

PROPOSTA DI UNA METODOLOGIA SEMI AUTOMATICA BASATA SULL'ANALISI DELL'IMMAGINE DIGITALE FINALIZZATA ALLA CREAZIONE E LA GESTIONE DELLA DOCUMENTAZIONE GRAFICA NEI RESTAURI

Annamaria Amura

*¹Dottoranda, Dipartimento di Scienze di Base e Applicazioni, Università degli studi di Urbino Carlo Bo, Piazza della Repubblica, 13, 61033, Urbino, Italy. +39 0722304524

Abstract

Questo contributo propone una metodologia semi-automatica, basata su una sequenza di processi di *image analysis* impiegati su riproduzioni fotografiche digitali di opere d'arte. La procedura è finalizzata alla produzione di documenti vettoriali/grafici per la documentazione nel lavoro di conservazione e restauro. Il metodo proposto si basa su un'analisi statistica di dati raster visibili e multispettrali. In prima istanza affronteremo alcune delle problematiche legate alla rappresentazione grafica, in seguito mostreremo degli esempi di algoritmi applicati, di come le loro immagini di output possano essere utilizzate per estrarre automaticamente i contorni delle aree di interesse. Grazie a questa estrazione è possibile infatti effettuare una conversione raster to vector ottenendo un tracciato vettoriale in automatico, alleggerendo così il pesante lavoro di trascrizione grafica delle informazioni all'interno delle mappature tematiche. In ultimo, presenteremo i risultati di questa metodologia attraverso l'utilizzo di un software GIS free e open source, QGIS[®], (ampiamente utilizzato in ambito archeologico). Proponiamo quindi una metodologia semi automatica, guidata complessivamente dall'operatore, per rendere la trascrizione grafica dei dati scientifici più oggettiva, rigorosa e accurata, riducendo il lavoro manuale fonte di interpretazione soggettiva.

Introduzione

Tutte le discipline connesse al restauro presentano la profonda necessità di raggiungere una piena comprensione dell'oggetto d'interesse, al fine di sviluppare una maggiore consapevolezza riguardo le azioni necessarie da compiere, nel pieno rispetto delle sue caratteristiche. In virtù di questo importante compito di piena comprensione e trasmissione al futuro del bene si è sentita sin da subito l'esigenza di adottare tecniche di documentazione sempre più oggettive e non approssimative. Un ruolo importante durante lo studio della storia artistica, conservativa e delle tecniche e materiali utilizzati è sicuramente svolto dall'indagine diagnostica e dalla successiva trascrizione in immagini, testi e grafica di tutte le informazioni acquisite sull'opera. Questo contributo si propone di affrontare solo alcune delle ampie problematiche legate alla documentazione, in particolare, proponiamo un approccio interdisciplinare per la creazione e la gestione dei file grafici/vettoriali denominati rappresentazioni grafiche o mappe tematiche. Il problema affrontato si colloca nel momento in cui l'operatore cerca di trascrivere con precisione lo stato di conservazione del bene mediante l'interpretazione grafica, affidando al disegno il compito di linguaggio di sintesi e descrizione chiara di tutte le informazioni. Quest'esigenza di precisa trascrizione ha avvicinato il mondo del restauro al sapere tecnologico e informatico tanto che, in pochi decenni, si è passati dall'utilizzo esclusivo della documentazione cartacea alla costruzione di ricchi database digitali talvolta compresi anche di modelli tridimensionali. Nonostante ciò, la documentazione grafica è ancora pensata e prodotta con finalità di stampa e di archiviazione, nonostante le si riconosca una considerevole importanza per il suo duplice ruolo sia analitico-diagnostico che conoscitivo-documentario.

Le riproduzioni in fotografia digitale delle opere, attualmente utilizzate esclusivamente come documento di analisi visiva e base di ricalco per le rappresentazioni grafiche, possono essere invece interrogate e rese "interattive" attraverso algoritmi di *image analysis* abbinati ad operazioni di interrogazione presenti nei Sistemi Informativi Geo-referenziati (GIS). La loro caratteristica di "bidimensionalità" non è infatti una limitazione, in quanto, l'immagine fotografica digitale è composta da una serie di valori numerici, calcolabili e statisticamente interrogabili.

Le problematiche affrontate all'interno del processo di documentazione grafica: un passo verso il semi-automatismo e l'interattività

La produzione di rappresentazioni grafiche, soprattutto per quanto riguarda i manufatti mobili e/o archeologici è ancora strettamente vincolata al lavoro manuale di disegno, nonostante il largo impiego di strumenti informatici. Le difficoltà di lettura e trascrizione dei dati sono affrontate in modo molto soggettivo, mediante un'ispezione visiva a occhio nudo delle immagini diagnostiche e una trascrizione manuale dei dati scientifici raccolti. Questo tipo di restituzione grafica è dunque caratterizzata da una forte interpretazione soggettiva dell'operatore, in quanto disegnare il modello dell'oggetto e le relative informazioni richiede non solo tempo, ma anche e

soprattutto un'abilità manuale e una piena padronanza degli strumenti per il disegno informatico. Ogni rappresentazione grafica risulterà più o meno fedele al manufatto originale e al suo reale stato di conservazione a seconda dell'esperienza personale nel campo e della conoscenza del software utilizzato. Inoltre, le varie regioni d'interesse presenti sulla superficie dell'opera sono caratterizzate da bordi molto irregolari e dettagliati, quindi complessi da trascrivere graficamente. I restauratori utilizzano spesso software commerciali per tentare di facilitare il disegno ma senza seguire uno standard metodologico ufficiale, proprio per ovviare a questo problema, nel 2003 è stato creato, dal MiBAC un sistema informativo, *SICaR /web based*, per la documentazione geo referenziata degli interventi di restauro su le diverse tipologie di oggetti. Questo software, come gli altri utilizzati attualmente, non prevede l'uso dell'analisi delle immagini, quindi non permette un'interazione tra grafica raster e grafica vettoriale, interazione che dovrebbe invece essere necessaria per sfruttare a pieno l'immagine diagnostica. Questo è uno dei principali problemi che intendiamo affrontare: l'eccessiva variabilità e approssimazione nella lettura delle immagini diagnostiche e nella trascrizione grafica dello stato di fatto nel modello delle informazioni.

Casi studio: due dipinti su tela.

Abbiamo esaminato e testato la metodologia su due dipinti su tela ripresi in diverse modalità.

Un *l'Ecce Homo* di Bernardo Strozzi è stato ripreso sotto illuminazione a luce visibile, con due proiettori a luce diffusa Ianiro da 500 W e utilizzando un Macbeth Color Checker come riferimento. L'immagine RGB è stata acquisita da una fotocamera Nikon D800. L'immagine a fluorescenza UV è stata realizzata sotto l'illuminazione di due lampade UV Labino, utilizzando una piastrina al bario-solfato al 99% e un colorimetro Macbeth come riferimento, da una fotocamera D800 dotata di un Hoya IR- Filtro digitale con taglio UV. L'immagine di fluorescenza così ottenuta è stata quindi sottratta dalla luce parassita visibile per evidenziare le regioni che producono realmente fluorescenza sotto l'illuminazione ultravioletta. L'immagine di riflettografia del vicino infrarosso (780-980 nm, Fig. 1 c) è stata catturata da una fotocamera D800 IrUv con filtri Peca 87c e 87b, sotto l'illuminazione di quattro proiettori a luce diffusa Ianiro da 800 W e con un riferimento per Macbeth Color Checker. La seconda opera, *Cleopatra* di Donato Creti, oltre le riprese in luce visibile è stata ripresa in infrarossi (IR) a 1050 nm, con un intervallo dinamico elevato (16 bit), attraverso un sistema multispettrale con una camera Morovian G2-8300 (CCD KAF 8300 18,1 × 13,7 mm pixel 5,4 × 5,4 µm). La risoluzione spettrale si è ottenuta attraverso filtri interferenziali con bande passive di ± 25 nm attorno alle lunghezze d'onda centrali 450, 500, 550, 600 e 650 nm nel campo visibile e 850, 950, 1050 nm nel vicino infrarosso.



Figura 2-3-4-5-6-7: (a) *Ecce Homo*, Bernardo Strozzi, Olio su tela, 1620-1622, 105×75 cm. Standard RGB; (b) UV-induced fluorescence; (c) NIR reflectography. Immagini scattate da Paolo Maria Triolo, concessione del Ministero per i Beni e le attività Culturali-Galleria Nazionale di Palazzo Spinola, Genova, Italia. (d) *Cleopatra*, Donato Creti, Olio su tela, 100×77 cm. Collezione privata. Standard RGB, luce visibile dopo il restauro, immagine scattata da Annamaria Amura. (e) Il set di immagini multispettrali dai 450 ai 1050 nm, immagini catturate da Vincenzo Palleschi CNR Pisa.

La combinazione di algoritmi di *Image Analysis* utili al semi-automatismo per la documentazione grafica

I metodi di elaborazione dell'*image processing/analysis* che interessano principalmente la nostra ricerca riguardano gli algoritmi di segmentazione, interrogazione raster, individuazione dei bordi delle aree di interesse (*edge detector*) e la conversione da raster a vettore (*poligonizzazione*) [1]. Le funzioni di segmentazione e classificazione automatica applicate a immagini multispettrali o iper-spetttrali hanno avuto una grande ripercussione nella diagnostica pre-restauro, per il miglioramento e la lettura dei palinsesti di testi antichi, per migliorare l'interpretazione delle indagini diagnostiche ed evidenziare dettagli nascosti nei dipinti [3].

La combinazione metodologica che ha prodotto risultati migliori è la seguente ed è divisibile in tre fasi:

- 1) Le immagini nell'intervallo visibile e le altre immagini diagnostiche multispettrali sono analizzate utilizzando algoritmi di segmentazione quali l'analisi di componenti indipendenti (ICA) e strategie di

ortogonalizzazione, come ad esempio l'analisi della componente principale (PCA)[..]. Tali algoritmi producono un diverso numero di immagini in uscita in scala di grigio che chiariscono e separano per contrasto le aree di interesse.

- 2) Il restauratore ispeziona e seleziona le immagini in cui il contrasto tra le aree di suo interesse è più evidente. Le immagini selezionate sono quindi soggette a un algoritmo di soglia (*Color Threshold*), fornendo in output maschere binarie (bianco e nero) che rappresentano le aree e i loro bordi. In questa fase abbiamo anche testato un tipo di rete neurale: la *Self-Organizing Map* (SOM), che produce, in output, delle maschere binarie [3].
- 3) Le maschere così ottenute sono poligonizzate per creare i tracciati vettoriali per le mappe tematiche. In questa fase l'operatore può dunque decidere se finalizzare il lavoro alla stampa, oppure interrogare i tracciati vettoriali così creati per ottenere informazioni dimensionali, statistiche, percentuali, creando delle vere e proprie mappe interattive esportabili e consultabili anche on line.



Figura 1: Combinazione cronologica degli algoritmi

È importante precisare che l'efficacia di questi algoritmi è fortemente condizionata dalla qualità e dalla risoluzione delle immagini in ingresso: il risultato si è dimostrato migliore nei casi in cui le immagini sono state scattate con una corretta illuminazione e a una risoluzione spaziale elevata. Inoltre, la riuscita della segmentazione è risultata più semplice nei casi in cui le aree da separare erano già in qualche modo distinguibili nelle immagini diagnostiche in input.

Applicazione delle tre fasi della metodologia

Le immagini diagnostiche che riproducono le opere in esame sono formate da aree con livelli di informazioni diverse da evidenziare e interpretare. Queste aree, che rappresentano e descrivono la storia conservativa dell'opera, nelle immagini che siamo soliti esaminare sono sovrapposte e combinate insieme in un unico file raster. In queste immagini ogni campo spettrale mostra tutti i livelli d'informazione, quindi il primo passo da compiere è quello di estrarre (o separare) i singoli livelli di informazione dall'intero insieme dell'informazione spettrale. A tale scopo adottiamo l'analisi delle componenti principali (PCA) e l'analisi delle componenti indipendenti (ICA): questi due algoritmi di segmentazione vedono per ogni banda spettrale le aree come un cubo di dati di input contenente un certo numero di livelli di informazione. Le immagini in output risultanti dall'elaborazione statistica, a differenza di quelle diagnostiche, presentano i livelli di informazione reciprocamente indipendenti e principali suddivisi in immagini diverse. Il presupposto di indipendenza è di considerevole importanza in quanto stiamo cercando di segmentare le caratteristiche del manufatto generate in tempi diversi e con materiali diversi e quindi presumibilmente indipendenti tra loro. In Figura 8 e 9 riportiamo il risultato di questo primo passaggio appena descritto sulle due opere. Come immagini di input per l'*Ecce Homo* abbiamo inserito un'immagine RGB in luce visibile, un NIR, e una Fluorescenza UV indotta. Per la *Cleopatra* abbiamo inserito in input l'immagine RGB in luce visibile e 9 canali multispettrali dai 450 ai 1050 nm. Gli output dei due algoritmi sono stati rispettivamente 20 immagini in scala di grigio per l'*Ecce Homo* e 16 immagini per la *Cleopatra*. Come si può vedere dalla Figura 8 ad esempio le reintegrazioni a vernice eseguite su tutta la superficie dell'opera *Ecce Homo* sono state suddivise e accentuate per contrasto in alcuni output sullo sfondo e in altri sulla figura del Cristo.

FASE 1



Figura 8 FASE 1 Applicazione degli algoritmi ICA e PCA sulle immagini visibili e diagnostiche dell'opera *Ecce Homo* di Bernardo Strozzi. Per una questione di spazi abbiamo scelto di mostrarne solo la metà degli output.

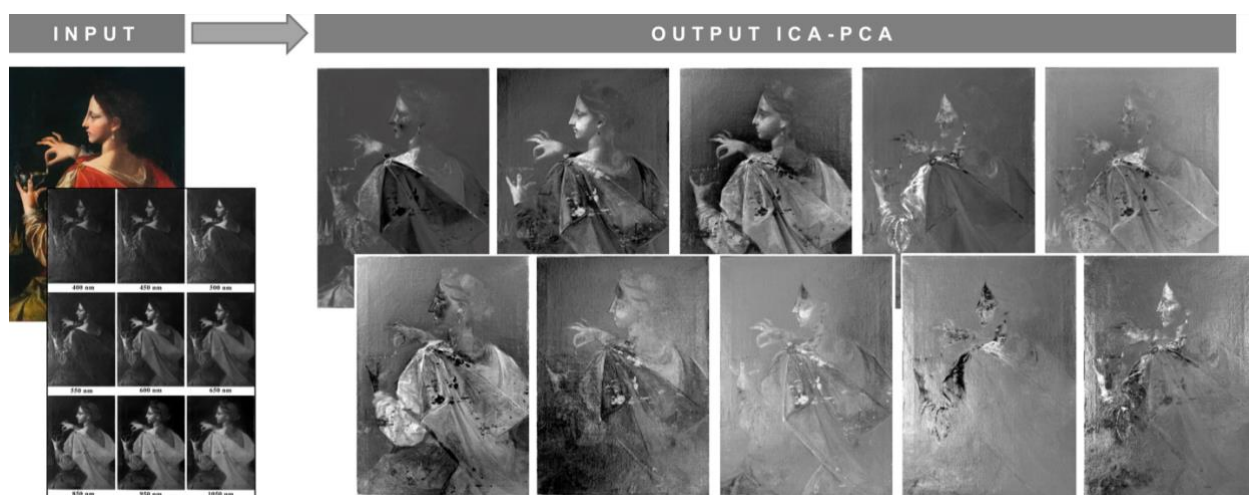


Figura 9 FASE 1 Applicazione degli algoritmi ICA e PCA sulle immagini visibili e multispettrali dell'opera *Cleopatra* di Donato Creti. Per una questione di spazi abbiamo scelto di mostrarne solo la metà degli output.

La seconda fase della metodologia consiste nell'ispezionare le immagini di output allo scopo di scegliere quelle in cui le regioni che meglio descrivono lo stato di conservazione siano sufficientemente contrastate e ben separate l'una dall'altra. Anche senza un'analisi chimica o qualsiasi altra tecnica di indagine più specialistica questo tipo di elaborazione delle immagini ci permette infatti di distinguere diverse aree che sono invece classificate insieme nei canali acquisiti dalle indagini diagnostiche o visibili in partenza. In questa fase dagli output in scala di grigio si estraggono delle maschere che identificano le regioni mediante bordi netti, detti *a step*, operazione necessaria per procedere alla successiva trasformazione di questi bordi in tracciati vettoriali.

Le maschere binarie possono essere ottenute attraverso un processo di sogliatura dei valori, raggruppando cioè i valori dei pixel in scala di grigio in due sole classi rispettivamente nero 0 e bianco 255 (Fig. 11).

Questa classificazione in soli due valori può avvenire in maniera guidata dall'operatore, che in questo caso esegue per ogni immagine una soglia, o in maniera automatica tramite Reti Neurali. Nel nostro caso abbiamo utilizzato la *Self-Organizing Map* (SOM), un tipo particolare di rete neurale basata su algoritmi di allenamento competitivo. La rete neurale SOM viene applicata in un'unica volta a tutte immagini di output ottenute tramite ICA e PCA. La finalità è quella di verificare se possiamo ottenere un sensibile miglioramento del riconoscimento delle aree: nel peggiore dei casi possiamo avere output uguali agli input, nel migliore gli output scompongono ulteriormente le aree perché pertinenti a qualcosa che ha lo stesso comportamento ottico e coerenza topografica. In questo caso l'operatore inserisce all'interno della rete tutte le immagini e avrà in automatico un numero n di uscite direttamente in maschere binarie.

FASE 2

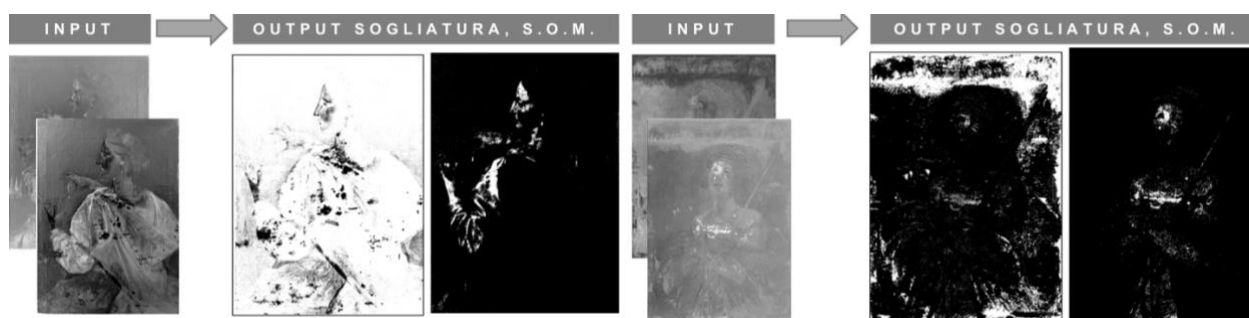


Figura 10 FASE 2 Sogliatura manuale e rete neurale S.O.M. su alcune immagini in uscita dagli algoritmi ICA e PCA.

R:132 G:132 B:132	R:126 G:126 B:126	R:167 G:167 B:167	R:184 G:184 B:184
R:161 G:161 B:161	R:149 G:149 B:149	R:178 G:178 B:178	R:188 G:188 B:188

0	0	255	0
255	255	255	0

Figura 11 Esempio di classificazione di tutti valori di pixel in scala di grigio a soli due valori per l'ottenimento delle maschere binarie con bordi a gradino detti *a step*.

Nella terza ed ultima fase della nostra metodologia per l'estrazione automatica del disegno grafico nel modello delle informazioni, ogni maschera binaria viene trasformata da file raster a tracciato vettoriale. Successivamente potranno essere associate a ogni livello di informazioni una texture o colore specifico per la creazione dei tematismi. L'estrema precisione di questa trascrizione automatica delle informazioni è una caratteristica resa possibile dalla metodologia automatica che proponiamo e può essere ripetuta da diversi operatori a distanza di tempo ottenendo come risultato lo stesso tracciato vettoriale. Fino ad ora siamo riusciti ad automatizzare in maniera completa solo la trascrizione grafica per il modello delle informazioni. Per quanto riguarda il modello dell'oggetto (dell'opera d'arte), ossia il disegno figurativo del manufatto, abbiamo automatizzato solo il disegno della sua sagoma, per quanto complessa e articolata possa mostrarsi. Anche in questo caso del modello dell'opera d'arte a volte gli output delle reti neurali SOM possono aiutare a delimitare con precisione i bordi delle figure.

FASE 3

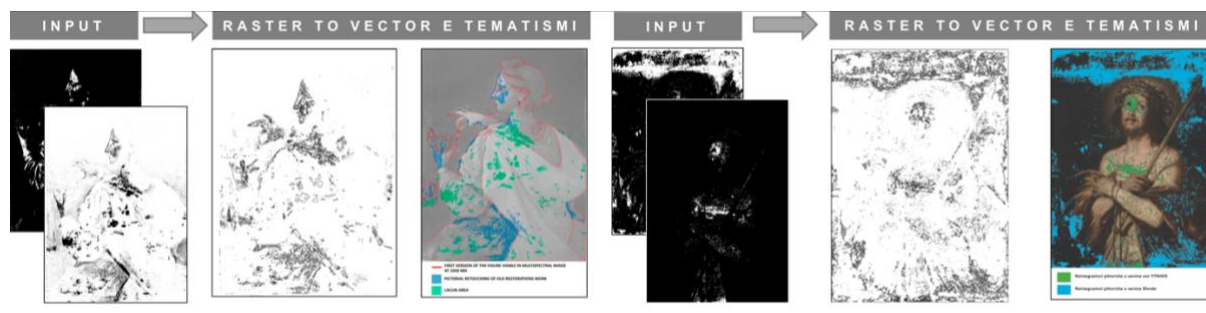


Figura 12 FASE 3 processo di poligonizzazione automatica, da raster a vettore, e successiva creazione dei tematismi per il modello delle informazioni su base fotografica raster.

Presentazione della metodologia in QGIS3®, un'utile applicazione per i beni culturali.

Nel campo del restauro interessanti sperimentazioni sono state eseguite impiegando i Sistemi Informativi Geografici (GIS), particolarmente in ambito archeologico è nato da tempo un grande interesse verso tali strumenti che, pur nascendo per l'analisi del territorio, mostrano di poter essere efficacemente utilizzati anche nel campo della conservazione architettonica, dei beni archeologici e mobili [4]. L'uso della tecnologia GIS fornisce infatti un contributo risolutivo al problema della documentazione poiché permette alcune relazioni a oggi fondamentali, tra queste evidenziamo: la relazione topologica tra un archivio di dati e una rappresentazione grafica e una forte relazione tra la grafica raster e quella vettoriale. Rispetto a strumenti grafici CAD, (*Computer Aided Design*) i sistemi GIS integrano: dati vettoriali; dati raster (cartografia e immagini); dati alfanumerici (attributi degli oggetti grafici organizzati in tabelle nel database), testi, tabelle, fogli di calcolo, grafici, filmati, modelli tridimensionali e permettono di esportare e condividere i progetti sul web [5]. Oltre alla varietà di lettura e produzione di diverse tipologie di file, il GIS consente anche di effettuare elaborazioni complesse su di essi: quantitative, statistiche, modellazioni, previsioni, percentuali ecc. La consultazione dei dati può avvenire attraverso semplici strumenti di selezione direttamente sul disegno oppure tramite specifiche *query* nell'archivio dati, ricercando per singole parole chiave oppure attraverso il linguaggio SQL (*Structured Query Language*).

Non è stato dunque difficile provare ad integrare le tre fasi della metodologia proposta in un'applicazione GIS, in particolare, QGIS3® ha permesso di realizzare il modello procedurale attualmente eseguibile in maniera pratica e veloce dall'operatore; mostreremo di seguito la procedura applicata in questo software.

Per quanto riguarda i beni mobili, non dotati dunque di punti georiferiti, un primo ostacolo da superare è quello di inserire le immagini in scala 1:1 all'interno del GIS. In QGIS3® questa problematica può essere risolta in diversi modi ad esempio creando un sistema di riferimento metrico cartesiano ex novo oppure scegliendo un sistema di riferimento metrico esistente; in questo modo sarà possibile disegnare con gli strumenti CAD presenti un poligono delle stesse dimensioni dell'opera e georeferenziare successivamente l'immagine all'interno del poligono. I 4 angoli dell'immagine saranno quindi scelti come punti di controllo da far aderire a quelli del poligono. (Fig. 13) La possibilità di salvare e registrare i punti permette di inserire in maniera veloce tutte le immagini e georeferenziarle nello stesso punto in modo da averle perfettamente sovrapposte. Inserirle le immagini di partenza inizia la prima fase della metodologia con i processi di *image analysis* sopra descritti. Attualmente in QGIS3® è inserito solo l'algoritmo i.PCA, ma la versatilità di questa applicazione permette di inserire tutti gli algoritmi desiderati nel modello di processing attraverso uno script in Python®. L'operatore sceglierà quindi all'interno della lista degli Strumenti di Processing l'algoritmo desiderato (fig.14), attraverso una semplice finestra si selezionano le immagini in input e si lancia l'algoritmo. Il tempo di calcolo dipende fortemente dalla risoluzione spaziale delle immagini inserite e dalla velocità di elaborazione del calcolatore in

uso. Le immagini in scala di grigio in uscita saranno visibili nella lista *Layer* perfettamente sovrapposte alle altre. (Fig. 15)

FASE 1

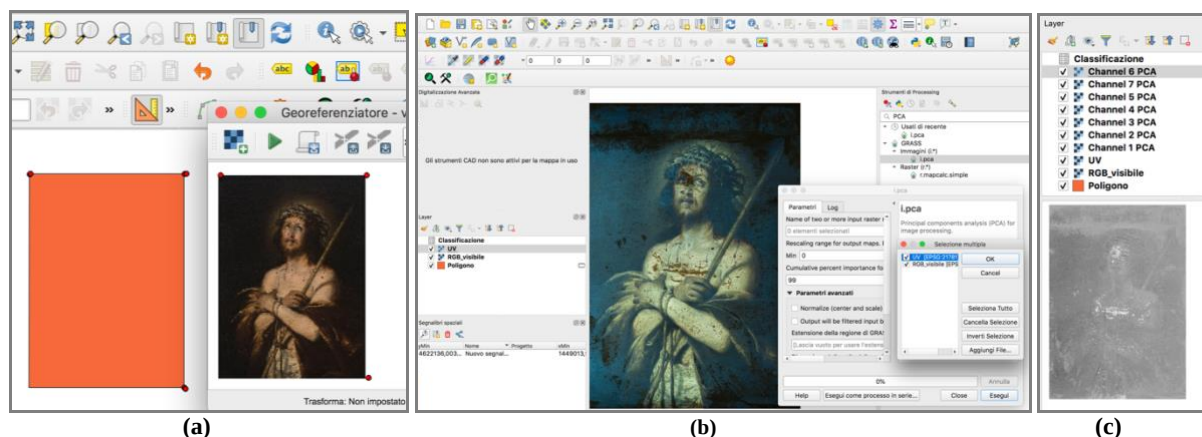


Figura 13-14-15 (a) Georeferenziatore di raster (b) Finestra Strumenti di Processing e algoritmo PCA. (c) output nella finestra Layer

La seconda fase della metodologia consiste nello scegliere i canali di output dell'algoritmo che meglio chiariscono lo stato di conservazione e trasformarle in maschere binarie. In QGIS3® Gli strumenti più idonei a tale scopo e di semplice utilizzo sono il Plugin *Value tool* e lo strumento di Processing per l'analisi Raster *Riclassifica per Layer* o *Riclassifica per tabella*. Con lo strumento *Value Tool* si scorre semplicemente sull'immagine per visionare i valori dei pixel corrispondenti alle rispettive aree da mappare (Fig.16). Si scelgono quindi due intervalli di valori in scala di grigio da 0 a 255. Nel nostro caso abbiamo raggruppato i valori che vanno dallo 0 a 180 nella classe 0 e i valori che vanno da 180 a 255 nella classe 1. Una volta deciso l'intervallo di valori si procede alla riclassificazione del raster con lo strumento *Riclassifica per Tabella*. Le fasi 1 e 2, con immagini in risoluzione di 150 pixel/pollice e un calcolatore di media potenza, richiedono un tempo massimo di esecuzione di 15 minuti.

FASE 2

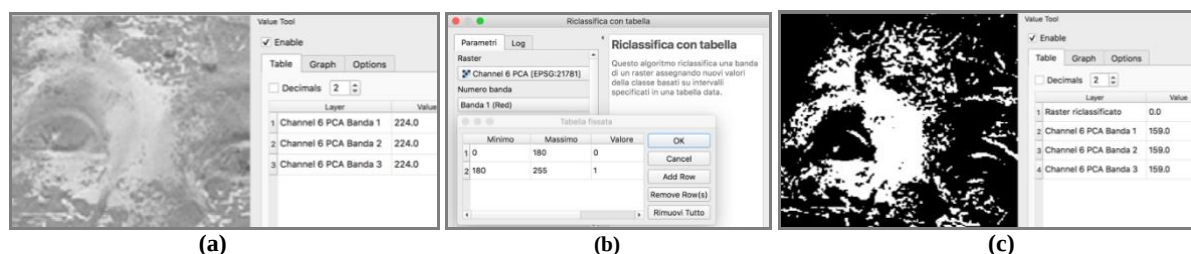


Figura 16-17-18 (a) Strumento Value Tool per l'identificazione dei valori dei pixel (b) Finestra Strumenti di Processing Riclassifica con tabella (c) output raster riclassificato in maschera binaria.

La terza Fase della metodologia consiste nell'estrazione automatica del disegno grafico per la creazione del modello delle informazioni, ogni maschera binaria corrispondente ad un'informazione viene trasformata da file raster a tracciato vettoriale. In QGIS3® questo passaggio avviene molto rapidamente anche con file complessi e permette la creazione di un poligono vettoriale che rispecchia in maniera fedele i bordi delle aree di interesse riconosciuti ed evidenziati dalle indagini diagnostiche. Successivamente il poligono può essere caratterizzato con la finestra di *Stile Layer* per la successiva tematizzazione e creazione della legenda.

FASE 3



Figura 19-20-21 (a) Raster vettorializzato con lo strumento poligonizzatore. (b) Tracciato vettoriale tematizzato con sfondo immagine luce visibile.

Ad ogni poligono potranno essere associate informazioni testuali ed alfanumeriche inserendole nella tabella degli attributi. Grazie alla possibilità di interrogare sia il file raster che i singoli poligoni si potrà rendere così la mappatura tematica interattiva, creando ad esempio schede grafiche che riportino graficizzate informazioni come la percentuale dell'aria delle lacune o degli interventi precedenti ecc. Difatti QGIS3® possiede una finestra di Layout di stampa molto efficace e versatile che permette la creazione anche di complesse schede con la possibilità di salvare un template di base per riutilizzarlo in futuro. In Figura 21-22 mostriamo il risultato finale ottenuto con questa metodologia in QGIS3®. I progetti possono essere esportati on line e su dispositivi mobili tramite applicazioni web sviluppate per QGIS® come *Web Mapping®*, *Talking Map®*, *Qfield®* [5].

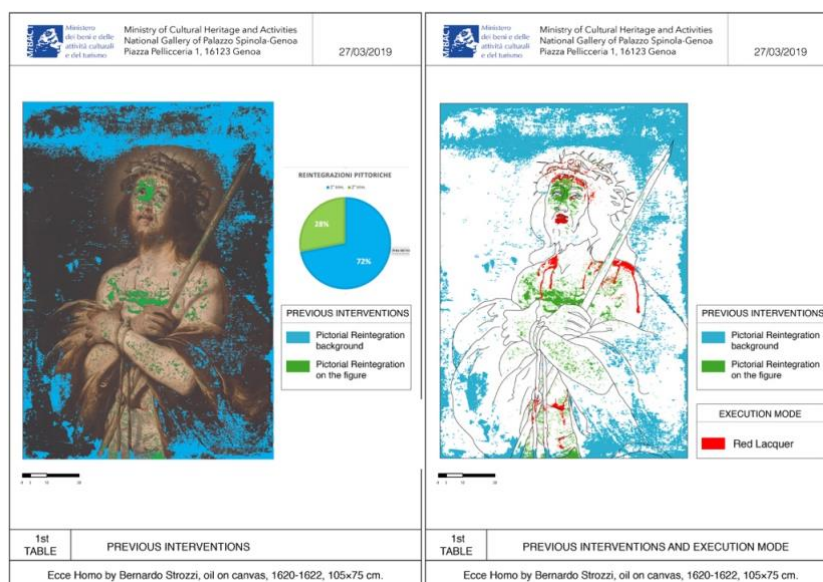


Figura 22-23 Esempi di schede di mappature tematiche eseguite in QGIS e composte con il layout di stampa.

Conclusioni

Abbiamo mostrato come sia possibile sviluppare una metodologia integrata per la documentazione che tenga conto delle nuove tecnologie GIS, e permetta di automatizzare parzialmente il processo di creazione dei file vettoriali. Oltre alla riduzione dei tempi, questa strategia aiuta a superare il limite dell'interpretazione individuale, facilitando il restauratore nell'esecuzione dei tematismi grafici. Tutte le operazioni sono ripetibili e verificabili da operatori diversi in tempi lontani dall'intervento. Il processo automatizzato offre inoltre la possibilità di registrare un rapporto tecnico contenente tutte le operazioni e i parametri utilizzati nelle fasi di lavorazione dei file. È importante specificare che il risultato finale dipende dal tipo di opera, in quanto ciascuna, sia mobile che architettonica, ha una diversa storia e differenti problematiche di rappresentazione e sarebbe quindi impossibile costruire un modello procedurale univoco che soddisfi sempre e per tutte le opere le esigenze di rilievo. Tuttavia, è possibile creare un modello guida e fornire indicazioni specifiche sulla qualità delle immagini in input da utilizzare che, ad esempio, devono possibilmente essere ad alta risoluzione spaziale e prive di disturbi e riflessi di luce e devono essere geometricamente corrette, in caso contrario tutte le informazioni derivanti dall'analisi dei dati non sarebbero esatte. La precisione dell'analisi raster e la sua conversione a vettore, che è la base della nostra metodologia, dipende da diversi fattori tra cui il più importante è sicuramente la risoluzione spaziale delle immagini in input e il software utilizzato dall'operatore. Oltre a questo condizionamento, va precisato anche che la lettura degli output degli algoritmi di *image analysis* non è sempre semplice poiché a volte in un'immagine emergono combinate fra loro informazioni diverse. Con questa procedura metodologica si è però in grado di mappare e documentare molto più rapidamente e accuratamente rispetto alle attuali metodologie di documentazione grafica manuale. Questa metodologia è attualmente in fase di sperimentazione con altri tipi di manufatti, con risultati analoghi a quelli riportati in questo documento.

Ringraziamenti

Il lavoro presentato è all'interno di un progetto di ricerca ed è stato elaborato grazie ad una produttiva collaborazione tutt'ora in corso con il Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) di Pisa. In particolare, si ringraziano: Vincenzo Palleschi (primo ricercatore) e Stefano Pagnotta (assegnista di ricerca) dell'Istituto di chimica dei composti organometallici, rispettivamente per le riprese in fotografia multispettrali delle opere e per le applicazioni di reti neurali SOM; Emanuele Salerno (primo ricercatore) e Anna Tonazzini (Primo Ricercatore)

dell'Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione per le loro applicazioni e ricerca degli algoritmi di segmentazione sulle immagini. Inoltre, si ringraziano: Paolo Maria Antonio Triolo docente di Fotografia per la diagnostica della Università di Urbino per le immagini fornite e l'aiuto nella loro lettura, Elvio Moretti ricercatore dell'Università di Urbino per il suo apporto sullo sviluppo dei GIS applicati ai beni culturali e gli sviluppatori di QGIS® Italia, in particolare Matteo Ghetta e Paolo Cavallini per il loro supporto tecnico.

NOTE

- [1] (Zhao Y. 2008), (Rafael C. Gonzales, Richard E. Woods 2008)
- [2] (Easton et al, 2003), (Tonazzini A. et al, 2019, pp. 4-12)
- [3] (Kohonen T., 1998, pp.1-6)
- [4] (Baratin L, Moretti E. e Bertozzi S., 2012, 2014, 2016) (Fuentes A., 2015) (Bartolomucci C. 2008)
- [5] (<https://www.talkingmaps.eu/>) (<https://new.opengis.ch/android-gis/qfield/>)

BIBLIOGRAFIA

1. Baratin L. et al, “Spatial analyst per lo studio di manufatti dipinti su tela e su tavola a supporto della documentazione per la conservazione e il restauro delle opere d'arte.” in “Atti della 15 Conferenza Italiana Utenti ESRI” Roma, Auditorium del Massimo, 09-10 Aprile 2014. Supplemento a GEOMEDIA, vol. 2-2014, ISSN: 1128-8132
2. Baratin L. et al. “GIS Applications for a New Approach to the Analysis of Panel Paintings. In: Ioannides M. et al. (Eds.): *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection*. EuroMed 2016, Lecture Notes in Computer Science, vol 10058.
3. Baratin L., “La documentazione prima del restauro: una problematica aperta” 2012 In: Arbace L., Baratin, L. (eds) *Restauri d'Arte: opere dell'Abruzzo recuperate dopo il sisma*. vol. 1, Gabbiano s.r.l., Ancona, pp. 148-152.
4. Baratin, L. et al, “The Geomorphological transformations of the City of Urbino: the design of the city analysed with GIS tools. *SCIRES it, SCientific REsearch and Information Technology*”, vol. 5, no. 1, pp. 41–60. © CASPUR-CIBER Publishing, <http://caspur-ciberpublishing.it>.
5. Baratin, L., Cattaneo, A., 2016c. “SICaR restoration of religious works of art in Urbino.” In Pelosi, C., Agresti, G., Lanteri, L. (ed.) *8th european symposium on religious art, Restoration & conservation*. pp. 62-
6. Baratin, L., Scicolone, G., Lonati, S., “Conservation Digital Report: standard documentation in Cultural Heritage”, *EUROGRAPHICS Workshop on Graphics and Cultural Heritage*. 2016
7. Bartolomucci C. *Nuovi metodi per la documentazione*, in G. Carbonara (diretto da), *Trattato di Restauro Architettico*. Grandi temi di restauro. Secondo aggiornamento, Torino: Utet, vol. X, 2008 pp. 105-140
8. Bertozzi S., Baratin L. e Moretti E., 2015. “Superfici Pittoriche e Supporti: GIS Analysis, Caratterizzazione e Monitoraggio” in *Atti della Conferenza ESRI Italia 2015*. Roma, Ergife Palace Hotel, 15-16 Aprile 2015.
9. Easton et al.: “Multispectral imaging of the Archimedes palimpsest” In: *Proc. IEEE AIPR*, 2003, pp. 111-116.
10. Fuentes, A.: “La tecnología SIG al servicio de la cuantificación numérica del deterioro en superficies pictóricas. Un paso más hacia la objetivización de los diagnósticos patológicos.” In: *Paper of Congreso Grupo Español del I.C.C.*, Madrid 2015 pp. 363-369,.
11. Kohonen T., “The self-organizing map” in *Neurocomputing* 21, 1998, pp 1–6.
12. Rafael C. Gonzales, Richard E. Woods. “Elaborazione delle immagini digitali”, Pearson, 2008.
13. Sacco F., “Sistematica della documentazione e progetto di restauro”, in *Bollettino ICR*, (2002), pp.28-54.
14. Salerno E., et al.: “Analysis of multispectral images in cultural heritage and archaeology” *J. Appl. Las. Spectr.* 1(1), 2014, pp. 22-27.
15. Salerno E., Tonazzini A., Bedini L.: “Digital image analysis to enhance underwritten
16. Schmid W., “Documentation of Intangibles” in “Graphic Documentation Systems in Mural Painting Conservation” *GraDoc*, Atti del Seminario (Roma, 16-20 novembre 1999), ICCROM, Roma 2000
17. SICaR/wb, <http://sicar.mbigroup.it/>
18. Tonazzini A., Salerno E., Bedini L., “Fast correction of bleed-through distortion in grayscale documents by a blind source separation technique”, *Int. J. on Document Analysis and Recognition*, DOI 10.1007/s10032-006-0015-z Vol. 10, June 2007, pp. 17-25.
19. Tonazzini, A., et al.: “Analytical and mathematical methods for revealing hidden details in ancient manuscripts and paintings”: A review. *J. Adv. Res.*, in press, DOI:10.1016/j.jare.2019.01.003.
20. Triolo Paolo Antonio Maria et al.: “Quattro opere a confronto. Interpretazioni e confronti delle analisi di diagnostica per immagine sulle tele di Bernardo Strozzi.” In Zanelli, G. (ed.), *Bernardo Strozzi. Allegoria della Pittura*, Sagep, Genova, Italy (2018).
21. Zhao Y.: “Image segmentation and pigment mapping of cultural heritage based on spectral imaging” Thesis, Rochester Institute of Technology (2008).