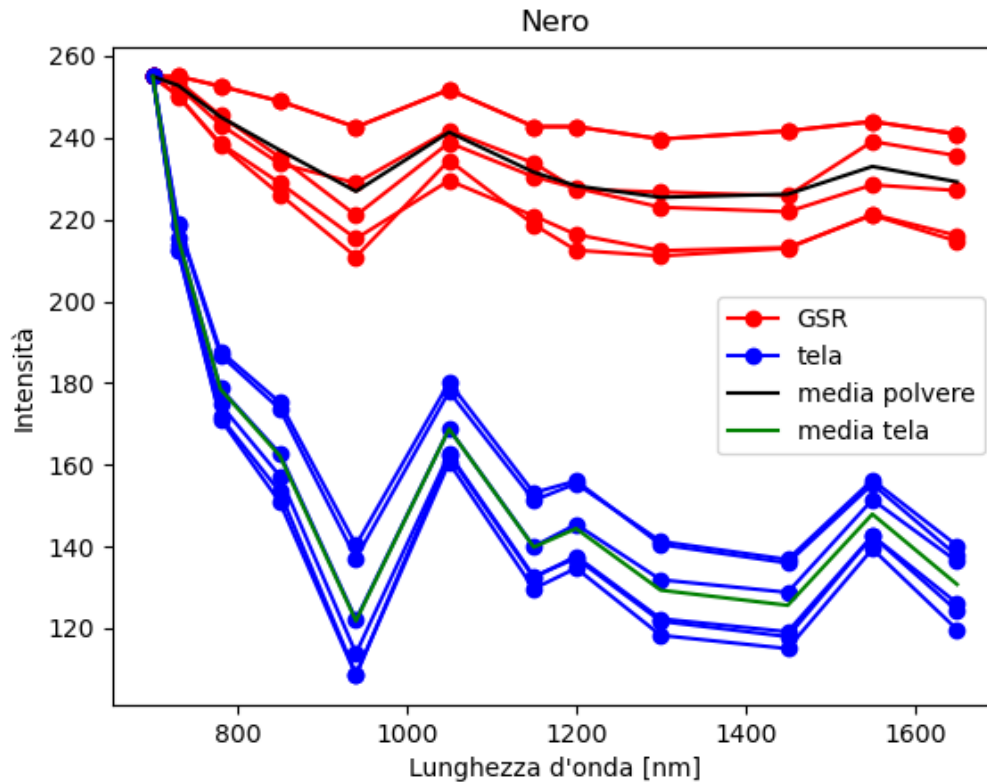


Figura 39 Andamento intensità aree, per riquadro nero cosparso con polvere di carbone.

Nel grafico in Figura 39, è possibile vedere l'andamenti dell'intensità delle particelle di polvere e della tela in sei aree differenti del riquadro. Da esso si nota che, le intensità di entrambi gli elementi partono da valori molto simili nel campo del visibile, per andarsi a discostare aumentando la lunghezza d'onda.

Tra le diverse aree gli andamenti dell'intensità restano piuttosto invariati, discostandosi lievemente dal valore medio.

Analizzando il contrasto, si ottiene il grafico in Figura 40.

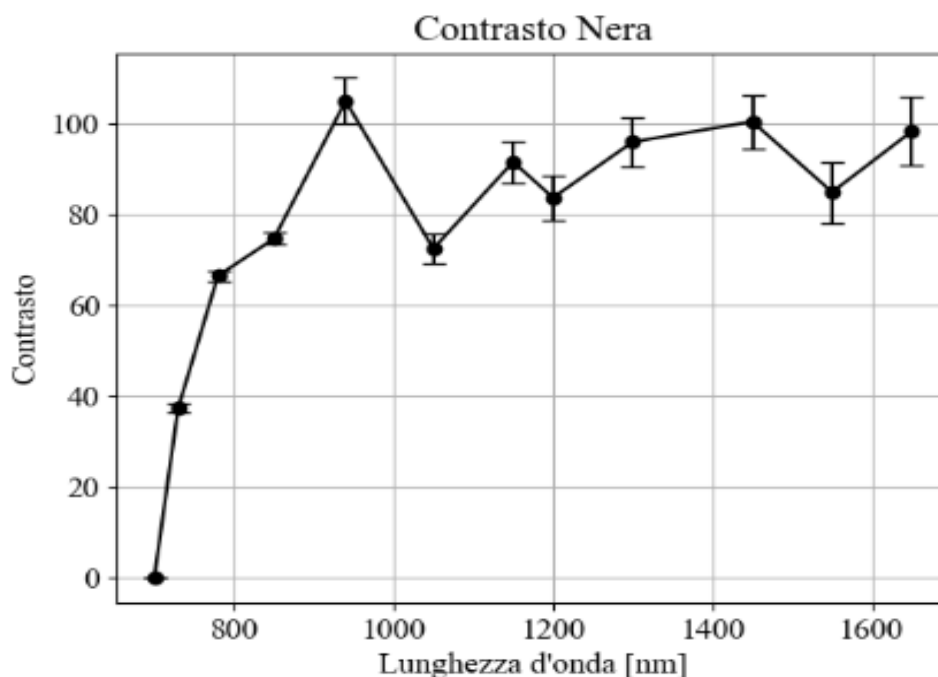


Figura 40 Andamento contrasto in funzione della lunghezza d'onda, per riquadro nero cosparso di polvere di carbone.

Da questo grafico è possibile dire che, si ha contrasto massimo tra particelle di polvere e tela, a 950 nm, per poi decrescere lievemente, mantenendo sempre valori elevati, ma mai superiori a quello del picco precedente.

Analizzando l'incertezza del contrasto, si ottiene una deviazione standard che oscilla tra 0 e 7, con una media di 3.5. Si hanno valori così bassi proprio perché gli andamenti dell'intensità nelle diverse aree, sia per la polvere che per la tela, si discostano molto poco l'uno dall'altro, offrendo un'incertezza molto più bassa rispetto agli altri riquadri.

3.4 CONFRONTO RISULTATI TELA ANALIZZATI CON TELECAMERA GOLDEYE

Confrontando i risultati ottenuti nei diversi riquadri, possiamo dire che, tutti i riquadri offrono un andamento crescente nel visibile, tranne quello bianco, come è possibile vedere nel grafico in Figura 41. Successivamente raggiungono tutti un picco massimo, per poi andare a oscillare a valori più o meno elevati nel campo dell'infrarosso, senza mai superare il picco raggiunto precedentemente. Il riquadro che offre maggiore contrasto è il bianco,

invece quello che ne offre meno è il blu, perciò in quest'ultimo sarà più difficile distinguere particelle di polvere e tela.

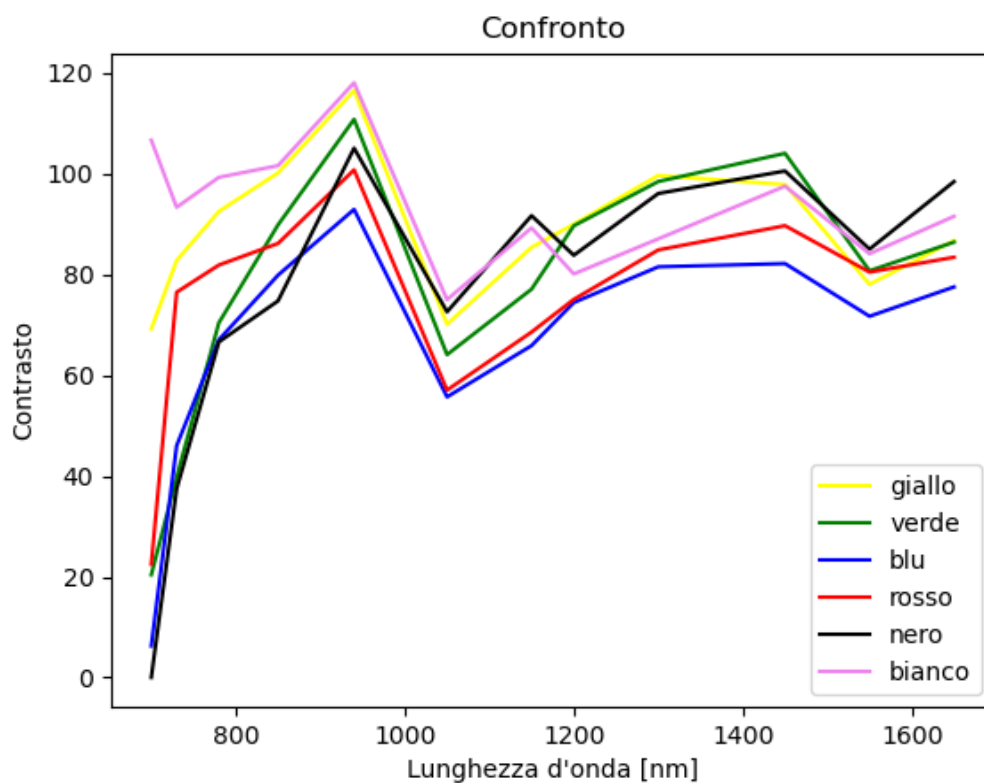


Figura 41 Confronto andamento contrasti nei riquadri della tela colorata.

Andando ad analizzare invece l'andamento medio dei contrasti, si ottiene il grafico in Figura 42.

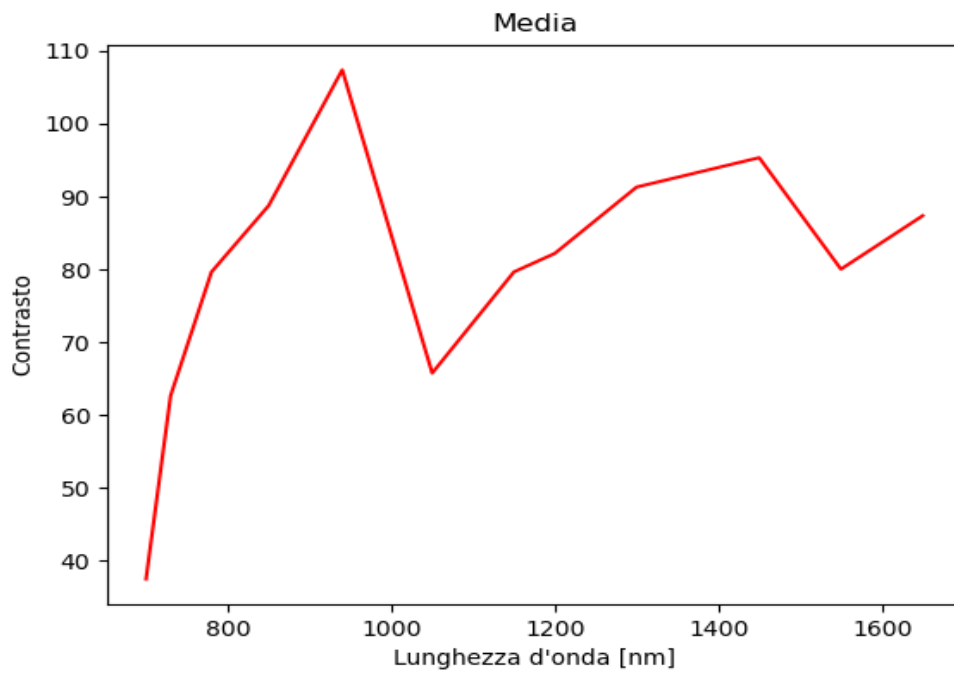


Figura 42 Andamento medio del contrasto nei diversi riquadri di colori differenti.

Quest'ultimo mostra in maniera più chiara quello detto precedentemente, confermando che il contrasto massimo si ha a 950 nm, per poi andare a decrescere.

CONCLUSIONI

Dalle acquisizioni effettuate con la telecamera ad alta risoluzione Genie Nano, risulta che su tessuti bianchi si ha maggiore contrasto, quindi migliore visibilità dei residui da sparo con illuminazione a lunghezza d'onda nel visibile, quindi 400-700 nm; invece per quanto riguarda tessuti di colore blu e verde le lunghezze d'onda ottimali per la visualizzazione delle particelle di polvere sono, 940 nm e 850 nm, rispettivamente

Dall'analisi effettuata con la telecamera SWIR Alien Vision – GOLDEYE, invece è possibile affermare che qualsiasi sia il colore del tessuto su cui viene depositata la polvere di carbonio, la lunghezza d'onda ottimale per il rilevamento di essa, è 940 nm.

In conclusione si può affermare che, la tecnologia multispettrale nello spettro dell'infrarosso è uno strumento utile ed efficace per il rilevamento di residui da sparo, rilevandosi un metodo non distruttivo e con tempistiche d'analisi ridotte.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Q. Rossy, A. c. di, *The Routledge international handbook of forensic intelligence and criminology*. in Routledge international handbooks. London New York, NY: Routledge, 2018. doi: 10.4324/9781315541945.
- [2] K. Sellier, *Shot Range Determination*. in Forensic Science Progress Ser, no. v. 6. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, 1991.
- [3] T. Plattner, B. Kneubuehl, M. Thali, e U. Zollinger, «Gunshot residue patterns on skin in angled contact and near contact gunshot wounds», *Forensic Sci. Int.*, vol. 138, fasc. 1–3, pp. 68–74, dic. 2003, doi: 10.1016/j.forsciint.2003.08.011.
- [4] C. Bettin, «Analisi dei residui di sparo», *Introduzione Ai Metodi Cromogenici Vis. Residui E Tracce Sparo 1st Ed Cristian Bettin Padova*, 2013.
- [5] F. C. Barnes e R. A. Helson, «An Empirical Study of Gunpowder Residue Patterns», *J. Forensic Sci.*, vol. 19, fasc. 3, p. 10201J, lug. 1974, doi: 10.1520/JFS10201J.
- [6] K. L. Kersh, J. M. Childers, D. Justice, e G. Karim, «Detection of Gunshot Residue on Dark-Colored Clothing Prior to Chemical Analysis», *J. Forensic Sci.*, vol. 59, fasc. 3, pp. 754–762, mag. 2014, doi: 10.1111/1556-4029.12409.
- [7] W. Feeney *et al.*, «Detection of organic and inorganic gunshot residues from hands using complexing agents and LC-MS/MS», *Anal. Methods*, vol. 13, fasc. 27, pp. 3024–3039, 2021, doi: 10.1039/D1AY00778E.
- [8] F. Zapata, M. López-López, J. M. Amigo, e C. García-Ruiz, «Multi-spectral imaging for the estimation of shooting distances», *Forensic Sci. Int.*, vol. 282, pp. 80–85, gen. 2018, doi: 10.1016/j.forsciint.2017.11.025.
- [9] P. Głomb, M. Romaszewski, M. Cholewa, e K. Domino, «Application of hyperspectral imaging and machine learning methods for the detection of gunshot residue patterns», *Forensic Sci. Int.*, vol. 290, pp. 227–237, set. 2018, doi: 10.1016/j.forsciint.2018.06.040.
- [10] V. Koifman, «Sony SenSWIR White Paper», Image Sensors World. Consultato: 18 novembre 2024. [Online]. Disponibile su: <https://image-sensors-world.blogspot.com/2021/12/sony-senswir-white-paper.html>
- [11] «One Source. Unlimited Vision. | Teledyne Vision Solutions». Consultato: 18 novembre 2024. [Online]. Disponibile su: <https://www.teledynevisionsolutions.com/>

- [12] «Detail», Allied Vision. Consultato: 31 ottobre 2024. [Online]. Disponibile su: <https://www.alliedvision.com/en/camera-selector/detail/>
- [13] «Genesi Elettronica – Industrial Electronics and LED lighting for machines and vision systems». Consultato: 31 ottobre 2024. [Online]. Disponibile su: <https://www.genesi-elettronica.com/>
- [14] A. Moskovchenko, M. Švantner, e M. Honner, «Detection of gunshot residue by flash-pulse and long-pulse infrared thermography», *Infrared Phys. Technol.*, vol. 140, p. 105366, ago. 2024, doi: 10.1016/j.infrared.2024.105366.