La tecnica MHX
(Multi-Illumination Hyperspectral eXtraction)
in Archeologia

Ceccoli Silvano

Nei primi due decenni del nostro secolo la spettroscopia non invasiva *in situ* ha assunto un ruolo sempre più importante nello studio e nella conservazione dei manufatti archeologici e dei Beni Culturali. I metodi spettroscopici possono essere utilizzati per acquisire una profonda comprensione della composizione materiale degli oggetti archeologici e artistici, nel pieno rispetto della loro integrità e del loro valore. Notevoli miglioramenti nella tecnologia dei rivelatori, nell'interfacciamento strumento-computer, nell'ottica di focalizzazione e nelle prestazioni delle sorgenti di radiazione sono stati compiuti nel campo della spettroscopia, portando allo sviluppo e all'applicazione di successo di tutta una serie di strumenti analitici non invasivi e portatili, per l'esame puntuale del materiale ritrovato negli scavi archeologici. Tra queste nuove e recenti tecniche, negli ultimi 15 anni, è apparsa timidamente alla ribalta una tecnica fotogrammetrica diagnostica nota con l'acronimo MHX (*Multi-Illumination Hyperspectral eXtraction*), tecnica tutta italiana, ideata da membri del CNR di Pisa e dalla ditta Art Test di Pisa del Dott. Luciano Marras.

Cosa è la tecnica MHX (*Multi-Illumination Hyperspectral eXtraction*) e a che cosa serve in Archeologia

La tecnica *Multi-illumination Hyperspectral eXtraction* (*MHX)* in Archeologia è un nuovo metodo diagnostico, che supera di gran lunga l'approccio convenzionale dell'*Imaging* Multispettrale. L'*Imaging* Multispettrale più in uso, generalmente, si basa sul fatto di poter riconoscere i materiali costitutivi di un'opera esaminata, attraverso il costante confronto dell'immagine in falsi colori[1] con quelle ottenute su materiali noti, utilizzate in precedenza e diventate punto di riferimento di partenza. Nell'applicazione pratica, specie su pitture parietali o vascolari d'interesse archeologico e artistico-culturale, le metodologie convenzionali, che nella mia recente tesi ho illustrato e che storicamente si sono affermate nell'ambiente

[1] L'elenco delle principali tipologie di "Falso Colore", è ben riportato da Paolo A. M. Triolo, *Manuale Pratico di Documentazione e Diagnostica per i BB.CC*, Il Prato, Saonara (Pd), 2021, pagg. 123 e segg.

archeologico, precedendo cronologicamente la tecnica MHX, sono risultate limitative e talvolta invasive, se non addirittura distruttive. Si è notato che le stesse tecniche di *Imaging* Multispettrale sono sfruttate solo in minima parte. La tecnica MHX parte con un approccio totalmente differente: basandosi sull'elaborazione simultanea delle informazioni iperspettrali, ottenute utilizzando illuminatori diversificati ad altissima purezza spettrale (da qui M = *Multi-Illumination*), acquisisce un ampio set d'immagini iperspettrali (H = *Hyperspectral*). L'analisi e l'elaborazione dei set d'immagini rilevate sono finalizzate, non solo all'improbabile riconoscimento della natura chimica dei pigmenti, usati per realizzare i dipinti, ma per estrarre (X = *eXtration*), tramite una serie ben precisa di algoritmi di separazione cieca di analisi (BSS), informazioni individuabili in ogni singola immagine del set di foto iperspettrali scattate. Per realizzare al meglio le riprese fotografiche, si fa uso della fotocamera della serie Chroma, dell'azienda DTA di Pisa, da 8 Megapixel, originariamente prodotta per la ricerca astrofisica e quindi caratterizzata da un'alta sensibilità, che riesce a riprendere immagini con un bassissimo rumore elettronico, qualità estremamente necessaria per poter acquisire i debolissimi segnali, che caratterizzano le bande estreme elettromagnetiche ai limiti del sensore CCD della fotocamera. I set di ripresa iperspettrali vengono poi elaborati al computer con diversi algoritmi di separazione cieca di analisi (BSS), per ottenere, a sua volta, un set d'immagini monocromatiche, dove ogni immagine corrisponde a diverse caratteristiche della pittura studiata. Da questo set d'immagini monocromatiche si estraggono le più leggibili e, per poter recuperare verosimilmente il colore, seppure in maniera alquanto parziale, si sovrappongono digitalmente le immagini estratte monocromatiche all'immagine visibile RGB e, in tal modo, spesso si riesce a dare una cromaticità attendibile, talvolta anche sfruttando i residui cromatici presenti. La tecnica MHX, negli ultimi 15 anni, è andata affermandosi come nuova tecnica diagnostica, che è riuscita, in più occasioni, a far emergere dall'oblio dipinti e pitture totalmente illeggibili, di cui le più note sono state la famosa estrazione di affreschi murali perduti dalla Tomba della Scimmia della necropoli di Poggio Renzo, a Chiusi (V secolo a. C.)[2], dalla Tomba n. 6222 di Tarquinia (IV secolo a. C.)[3], dalla Tomba dei Demoni

[2] Giancristofaro C., Marras L., Paleschi V., *Rilievo e Visualizzazione 3D di dati diagnostici con strumenti Open Source*, in *Archeomatica*, n.1, Marzo 2014, pagg.12-13.
[3] Adinolfi G., Carmagnola R., Marras L., Palleschi V., *Oltre il visibile. Rapporto preliminare sulla Tomba n.6222 di Tarquinia*, Giorgio Bretschneider Editore, Roma, 2021, pagg. 131-161.

Azzurri nella necropoli di Monterozzi (Tarquinia, metà V secolo a. C.)[4], dall'Ipogeo dei Volumni (Perugia, seconda metà III secolo a. C.)[5], oltre a decine di pitture vascolari.

Per poter intendere meglio cosa è la tecnica MHX occorre mettere a fuoco tre elementi importanti: (1) Le sorgenti luminose ad alta purezza spettrale (M = *Multi-illumination*); (2) la fotogrammetria iperspettrale (H = *Hyperspectral*) e (3) gli algoritmi BSS, che ci permettono di estrarre (X = *eXtraction*) i disegni che non si vedono più a occhio nudo.

(1) Le sorgenti luminose ad alta purezza spettrale (M = *Multi-illumination*). La tecnica MHX utilizza illuminatori Led-UV a diodi di altissima purezza spettrale, ulteriormente filtrati, per eliminare qualsiasi residuo parassita di luce visibile e infrarossa, in modo da acquisire set d'immagini in riflettografia[6] UV (0,35 μm), in fluorescenza[7] UV-Visibile (0,450/0,750 μm) e in fluorescenza UV-IR (UltraVioletto/Radiazione Infrarosso: 0,750 μm); utilizza, inoltre, anche illuminatori alogeni (con utilizzo di lenti apposite) per la riflettografia visibile (7 bande da 0,4 a 0,7 μm) e per l'infrarosso (4 bande da 0,75 a 1,050 μm). Di solito, ma non sempre, per completezza, si acquisisce con un illuminatore di Led rossi, ad alta potenza di emissione, anche un set d'immagini in Luminescenza Visibile-Infrarossa (nella banda di 0,950 μm), nota come VIL. Quest'ultima luminescenza ci permette di scoprire se siamo in presenza del Blu egizio[8].

(2) **La fotogrammetria iperspettrale (H = *Hyperspectral*).** L'*Imaging* iperspettrale è realizzata *in situ*, sullo scavo archeologico, ed è una ripresa fotogrammetrica particolare, realizzata con le sorgenti di luci su citate. L'*Imaging* iperspettrale è una tecnica di ripresa fotografica che combina fotografia digitale e spettroscopia, per raccogliere informazioni su centinaia di bande spettrali continue lungo lo spettro elettromagnetico, dall'Ultravioletto all'Infrarosso. Il risultato fotogrammetrico di questa particolare tecnica fotografica è un modello geometrico tridimensionale, definito Cubo Iperspettrale (*datacube*), dove x e y sono le dimensioni spaziali del pixel e z (o λ) la lunghezza d'onda elettromagnetica. Le immagini

---

[4] G. Adinolfi, R.Carmagnola, M. Cataldi, L. Marras, M. Masseti, V. Palleschi, *Vedere l'invisibile: immagini da un "bestiario" di V sec. A. C. nella tomba dei Demoni Azzurri dalle prime indagini multispettrali*, dalla rivista on-line *Ostraka*, anno XXVIII, 2019, Edizioni ETS, Pisa, 2019, pagg. 5 -22.

[5] Palleschi V., Marras L., *L'indagine multispettrale*, in *Appendice* di Turchetti M. A., *La "Porta dell'Ade" nell'Ipogeo dei Volumni*, in *Studi Etruschi*, Vol. LXXXV, 2022, Roma, pagg. 216-217.

[6] ***Riflettografia***, è un tipo di luminescenza, in cui la luce incidente è riflessa dal materiale senza essere assorbita da questi, quindi la luce rimbalza. Grazie alla misurazione dell'angolo del rimbalzo della luce si può risalire alla composizione e alla formazione fisica e chimica del materiale colpito dalla luce. Questo processo è definito anche processo di riflessione.

[7] ***Fluorescenza***: è un tipo di luminescenza, in cui il materiale colpito dalla luce incidente assorbe una parte di essa e la rimette ad una lunghezza d'onda più lunga e quindi ad energia più bassa di quella subita. La fluorescenza è un processo di assorbimento e di riemissione di luce.

[8] Con la Luminescenza Visibile-Infrarossa (VIL), oltre al Blu Egizio, si possono anche scoprire il Blu e Violetto Han, il Blu Maya, e con minore evidenza i rossi a base di Cadmio.

iperspettrali sono immagini digitali caratterizzate da un elevato numero di bande e da una risoluzione geometrica. Il sensore cattura dalle 10 alle 100 immagini circa, su lunghezze d'onda di prossimità, in modo da dare vita ad un cubo di dati tridimensionale, in cui la terza dimensione rappresenta gli intervalli spettrali (λ) (Fig. 1).

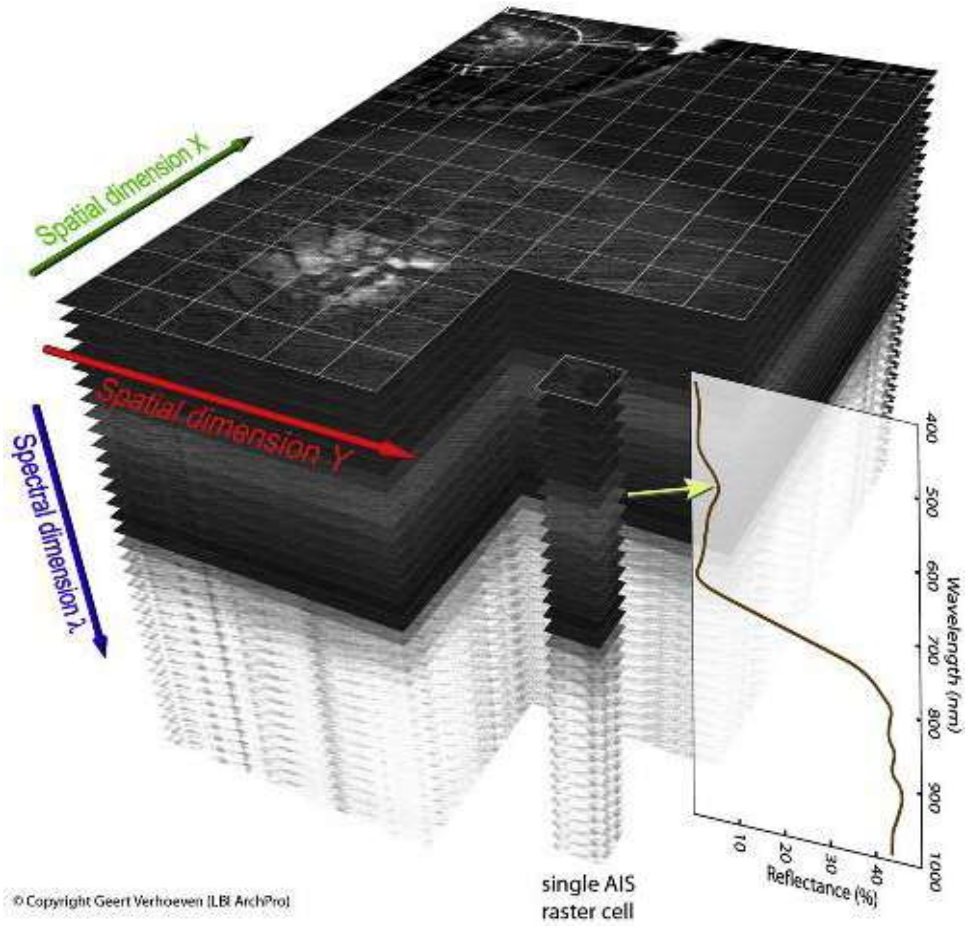


Fig. 1
Cubo che rappresenta i dati iperspettrali, dove x e y sono dimensioni spaziali e λ indica le varie lunghezze d'onda (dimensione spettrale).

In pratica, ogni singolo pixel della fotografia, ripresa da una fotocamera iperspettrale, contiene uno spettro luminoso completo, divenendo così una vera e propria "*impronta digitale chimica*" del materiale inquadrato e ripreso (Fig. 2).

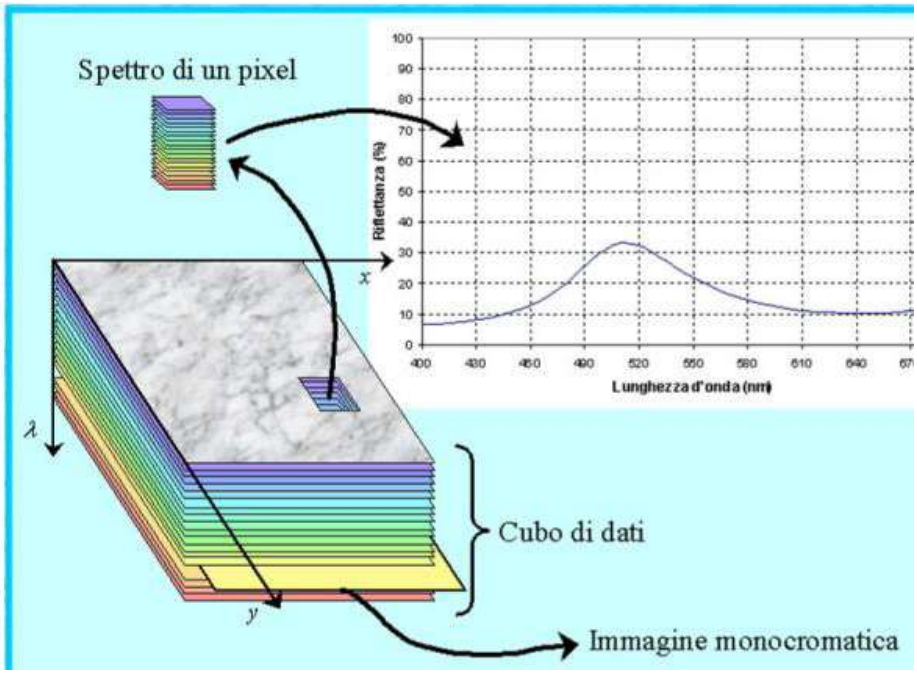


Fig. 2

Ogni singolo pixel della fotografia iperspettrale contiene uno spettro luminoso completo, paragonabile all'impronta digitale chimica *del materiale inquadrato e ripreso.*

L'*Imaging* iperspettrale viene spesso confusa con l'*Imaging* multispettrale, ma le due sono ben distinte: l'*Imaging* multispettrale riprende da 3 a 15 bande spettrali separate e dà luogo a immagini bidimensionali spaziali, l'*Imaging* iperspettrale cattura centinaia di bande spettrali strette e contigue, garantendo un livello di dettaglio chimico-fisico superiore. Non solo, ma poiché l'*Imaging* iperspettrale consente di analizzare la composizione chimico-fisica di un oggetto senza toccarlo o danneggiarlo (tecnica non distruttiva, né invasiva)[9], ancor prima che in Archeologia, era già stata applicata in molti altri campi, come, per esempio, nell'agricoltura di precisione, per monitorare lo stato di salute delle piante, eventuali stress idrici o eventuali malattie, prima che siano visibili a occhio nudo. Oppure nel controllo della qualità alimentare nei cibi immessi nel mercato, ma anche nel campo della conservazione dei Beni Culturali, per analizzare i pigmenti dei dipinti antichi e scoprire eventuali disegni o eventuali restauri sotto gli strati di vernice. E in campo sanitario e farmaceutico, per mappare i tessuti biologici o verificare l'omogeneità dei principi attivi nei farmaci.

(3) Gli algoritmi BSS per estrarre le immagini non più visbili (X = eXtraction) Dopo aver catturato le immagini iperspettrali di una parete o di un vaso, realizzate sia in

[9] Legnaioli, G. Lorenzetti, G. H. Cavalcanti, E. Grifoni, L. Marras, A. Tonazzini, E. Salerno, P. Pallecchi, G. Giachi e V. Palleschi, *Recovery of archeological wall paintings using novel multispectral approaches*, in *Heritage Science*, 2013, letto il 30/07/2025 sul sito *http://www.heritagesciencejournal.com/content/1/1/33*.

riflettografia che in fluorescenza ultravioletta (UV) e infrarossa (IR), si acquisiscono decine e decine di immagini monocromatiche dello stesso dipinto a diverse lunghezze d'onda. L'allineamento geometrico perfetto di queste immagini crea il cosiddetto cubo di dati spaziali e spettrali, che sono sottoposti alla lavorazione con tutta una famiglia di algoritmi definiti BSS (*Blind Source Separation* = Separazione Cieca della Sorgente). I principali algoritmi BSS[10] utilizzati nella tecnica MHX sono l'Analisi delle Componenti Indipendenti (ICA = *Indipendent Component Analysis*)[11] e l'Analisi delle Componenti Principali (PCA = *Principal Component Analysis*)[12]. Gli algoritmi BSS, utilizzati nella tecnica MHX, estraggono dai set di riprese iperspettrali le informazioni chimiche e morfologiche dei disegni non più visibili, separando il rumore di fondo del materiale calcareo, su cui sono stati fatti i disegni, dai residui microscopici del legante e del colore. Nelle singole immagini iperspettrali, l'immagine "perduta" è mischiata e nascosta insieme al degrado della superficie, alle eventuali macchie di umidità o alla vernice ingiallita dal tempo. Allora l'algoritmo analizza in maniera simultanea l'intero cubo dell'immagine iperspettrale, senza sapere assolutamente a priori quali materiali o pigmenti siano presenti (da qui il temine *blind* = cieca), ma il software è in grado di separare i diversi contributi spettrali. Con queste separazioni l'algoritmo genera un nuovo set di immagini matematicamente combinate. In alcune di queste immagini i "disturbi" superficiali, vengono azzerati, mentre le tracce infinitesimali dei pigmenti originari vengono evidenziati al massimo e ciò permette di ricostruire monocromaticamente, in varie gradazioni di grigio, l'iconografia originaria in modo chiaro ed evidente. In pratica, si può affermare che la famiglia degli algoritmi BSS (*Blind Source Separation*) sono formule matematiche universali il cui scopo è estrarre segnali puliti e nascosti, partendo da un insieme di dati confusi e sovrapposti, agendo in modo "cieco", ovvero senza conoscere in anticipo le caratteristiche delle sorgenti.

Un algoritmo della famiglia BSS provato[13] per la prima volta nel 2000 è diventato dì uso comune in medicina per l'elettrocardiogramma fetale (fECG), per separare il battito cardiaco

---

[10] Questi algoritmi sono risultati decisivi per separare le voci che si sovrappongono durante un affollato cocktail party. Infatti, gli algoritmi BSS sono in grado, in una stanza, dove ci sono 2 persone, che parlano contemporaneamente e sovrappongono le loro voci, con 2 microfoni che registrano i suoni combinati, a generare 2 file audio puliti e distinti: uno con la voce della prima persona e uno con la voce distinta della seconda persona.

[11] L'algoritmo ICA analizza le tracce dei 2 microfoni, nel caso del Cocktail Party citato alla nota precedete, e sfruttando il fatto che le 2 voci sono statisticamente indipendenti riesce a generare 2 file audio puliti e distinti.

[12] Nel caso sin qui citato del Cocktail Party, l'algoritmo PCA trova la combinazione dei suoni che genera il volume massimo (varianza) e una combinazione ortogonale alla prima. Pur non essendo in grado di separare le 2 voci come l'algoritmo ICA, fornisce comunque i dati per come comprimere i file audio generati dall'algoritmo ICA.

[13] Lieven De Lathauer, Bart De Moor, Joos Vandewalle, *Fetal electrocardiogram extraction by blind source subspace separation"*, sulla rivista *IEEE(= Institut of Electric and Electronics Engineers) Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 47, N..5, maggio 2000, pagg. 567-573.

del nascituro da quello della madre. In questo caso gli elettrodi posizionati sul ventre della madre registrano un unico segnale elettrico caotico, che fonde insieme i battiti di entrambi i cuori e i rumori muscolari. L'algoritmo BSS interviene analizzando le frequenze e isolando perfettamente la traccia cardiaca del feto per monitorarne la salute. Nell' *imaging* iperspettrale la logica matematica è identica, ma applicata alla luce anziché al suono. Il software non si limita a dividere i colori in semplici toni di grigio. Ogni "strato" di dati estratto dal cubo iperspettrale (chiamato anche *Componente Indipendente*) rappresenta una mappa di riflettografia molecolare.

Se un dipinto invisibile si trova sotto un disegno visibile, i loro pigmenti chimici riflettono le lunghezze d'onda in modo diverso. L'algoritmo BSS riconosce queste sottili differenze statistiche. Isola lo strato superficiale (es. il fango, la vernice ingiallita o il dipinto successivo) e lo inserisce in un canale, mentre nel canale adiacente proietta esclusivamente le forme geometriche e i contorni del disegno nascosto. Il risultato visivo finale è un'immagine ad altissimo contrasto, dove i contorni cancellati riemergono, offrendo una visibilità impossibile da ottenere a occhio nudo. Allo stesso modo in una parete in cui c'era un dipinto che attualmente non si vede, l'algoritmo separa i disturbi e ci permette di vedere ciò che c'era dipinto e oggi non vediamo più.

Un esempio di risultato ottenuto dalla tecnica MHX:

Ipogeo dei Volumni A Ponte San Giovanni (Perugia)

Nell'Ipogeo dei Volumni, a Ponte San Giovanni, vi è l'urna monumentale di *Arnth Velimna/Volumnus Auleś*, uno dei fondatori dell'Ipogeo, morto probabilmente verso la fine del III secolo a.C. Quest'urna al centro, tra due statue fittili dei demoni etruschi, *Culsu*[14] e *Vanth*, aveva un dipinto, definito la «Porta dell'Ade», che tutt'oggi è indecifrabile (Fig. 3).

[14] Simon E., in *Culśu, Culśanś, Ianus*, in *Atti del II Congresso Internazionale Etrusco,* Giorgio Bretschneider Editore, Roma, 1989, pagg. 1271-1284.



Fig. 3

Ecco il degrado con cui si presenta oggi il dipinto della Porta dell'Ade,
nel cassone centrale, tra le statue di Culsu e Vanth.

La tecnica MHX ha catturato, con gli illuminatori diversificati ad altissima purezza spettrale, tutta una serie di set di riprese iperspettrali (Fig. 4).

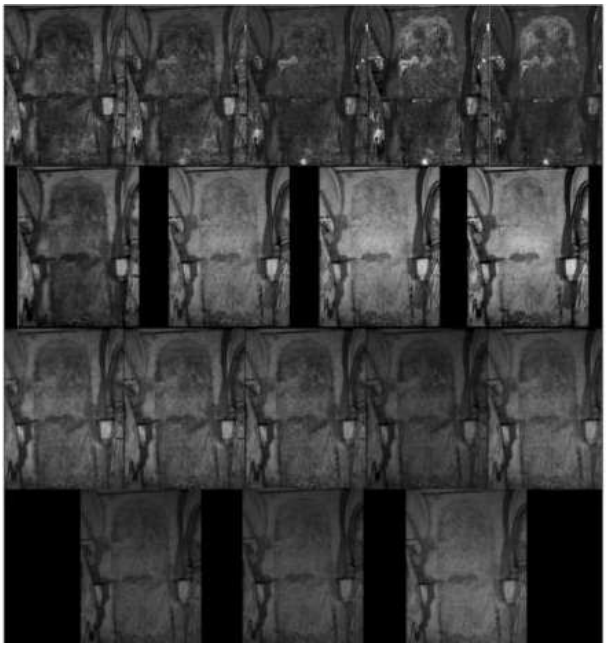


Fig.4

4 set di riprese iperspettrali: ogni riga da sinistra verso destra sono a lunghezza d'onda crescente.
Sono qui rappresentate 17 riprese da 4 set. Dall'alto verso il basso:
(1) 5 immagini in sequenza di fluorescenza UV (0,45/0,5/0,55/0.6/0.65 µm);
(2) 4 immagini di cui 1 in riflettografia UV (UVr) (0,35 µm)
e 3 in sequenza di riflettografia IR (0,85/0,95/1,05 µm);
(3) e (4) 8 riprese in riflettografia nel visibile
(da 0,4 a 0,75 µm → 0,40/0,45/0,5/0,55/0,6/0,65/0,7/0,75).

Questi stessi set di riprese iperspettrali sono stati poi elaborati con i diversi metodi di separazione cieca (algoritmi BSS), ottenendo così oltre 50 immagini monocromatiche, in varie tonalità di grigio, ognuna corrispondente a diverse caratteristiche del disegno della pittura della "*Porta dell'Ade*". Da questo insieme di immagini si sono selezionate le più significative. E, dopo un'attenta selezione, si è potuto avere la restituzione iconografica monocromatica completa del dipinto (fig. 5).



Fig. 5

Come si può notare questa immagine, ottenuta con la tecnica MHX, restituisce l'iconografia monocromatica del dipinto e, soprattutto, ci fornisce la parte superiore, che a occhio nudo è totalmente illeggibile. Si può vedere che le tecniche di restituzione, per loro natura, forniscono immagini con toni di grigio, prive di informazioni cromatiche, ma se il dipinto studiato mantiene residui cromatici, allora è possibile recuperare i colori dell'immagine. Nel caso dell'immagine della *Porta dell'Ade,* con un'opportuna sovrapposizione dell'immagine residuale visibile colorata sopra a quella ottenuta con la tecnica MHX, si è avuto il risultato che è fornito dalla seguente immagine (Fig.6).



Fig. 6
Recupero dei dettagli cromatici

Da questo esempio, si può vedere la capacità della tecnica MHX di poter recuperare immagini ormai perdute.

MHX: una Tecnica Innovativa

La tecnica MHX è una recente metodologia diagnostica che sta iniziando ad imporsi nell'ambito archeologico. Occorre sottolineare quanto sia importante in Archeologia l'utilizzo di approcci metodologici e diagnostici non invasivi, né distruttivi, come è la tecnica MHX. Tecnica che si è rivelata estremamente ordinata, sempre georeferenziata, in modo che in futuro qualsiasi studioso sia in grado di ricostruire fedelmente le fasi di lavoro in maniera chiara e consapevole. La procedura e il protocollo della tecnica MHX deve sempre stabilire la georeferenzialità e l'applicazione rigorosa della disposizione delle apparecchiature illuminanti e fotocamera di ripresa, in modo da ottenere i migliori risultati possibili nella cattura fotogrammetrica delle informazioni, per evitare distorsioni e criticità, che potrebbero compromettere o fuorviare i risultati finali.

Occorre anche sottolineare che, in questi ultimi anni, ci sono anche stati tentativi di usare, nello stesso contesto diagnostico, altre nuove tecniche e altri metodi innovativi, come nel caso della "*Porta dell'Ade*", nell'Ipogeo dei Volumni, a Ponte San Giovanni (Perugia), dove si è fatto uso dell'algoritmo IFF, base della tecnica LIBS. In tale circostanza, questo metodo ha

fornito risultati dignitosi, simili a quelli ottenuti dalla tecnica MHX, ma non superiori, in quanto la ottimizzazione dei dettagli estrapolati dalla tecnica MHX si è rivelata decisamente migliore.

Naturalmente come ogni tecnica, anche MHX ha le sue criticità. Ciò lo si è visto per il cratere biconico dalla Tomba 97 della Necropoli etrusca del Palazzone, a Ponte San Giovanni (Perugia), quando i dipinti di questo vaso di ceramica sono stati raschiati a fondo, o hanno subito gravissimi danni, allora anche per la tecnica MHX è impossibile estrarre qualsiasi tipo d'immagine. Questo vale per tutte le tecniche diagnostiche in genere.

Ma, nonostante i notevoli successi sin qui ottenuti, la tecnica MHX, come ha precisato durante una conferenza stampa uno dei suoi ideatori, il Dottore Vincenzo Palleschi del CNR di Pisa, ha un limite, legato alla "*perdita di informazioni sul colore delle immagini estratte dal set iperspettrale*", giacché l'elaborazione estrae immagini monocromatiche, con gradazioni di grigio. In situazioni più fortunate invece, "*quando si conservano i resti del colore ancora percepibili nelle bande del visibile, è possibile ricostruire una ipotetica cromia originale delle pitture, riscoprendo colori scomparsi da secoli, come il blu egizio*"[15]. Quando però non si hanno resti o tracce evidenti di colore, la ricostruzione della cromaticità di un dipinto può essere recuperata grazie all'utilizzo di altre tecniche di analisi spettroscopica, ormai affermate. La tecnica MHX resta comunque basilare per la panoramica a vasto raggio, dato che individua i punti in cui queste altre tecniche devono concentrare lo studio per estrarre le informazioni cromatiche necessarie. In questo modo, la tecnica MHX diviene la base principale su cui impostare il lavoro di queste altre tecniche. E difatti, ciò che è importante e distingue questa tecnica dalle altre è che senza la tecnica MHX risulta molto complesso e difficile individuare e leggere chiaramente le sagome e il disegno di base di pitture, di affreschi murali e vascolari. Come è stato dimostrato con l'analisi della "*Porta dell'Ade*", senza la tecnica MHX sarebbe stato impossibile leggere il disegno della pittura sull'urna monumentale. La tecnica MHX, unita all'analisi del colore, fatta con le tecnologie di *imaging* non distruttive, può aiutarci a svelare le policromie originarie, dato che oggi, a causa di fattori inquinanti, i dipinti antichi tendono a deperire più rapidamente.

Come hanno ampiamente dimostrato i suoi ideatori, il protocollo di lavoro della tecnica MHX si integra adeguatamente con le varie tecniche diagnostiche *open source* più avanzate e moderne.

---

[15] Dalla conferenza stampa avvenuta al margine della "*Presentazione degli studi ai dipinti della Tomba della Scimmia a Chiusi (SI)*", tenutasi a Chiusi 21-22 marzo 2015, rintracciabile sul sito di Art Test di Luciano Marras & c, S.a.S.: *www,art-test.eu.*

La tecnica MHX è uno degli ultimi prodotti di questa evoluzione tecnologica e si è dimostrata un buon mezzo per scoprire dipinti, affreschi e disegni murali e vascolari, che erano deteriorati e indecifrabili, inoltre è una tecnica non invasiva, a basso costo, che ha la possibilità di operare *in situ*, negli stessi scavi archeologici, senza dover ricorrere al laboratorio.

Bibliografia essenziale

Adinolfi G., Carmagnola R., Marras L., Palleschi V., *Oltre il visibile*. *Rapporto preliminare sulla Tomba n.6222 di Tarquinia*, Giorgio Bretschneider Editore, Roma, 2021.

Adinolfi G., R.Carmagnola, M. Cataldi, L. Marras, M. Masseti, V. Palleschi, *Vedere l'invisibile: immagini da un "bestiario" di V sec. A. C. nella tomba dei Demoni Azzurri dalle prime indagini multispettrali*, dalla rivista *Ostraka*, anno XXVIII, 2019, Edizioni ETS, Pisa, 2019, pagg. 5 -22.

Adinolfi G., Carmagnola R., Cataldi M., Marras L., Palleschi V., *Recovery of a lost wall painting of the Etruscan Tomb of the Blue Demons in Tarquinia (Viterbo, Italy) by multispectral reflectometry and UV fluorescence imaging*, in *Archaeometry*, 2019, LXI, 2, pagg. 450-458.

Adinolfi G., Capoferro A., Carmagnola R., Marras L., Palleschi V., *Luci e ombre sulla pittura antica*, in *Ostraka* Rivista di Antichità, Anno XXXII, 2023, pagg. 219-225.

Cetica M., Marras L., Materazzi M., Poggi P., *Tecniche di imaging multispettrale*, in *Elementi di Archeometria. Metodi fisici per i beni culturali*, a cura di Castellano A., Martini M., Sibilia E., Egea Editore, Milano, 2002, pagg, 205-226.

Giancristofaro C., Marras L., Paleschi V., *Rilievo e Visualizzazione 3D di dati diagnostici con strumenti Open Source*, in *Archeomatica*, n.1, Marzo 2014, pagg.12-13.

Legnaioli S., Grifoni E., Lorenzetti G., Marras L., Pardini L., Palleschi V., Salerno E., Tonazzini A., *Enhancement of hidden patterns in paintings using statistical analysi*s, in *Journal Cult Heritage*, 2013, vol. 14, pagg. 566–570.

Lieven De Lathauer, Bart De Moor, Joos Vandewalle, *Fetal electrocardiogram extraction by blind source subspace separation"*, sulla rivista *IEEE(= Institut of Electric and Electronics Engineers) Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 47, N..5, maggio 2000, pagg. 567-573.

Lippolis E., *L'Ipogeo dei Velimna/Volumni al Palazzone di Perugia: un caso di rappresentazione familiare e il problema interpretativo*, in *L'Ipogeo dei Volumni*, *170 anni dalla scoperta*, Atti del Convegno, 10-11 Giugno 2010, Fabrizio Fabbri Editore, Città di Castello, 2011, pagg. 135-166.

Musazzi Sergio, *Fiat lux. Alla scoperta della luce*, Editoriale Delfino, Milano, 2022.

Palleschi V., Marras L., *L'indagine multispettrale*, in *Appendice* di Turchetti M. A., *La "Porta dell'Ade" nell'Ipogeo dei Volumni*, in *Studi Etruschi*, Vol. LXXXV, 2022, Roma, pagg. 216-217.

Palleschi V., Marras L., Turchetti M. A., *Ricerca di Caratteristiche Intressanti: un Nuovo Approccio all'Analisi di Immagini Multispettrali,* in *Heritage*, 2022, 5, pagg. 4089-4099, pubblicato on line l'11 dicembre 2022.

Poldi G., Tesi di Dottorato in Culture Umanistiche e Visive, *Le analisi scientifiche non invasive e gli studia humanitatis. Prospettive di ricerca e casi studio*, Università degli Studi di Bergamo, Anno Accademico 2011-2012.

Ray Smith Alvy, *A Biography of The Pixel*, MIT Press Ltd, Cambridge (Massachusetts), 2021.

Riederer J., *Egyptian Blue*, in *Artists Pigments*, vol. 3 (1997), pagg. 23-45.

Rogerio-Candelera M. A., Jurado V., Laiz L., Saiz-Jimenez C., *Laboratory and in situ assays of digital image analysis based protocols for biodeteriorated rock and mural paintings recording*, in *Journal of Archaeology*, 2011, vol. 38, pagg. 2571–2578.

Salerno E., Tonazzini A., Grifoni E., Lorenzetti G., Legnaioli S., Lezzerini M., Marras L., Pagnotta S., Palleschi V., *Analysis of Multispectral Images in Cultural Heritage and Archaeology*, in *JALS* (*Journal of Applied and Laser Spectroscopy*), 2014, I, 1, pagg. 22-27

Triolo Paolo A. M., *Manuale Pratico di Documentazione e Diagnostica per i BB.CC*, Il Prato, Saonara (Pd), 2021.

SITI

https://arxiv.org/abs/1404.2986, articolo di J. Shlens, *A Tutorial on Indipendent Component Analysis,* apparso in data 14 Aprile 2014, consultato il 18 agosto 2025.

http://www.heritagesciencejournal.com/content/1/1/33, articolo di S. Legnaioli, G. Lorenzetti, G. H. Cavalcanti, E. Grifoni, L. Marras, A. Tonazzini, E. Salerno, P. Pallecchi, G. Giachi e V. Palleschi, *Recovery of archeological wall paintings using novel multispectral approaches*, in *Heritage Science*, 2013, letto il 30/07/2025.

https://doi.org/10.1016/j.sob.2022.106508, articolo di Q. Wu, C. Marina-Montes, J. O. Cáceres, J. Anzano, V. Motto-Ros, L. Duponchel, *Interesting features finder (IFF): Another way to explore spectroscopic imaging data sets giving minor compunds and traces a changeto express themselves,* consultato il 20/09/2025.

https://art-test.eu.

https://arxiv.org/abs/1404.2986, articolo di J. Shlens, *A Tutorial on Indipendent Component Analysis,* apparso in data 14 Aprile 2014, consultato il 18 agosto 2025.

Illustrazioni

Figura 1 Foto ripresa da Simone Rando, *Analisi tematiche di immagini multi spettrali per la documentazione del territorio*, Tesi di Laurea Magistrale del Politecnico di Torino, Dicembre 2017, pag. 24.

Figura 2 Illustrazione ripresa dalla Tesi di Laurea in Telerilevamento dal titolo di "*Uso di immagini Iperspettrali Hyperion nell'analisi di acque lacustri*" di Alessandro Fabbri , Università di Ingegneria, Alma Mater Studiorum-Università degli Studi di Bologna, anno Accademico 2008/2009

Figura 3 Foto dell'autore.

Figura 4-5-6 Foto riprese da L.Marras, V. Palleschi, M. A. Turchetti, *Indagini archeometriche sulle pitture "perdute" dell'Ipogeo dei Volumni a Perugia*, in *Bollettino di archeologia on line*, XIV, 2023 Suppl.1, pagg. 205-215.