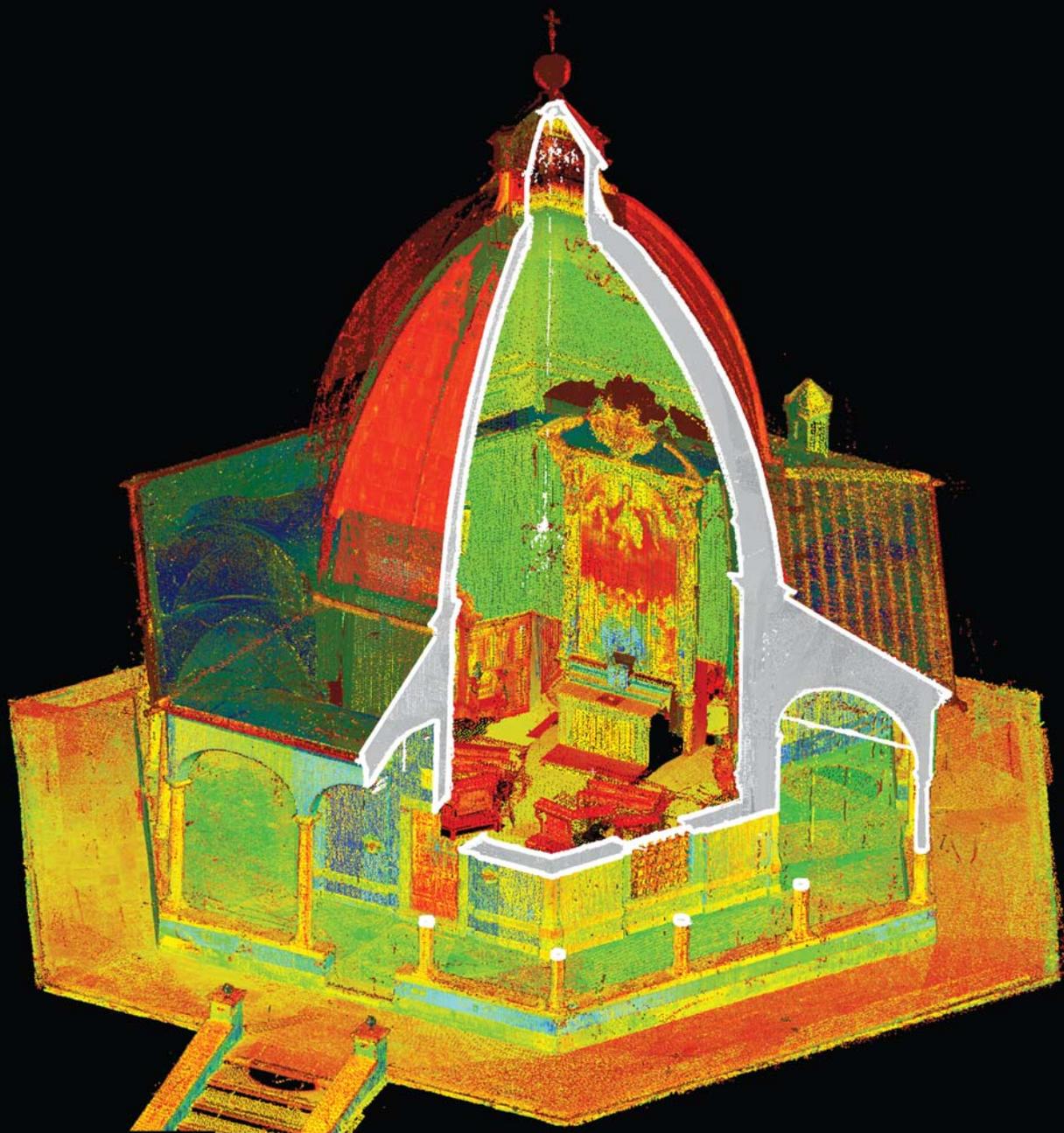


ARCHEOMATICA



RILEVARE E RENDERE VISIBILI I TESORI NASCOSTI

UN'ESPERIENZA SENSORIALE: I COLORI DELL'ARA PACIS

RISPARMIO ENERGETICO: È LA VOLTA DEI MUSEI DALLA GESTIONE ETICA

SEMANTIC WIKI PER LA PROTEZIONE DEI BBCC

L'EVOLUZIONE DELL'IMMAGINE: DALLA PITTURA RUPESTRE ALL'ENERGIA AUTOPOIETICA

RILEVARE E RENDERE VISIBILE L'INVISIBILE

DOCUMENTAZIONE 3D E MULTI-SPETTRALE PER LA FRUIZIONE DI CAPOLAVORI ARTISTICI

di Fabio Remondino, Anna Pelagotti

Rilievi metrici tridimensionali (3D) e indagini multi-spettrali rappresentano un aiuto insostituibile per documentare, conservare, restaurare e comunicare il patrimonio culturale. Un progetto interdisciplinare tra la Soprintendenza per i Beni Archeologici dell'Etruria Meridionale, la Fondazione Bruno Kessler di Trento e la ditta Art-Test sas di Firenze ha portato alla realizzazione di un modello 3D multi-risoluzione e multi-spettrale per la documentazione e la visualizzazione di una delle tombe etrusche più belle della Necropoli di Tarquinia, sepolcro attualmente visibile solo in parte ai visitatori attraverso una porta di vetro. La ricostruzione virtuale e le indagini multi-spettrali sono state recentemente inserite in una mostra multimediale sugli Etruschi, in corso a Bruxelles fino ad aprile 2011.

UN ALTRO MODO È POSSIBILE

Spesso i capolavori artistici sono fragili e non possono essere resi disponibili al grande pubblico con disinvoltura. Eppure devono poter essere visti e fruiti dal maggior numero di persone possibile, perché solo così assolvono ad un compito importante: divulgare e tramandare alle generazioni future la conoscenza e l'arte passata. Una soluzione può essere quella di affidarsi ad un intermediario, come può essere un modello digitale metrico o una riproduzione 3D foto-realistica, che non ha ovviamente tutti i pregi dell'originale, ma che può comunque comunicare alcuni dei suoi contenuti e può aiutare ad avvicinare e comprendere l'opera in modo diverso, mostrandola sotto nuovi punti di vista. Se al rilievo 3D della struttura visibile si associano poi indagini multi-spettrali che rivelano dettagli invisibili all'occhio umano, queste indagini scientifiche aumentano la conoscenza e la possibilità di fruizione del bene artistico, nonché la valenza delle indagini di conservazione e restauro.

LA NECROPOLI ETRUSCA

Le tombe etrusche di Cerveteri e Tarquinia, patrimonio dell'umanità UNESCO dal 2004, sono arrivate fino a noi con un viaggio durato secoli, ma trovano proprio ora le condizioni più difficili perché la loro esistenza continui e le pitture parietali non si dissolvano a causa delle attuali condizioni ambientali, climatiche e di inquinamento atmosferico. Nella necropoli di Tarquinia, le tombe note sono circa seimila, di cui più di un centinaio dipinte. Sono per la maggior parte camere scavate nella roccia tufacea, sormontate da tumuli e accessibili attraverso un *dromos*. Il nucleo più prestigioso della necropoli, che risulta per questo aspetto la più importante del Mediterraneo, è costituito da una serie straordinaria di tombe dipinte, definita da M. Pallottino, uno dei massimi studiosi della civiltà etrusca, *il primo capitolo della storia della pittura italiana*. L'arte di decorare con pitture i sepolcri delle famiglie aristocratiche è documentato anche in altri centri, ma solo a Tarquinia



Figura 1 - Dettagli delle pitture parietali della Tomba della Caccia e Pesca di Tarquinia rappresentanti scene di vita quotidiana.

il fenomeno assume dimensioni così ampie, spettacolari e continuate nel tempo: è infatti attestato dal VII al II sec. a.C., cioè per quasi tutta la durata della vita della città toscana. Gli affreschi rappresentano la vita reale del popolo etrusco (figura 1) e accompagnavano il defunto nel suo percorso ultraterreno con colori splendidi, scene quotidiane, saluti e commiati, richiamando ai valori e alle abitudini di una civiltà grandiosa ancora in parte avvolta dal mistero. Di tutte le tombe dipinte, solo una decina sono visibili al pubblico, sebbene dietro una porta a vetri intesa a proteggere il micro-clima interno.

Con un progetto pilota, realizzato grazie ad una collaborazione tra la Soprintendenza per i Beni Archeologici dell'Etruria Meridionale, la Fondazione Bruno Kessler di Trento e la ditta Art-Test sas, è stato realizzato un modello digitale 3D multi-risoluzione e multi-modale di una delle tombe sotterranee più significative e più belle della Necropoli di Tarquinia: la tomba della Caccia e delle Pesca. La tomba, rinvenuta nel 1873 e datata intorno al 520-510 a.C., è composta da una tomba e due stanze assiali (ciascuna di circa 5x5x2 metri) con soffitto a doppio spiovente, entrambe completamente ricoperte da pitture murali e normalmente non accessibili ai visitatori, ma visibili in parte al di là di una porta a vetri.

IL RILIEVO 3D

Il rilievo e la documentazione 3D sono stati realizzati utilizzando uno scanner laser a tempo di volo, vista la necessità di restituire un modello geometrico a risoluzione millimetrica uniformemente in tutte le parti della tomba. Per l'esterno della tomba sono state fatte dieci stazioni di presa con una risoluzione geometrica media di 1 cm, mentre per l'interno (dromos e stanze) sono state necessarie tredici stazioni a 4 mm di risoluzione. Dopo la registrazione

delle nuvole di punti, il modello geometrico è stato texturizzato con circa 160 immagini HDR ad alta risoluzione (24 Mega pixel), acquisite impiegando luci fredde al neon, per evitare la crescita di muffe e funghi sulle pareti umide della tomba. Inoltre, per ottenere la restituzione di un'illuminazione omogenea all'interno della tomba, le immagini sono state calibrate radiometricamente.

LE INDAGINI CON IMMAGINI MULTI-MODALI

Per indagare, in modo completamente non invasivo, la natura dei materiali utilizzati per le pitture parietali delle tombe di Tarquinia, sono state realizzate indagini multi-spettrali e multi-modali su alcune aree preventivamente selezionate in collaborazione con i restauratori.

Si parla di indagini multi-spettrale quando si rilevano segnali in zone diverse dello spettro elettromagnetico, come per esempio il visibile e l'infrarosso, mentre di indagini multi-modali quando si registrano fenomeni diversi tra loro, come per esempio la riflessione delle radiazioni provenienti da una sorgente esterna o l'emissione di radiazione per fluorescenza.

Le indagini multi-spettrali realizzate prevedono l'acquisizione di immagini tramite una telecamera scientifica raffreddata, che consente lunghi tempi di esposizione mantenendo un ottimo rapporto segnale-rumore, e una serie di filtri interferenziali (figura 3a). Le acquisizioni sono eseguite con lampade illuminanti con spettro di emissione nella regione dell'Ultravioletto, del Visibile e dell'Infrarosso. Per ogni banda spettrale, e quindi per ogni filtro usato, viene registrata la quantità di radiazione raccolta. Tutte le immagini (mono-cromatiche) acquisite, devono essere poi registrate e allineate per indagini diagnostiche.

Questo tipo di indagini risultano tanto più accurate quanto più fittamente viene campionato il segnale luminoso in



Figura 2 - Alcune viste del modello 3D fotorealistico e una sezione del rilievo della Tomba della Caccia e Pesca nella necropoli Etrusca di Tarquinia.

ingresso al rivelatore, e quindi, quante più bande vengono investigate. Nella pratica si deve considerare anche la finalità con la quale si effettuano le indagini multi-spettrali ed il tempo operativo a disposizione.

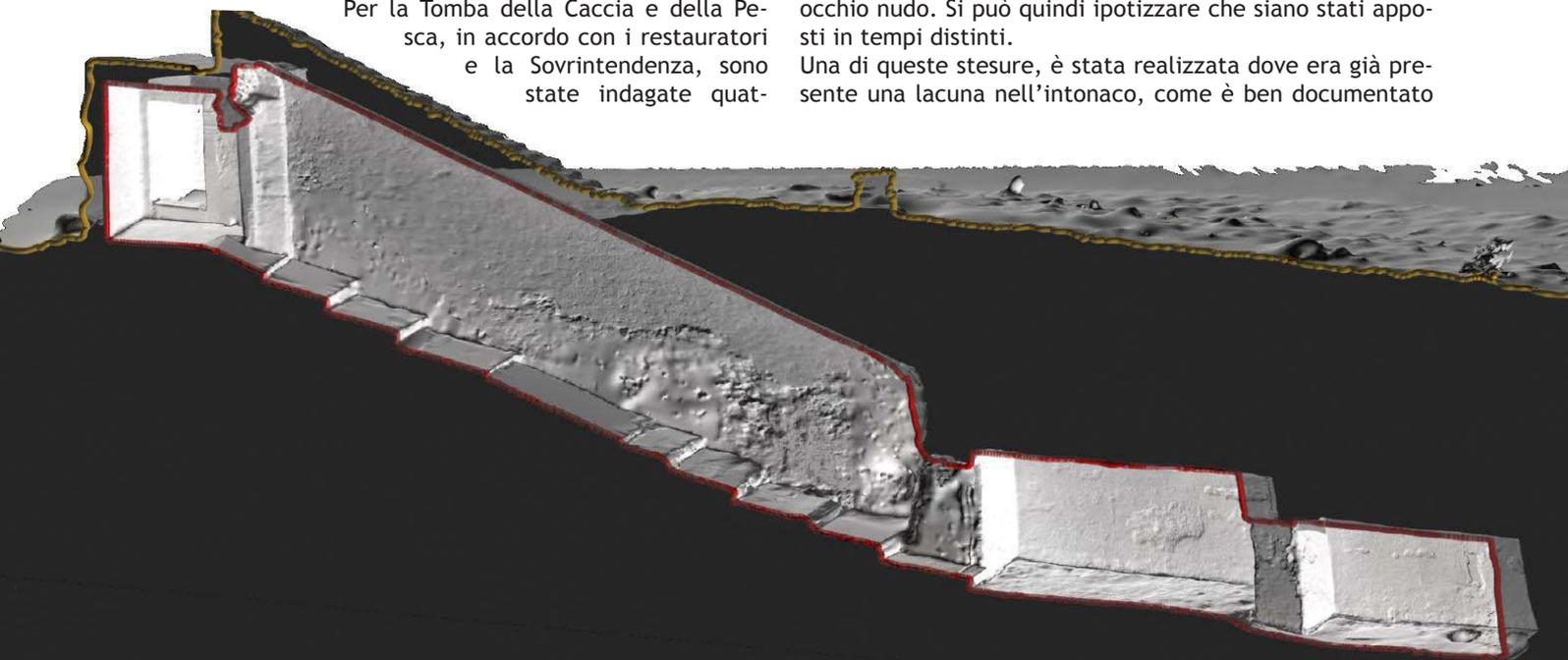
Con le indagini multi-spettrali si raccolgono dunque informazioni sulle proprietà dei materiali, ciascuno dei quali presenta infatti una caratteristica curva di emissione per fluorescenza e di riflettanza nel visibile e nell'infrarosso. Dal momento che materiali diversi assorbono, riflettono e emettono per fluorescenza in modo caratteristico, l'immagine di fluorescenza che si ottiene irraggiando con raggi ultravioletti, ad esempio, può servire per differenziare ed evidenziare taluni materiali presenti, anche quando questi appaiano molto simili alla vista.

La scelta delle parti da indagare è caduta sulle porzioni in peggior stato di conservazione, ovvero dove le pitture erano incomplete perché in parte svanite o cadute insieme all'intonaco, nella speranza di riuscire a recuperare alcuni dei tratti non più visibili della decorazione parietale, come già realizzato ad esempio nella Tomba dei Demoni Azzurri di Tarquinia. Le indagini multi-spettrali in questa tomba hanno fatto emergere alcuni dettagli scomparsi alla vista dell'occhio umano e hanno permesso di ricostruire alcune delle figure degradate della tomba.

Per la Tomba della Caccia e della Pesca, in accordo con i restauratori e la Sovrintendenza, sono state indagate quat-

tro piccole aree. L'indagine multi-spettrale più completa è stata effettuata sull'area in figura 3b, dove sono acquisite un totale di ventuno immagini, con illuminazione dall'ultravioletto all'infrarosso. Con i dati a disposizione si sono ricercate, in base agli spettri di emissione e riflessioni rilevati, le caratteristiche dei materiali presenti. Il risultato più eclatante è stata la documentazione di una scena con pitture evidentemente già danneggiate in epoca etrusca. È cosa nota che le tombe venissero aperte in occasione di sepolture successive dei membri della stessa famiglia. L'indagine multi-spettrale ha rilevato per la prima volta, per quanto di nostra conoscenza, come probabilmente in occasione di queste 'riaperture' venissero anche effettuati dei lavori di restauro delle pitture che si fossero eventualmente già danneggiate. L'analisi dei dati relativi a questa area ha permesso infatti di rilevare la presenza di due materiali rossi, che presentano una composizione chimica leggermente diversa, dal momento che le loro curve di riflettanza e di emissione per fluorescenza sono diverse tra loro, anche se appaiono visivamente molto simili. A questo proposito si veda in figura 4 come il particolare della stoffa che cinge i fianchi dell'uomo, ma anche altre zone nell'area inquadrata, risultino composte da stesure di materiali con diverso comportamento spettrale, pur essendo indistinguibili ad occhio nudo. Si può quindi ipotizzare che siano stati apposti in tempi distinti.

Una di queste stesure, è stata realizzata dove era già presente una lacuna nell'intonaco, come è ben documentato



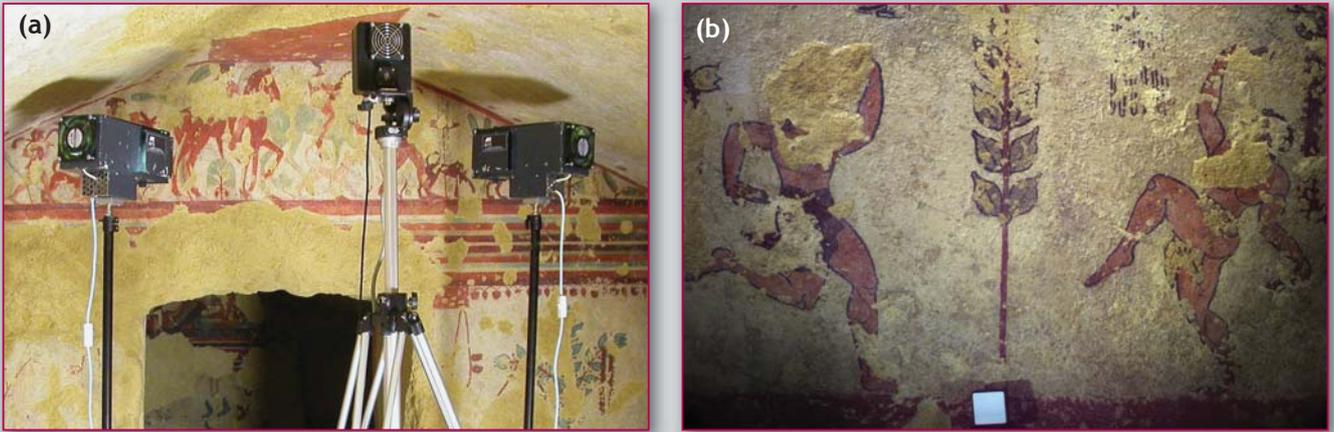


Figura 3 - La strumentazione (camera CCD raffreddata, lampade e filtri interferenziali) per l'acquisizione delle immagini multi-spettrali (a). Una delle aree campione scelte per le indagini diagnostiche non invasive (b).

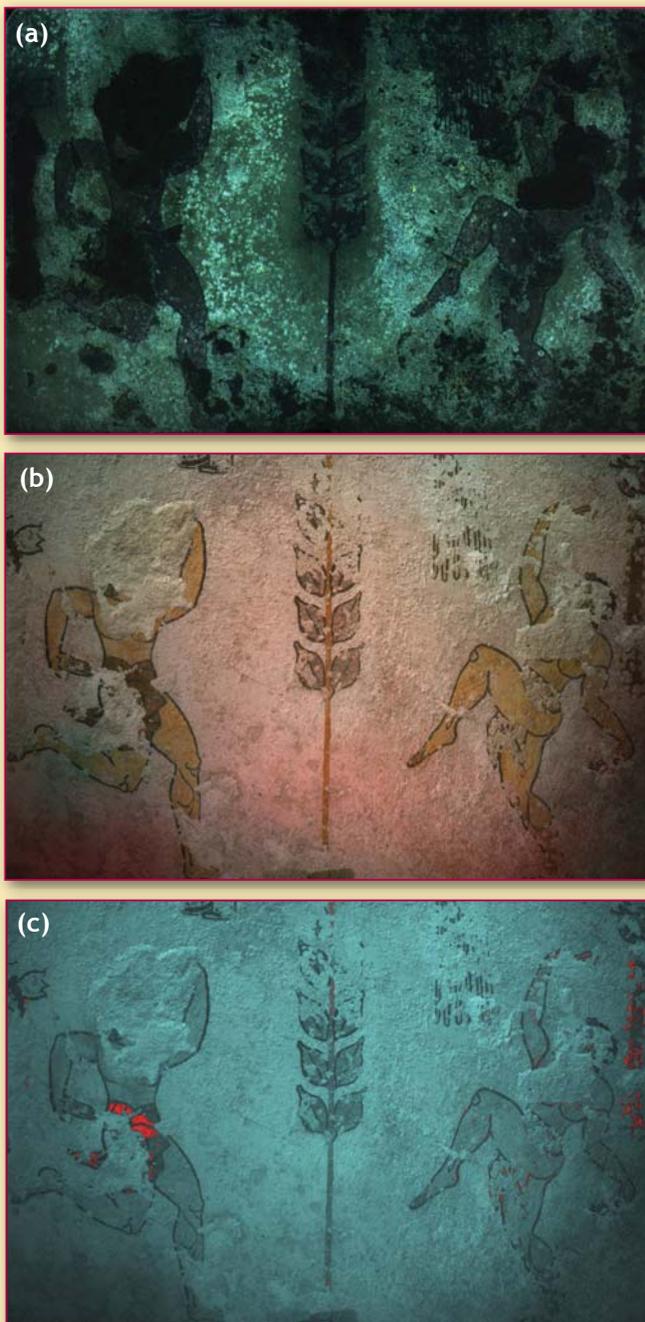


Figura 4 - Immagine di fluorescenza (a) e infrarosso falso colore (b) dell'area indagata. Mappa tematica con in rosso le aree di restauro eseguite verosimilmente in epoca etrusca e riscontrate grazie all'analisi multi-spettrale (c).

dal rilievo 3D nella zona corrispondente. Da questo possiamo dedurre come sia stata stesa dopo che la lacuna nell'intonaco si era già formata e quindi verosimilmente a distanza di un periodo di tempo rilevante.

Questo risultato è un esempio tipico di come certe conclusioni si possano trarre soltanto integrando tra di loro tecniche di rilievo e di indagine. Avere a disposizione poi metodologie quantitative 2D e 3D, come quelle applicate in questo caso, consente anche di avere dati metrici corretti e calibrati, che possono venire quindi confrontati con applicazioni su altre opere o a distanza di tempo.

Un'altra metodologia, denominata 'analisi segnali deboli', ha consentito di rilevare tracce di pitture apposte in zone dove probabilmente era già caduto l'intonaco ma che sono successivamente svanite. Un esempio è riportato nel dettaglio della figura 5: in quello che è attualmente visibile (figura 5b) si nota come il profilo del braccio teso del pescatore sia svanito alla vista. Ma grazie al multi-spettrale

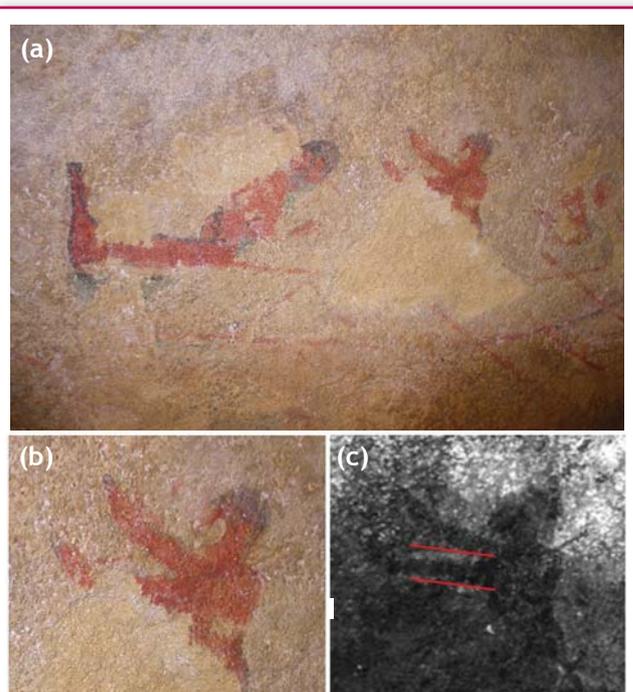


Figura 5 - Un'ulteriore area con pittura parietale indagata con la tecnica multi-spettrale (a). In b) l'immagine visibile di un dettaglio, in c) l'immagine relativa all'indagine "analisi segnali deboli". Nell'immagine multi-spettrale si notano due linee più chiare (delimitate da due linee rosse per chiarezza) che delineano il braccio sinistro del pescatore, ora non più visibili all'occhio umano.



Figura 6 - La digitalizzazione e vettorializzazione degli affreschi parietali per la catalogazione delle figure dipinte e del degrado esistente.

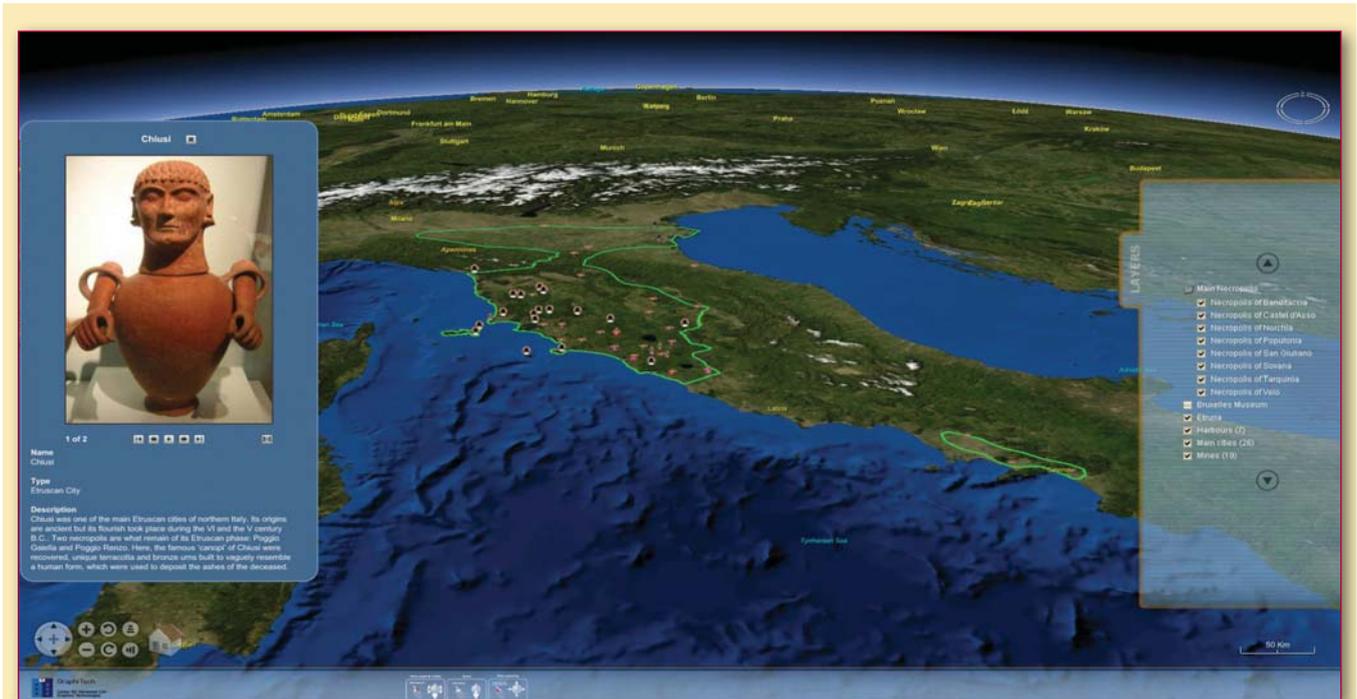
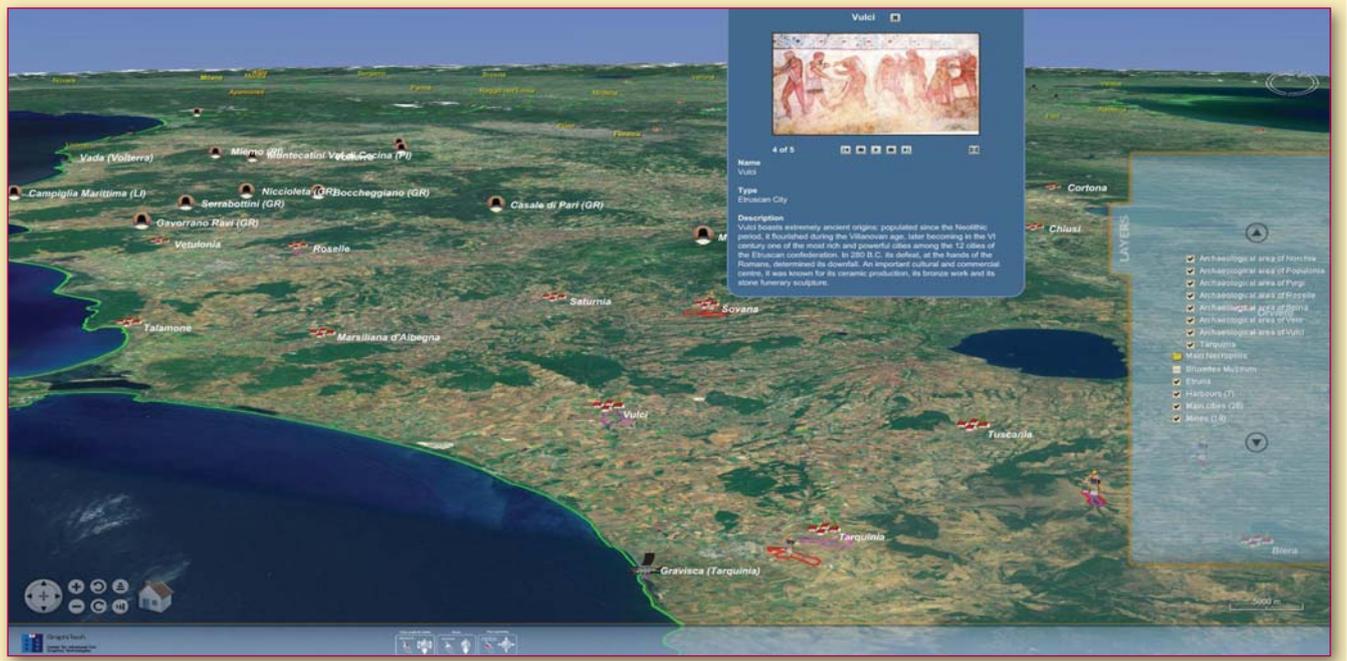


Figura 7 - Il geo-browser per la contestualizzazione geografica e 3D degli insediamenti Etruschi in Italia realizzato in collaborazione con Graphitech per la mostra multimediale "Etruschi in Europa" di Bruxelles.



si notano bene i limiti del braccio sinistro del pescatore. Essendo presente attualmente una lacuna nell'intonaco, si può concludere che queste linee furono tracciate quando già l'intonaco era caduto e sono quindi da considerarsi prodotto di un restauro eseguito in epoca etrusca.

Le metodologie applicate hanno dunque permesso non solo la documentazione dello stato attuale della tomba, e quindi la generazione di un modello virtuale metrico, esplorabile in remoto e in grado di arricchire le possibilità di visita di un ambiente che non può essere reso sempre accessibile al pubblico, ma anche la raccolta di informazioni di grande interesse scientifico, che possono essere di aiuto per la comprensione della storia e il restauro di questa importante testimonianza del nostro passato.

L'utilizzo di dati 3D e immagini ad alta risoluzione ha anche permesso la digitalizzazione e vettorializzazione degli affreschi parietali per la catalogazione delle figure dipinte e del degrado esistente (figura 6).

Oltre che a fini di restauro e conservazione, queste potenzialità e risultati sono stati utilizzati sia per creare un documentario illustrativo della campagna di lavoro nella tomba che ha partecipato alla rassegna internazionale del Cinema Archeologico di Rovereto, sia per realizzare un video proiettato al museo archeologico di Tarquinia e fuori della tomba che mostra le pareti dipinte normalmente non visibili al visitatore e sia come materiale multimediale per la mostra 'Etruschi in Europa', allestita all'interno del Museo del Cinquantenario, a Bruxelles. La mostra, realizzata in collaborazione con Historia, accanto alle vetrine con i reperti archeologici della collezione propria del museo, offre la possibilità di viaggiare virtualmente nel mondo etrusco. Grazie ad un geo-browser, realizzato in collaborazione con Graphitech, si visualizzano in 3D gli insediamenti etruschi presenti in tutta Italia (figura 7). Per mezzo di un tour virtuale si entra poi all'interno della Necropoli di Cerveteri e si visitano le singole tombe lungo la via Sepolcrale. Infine alcuni importantissimi oggetti delle più ricche collezioni etrusche sono visibili in 3D senza che sia stato necessario spostarli dalla loro collocazione abituale, ma grazie alle speciali riprese e agli occhialini anaglifici forniti all'ingresso dell'esposizione. La grande affluenza di visitatori e l'entusiasmo dei ragazzi che visitano la mostra lascia ben sperare per la possibilità di aumentare questo tipo di esperienze all'interno dei Musei e dei siti archeologici

RIFERIMENTI

Art-Test sas, www.art-test.com
 Fondazione Bruno Kessler, www.fb�.eu
 Fondazione Graphitech, www.graphitech.it
 Historia, www.historiaweb.it

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano Soprintendenza per i Beni Archeologici dell'Etruria Meridionale, Alessandro Rizzi, Stefano Girardi, Giorgio Agugiaro (FBK Trento), Matteo Rapanà (Università di Trento), Luciano Marras (Art-Test), Giorgio Baratti (Università di Milano), Raffaele de Amicis, Daniele Magliocchetti e Gabrio Girardi (Graphitech).

BIBLIOGRAFIA

- Barni, M., Pelagotti, A., Piva, A., 2005, *Image processing for the analysis and conservation of paintings: opportunities and challenges*, IEEE Signal Processing Magazine, Vol 22(5).
- Marras, L., Pelagotti, A., Castaldi, M., Carmagnola, R., Adinolfi, G., 2009, *La Signora dei Demoni Azzurri*, Archeo, ottobre 2009, pp. 80-85.
- Pelagotti, A., Del Mastio, A., De Rosa, A., Piva, A., 2008, *Multispectral imaging of paintings: a way to material identification*, IEEE Signal Processing Magazine, Special Section - Signal Processing in Visual Cultural Heritage, Vol 25(4), pp. 27-36.
- Remondino F., Rizzi, A., 2010, *Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites - Techniques, problems and examples*, Journal of Applied Geomatics, Vol.2(3), pp. 85-100.

ABSTRACT

Surveying and making visible the invisible

This contribution reports the collaborative work between the Soprintendenza per i Beni Archeologici dell'Etruria Meridionale, FBK Trento and Art-Test for the multi-resolution and multi-spectral 3D surveying and documentation of one of the most beautiful underground grave in Tarquinia ("Hunting and Fishing" tomb, composed of two rooms spanning approximately 5x5x2 m each one), decorated with wall paintings which seem to have undergone restoration already at Etruscan times.

PAROLE CHIAVE

3D, laser scanning, indagine multispettrale, modello fotorealistico.

AUTORI

FABIO REMONDINO
 FONDAZIONE BRUNO KESSLER (FBK)
 3D OPTICAL METROLOGY UNIT
 TRENTO, ITALIA
REMONDINO@FBK.EU
[HTTP://3DOM.FBK.EU](http://3DOM.FBK.EU)

ANNA PELAGOTTI
 CNR-INO
 FIRENZE, ITALIA
ANNA.PELAGOTTI@INO.IT
WWW.INO.IT