

DONATELLA MATÈ, MATTEO MONTANARI, RITA CAPITANI,
MARIA CARLA SCLOCCHI*

*Disinfezione del patrimonio librario, archivistico, fotografico e
cinematografico: stato dell'arte e prospettive*

TITLE: *Disinfection Practices for Library, Archival, Photographic, and Cinematographic Heritage: State of the Art and Emerging Perspectives*

ABSTRACT: Growing awareness of the health and environmental risks associated with conventional biocides has underscored the need for safer and more sustainable alternatives. This study reviews the current state of disinfection practices applied to paper, parchment, photographic materials, and film, with a focus on recent advances and innovative approaches. Particular attention is devoted to emerging techniques, while acknowledging that many novel disinfection strategies still require thorough investigation and validation. The Italian context is examined in detail, where the conservation of cultural heritage faces specific challenges and opportunities that may shape future developments in the field.

KEYWORDS: Disinfection methods; Library and archival materials; Photographic and cinematographic materials; Preventive conservation; Biodeterioration.

La crescente consapevolezza dei rischi per la salute e per l'ambiente associati ai biocidi convenzionali ha reso evidente la necessità di individuare alternative più sicure e sostenibili. Il presente studio analizza lo stato attuale delle pratiche di disinfezione applicate a carta, pergamena, materiali fotografici e cinematografici, con particolare attenzione ai più recenti progressi e agli approcci innovativi. Viene inoltre dato rilievo alle tecniche emergenti, riconoscendo che molte delle nuove strategie di disinfezione richiedono ancora approfonditi studi e validazioni. Un focus specifico è dedicato al contesto italiano, dove la conservazione del patrimonio culturale si confronta con sfide e opportunità peculiari, capaci di orientare i futuri sviluppi del settore.

PAROLE CHIAVE: Metodi di disinfezione; Materiali archivistici e librari; Materiali fotografici e cinematografici; Conservazione preventiva; Biodeterioramento.

DOI: <https://doi.org/10.60923/issn.2240-3604/25998>

Copyright © 2025 The Author

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

<<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>>

Introduzione

biblioteche, archivi, fototeche, raccolte di beni sonori e audiovisivi costituiscono una rete estremamente capillare sia sul territorio nazionale sia a livello internazionale. Si tratta di enti e istituti che custodiscono oggetti polimerici – costituiti da carta, pergamena, papiro, legno, cuoio, tessuti, pellicole e supporti fotografici, magnetici, ottici e digitali – spesso compresenti ma caratterizzati da esigenze conservative profondamente diverse. In assenza di un modello europeo e internazionale,

* Donatella Matè, già Funzionaria del Laboratorio per la Conservazione Preventiva ICPAL, donatella.mate@gmail.com; Matteo Montanari, Accademia di Belle Arti di Bologna, Accademia di Brera, Milano, matteo.montanari@gmail.com; Rita Capitani, Unità di crisi dell'Emilia-Romagna e Opificio delle Pietre Dure, Firenze, rita.capitani@cultura.gov.it; Maria Carla Sclocchi, già Funzionaria del Laboratorio di Biologia ICPAL, mariacarla.sclocchi@gmail.com. Per tutti i siti web l'ultima consultazione risale al 25.07.2026.

la disciplina italiana in materia di beni culturali riconosce tale *status*, in particolare, ai documenti e alle raccolte librerie delle biblioteche dello Stato, degli enti e istituti pubblici, delle persone giuridiche private senza fine di lucro nonché, quando sia intervenuta la dichiarazione dell'interesse culturale, ai documenti e ai libri, appartenenti a soggetti diversi, opera di autore non più vivente o la cui esecuzione risalga ad oltre settanta anni; alle fotografie, con relativi negativi e matrici, alle opere cinematografiche e audiovisive la cui produzione risalga ad oltre venticinque anni.¹

Il patrimonio custodito dalle sole biblioteche pubbliche statali italiane ammonta a decine di milioni di esemplari comprendenti manoscritti, edizioni a stampa, periodici, mappe e collezioni speciali, mentre gli Archivi di Stato italiani tutelano oltre 1.500 chilometri lineari di documentazione. Al patrimonio conservato dagli enti e istituti pubblici, si affianca quello, altrettanto significativo, detenuto da istituzioni private, enti ecclesiastici, fondazioni e raccolte specializzate.

La maggior parte di questi materiali è conservata in edifici non originariamente progettati per la conservazione documentaria, o caratterizzati da carenze strutturali, microclimatiche e impiantistiche, che ne compromettono l'idoneità. La maturata consapevolezza, in ambito nazionale, della specificità degli edifici destinati a biblioteche e archivi, ha prodotto, in Italia, dei criteri tecnici dedicati, sottolineando l'importanza imprescindibile delle misure preventive.²

In tale quadro dispositivo, la legislazione italiana impone ai proprietari, possessori o detentori di beni culturali l'obbligo di garantirne la conservazione, vietandone il deterioramento, il deturpamento e la distruzione.³ La natura prevalentemente organica dei materiali conservati da archivi, biblioteche, fototeche e cineteche ne aumenta la vulnerabilità a molteplici fattori di rischio, fisici, chimici e biologici: tra questi il biodeterioramento rappresenta una delle principali cause di danneggiamento, specialmente in seguito a eventi emergenziali come

¹ D. Lgs. 22 gennaio 2004, n. 42, *Codice dei beni culturali e del paesaggio*, ai sensi dell'articolo 10 della L. 6 luglio 2002, n. 137. (GU n. 45 del 24 febbraio 2004 - Suppl. Ordinario n. 28), articoli 10 (Beni culturali), 11 (Cose oggetto di specifiche disposizioni di tutela), 12 (Verifica dell'interesse culturale), 13 (Dichiarazione dell'interesse culturale).

² A titolo di esempio si vedano la circolare MiBAC n. 132/2004, *Piani di emergenza per la tutela del patrimonio culturale*, <https://dgspatrimonioculturale.beniculturali.it/wp-content/uploads/2020/08/Piani-di-emergenza-per-la-tutela-del-patrimonio-culturale_SG-Circolare-N.-132-08_10_2004.pdf> e la circolare MiC n. 2/2025, *Indirizzi e strumenti operativi per l'elaborazione, l'attuazione e l'aggiornamento del piano di limitazione dei danni al patrimonio culturale*, <https://dit.cultura.gov.it/wp-content/uploads/2025/04/Circolare-PLD_signed.pdf>, che richiamano la normativa antincendio, con particolare riferimento alla Regola tecnica verticale n. 10 e n. 12 in materia di prevenzione incendi.

³ Si veda il combinato disposto degli articoli 30 (Obblighi conservativi) e 20 (Interventi vietati) del D.Lgs. 42/2004 con l'articolo 518-duodecies (Distruzione, dispersione, deterioramento, deturpamento, imbrattamento e uso illecito di beni culturali o paesaggistici) del Codice Penale, R.D. n. 1398/1930.

allagamenti e infiltrazioni, anche derivanti da guasti degli impianti, o lunghi periodi di mancata manutenzione.

La polvere rappresenta il vettore primario di diffusione microbica, trasportando batteri e microfunghi sotto forma di spore o frammenti di micelio. I microfunghi possono inoltre essere veicolati da organismi superiori – artropodi quali insetti ed acari – che se ne nutrono e, anche tramite i loro cicli vitali, facilitano la dispersione delle spore. Condizioni di elevata umidità relativa, prolungate nel tempo e associate a scarso ricambio d'aria nonché all'influenza delle variazioni stagionali, favoriscono la condensa e la creazione di microambienti umidi, in cui batteri ambientali e spore fungine quiescenti possono trovare l'habitat idoneo a costituire comunità ecologiche in grado di provocare danni estesi sui materiali.

Le linee guida italiane⁴ e internazionali⁵ raccomandano il rispetto di condizioni di temperatura e umidità relativa (U.R.)⁶ differenziate per tipologia di materiale⁷ e il mantenimento della stabilità di tali parametri per evitare stress igrometrico a carico dei manufatti.

Quando il danno si manifesta, spesso senza essere rilevato tempestivamente, è determinante intervenire sull'ambiente conservativo ma può essere necessario ricorrere a procedure di disinfezione dei materiali, la cui applicazione deve essere attentamente valutata in relazione alla tipologia e all'estensione del danno, alla gravità dell'attacco biologico, agli spazi disponibili per le operazioni e ai rischi per operatori e manufatti. Macchie legate a infezioni pregresse o a fenomeni di *foxing* di probabile origine biologica⁸ (Figg. 1, 2) richiedono principalmente il miglioramento

⁴ MiBAC, D.M. 10 maggio 2001, *Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei*, 2001.

⁵ ISO 11799:2015, *Information and Documentation. Document Storage Requirements for Archive and Library Materials*, Geneva: ISO, 2015; UNI 10829:1999, *Beni di interesse storico e artistico. Condizioni ambientali di conservazione. Misurazione e analisi*, Milano: UNI, 1999.

⁶ Rapporto percentuale tra la quantità di vapore acqueo presente nell'aria e la quantità massima che l'aria può contenere alla stessa temperatura senza che avvenga condensazione. Si tratta di un parametro fondamentale nella conservazione dei beni culturali perché influisce direttamente sui fenomeni di degradazione fisica, chimica e biologica dei materiali. L'U.R. viene misurata e monitorata mediante igrometri, termo-igrometri, *datalogger* elettronici collocati negli ambienti di conservazione e nelle vetrine, con registrazione periodica dei dati per verificare il rispetto dei valori consigliati e la loro stabilità in rapporto alle variazioni stagionali.

⁷ In depositi che conservano oggetti prevalentemente cartacei sono consigliabili valori termoigrometrici tra il 40-55% di U.R. e i 18-22 °C di T.

⁸ Il *foxing* si manifesta con macchie brunastre e irregolari sui supporti cartacei (così denominate per la somiglianza con il colore del mantello della volpe) e può avere un'origine biotica, abiotica o mista, risultante cioè da fattori sia chimici sia biologici. La presenza di comunità fungine - capaci di metabolizzare alcuni componenti della carta e di generare composti cromofori - può contribuire alla formazione delle macchie, spesso in sinergia con processi ossidativi e con la presenza di impurità metalliche nel supporto.

Si vedano JUSTYNA SZULC et al., *Analysis of Paper Foxing by Newly Available Omics Techniques*, «International Biodeterioration & Biodegradation», CXXXII, 2018, pp. 157-165, DOI: 10.1016/j.ibiod.2018.03.005; MARIA CARLA SCLOCCHI et al., *Microbial Life and Death in a*

delle condizioni microclimatiche e dei materiali di immagazzinamento. Diversamente, lo sviluppo di efflorescenze fungine attive e dal micelio variamente colorato (Figg. 3, 4), capaci di produrre composti volatili potenzialmente allergizzanti o tossici,⁹ rende necessario valutare interventi mirati e controllati.



Fig. 1. Buste d'archivio interessate da macchie di origine biologica. Foto: Rita Capitani.



Fig. 2. Macchie di origine biologica sul recto di una stampa fotografica all'albumina. Collezione Matè. Foto: Maria Carla Sclocchi.

Foxing Stain: a Suggested Mechanism of Photographic Prints Defacement, «Microbial Ecology», LXXIII, 2017, 4, DOI: 10.1007/s00248-016-0913-7; GUADALUPE PIÑAR et al., *Amid the Possible Causes of a Very Famous Foxing: Molecular and Microscopic Insight into Leonardo da Vinci's Self-Portrait*, «Environmental Microbiology Reports», VII, 2015, 6, pp. 849-859, DOI: 10.1111/1758-2229.12313.

⁹ Le micotossine sintetizzate da alcune specie di microfunghi che intaccano i materiali di archivi e biblioteche, come ad esempio i tricoteceni prodotti da *Stachybotrys chartarum* o le aflatossine prodotte da *Aspergillus flavus* in determinate condizioni ambientali o di substrato, possono produrre effetti tossici anche acuti, immunosoppressori, cancerogeni, mutageni, teratogeni, ecc. in dipendenza da diversi fattori. L'International Agency for Research on Cancer (IARC) colloca in particolare le aflatossine in classe 1 (carcinogeni umani certi) e le fumonisine, l'aflatossina M1 e l'ocratossina A in classe 2B (possibili carcinogeni umani). Si veda VLADIMIR OSTRY et al., *Mycotoxins as human carcinogens the IARC Monographs classification*, «Mycotoxins Research», 33, 2017, 1, pp. 65-73, DOI: 10.1007/s12550-016-0265-7.



Fig. 3. Danni ai volumi causati da infiltrazioni d'acqua dovute al malfunzionamento dell'impianto di climatizzazione. Foto: Rita Capitani.



Fig. 4. Sviluppo di colonie fungine su dorsi e tagli di volumi dopo variazioni marcate di umidità relativa e temperature dovute al malfunzionamento di impianti di climatizzazione. Foto: Maria Carla Sclocchi.

In passato la disinfezione dei materiali librari e archivistici si avvaleva prevalentemente di trattamenti gassosi – come ossido di etilene, fluoruro di solforile, acido cianidrico e timolo – sostanze altamente tossiche, oggi in gran parte vietate per l'uso su beni culturali. Attualmente, nei casi più frequenti di danni circoscritti a poche decine o centinaia di manufatti, gli interventi diretti sui beni si basano su applicazioni localizzate di prodotti biocidi, eseguite anche *in situ*, con l'ausilio di dispositivi di protezione individuale (DPI)¹⁰ e nel rispetto delle limitazioni normative vigenti. La scelta dei biocidi è infatti condizionata non solo dalla loro compatibilità con i materiali costitutivi, ma anche dal quadro regolatorio¹¹ che restringe fortemente l'impiego di sostanze potenzialmente pericolose.

Nel corso di vari decenni, gli istituti scientifici del Ministero della Cultura – quali il Centro di Fotoriproduzione Legatoria e Restauro degli Archivi di Stato (CFLR) e l'Istituto Centrale per la Patologia del Libro (ICPL), fusi nel 2007 nell'Istituto Centrale per il Restauro e la Conservazione del Patrimonio Archivistico e Librario (ICRCPAL), oggi Istituto Centrale per la Patologia degli Archivi e del Libro (ICPAL) –, hanno prodotto ricerche e indicazioni metodologiche nel campo della prevenzione dei danni di origine biologica e della disinfezione dei materiali archivistici e librari.

Questo articolo intende fornire un accesso semplificato e coordinato alle numerose pubblicazioni nel campo dei sistemi di disinfezione dei materiali conservati in archivi e biblioteche interessati da eventi calamitosi o danneggiati da metodi di conservazione inadeguati e carenti. Lo scopo è permettere anche ai non specialisti di orientarsi tra le motivazioni che hanno portato all'evoluzione dei sistemi di trattamento disponibili sia in Italia che all'estero. La comprensione delle modalità operative di questi metodi è volta, inoltre, alla condivisione di scelte consapevoli con gli esperti del settore. L'esame delle principali metodologie fisiche e chimiche include sia tecniche attualmente in fase di studio, sia procedure già testate su materiali analoghi a quelli conservati in archivi e biblioteche. L'obiettivo dell'articolo è evidenziare la necessità di studi più sistematici, la varietà ancora marcata delle pratiche adottate e l'assenza, allo stato attuale, di un

¹⁰ Nella normativa italiana sulla sicurezza nei luoghi di lavoro (D.Lgs. 9 aprile 2008, n. 81) i DPI sono definiti come le attrezzature destinate a proteggere il lavoratore dai rischi per la salute e la sicurezza durante l'attività lavorativa. Nella disinfezione dei materiali di archivi e biblioteche i DPI costituiscono una misura complementare alle protezioni collettive e alle procedure operative definite per ciascuna tecnica e comprendono, a seconda del trattamento: guanti protettivi, indumenti di protezione, dispositivi di protezione delle vie respiratorie e degli occhi, protezioni conformi alla normativa vigente in materia di radioprotezione (D.Lgs. 101/2020) nel caso di impiego di radiazioni ionizzanti.

¹¹ Il Regolamento (UE) n. 528/2012 (BPR) del Parlamento europeo e del Consiglio (testo consolidato Ed. 6.1 del 22 maggio 2024) ha sostituito la Direttiva 98/8/CE del 16 febbraio 1998 relativa all'immissione sul mercato dei biocidi, che disciplinava il quadro per la politica di settore in UE. EUROPEAN UNION, <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/ALL/?uri=CELEX%3A31998L0008>>.

metodo universalmente applicabile che garantisca efficacia, sicurezza e piena compatibilità con l'eterogeneità dei materiali coinvolti, anche in base al loro stato di conservazione. La ricerca si inserisce anche nel filone di studio che intende sia preservare l'integrità dei substrati sia ridurre al minimo l'impatto eco-tossicologico dei trattamenti.

È opportuno evidenziare che il testo si concentra sulle metodologie di disinfezione che sono rivolte ai microrganismi, accantonando quelle di disinfestazione, che sono volte invece a eradicare gli infestanti come insetti e roditori. Le due attività sono talvolta confuse, anche a livello terminologico, da chi si occupa della tutela dei beni archivistici e librari.

Risposta allo sviluppo microbico

Come già delineato da Fausta Gallo nel 1991¹², e confermato da molteplici studi successivi, estese infezioni possono verificarsi sui materiali di archivi e biblioteche:

- all'interno di depositi con U.R. elevata che provoca lo sviluppo dei microrganismi sulle sole legature e sui contenitori o anche all'interno dei manufatti;
- a seguito di eventi catastrofici che comportano il bagnamento dei materiali e lo sviluppo generalizzato dei microrganismi.

Nel primo caso, è necessario operare il risanamento dei locali, l'asciugatura dei materiali, il cui contenuto d'acqua deve essere riportato sotto il 10%, e la loro eventuale disinfezione. Soprattutto in assenza di indagini preliminari che accertino che i microrganismi siano attivi e che un trattamento di disinfezione sia effettivamente necessario, è opportuno osservare le dovute cautele, promuovendo il necessario coinvolgimento di un biologo e di un restauratore abilitato. Vanno evitati trattamenti o cosiddette "sanificazioni" impropriamente definite come "preventive". Dovranno, pertanto, essere prioritarie la gestione dei parametri ambientali dei locali di deposito e la deumidificazione dei materiali. Solo in presenza di infezioni attive e pericolose per l'uomo sarà necessario operare una vera e propria disinfezione.

Nel caso di materiali interessati da bagnamento a seguito di emergenze, la gestione di un numero limitato di volumi e documenti, comunque trattabili in breve tempo, ne permette l'asciugatura e l'eventuale disinfezione; in caso di quantitativi elevati di materiali umidi è preferibile invece porre in *stand by* il progredire dei danni, congelandoli e

¹² FAUSTA GALLO, *Problemi biologici: interventi di massa*, in *Dal 1966 al 1986. Interventi di massa e piani di emergenza per la conservazione del patrimonio librario e archivistico*, atti del convegno e catalogo della mostra (Firenze 20-22 novembre 1986), Ministero per i Beni Culturali e Ambientali, Pubblicazioni degli Archivi di Stato, Saggi 17, Roma, 1991, pp. 69-70. In merito alle problematiche di gestione delle contaminazioni fungine sui documenti grafici si veda il recente testo: MALALANIRINA SYLVIA RAKOTONIRAINY, *Gestion de la contamination fongique dans les collections de documents graphiques*, Editions des archives contemporaines, Coll. «Sciences archéologiques», France, 2024, DOI: 10.17184/eac.9782813005489.

programmando la loro successiva gestione in lotti allo scopo di arrestare il rapido sviluppo dei microrganismi.

La gestione dei vari beni danneggiati dall'acqua proveniente da impianti idrici, termici e antincendio, dalle acque reflue, dall'acqua piovana, anche in forma di grandine, da esondazioni e maree, richiede dunque un'attenta valutazione di alcuni fattori:

- grado di bagnamento;
- presenza e gravità dell'infezione (funghi e batteri);
- presenza di fango, detriti e altri inquinanti;
- quantità di beni interessati;
- tipologie di beni e qualità dei materiali costitutivi;
- proprietà dei beni e loro importanza amministrativa, informativa, storica;
- risorse disponibili, anche in termini di spazi, attrezzature, personale formato e da formare;
- condizioni ambientali specifiche.

Prima fase da attuare è la separazione dei materiali asciutti da quelli umidi e bagnati, mettendo al riparo i primi da possibili danni. Qualora si tratti di beni individuati come beni culturali dal D.Lgs. 42/2004,¹³ di proprietà pubblica e di enti ecclesiastici civilmente riconosciuti, di archivi privati dichiarati di interesse storico particolarmente importante o di biblioteche private dichiarate di eccezionale interesse culturale, dovranno essere individuati i materiali scartabili, stoccandoli in un'area sicura ma accessibile per la raccolta e la distruzione, in attesa di autorizzazione allo scarto come da linee guida della Soprintendenza archivistica e bibliografica competente. Quantitativi limitati di materiali umidi o bagnati possono essere asciugati all'aria (*air-drying*), operazione che richiede spazi idonei e attrezzati, dove possibile, con ventilatori e deumidificatori, ad opera di operatori formati. L'interfoliazione dei materiali cartacei può avvenire con carta assorbente o con ZorbixSM.¹⁴

L'impacchettamento sottovuoto (*vacuum packaging* o *squelch drying*) può essere realizzato anche *in situ* con attrezzature da banco poiché agisce gradualmente e riduce le distorsioni, risultando particolarmente adatto per volumi di pregio e con coperte in pergamena e in cuoio.

Materiali fotografici, sonori e audiovisivi richiedono, in generale una primaria pulitura per via umida realizzata utilizzando acqua priva di cloro,

¹³ Codice dei beni culturali e del paesaggio, cit.

¹⁴ ZorbixSM (Artifex Equipment Inc) è un foglio assorbente riutilizzabile costituito da un polimero a base di amido di mais e poliacrilonitrile, sviluppato per l'essiccazione di materiali librari e documenti danneggiati dall'acqua. È in grado di assorbire fino a 50 volte il proprio peso in liquido e viene impiegato anche per controllare l'umidificazione in modo graduale. ANTOINETTE E. CURTIS, *Zorbix as a Moisture Source for Parchment and Paper Treatments*, «Journal of Paper Conservation», XVI, 2016, 3, pp. 115-117, DOI: 10.1080/18680860.2015.1123456.

ed eventuale disidratazione in presenza di elementi metallici¹⁵. Grandi quantità di materiale bagnato, infangato o contaminato che non potrebbero essere trattate prima dell'insorgere di infezioni generalizzate, vengono insacchettate e sottoposte a congelamento (v. A.6). Il congelamento, volto ad arrestare il progredire del danno e delle infezioni sui materiali, può riguardare anche interi raccoglitori, cassette e scatole.

L'asciugatura dei materiali congelati, che può essere preceduta dalla pulitura per via umida e deve essere seguita dalla depolveratura (v. A.8), avviene, dove possibile, mediante liofilizzazione o crioessiccazione (v. A.7), in particolare in presenza di inchiostri manoscritti non ancora dilavati e carte patinate non ancora compattate. Le ulteriori tecniche di asciugatura si applicano ai materiali che subirebbero danni nel corso del processo di liofilizzazione e comunque con le limitazioni di seguito specificate:

- scongelamento, asciugatura all'aria o disidratazione in particolare per materiali fotografici, sonori e audiovisivi;
- scongelamento, interfoliazione con carta assorbente o con ZorbixSM e impacchettamento sottovuoto (*vacuum packaging* o *squelch drying*) per materiali che subirebbero danni e deformazioni nel corso della liofilizzazione;
- essiccazione evaporativa o "stress termico" generalmente impiegata su materiali non storici (v. A.5);
- essiccazione a microonde, che dovrebbe tuttavia prevedere filtri ceramici per evitare surriscaldamento e danni dovuti a elementi metallici (v. A.1.1);

La liofilizzazione e gli altri interventi di asciugatura possono, però, non risultare sufficienti a inattivare i microrganismi o gli agenti patogeni eventualmente entrati in contatto con i materiali e richiedere, oltre alla depolveratura, un intervento di disinfezione o di sterilizzazione. Il metodo individuato per quest'ultimo trattamento dovrebbe avere uno spettro d'azione che comprenda gli agenti biologici da eliminare e non essere dannoso per i materiali da trattare.

In merito alla sicurezza degli operatori, si ricorda che ogni prodotto chimico è dotato di una scheda di rischio nella quale sono indicate le sue caratteristiche chimico-fisiche e la sua tossicità nei confronti dell'uomo¹⁶ e che gli elementi essenziali della scheda sono riportati anche sulle etichette dei prodotti, indicati da pittogrammi e frasi di rischio codificate.

¹⁵ CONSERVATION CENTER FOR ART AND HISTORIC ARTIFACTS, *Disaster Recovery. Salvaging Photograph Collections*, 1998, Philadelphia, Pa, <<https://ccaha.org/sites/default/files/attachments/2018-07/technical-bulletin-salvaging-photographs.original.pdf>>.

¹⁶ Sotto il profilo della sicurezza per gli operatori, si descrivono a titolo di esempio due dei parametri tossicologici di interesse. La dose letale (DL₅₀) esprime in milligrammi (mg) di materia attiva per chilogrammo (kg) di peso la dose che sperimentalmente provoca per ingestione il 50% di mortalità in una popolazione di ratti. Il valore medio di esposizione (VME) è la concentrazione media di una sostanza chimica espressa in mg di materia attiva in un metro cubo di aria a cui un lavoratore può essere esposto durante una giornata lavorativa senza effetti nocivi apprezzabili per la salute.

Per ciascuna tecnica, comprese le tecniche emergenti che possono essere impiegate solo su materiali non storici, vengono sintetizzati i risultati delle ricerche già condotte, i limiti e le potenzialità di utilizzo. Ai procedimenti fisici che comprendono sistemi di irraggiamento (radiazioni elettromagnetiche non ionizzanti e ionizzanti), tecniche in corso di sperimentazione come il plasma freddo, tecniche che agiscono sulla temperatura (congelamento, essiccazione evaporativa, liofilizzazione), atmosfere modificate e pulitura meccanica, si associano i metodi chimici e quelli biologici.

Al fine di orientare la lettura, si riporta di seguito l'indice dei contenuti riguardanti i metodi di disinfezione disponibili o in corso di studio.

A) Metodi fisici

A.1) Radiazioni elettromagnetiche non ionizzanti

A.1.1) Microonde

A.1.2) Raggi UV-C

A.2) Radiazioni elettromagnetiche ionizzanti

A.2.1) Raggi X

A.2.2) Raggi gamma

A.3) Plasma

A.4) Atmosfere modificate

A.5) "Stress termici"

A.6) Congelamento

A.7) Liofilizzazione

A.8) Pulitura meccanica

B) Metodi chimici

B.1) Ossido di etilene

B.2) Soluzioni idroalcoliche

B.3) Sali di ammonio quaternario

B.4) Composti fenolici

B.5) Acidi e sali

B.6) Azoli

B.7) Anidride carbonica supercritica

B.8) Nanoparticelle metalliche

C) Metodi biologici

C.1) Composti chimici di origine naturale

C.2) Enzimi

D) Dopo la disidratazione

E) Attività preventive

Considerazioni e conclusioni

A) Metodi fisici

Prima di esaminare in dettaglio le metodologie fisiche si ritiene utile illustrare con un grafico le caratteristiche dello spettro elettromagnetico (Fig. 5) in modo da inquadrare più agevolmente la collocazione delle radiazioni citate rispetto al visibile.

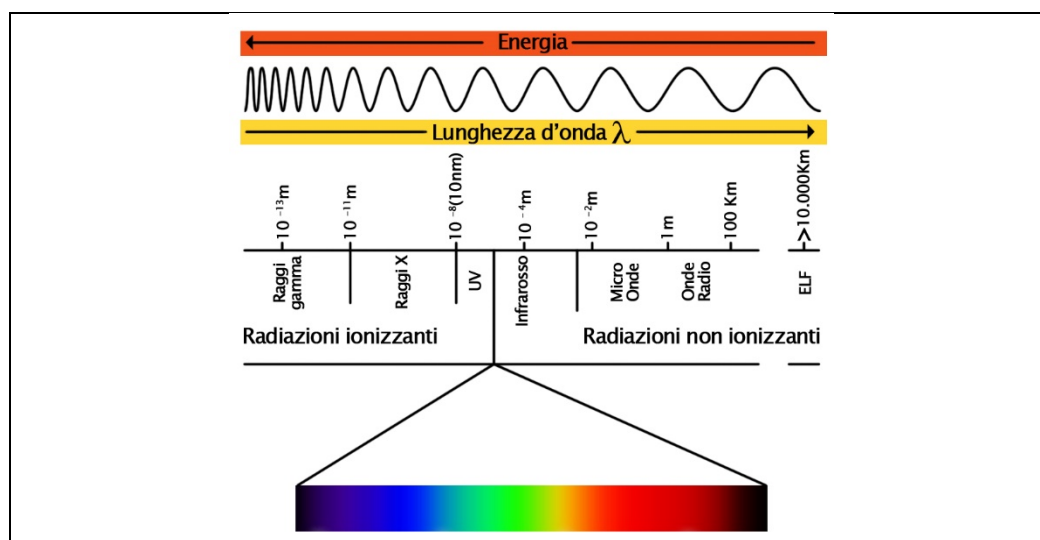


Fig. 5. Spettro elettromagnetico. Elaborazione grafica di Roberto Bianchi.

A.1) Radiazioni elettromagnetiche non ionizzanti

A.1.1) Microonde

Le microonde, con lunghezza d'onda compresa tra le radiofrequenze e le frequenze più elevate degli infrarossi, generano calore facendo oscillare le molecole polari, in particolare l'acqua: il loro effetto disinfettante si basa quindi sul riscaldamento rapido dei materiali umidi, che provoca disidratazione e inattivazione dei microrganismi. La presenza di umidità nei supporti è dunque determinante per l'efficacia del trattamento.

Il lavoro di Cerchiara et al.¹⁷ testa l'efficacia delle microonde a temperature di 30, 58 e 63 °C su *Aspergillus versicolor*, isolato da un volume del XVIII secolo, utilizzandolo per contaminare campioni di carta precedentemente esposti a vapori derivanti da acqua a 60 °C, in ambiente mantenuto per 15 giorni al 70% di U.R. L'osservazione delle fibre di cellulosa tramite *Scanning Electron Microscope* (SEM) e la misura del grado di polimerizzazione (DP)¹⁸ mostrano che il riscaldamento a 58 °C e 63 °C per pochi minuti blocca l'attività fungina e non danneggia la cellulosa mentre, al contrario, la temperatura più bassa (30 °C) risulta inefficace, poiché la crescita del microfungo ricompare dopo 30 giorni. Si puntualizza che questo articolo limita la sperimentazione a provini di carta e non a volumi interi dove si potrebbero creare disomogeneità di distribuzione del calore e quindi *hot spot* efficaci a macchia di leopardo.

¹⁷ TERESA CERCHIARA et al., *Effects of Microwave Heating for the Conservation of Paper Artworks Contaminated with Aspergillus versicolor*, «Cellulose», XXV, 2018, 3, pp. 2063-2074, DOI: 10.1007/s10570-018-1687-5.

¹⁸ Il DP, che indica il numero di unità di glucosio nella catena del polimero, diminuisce in caso di deterioramento.

Inoltre, il riscaldamento può generare fenomeni di bruciatura in presenza di componenti metalliche delle legature (lamine, borchie e cantonali, chiodi di fissaggio delle bindelle e dei nervi, puntali o graffe e tenoni o contrograffe, spirali, rilegature termiche con dorsi in metallo, punti metallici e *attaches* in genere).

Uno studio di Hajek et al.¹⁹ illustra un metodo avanzato per l'uso di microonde nell'asciugatura di materiali danneggiati dall'acqua. Il trattamento consiste nell'associare, durante l'esposizione alle microonde, un'unità di raffreddamento dell'aria e filtri in ceramica, i quali riducono l'intensità della radiazione e, di conseguenza, la formazione di macchie e il surriscaldamento delle parti metalliche presenti nei documenti. Il dispositivo brevettato dal gruppo di ricerca di Hajek, sviluppato per eliminare i rischi connessi alle variazioni di temperature che si generano negli oggetti contenenti elementi metallici, non è tuttavia disponibile sul mercato.

Le microonde vengono pertanto sconsigliate per l'asciugatura di volumi e faldoni voluminosi ma possono essere utilizzate in archivi e biblioteche per l'asciugatura di pareti umide in caso di problemi di condensa e quando altre tecniche risultano inapplicabili. Risultano idonee per la disinfestazione da insetti xilofagi delle parti fisse degli arredi lignei, purché non presentino decorazioni e colorazioni sensibili al calore. Tale operazione va eseguita in associazione a termocamere, utili per verificare le temperature raggiunte dal legno.

A.1.2) Raggi UV-C

Nello spettro elettromagnetico, si distinguono tre bande di UV (lunghezza d'onda λ compresa tra 100 e 400 nm²⁰) definiti come UV-A, UV-B e UV-C con diversa lunghezza d'onda. Il potere biocida dei raggi ultravioletti (UV) si esplica in una fascia più ristretta, a intensità comprese tra 200 nm e 300 nm.

Nella categoria UV-C, la massima efficacia è compresa tra 230 nm e 275 nm con la massima azione biocida a 254 nm che causa la degradazione degli acidi nucleici dei microorganismi. Le lunghezze d'onda comprese nella banda UV-C sono prodotte da lampade a vapori di mercurio eccitate da una corrente elettrica. Vengono di norma utilizzate per la sterilizzazione di superfici non porose oppure di aria e acqua.

I funghi melanici, molti dei quali implicati nel biodeterioramento di beni cartacei e fotografici come *Cladosporium spp.*, sono provvisti di melanina che agisce da scudo radioprotettivo assorbendo e dissipando l'energia delle radiazioni e per questo sono generalmente resistenti alle radiazioni UV-C che hanno una energia inferiore rispetto ai raggi X e ai raggi γ . Gli UV-C

¹⁹ MILAN HAJEK et al., *Simultaneous Microwave Drying and Disinfection of Flooded Books*, «Restaurator», XXXII, 2011, 1, pp. 1-12.

²⁰ Il nanometro (nm) equivale a un milionesimo di metro ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Nello spettro elettromagnetico questa unità è comunemente adottata per descrivere l'intervallo delle radiazioni.

sono molto più letali degli UV-A e UV-B e, a dosi elevate, sono in grado di inattivare anche i funghi melanici.

Le radiazioni citate hanno, però, uno scarso potere di penetrazione il che rende spesso difficoltosa l'inattivazione dei microrganismi all'interno dei materiali; queste radiazioni inoltre determinano alterazioni chimiche nei materiali cellulosici (depolimerizzazione e fotoossidazione della molecola di cellulosa²¹ con tipico imbrunimento) e schiarimento dei coloranti organici.

Quali agenti mutageni ed estremamente dannosi per gli occhi, gli UV devono essere utilizzati con cautela e a distanza dagli operatori. La loro pericolosità impone un utilizzo limitato rispettando contenuti tempi di esposizione. La luce ultravioletta in tutte le sue componenti è classificata dall'*International Agency for Research on Cancer* (IARC) nel Gruppo 1 degli agenti certamente cancerogeni per l'uomo. Poco studiate,²² per i motivi sopra indicati non vengono ritenute idonee come metodo di disinfezione per materiale archivistico e librario.

Nonostante ciò, l'uso di lampade germicide a diodi emettitori di luce LED UV-C sono state proposte come metodo di inattivazione dei virus, incluso SARS-CoV-2. L'Istituto Superiore di Sanità (ISS), come riportato nel "Rapporto ISS COVID-19 n. 12/2021",²³ ne dissuase l'utilizzo per impiego non professionale.²⁴ Infatti in una nota dell'ICPAL del maggio 2020,²⁵ quando questi dispositivi venivano reclamizzati, si specificava che non si riteneva consigliabile ricorrere all'utilizzo delle radiazioni UV sottoponendo il materiale archivistico e librario a irraggiamenti singoli o ripetuti per il rischio di danni a breve e lungo termine sui molteplici costituenti materici dei beni e, naturalmente, per il rischio di tipo sanitario.²⁶

²¹ CRISTINA CICERO et al., *Disinfection in Archives – A Short Review of the Sustainable Approaches and Green Perspectives of Using Radiation for Mass Disinfection*, «Sustainability», XVI, 2024, 21, 9303, DOI: 10.3390/su16219303; VLADIMÍR BUKOVSKY, MÁRIA TRNKOVÁ, *The Influence of Secondary Chromophores on the Light Induced Oxidation of Paper Part I: The Influence of Light on Cellulose and Secondary Chromophores*, «Restaurator», XXIV, 2003, 1, pp. 18-35.

²² In merito si vedano BUKOVSKY, TRNKOVÁ, *The Influence of Secondary Chromophores*, cit.; IID., *The Influence of Secondary Chromophores on the Light Induced Oxidation of Paper Part II: The Influence of Light on Groundwood Paper*, «Restaurator», XXIV, 2003, 2, pp. 118-132.

²³ ISS COVID-19 n. 12/2021, *Raccomandazioni ad interim sulla sanificazione di strutture non sanitarie nell'attuale emergenza COVID-19: ambienti/superfici* (aggiornamento Rapporto ISS COVID-19 n. 25/2020).

²⁴ Gli studi sugli UV per inattivare i microrganismi e i virus furono condotti sin dagli inizi del Duemila e molti altri sono stati pubblicati nel corso della pandemia da SARS-CoV-2 dimostrando che le fonti di radiazioni UV-C, con diverse lunghezze d'onda, possono inattivare efficacemente sulle superfici il SARS-CoV-2. Si vedano ANNA GIDARI et al., *SARS-CoV-2 Survival on Surfaces and the Effect of UV-C Light*, «Viruses», XIII, 2021, 3, 408, DOI: 10.3390/v13030408; CAETANO P. SABINO, FÁBIO P. SELLERA, DOUGLAS F. SALES-MEDINA, *UV-C (254 nm) Lethal Doses for SARS-CoV-2*, «Photodiagnosis and Photodynamic Therapy», XXXII, 2020, 101995, DOI: 10.1016/j.pdpdt.2020.101995.

²⁵ MiBACT, ICRCPAL|05/05/2020|0000672I [25.16.01/3/2020], FAQ, <https://icpal.beniculturali.it/wp-content/uploads/2020/06/FAQ_maggio_2020_Pagina_1.pdf>.

²⁶ Per un approfondimento si veda DONATELLA MATÈ, MARIA CARLA SCLOCCHI, *L'emergenza pandemica vissuta in biblioteche e archivi*, «Biblioteche oggi», XLIII, 2025, 3, pp. 31-37, DOI: 10.3302/0392-8586-202503-0031-1.

A.2) Radiazioni elettromagnetiche ionizzanti

L'International Atomic Energy Agency (IAEA), agenzia dell'ONU nata nel 1954, ha per Statuto la missione dell'uso pacifico delle radiazioni e delle tecnologie nucleari,²⁷ prevedendo programmi per incoraggiarne l'uso nella ricerca sul patrimonio culturale.²⁸

Le radiazioni ionizzanti utilizzate nei processi industriali sono costituite da onde elettromagnetiche come raggi X e γ o particelle cariche come elettroni accelerati. Tali radiazioni sono in grado di eliminare qualsiasi organismo biodeteriogeno a causa dei danni indotti a livello del DNA con inibizione della divisione cellulare. Le tecniche di irraggiamento vengono già largamente utilizzate in molti Paesi, primi fra tutti la Francia e il Brasile, dove interi impianti di trattamento sono destinati quasi esclusivamente ad attività di recupero di beni culturali. Le radiazioni γ e, in misura più limitata, i raggi X possono infatti essere considerate tra le soluzioni più efficaci per la sterilizzazione di manufatti complessi, sia per composizione sia per forma. Rappresentano una valida opzione in caso di calamità che comportino il contatto di volumi e documenti con l'acqua, quando è necessario trattare rapidamente grandi quantità di oggetti. In questi casi è infatti fondamentale agire con urgenza, perché su materiali organici bagnati il biodeterioramento può iniziare già nelle 24-48 ore successive all'allagamento. Per quanto concerne la presenza di residui tossici o radioattivi, si può ragionevolmente affermare che sia i raggi X che le radiazioni γ non producono radioattività nell'oggetto trattato. Tuttavia, entrambe le radiazioni interagiscono con le molecole del materiale, generando radicali liberi e prodotti di degradazione chimica che, in alcuni casi, possono risultare reattivi o potenzialmente dannosi per la stabilità dei

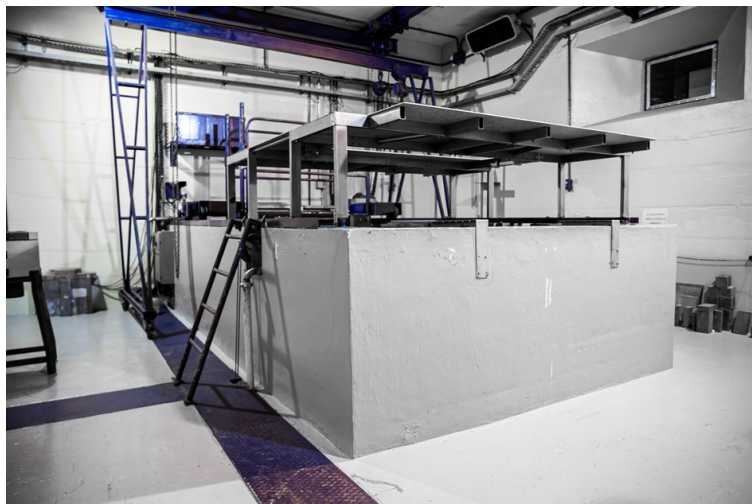


Fig. 6. Interno della cella di irraggiamento della facility Calliope del C.R. ENEA Casaccia. Su concessione del C.R. ENEA Casaccia.

²⁷ IAEA, <<http://www.iaea.org/About/statute.html>>.

²⁸ IAEA, *Uses of Ionizing Radiation for Tangible Cultural Heritage Conservation*, Iaea Radiation Technology Series n. 6, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2017, <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/16-17821_PUB1747_web.pdf>.

materiali. Quindi va considerato che l'interazione delle radiazioni ionizzanti con i materiali può portare a potenziali alterazioni (o effetti secondari) nella loro struttura, composizione chimica o aspetto e il loro impiego richiede il rispetto di stringenti normative di sicurezza per le persone: in Italia vige il D.Lgs. 101/2020, che recepisce la direttiva 2013/59/Euratom.²⁹

I ricercatori sono da anni impegnati nello studio delle applicazioni delle radiazioni ionizzanti presso il Centro Ricerche Casaccia dell'Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Sostenibile (ENEA), situato in provincia di Roma.³⁰ Le attività condotte mirano allo sviluppo di strumenti, metodi analitici e trattamenti innovativi per la



Fig. 7. Rastrelliera con 25 sorgenti di Cobalto⁶⁰ posizionata sul fondo della piscina di stoccaggio della facility Calliope del C.R. ENEA Casaccia. Su concessione del C.R. ENEA Casaccia.

²⁹ D.Lgs. 31 luglio 2020, n. 101, attuazione della direttiva 2013/59/Euratom del 5 dicembre 2013 che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom e riordino della normativa di settore in attuazione dell'articolo 20, comma 1, lettera a), della L. 4 ottobre 2019, n. 117. (20G00121) (GU Serie Generale n. 201 del 12 agosto 2020 – Suppl. Ordinario n. 29), <<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2020/08/12/20G00121/sg>>.

³⁰ L'impianto di irraggiamento γ Calliope, progettato e realizzato nel 1967-1968 presso l'ENEA Casaccia, è caratterizzato da una sorgente radioisotopica di Cobalto⁶⁰. Si vedano le recenti pubblicazioni: BEATRICE D'ORSI et al., *Preserving the Past with Gamma Rays: Real Case Studies from the Montecassino Abbey Collection*, 2025 IMEKO TC26 International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage, Bergamo, Italy, October 15-17, 2025; BEATRICE D'ORSI et al., *Gamma Irradiation for Cultural Heritage Conservation: Comparison of the Side Effects on New and Old Paper*, «Journal of Cultural Heritage», LXX, 2024, pp. 335–344, DOI: 10.1016/j.culher.2024.10.009 ; ALESSIA CEMMI, ILARIA DI SARCINA, BEATRICE D'ORSI, *Gamma Radiation-induced Effects on Paper Irradiated at Absorbed Doses Common for Cultural Heritage Preservation*, «Radiation Physics and Chemistry», CCII, 2023, 110452, DOI: 10.1016/j.radphyschem. 2022.110452; STEFANIA BACCARO et al., *Gamma Irradiation Calliope Facility at ENEA-Casaccia Research Centre (Rome, Italy)*, ENEA, 2019.

conservazione del patrimonio culturale (Figg. 6, 7). Sono in via di progettazione dei test di trattamento in termovuoto allo scopo di limitare la presenza di ossigeno e lo sviluppo dei radicali e di applicare le radiazioni ai materiali congelati a seguito di emergenza.

A.2.1) Raggi X

L'irradiazione con raggi X utilizza energia ionizzante proveniente da acceleratori con fascio elettronico ad alta potenza. I raggi X sono in grado di danneggiare le cellule e di rompere i legami chimici nel DNA dei microrganismi impedendone la riproduzione. Sebbene alcuni studi ne evidenzino i potenziali vantaggi³¹, l'impiego dei raggi X deve avvenire con la massima cautela. Le radiazioni interagiscono con le molecole di acqua dei materiali trattati mediante fotolisi generando radicali liberi molto reattivi, in particolare radicali idrossile (OH)³² e idrogeno (H). Questi radicali possono reagire con i componenti organici dei beni archivistici e librari, provocando scissioni delle catene polimeriche, ossidazione e alterazioni meccaniche o cromatiche dei materiali.

Il recente studio di Gyeong-Seo et al.³³ ha esaminato la dose soglia di radiazioni a raggi X necessaria per devitalizzare funghi che danneggiano il patrimonio culturale, tra cui *Epicoccum nigrum* (elevata resistenza alle radiazioni grazie alla presenza di un pigmento, l'epicocchina, fortemente protettivo), *Cladosporium cladosporioides* (resistenza moderata) e *Aspergillus niger* (resistenza definita "comune" sulla base dei risultati sperimentali). *E. nigrum* è stato efficacemente controllato con una dose di 12,5 kGy,³⁴ mentre *C. cladosporioides* è stato controllato con 7,5 kGy e *A. niger* entro l'intervallo di 5 kGy. I risultati di questo studio suggeriscono che almeno 12,5 kGy dovrebbero essere utilizzati per trattare le opere d'arte dopo inondazioni o altri disastri causati dall'acqua.

Cuoio e pergamena sono suscettibili a cambiamenti strutturali se esposti alle dosi di raggi X sopra richiamate per l'inattivazione dei microrganismi che intaccano i materiali di archivi e biblioteche, con possibili alterazioni

³¹MARIA LUIZA EMI NAGAI, PAULO DE SOZUA SANTOS, PABLO ANTONIO SALVADOR VASQUEZ, *Irradiation Protocol for Cultural Heritage Conservation Treatment*, «Brazilian Journal Radiation Sciences», IX, 2021, 1A, pp. 1-16, DOI: 10.15392/bjrs.v9i1A.1351; IOAN VALENTIN MOISE et al., *Radiation Processing for Cultural Heritage Preservation - Romanian Experience*, «Nukleonika», LXII, 2017, 4, pp. 253-260, DOI: 10.1515/nuka-2017-0037.

³²I radicali idrossile sono particolarmente instabili a causa dell'unico elettrone esterno.

³³GYEONG-SEO JO et al., *Disinfection of Fungus Using X-Ray Irradiation for the Preservation of Contaminated Organic Artifacts of Traditional Heritage*, «Applied Radiation and Isotopes», CCXXII, 2025, 111830, DOI: 10.1016/j.apradiso.2025.11183. Gli autori specificano anche che i raggi X possono essere utilizzati per controllare i funghi a dosi più basse del 20% ca. rispetto a quelle necessarie con i raggi γ .

³⁴Unità internazionale della dose assorbita, il kGy rappresenta l'energia media impartita a un'unità di materia divisa per il peso della materia stessa. 1 Gray (Gy) è infatti uguale a 1 Joule di energia per kilogrammo di prodotto (1 kilogray è pari a 1000 Joule per kilogrammo).

nella stabilità del collagene. Vadrucci et al.,³⁵ presso l'impianto REX (Removable Electrons to X-rays) dei laboratori ENEA di Frascati (Roma), hanno verificato che solo l'applicazione di dosi inferiori a 0,5 kGy (1 Gy=0.001 kGy) per i campioni non invecchiati e a 1,5 kGy per quelli invecchiati mantiene la struttura fibrillare sostanzialmente intatta, preservando la stabilità meccanica della pergamena testata, anche dopo invecchiamento accelerato. La pergamena risulta quindi poco resistente alle dosi, più elevate, necessarie per devitalizzare i funghi generalmente presenti sui materiali di archivi e biblioteche. Lo stesso dicasi per i materiali fotografici e audiovisivi.

A.2.2) Raggi gamma

I raggi γ emessi naturalmente da elementi chimici in forma di isotopi come Cobalto⁶⁰ sono somministrati sui materiali di interesse all'interno di strutture appositamente allestite e sono utilizzati con effetto sterilizzante sugli agenti biologici, sia microrganismi che insetti.

L'azione biologica dei raggi γ , come per i raggi X, consiste nella rottura dei legami chimici del DNA denaturandolo ed operando danni cellulari irreversibili.

L'azione fisica sui materiali come la carta, specie quella antica, consiste, a dosi elevate, in una diminuzione del grado di polimerizzazione che determina quindi un maggior infragilimento³⁶ e alterazioni della risposta colorimetrica del substrato. La dose di radiazione da applicare per il trattamento allo scopo di evitare danni ai materiali costitutivi del manufatto varia a seconda delle caratteristiche del supporto.

Il lavoro di Moise et al.³⁷ asserisce che un intervallo di dosi di 5-7 kGy può minimizzare questi effetti negativi. Drábková et al.³⁸ indicano cambiamenti significativi nella struttura dei materiali cellulosici anche al dosaggio di circa 4,5 kGy e la conclusione cui giungono gli autori è che il metodo non è adatto per la disinfezione di materiali a base di cellulosa. Dello stesso parere è una ricerca condotta nel 2016 presso l'ICRCPAL.³⁹

³⁵ MONIA VADRUCCI et al., *Effect of X-Ray and Artificial Aging on Parchment*, «The European Physical Journal Plus», CXXXVI, 2021, 873, DOI: 10.1140/epjp/s13360-021-01766-5.

³⁶ CORNELIU CATALIN PONTA, *Irradiation Conservation of Cultural Heritage*, «Nuclear Physics News», XVIII, 2008, 1, pp. 22-24, DOI: 10.1080/10506890801927213; MARIANNA ADAMO, GIUSEPPE MAGAUDA, FERNANDO ROCCHETTI, *The Effect of γ -Radiation on Acidified and Artificially Aged Paper*, «Restaurator», XXVIII, 2007, 4, pp. 227-238, DOI: 10.1515/REST.2007.227.

³⁷ IOAN VALENTIN MOISE, MARIAN VIRGOLICI, CONSTANTIN DANIEL NEGUT, *Establishing the Irradiation Dose for Paper Decontamination*, «Radiation Physics and Chemistry», LXXXI 2012, 8, pp. 1045-1050, DOI: 10.1016/j.radphyschem.2011.11.063.

³⁸ KLÁRA DRÁBKOVÁ, MICHAL DUROVIČ, IRENA KUČEROVÁ, *Influence of Gamma Radiation on Properties of Paper and Textile Fibres During Disinfection*, «Radiation Physics and Chemistry», CLII, 2018, pp. 75-80, DOI: 10.1016/j.radphyschem.2018.07.023.

³⁹ MARINA BICCHIERI et al., *Effects of Gamma Irradiation on Deteriorated Paper*, «Radiation Physics and Chemistry», CXXV, 2016, pp. 21-26, DOI: 10.1016/j.radphyschem.2016.03.005.

Secondo altre fonti⁴⁰ per un trattamento efficace e non invasivo per carta, materiali fotografici e pellicole in triacetato di cellulosa, sarebbe applicabile un valore inferiore a 10 kGy. Cappitelli et al.⁴¹ riferiscono che la dose consigliata per non danneggiare la carta è tra 2-8 kGy.

Un ulteriore studio⁴² indica che anche a dosi relativamente basse (5 kGy) si osservano riduzioni del 30% del DP. Tuttavia, già a quelle dosi si può ottenere un forte effetto disinfettante per i microfunghi⁴³ mentre le dosi inferiori non hanno azione fungicida ma solo insetticida (0,5-2 kGy).

A proposito dei materiali fotografici si sottolineano le indagini preliminari svolte dal CFLR e dall'ICPAL in collaborazione con l'ENEA per verificare l'effetto dei raggi γ sulla stabilità cromatica di alcune tipologie di carte fotografiche. In particolare è stato condotto uno studio sugli effetti di dosi ripetute di raggi γ (da 3 kGy a 100 kGy) applicati su stampe alla gelatina colorate manualmente per verificare la solidità del colore. Tramite *Energy Dispersive X-Ray Fluorescence* (EDXRF) è stata accertata, prima del trattamento, la presenza di coloranti organici (aniline) insieme a pigmenti organici (blu di Prussia, silicati e ossidi di ferro e fosfato di cromo). Anche dopo i trattamenti ripetuti, le coordinate colorimetriche, misurate nei campioni irraggiati e non irraggiati non hanno subito significative modifiche.⁴⁴

Per quanto riguarda le pellicole fotografiche e cinematografiche in triacetato di cellulosa, Nagai et al.⁴⁵ affermano che un range tra 6-10 kGy non modifica le proprietà principali dei materiali costitutivi.⁴⁶ Uno studio

⁴⁰ ALESSIA CEMMI, ILARIA DI SARCINA, BEATRICE D'ORSI, *Gamma Radiation-Induced Effects on Paper Irradiated at Absorbed Doses Common for Cultural Heritage Preservation*, «Radiation Physics and Chemistry», CCII, 2023, 110452, DOI: 10.1016/j.radphyschem.2022.110452; IOAN VALENTIN MOISE et al., *The Crosslinking Behaviour of Cellulose in Gamma Irradiated Paper*, «Polymer Degradation and Stability», CLX, 2019, pp. 53-59, DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2018.12.005.

⁴¹ FRANCESCA CAPPITELLI, CRISTINA CATTÒ, FEDERICA VILLA, *The Control of Cultural Heritage Microbial Deterioration*, «Microorganisms», VIII, 2020, 10, 1542, DOI: 10.3390/microorganisms8101542.

⁴² FLORIANA COPPOLA et al., *Effects of γ -Ray Treatment on Paper*, «Polymer Degradation and Stability», CL, 2018, pp. 25-30, DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2018.02.004.

⁴³ MATTEO MONTANARI et al., *Mass Treatment of Flooded Archival Materials by Gamma Radiation*, «Restaurator», XLII, 2021, 3, pp. 105-125, DOI: 10.1515/res-2021-0007.

⁴⁴ MARIANNA ADAMO, MASSIMO DE FRANCESCO, DONATELLA MATÈ, *Irraggiamento gamma su stampe colorate all'anilina. Valutazione della solidità del colore*, «Kermes», XXVI, 2013, 91, pp. 65-74. Sempre sulla stabilità cromatica si veda anche MARIANNA ADAMO et al., *Valutazione degli effetti dell'irraggiamento γ sulla stabilità cromatica di stampe fotografiche*, in *Lo Stato dell'Arte 7*, VII Congresso Nazionale IGIIC, Napoli, 8-10 ottobre 2009, Firenze, Nardini, 2009, pp. 365-372.

⁴⁵ MARIA LUIZA EMI NAGAI et al., *Gamma and Electron Beam Irradiation Effects for Conservation Treatment of Cellulose Triacetate Photographic and Cinematographic Films*, «Radiation Physics and Chemistry», CLXXXII, 2021, 109395, DOI: 10.1016/j.radphyschem.2021.109395.

⁴⁶ Sono stati studiati il comportamento di stabilità termica delle pellicole e la fattibilità della reticolazione delle pellicole. I campioni sono stati caratterizzati mediante *Attenuated Total Reflectance – Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR-ATR). Campioni irraggiati con raggi gamma e fasci di elettroni con dosi di radiazioni assorbite comprese tra 6 kGy e 200

di Carsote et al.⁴⁷ evidenzia che per pergamena e pelli, con una dose di 10 kGy, si hanno cambiamenti significativi nella struttura molecolare del collagene. Lungu et al.⁴⁸ verificano che radiazioni al di sotto di 10 kGy assorbite dal materiale non generano conseguenze sulla durezza ed elasticità dello stesso e vengono quindi considerate innocue sia per pergamena nuova che per quella invecchiata naturalmente.⁴⁹

D'altra parte, lo studio ha anche dimostrato che il cuoio altamente stabile termicamente potrebbe resistere ai danni fino a 25 kGy o persino 50 kGy a seconda della forza delle interazioni collagene-tannino. In generale, l'utilizzo delle radiazioni γ potrebbe essere applicato nei casi di pronto intervento su grandi quantità di materiale messo a rischio dallo sviluppo di microrganismi a seguito di alluvioni o inondazioni. Le modifiche indotte dai trattamenti potrebbero infatti essere considerate accettabili pur di evitare di perdere il manufatto, soprattutto nel caso di raccolte non tutelate.

Noto è il caso del tifone a Fukushima nel 2019 in seguito al quale molti documenti cartacei sono stati interessati dalla crescita di funghi cellulolitici alcuni dei quali, come ad esempio *Stachybotrys* spp., pericolosi per la salute umana. In tale caso i documenti sono stati esposti alle radiazioni γ con una intensità media di dosaggio tra 13-16 kGy. Non sono stati effettuati controlli e test per verificare gli effetti post irraggiamento.⁵⁰ A seguito dell'alluvione che ha colpito Livorno nel 2017, a due mesi dall'evento, la tecnica era stata applicata, al dosaggio di 5kGy, anche all'archivio del fotografo Dainelli.⁵¹

In Appendice si propongono le tabelle 1 e 2 che sintetizzano le caratteristiche principali delle radiazioni ionizzanti e non.

kGy sono stati esaminati mediante *Field Emission Gun – Scanning Electron Microscope* (FEG-SEM), *UV-Vis Spectroscopy* e *Differential Scanning Calorimetry* (DSC). La dose di 50 kGy, sia di raggi gamma che dei fasci di elettroni, ha comportato un effetto di reticolazione sulle pellicole. Gli spettri UV-Vis hanno rivelato cambiamenti già a partire da una dose di 15 kGy, cfr. NAGAI et al., *Gamma and Electron Beam Irradiation*, cit.

⁴⁷ CRISTINA CARSONE et al., *Micro-DSC, FTIR-ATR and NMR MOUSE Study of the Dose-Dependent Effects of Gamma Irradiation on Vegetable-Tanned Leather: The Influence of Leather Thermal Stability*, «Radiation Physics and Chemistry», CLXXXIX, 2021, 109712, DOI: 10.1016/j.radphyschem.2021.109712.

⁴⁸ ION BOGDAN LUNGU, LUCRETIA MIU, MIHALIS CUTRUBINIS, *Physical Chemical Investigation of Gamma-Irradiated Parchment for Preservation of Cultural Heritage*, XV, «Polymers», 2023, 4, 1034, DOI: 10.3390/polym15041034.

⁴⁹ International Agency on Research on Cancer, IARC, *Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risks to Humans; 1,3-Butadiene, Ethylene Oxide and Vinyl Halides (Vinyl Fluoride, Vinyl Chloride and Vinyl Bromide)*, World Health Organization, Lyon, France, volume 97, 2008.

⁵⁰ NAGAI et al., *Gamma and Electron Beam Irradiations*, cit.

⁵¹ *Memoria Fotografica, storia di un recupero collettivo*, Atti della conferenza di Livorno, a cura di Marcello Picollo, Barbara Cattaneo, Daniela Vianello, Livorno, Biblioteca Labronica/CNRIFAC, 11 maggio 2019. Si veda anche il video curato dalla Fondazione Laviosa partner del Progetto Memoria Fotografica: <<https://fondazionelaviosa.com/memoria-fotografica-recupero-archivio-daniele-dainelli/>>.

A.3) Plasma

Per definizione, il *Non-thermal Atmospheric Plasma* (NTAP) è lo stato di un gas parzialmente ionizzato dove l'energia è conservata soprattutto negli elettroni liberi. Questa tecnologia in cui la temperatura resta bassa è stata utilizzata in molte applicazioni, come la rimozione di inquinanti gassosi, ma negli ultimi anni l'uso si è esteso all'inattivazione microbica e alla degradazione di biofilm. L'acronimo LTP si riferisce al *Low Temperature Plasma* che può essere generato da scariche elettriche nei gas scelti a pressione atmosferica o a bassa pressione. I gas più frequentemente usati sono azoto, ossigeno, idrogeno, elio, argon e loro miscele. Gli agenti attivi generati dal plasma in alta umidità sono specie ossigeno reattive come O, O₂, O₂⁻, O₃, specie reattive di azoto come N, N₂, NO e specie reattive di H (H₂O, OH⁻, H₂O₂). In particolare, l'ossigeno in fase ionizzata reagisce rapidamente con la materia organica, generando CO, H₂O e CO₂ ed eliminando facilmente gli inquinanti per ossidazione.⁵²

Non sono stati studiati approfonditamente gli effetti sulla carta antica già gravata dall'invecchiamento naturale. Gli studi, ancora preliminari, si sono rivolti a carta nuova invecchiata e monoculture di microrganismi. È noto che le reazioni di una carta antica all'esposizione ad agenti disinfettanti possono variare rispetto a quelle di una carta nuova anche se invecchiata artificialmente.⁵³ Inoltre, studi⁵⁴ su inchiostri mostrano decolorazione per reazione con i componenti cristallini causati dalla scarica diretta del plasma ad azoto (N₂). Prove meccaniche e indagini fisico-chimiche mostrano che applicazioni di plasma "a riverbero" (*afterglow*) riducono le specie attive che esercitano un impatto negativo sui materiali rispetto alle scariche dirette in alta frequenza, pur mantenendo efficacia nella disinfezione dei materiali.⁵⁵

A.4) Atmosfere modificate

Il trattamento ipossico, generalmente indicato con il termine inesatto di "anossia", si basa sulla modifica controllata della composizione dell'aria, alterando i rapporti tra i gas in essa presenti. Ciò avviene all'interno di ambienti confinati realizzati con film polibARRIERA, mediante assorbitori di

⁵² RADKO TIÑO et al., *Plasma Technology in the Preservation and Cleaning of Cultural Heritage Objects*, Boca Raton, 2021.

⁵³ KATARZYNA PIETRZAK et al., *Disinfection of Archival Documents Using Thyme Essential Oil, Silver Nanoparticles Misting and Low Temperature Plasma*, «Journal of Cultural Heritage», XXIV, 2017, pp. 69-77, DOI: 10.1016/j.culher.2016.10.011; EMIL GHIOCEL IOANID et al., *Decontamination Effects of Radio Frequency Low-Temperature Plasma on Paper-Based Materials*, «Revue Roumaine de Chimie», LXI, 2016, 6-7, pp. 583-590; VLADIMIR SCHOLTZ et al., *Nonthermal Plasma*, cit.; EMIL GHIOCEL IOANID, VIORICA FRUNZĂ, DORINA EMILIA RUSU, *High-Frequency Plasma in Heritage Photo Decontamination*, «Annals of Microbiology», LX, 2010, 2, pp. 355-361, DOI: 10.1007/s13213-010-0051-2.

⁵⁴ GHIOCEL EMIL IOANID et al., *Behavior of Historical Printing Inks on Paper in High-Frequency Cold Plasma Discharges*, «IEEE Transactions on Plasma Science», XLVII, 2019, 1, pp. 81-85, DOI: 10.1109/TPS.2018.2873066.

⁵⁵ DORINA EMILIA RUSU et al., *Cold High-Frequency Plasma Versus Afterglow Plasma in the Preservation of Mobile Cultural Heritage on Paper Substrate*, «IEEE Transactions on Plasma Science», XLVIII, 2020, 2, pp. 410-413, DOI: 10.1109/TPS.2020.2970227.

ossigeno o apparecchiature in grado di ridurre la concentrazione di ossigeno (O₂) fino a valori residuali molto bassi (circa 0,01%) attraverso l'immissione di azoto (N₂), oppure con livelli di anidride carbonica (CO₂) superiori al 60%. Tali condizioni, realizzate a U.R. controllata, risultano incompatibili unicamente per la sopravvivenza degli organismi aerobi non sporigeni.⁵⁶ Va ricordato infatti che le tempistiche standard di trattamento (generalmente entro le quattro settimane), non producono un effetto biocida, sebbene alcuni microrganismi, in particolare batteri sensibili all'ipossia, possano risultare inattivati.⁵⁷ Si ribadisce pertanto l'efficacia di questi sistemi di disinfestazione esclusivamente su insetti e loro larve, nell'ambito di strategie note come *Integrated Pest Management* (IPM). È importante che nel corso di tali trattamenti l'U.R. non salga a valori compatibili con lo sviluppo di microrganismi poiché è stato verificato che diverse specie fungine biodeteriogene per i beni di archivi e biblioteche possono danneggiare i supporti in condizioni di ipossia, purché vi sia acqua disponibile nel substrato.

A.5) "Stress termici"

Sono in uso trattamenti che utilizzano il "calore secco" per l'asciugatura forzata di materiali bagnati o umidi attraverso l'impiego di camere climatiche a temperatura controllata, inferiore ai 50 °C. All'interno di queste camere il materiale viene asciugato mediante flussi di aria calda che provocano l'evaporazione dell'acqua dai supporti. Il vapore acqueo generato all'interno della camera viene a sua volta rimosso per condensazione. A seconda del grado di bagnatura dei supporti il ciclo di asciugatura può durare tra le 24 e le 36 ore. Il trattamento provoca il collasso delle strutture vegetative ed idratate dei microrganismi presenti sui supporti consentendone la rimozione per depolveratura, ma non ha alcun effetto su spore ed altre strutture di resistenza.⁵⁸ Non ne previene quindi la riattivazione che è legata alle condizioni di temperatura, umidità relativa e ventilazione degli ambienti di conservazione. Restano inoltre da indagare i probabili effetti avversi del calore sui materiali organici e il trattamento viene impiegato su materiali non riconosciuti come beni culturali, in seguito a eventi emergenziali, in assenza di legature e materiali fragili, o ancora in previsione della digitalizzazione di documenti sottoponibili a scarto. L'effetto fungicida del "calore umido" è noto in letteratura⁵⁹ e in ambito

⁵⁶ Dagli anni Duemila, sia presso il CFLR che in ICPAL, sono state condotte diverse verifiche della vitalità degli insetti a seguito dell'impiego delle attrezzature che realizzano atmosfere modificate proposte da ditte sul territorio nazionale.

⁵⁷ FLAVIA PINZARI et al., *Effects of Anoxia on Cultural Heritage Deteriorating Fungi: Possible Side Effects for the Stored Objects*, Conference NOOX3, Conference at the British Library and The Natural History Museum 3rd-4th November 2003, DOI: 10.13140/RG.2.2.18936.88328.

⁵⁸ MONTANARI et al., *Mass Treatment of Flooded Archival Materials by Gamma Radiation*, cit.

⁵⁹ JAN P.P.M. SMELT, STANLEY BRUL, *Thermal Inactivation of Microorganisms*, «Critical Reviews in Food Science and Nutrition», LIV, 2014, 10, pp. 1371-1385, DOI: 10.1080/10408398.2011.637645.

conservativo è stato dimostrato su talli lichenici (organismi simbiotici di funghi e alghe) su supporti lapidei.⁶⁰

Sono stati eseguiti test su documenti cartacei alluvionati e contaminati posti, previo insacchettamento in buste di polietilene, all'interno di una cella climatica mantenuta a temperature attorno ai 50 °C per 4 ore.⁶¹ I test finora eseguiti hanno dimostrato un effetto fungicida pressoché totale. Le prove devono essere implementate con la verifica dell'interferenza del trattamento con i supporti e non hanno interessato legature e beni fotografici e audiovisivi.

A.6) Congelamento

Il congelamento permette di evitare o arrestare lo sviluppo dei microrganismi sui supporti saturi di acqua, spesso ricca di sostanze organiche inquinanti, a seguito di bagnamento di materiale archivistico e librario. Il processo di congelamento non ha effetti significativi sulle cariche microbiche⁶² ma permette di organizzare il recupero e di programmare l'asciugatura di piccoli lotti di materiale, specie se il sinistro coinvolge una ingente quantità di beni. Per l'intervento sono solitamente impiegati container freezer che raggiungono temperature attorno a -25°C. A queste temperature, se il congelamento è sufficientemente rapido, il materiale cartaceo non subisce danni e si evita la formazione di grandi cristalli di ghiaccio, che potrebbero danneggiare i supporti. Possono invece essere danneggiate le opere d'arte su carta con mediazioni grafiche spesse come acrilici e *gouache*, le opere verniciate, alcune tipologie di stampe digitali, le fotografie in astuccio quali dagherrotipi, ambrotipi, ferrotipi, le lastre di vetro al collodio umido, le fotografie a contatto con vetri, i nastri magnetici (musicassette, DAT, videocassette, miniDV, bobine), i dischi in vinile e i dischi ottici (laserdisc, CD, DVD, Blu-ray) e i cilindri fonografici. Possono tuttavia essere congelati, previa catalogazione che consenta di ricostituire le unità iniziali, i materiali cartacei che li contengono e i loro allegati (Fig. 8).

⁶⁰ MAURO TRETIACH, STEFANO BERTUZZI, FABIO CANDOTTO CARNIEL, *Heat Shock Treatments: A New Safe Approach against Lichen Growth on Outdoor Stone Surfaces*, *Environmental Science & Technology*, XLVI, 2012, 12, pp. 6851-6859, DOI: 10.1021/es3006755.

⁶¹ Il contenuto d'acqua dei materiali resta in questo modo superiore al 16% per tutta la durata del trattamento.

⁶² RITA CAPITANI et al., *La Biblioteca comunale Aurelio Saffi di Forlì e l'alluvione del 2023: gestione dell'emergenza e valutazione del rischio sanitario, «Cores»* (in corso di pubblicazione).



Fig. 8. Nastri magnetici e dischi ottici contenuti nelle confezioni di carta e plastica originali e impregnati di acqua e fango a seguito di alluvione. Foto: Rita Capitani.

La presenza di sostanze chimiche nell'acqua che ha impregnato i materiali può abbassare il suo punto di gelo e richiedere temperature più basse. Se il congelamento interessa materiale alluvionato con fanghi può essere considerata l'opzione di un lavaggio preliminare dei beni, onde evitare di dover gestire le successive fasi di bonifica in presenza di fanghi ad elevato rischio biologico. Questa pratica, tuttavia, necessiterebbe la costante presenza di restauratori qualificati nelle fasi di recupero e non è dunque sempre possibile. Il materiale può permanere all'interno dei container freezer per un periodo anche prolungato (mesi, addirittura anni), avendo cura di evitare cicli di scongelamento/congelamento con conseguente formazione di cristalli di ghiaccio deleteri per l'integrità dei supporti. Lo scongelamento e l'asciugatura dei beni sono eseguiti in piccoli lotti, dove possibile attraverso il metodo della liofilizzazione (v. A.7) che permette di evitare il passaggio alla fase liquida dell'acqua, evitando fenomeni di migrazione delle mediazioni grafici idrosolubili. La liofilizzazione, tuttavia, è applicabile ad alcune tipologie di materiale e non consente la completa disinfezione del materiale eventualmente contaminato. In casi di elevata contaminazione di un ingente quantitativo di beni, prima della fase di asciugatura, è pertanto ipotizzabile un trattamento con radiazioni ionizzanti gamma su materiale ancora congelato o parzialmente scongelato.

Dopo l'essiccazione, in assenza di preventivo lavaggio, è indispensabile l'eliminazione dei residui secchi e della polvere, comunque necessaria per allontanare le strutture fungine disidratate (v. A.8). Sono inoltre necessarie la pressatura o spianatura (a seconda del materiale) e l'eventuale restauro, parziale o totale degli oggetti.

A.7) Liofilizzazione

La liofilizzazione è stata applicata alla conservazione di archivi e biblioteche a partire dagli anni Cinquanta del secolo scorso, con diverse sperimentazioni che hanno incluso dapprima camere a vuoto poi veri e propri liofilizzatori.⁶³ La tecnica è stata sperimentata dopo l'incendio del 1952 alla Biblioteca del Parlamento di Ottawa, nel 1971 dopo l'incendio della Biblioteca Regionale di Godthab, nel 1973, dopo l'incendio al Military Personal Records Center di St. Louis e, in Italia, dopo l'acquisto di un liofilizzatore nel 1997 presso la Biblioteca Nazionale Centrale di Firenze e con il primo impianto acquistato da una ditta privata nel 2003.

La liofilizzazione è un processo di asciugatura di materiali bagnati che sfrutta il fenomeno della sublimazione a bassa pressione. Il processo fisico della sublimazione permette all'acqua di passare dallo stato solido a quello gassoso evitando lo stato liquido (Fig. 9).

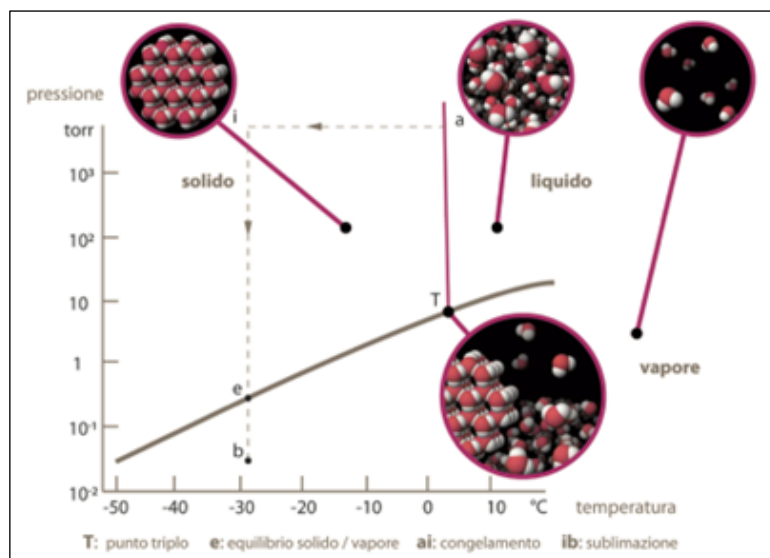


Fig. 9. Rielaborazione del diagramma delle fasi dell'acqua di Thomson limitato alle temperature prossime allo zero, a cura di Rita Capitani.⁶⁴

È richiesta una camera a vuoto associata a un condensatore, nella quale viene applicato un calore controllato e l'acqua congelata viene allontanata per sublimazione evitando cambiamenti dimensionali. Più elevato è il calore, più velocemente avviene il processo. Alcuni impianti lavorano tra i 30 °C e i 65 °C, impiegando sonde che monitorino pressione, temperatura e contenuto di umidità dei materiali. Test condotti sui materiali hanno

⁶³ PETER WATERS, *Procedures for Salvage of Water-damaged Library Materials*, Library of Congress, 1975.

⁶⁴ FRANÇOISE FLIEDER, CHRISTINE CAPDEROU, MICHEL DUCHEIN, *Sauvegarde des collections du Patrimoine. La lutte contre les détériorations biologiques*, CNRS Editions, 1999.

verificato l'assenza di effetti negativi sulle proprietà chimico-fisiche dei supporti cartacei fino a temperature di sublimazione pari a 65 °C.⁶⁵ Nella prassi operativa i restauratori scongelano parzialmente i beni congelati per una più facile introduzione nel liofilizzatore. Il parziale scongelamento superficiale permette di rimuovere tramite lavaggio controllato gli eventuali fanghi alluvionali che avvolgono i materiali, nel caso non fossero stati rimossi durante le fasi di recupero. All'interno della camera di trattamento, il materiale viene poi ricongelato in circa 6 ore a -5 °C prima dell'avvio della sublimazione a bassa pressione. La dimensione delle camere dei liofilizzatori disponibili in Italia è in grado di ospitare fino ad un massimo di 1,5 m³ di materiale e il processo dura circa 5-6 giorni. È da sottolineare che questo processo di scongelamento-ricongelamento, nonostante gli indubbi vantaggi sopra menzionati, può comportare il rischio di produzione di pericolosi cristalli di ghiaccio sulle parti esterne dei beni con possibili danni ai supporti.

La tecnica non permette di distaccare le carte patinate già compattate e comporta una forte disidratazione dei materiali. Quest'ultimo motivo la rende incompatibile con alcune tipologie di manufatti. La liofilizzazione non può essere applicata alla carta termica ed è sconsigliata su legature in cuoio e pergamena, nastri magnetici e numerosi processi fotografici. Il processo provoca infatti la perdita di densità e della caratteristica lucentezza di alcune stampe su carta, dovuta alla perdita di acqua legata oltre alla distruzione dei colloidali. Nonostante la sua efficacia e la relativa velocità del processo di asciugatura, la liofilizzazione presenta dei limiti: elevati costi che possono far lievitare tempi e costi del congelamento, elevati consumi energetici, scarsa disponibilità, nel nostro paese, di impianti specifici per il recupero di beni culturali e, fattore importante, non favorisce una totale eliminazione delle contaminazioni microbiche presenti nei supporti.⁶⁶ Possono sopravvivere, in particolare, le spore dormienti.⁶⁷ L'elevato grado di disidratazione raggiunto sui supporti, tuttavia, permette la rimozione del particolato biologico attraverso una successiva fase di depolveratura (v. A.6) cui devono far seguito la spianatura e l'eventuale restauro.

Nel caso in cui, al termine delle fasi di recupero e asciugatura di elevati quantitativi di materiale, persista un elevato grado di contaminazione, è possibile prevedere l'attuazione di trattamenti di decontaminazione a livello di massa. Questi trattamenti sono generalmente riservati a situazioni in cui la presenza di microrganismi o di altri agenti contaminanti non possa

⁶⁵ MARINA BICCHIERI, MICHELA MONTI, FRATI & LIVI, *La liofilizzazione quale intervento di recupero di volumi danneggiati da catastrofi naturali*, Atti del IV congresso nazionale di archeometria, Pisa 2006, a cura di Claudio D'Amico, Bologna, Pàtron, 2007, pp. 671-678.

⁶⁶ FEDERICA TROIANO et al., *La liofilizzazione quale intervento di recupero di volumi alluvionati ed attaccati da microfunghi*, in *Prima, durante... invece del restauro*, Atti del Congresso (Parma, 16-17 novembre 2012), a cura di Chiara Lodi, Cristiana Sburlino, Saonara, Il Prato, 2012.

⁶⁷ MARY-LOU E. FLORIAN, *Fungal facts: Solving Fungal Problems on Heritage Collections*, in *Museums and Archives*, London, 2002, pp. 85-97.

essere efficacemente eliminata con le sole procedure di asciugatura o con interventi tradizionali.

Tra le opzioni disponibili, si può considerare l'impiego di radiazioni gamma soprattutto quando è necessario trattare ingenti quantità di materiale. Per un numero ridotto di beni da trattare possono invece essere ipotizzati interventi localizzati (v. B.2). Prima di poter tornare a scaffale, il materiale deve riassorbire umidità ed essere monitorato per un tempo quantificato in circa tre settimane.

A.8) Pulitura meccanica

Come ricordato in precedenza, la mancata manutenzione periodica dei depositi di archivi e biblioteche può determinare una elevata carica microbica dell'aria a causa della presenza di spore fungine nella polvere depositata sulle superfici (v. D.1). La depolveratura eseguita utilizzando aspirapolveri dotati di filtri HEPA (*High Efficiency Particulate Air Filter*) è una procedura adatta per rimuovere la maggior parte del micelio fungino e delle spore negli ambienti deputati alla conservazione e sulle superfici degli arredi, evitando la dispersione di materiale biologico in ambiente.

La depolveratura delle superfici esterne dei volumi e delle buste d'archivio, denominata talvolta "depolveratura esterna" va effettuata solo sul materiale asciutto, che presenti un contenuto d'acqua inferiore al 10%, dotandosi di DPI - mascherine e guanti - per prevenire l'esposizione delle mucose ad agenti patogeni veicolati dalla polvere contaminata. Tale operazione periodica, che nelle biblioteche pubbliche statali italiane dovrebbe svolgersi a non oltre cinque anni di distanza, come determinato dall'art. 34 del DPR 1501/1967,⁶⁸ può essere fruttuosamente associata alla mappatura dello stato di conservazione dei materiali, offrendo l'occasione di segnalare quali manufatti presentano danni o fragilità che richiedano interventi conservativi mirati.

La pulitura meccanica delle pagine dei volumi e dei singoli documenti, talvolta denominata impropriamente "depolveratura interna" dovrebbe essere realizzata scongiurando la perdita di informazioni materiali rilevanti e impiegando supporti angolari che prevengano danni alle legature. Sono da evitarsi soffianti a potenza non regolabile che possano provocare danni meccanici ai supporti trattati. Sulle emulsioni fotografiche, facilmente graffiabili, si utilizzano soffiatori ad aria manuali.

A seguito di trattamenti di disinfezione, la pulitura meccanica dei manufatti è necessaria per rimuovere fisicamente i residui biologici resi inattivi dall'intervento. Oltre agli aspiratori, vengono impiegati pennelli e gomme testate per la conservazione degli specifici materiali trattati. Per gli audiovisivi e i supporti sonori sono in uso strumentazioni meccaniche progettate per ridurre al minimo l'azione abrasiva e adattarsi alle diverse superfici.

⁶⁸ Regolamento organico delle biblioteche pubbliche statali, GU n.116 del 08/05/1968 - Supplemento Ordinario n. 1160, ultimo aggiornamento all'atto pubblicato il 10/09/1984.

B) Metodi chimici

I metodi di disinfezione chimica dei beni in oggetto possono essere applicati in ambiente o in cella a seconda del prodotto e del suo stato fisico. La maggior parte di essi si somministra in ambiente previa protezione con DPI e ha effetto disinfettante più o meno efficace sulle spore fungine e i batteri sporigeni, notoriamente molto resistenti; un'eccezione riguarda l'ossido di etilene che è stato a lungo un sistema utilizzato in celle a pressione e temperatura controllate per ragioni di sicurezza e per garantirne l'efficacia.

B.1) Ossido di etilene

L'unico gas ritenuto efficace contro microrganismi e insetti è l'ossido di etilene $[(CH_2)_2O]$, che ha azione sterilizzante. Il gas non rimuove però fisicamente le spore dei funghi e i frammenti di micelio che persistono sui supporti trattati, per cui il potenziale allergenico dei materiali resta intatto. Per questo motivo risultava essenziale ed era prescritta, dopo ogni trattamento, la depolveratura con aspiratori muniti di filtri HEPA. L'International Agency on Research on Cancer (IARC) ha classificato l'ossido di etilene (EtO) ed altri composti – tra questi la formaldeide, anch'essa impiegata in passato nella disinfezione del materiale archivistico e librario – come cancerogeni noti per l'uomo.⁶⁹ L'EtO era già stato vietato in anni recenti per il trattamento dei beni culturali in diversi paesi, non solo europei, a causa delle sue caratteristiche cancerogene e mutagene. Tramite la Decisione di esecuzione (UE) 2025/1074, la Commissione europea ha vietato definitivamente l'utilizzo dell'ossido di etilene come sostanza biocida di tipo di prodotto 2 (disinfettanti e alghicidi non destinati all'applicazione diretta sull'uomo o animali) che includono il materiale librario e archivistico, in conformità al regolamento UE N. 528/2012 BPR.

Per completezza di informazione, e in considerazione della recente variazione incorsa nel quadro normativo italiano, il metodo viene comunque trattato riportando informazioni omogenee a quelle relative alle altre tecniche di disinfezione.

A titolo di esempio si riportano le fasi del protocollo di intervento impiegato per il trattamento con ossido di etilene dei materiali di archivi e biblioteche relativo ad interventi effettuati tra il 2019 e il 2023 in Emilia-Romagna:

- deumidificazione del materiale fino a portare il contenuto d'acqua all'8-10% (valori inferiori al 6% non consentono una buona penetrazione del gas mentre con valori troppo elevati il gas reagirebbe con l'acqua formando il composto inattivo glicole etilenico);

⁶⁹ INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER, IARC, *Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, vol. 100, *A Review of Human Carcinogens Part F: Chemical Agents and Related Occupations*, Lyon, France, International Agency for Research on Cancer, World Health Organization, 2012; National Toxicology Program, NTP, *Report on Carcinogens*, Fifteenth Edition, Research Triangle Park, NC: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, 2021, DOI: 10.22427/NTP-OTHER-1003, <<https://ntp.niehs.nih.gov/go/roc15>>.

- inserimento di indicatori chimici (di processo, multivariabili, o emulatori)⁷⁰ e indicatori biologici *Bacillus atrophaeus* ATCC® 9372⁷¹ all'interno dei materiali e in diversi punti della cella secondo un preciso schema;
- condizionamento dell'autoclave a 20 °C (una T compresa tra 20-30 °C è necessaria a garantire una buona attività del gas) e 60% di U.R.;
- depressione a 0,9 atmosfere;
- immissione del gas (12% EtO in quantità di 300 gr/m³ e 88% di gas inerte, generalmente CO₂) ed il suo mantenimento per 48 ore;
- evacuazione del gas, suo abbattimento e filtraggio;
- 20-25 lavaggi d'aria per l'eliminazione dei residui da documentare mediante dispositivo di rilevazione del gas Dräger®;
- verifica dell'efficacia del trattamento mediante indicatore chimico e biologico;
- isolamento per lungo periodo del materiale, successivamente al trattamento, in ambienti aerati e con volumi aperti a ventaglio per favorire ulteriormente l'eliminazione del gas.

In Italia, l'EtO fu largamente utilizzato per il trattamento dei materiali danneggiati dall'alluvione del 1966, grazie alle esperienze già condotte in Francia e in Polonia.⁷² La sterilizzazione con EtO divenne in seguito una metodica molto utilizzata dove i trattamenti vennero impiegati non solo in seguito ad eventi emergenziali ma anche a scopo "preventivo". Celle a gas per il trattamento dei materiali infestati dagli insetti (Fig. 10) erano già state attivate negli Istituti come Abbazia di San Nilo a Grottaferrata, ICPL, CFLR e Biblioteca Nazionale di Roma oltre che di Firenze e molte ditte private si attrezzarono con autoclavi fisse e mobili per i trattamenti con EtO. Nel 1985, per intervento del Ministero per i Beni Culturali ed Ambientali, fu ribadito che tali interventi di sterilizzazione si sarebbero dovuti espletare previa esecuzione di sopralluoghi tecnici e di analisi biologiche preliminari, seguite dalla certificazione dell'efficacia degli interventi eseguiti da CFLR e ICPL mediante l'impiego di test biologici con *Bacillus subtilis* e di indicatori chimici.⁷³

⁷⁰ Generalmente utilizzati gli indicatori di processo che virano di colore al contatto col gas.

⁷¹ Nei prodotti commerciali impiegati il completamento del ciclo di sterilizzazione è segnalato da un cambiamento di colore dell'indicatore chimico, tipicamente da verde a giallo, che permette una lettura rapida dell'avvenuta esposizione alle condizioni operative. Grazie alla sua elevata resistenza a radiazioni, calore e agenti chimici, le spore del microrganismo *Bacillus atrophaeus* sono usate invece negli indicatori biologici per validare, dopo incubazione per 24-48 ore nei sistemi rapidi o sette giorni con procedura standard, l'efficacia del processo di sterilizzazione.

⁷² FAUSTA GALLO, *Attività del laboratorio di biologia dell'Istituto di Patologia del Libro dal 1961 al 1972*, «Bollettino dell'Istituto di Patologia del Libro "Alfonso Gallo"», XXXI, 1972, pp. 110-111.

⁷³ GALLO, *Problemi biologici: interventi di massa*, pp. 61-67, cit.; MARIA CARLA SCLOCCHI, *La disinfezione e la disinfestazione dei supporti archivistici*, in *Chimica e biologia applicate alla conservazione degli archivi*, Roma, Ministero per i Beni e le Attività Culturali, 2002, pp. 557-575.



Fig. 10: Cella a gas: veduta anteriore, negativo su vetro, gelatina ai sali d'argento, 1953. Fonte: ICPAL, Fondo IST, n. 22, su concessione del Ministero della Cultura.

Le controindicazioni all'impiego del gas, come anche la formazione, in presenza di alogenuri nei supporti, di cloridrina di etilene, altrettanto tossica,⁷⁴ hanno dato nuovo impulso alle tecnologie delle radiazioni che sono tornate di attualità e che sono sottoposte, come visto in precedenza, a ulteriori approfondimenti (v. nota 12). Le sperimentazioni sul potenziale utilizzo di radiazioni γ per il recupero di materiali biodeteriorati, svolte a partire dagli anni Sessanta del secolo scorso, subirono infatti una battuta d'arresto proprio causata dalla diffusione del trattamento di sterilizzazione con EtO.

Tra le alternative all'EtO, nell'ambito dei metodi chimici, recenti studi⁷⁵ hanno interessato il perossido di idrogeno vaporizzato (VHP), testato però solo sui materiali tessili, che ha mostrato effetto biocida paragonabile a quello dell'EtO, con il vantaggio di un buon profilo di sicurezza e compatibilità ambientale.

B.2) Soluzioni idroalcoliche

Studi consolidati sono rivolti all'utilizzo di trattamenti di disinfezione con soluzioni idroalcoliche. Fin dagli anni Settanta del secolo scorso l'etanolo o alcol etilico (C_2H_5OH) è in uso per nebulizzazione o per tamponatura.

⁷⁴ RICHARD JOHN LOMAS, HELEN L. GILLAN, JOHN BRIAN MATTHEWS, *An Evaluation of the Capacity of Differently Prepared Demineralised Bone Matrices (DBM) and Toxic Residuals of Ethylene Oxide (EtOx) to Provoke an Inflammatory Response in Vitro*, «Biomaterials», XXII, 2001, 9, pp. 913-921, DOI: 10.1016/S0142-9612(00)00255-6.

⁷⁵ ANNA WAWRZYK et al., *Vapourised Hydrogen Peroxide (VHP) and Ethylene Oxide (EtO) Methods for Disinfecting Historical Cotton Textiles from the Auschwitz-Birkenau State Museum in Oświęcim, Poland*, *International Biodeterioration & Biodegradation*, CXXXIII, 2018, pp. 42-51, DOI: 10.1016/j.ibiod.2018.05.016.

Fausta Gallo, biologa dell'ICPL, che diresse il laboratorio di biologia dal 1972 al 1995, già in quegli anni evidenziava le potenzialità della disinfezione con alcol, riconducendone l'efficacia alla capacità di denaturare le proteine di membrana e di inibire la produzione di metaboliti essenziali per la sopravvivenza dei microrganismi.⁷⁶ La soluzione consigliata (70/30, ovvero soluzione idro-alcolica al 70% v/v, ottenuta miscelando 70 ml di alcol al 99% e 30 ml di acqua distillata) risulta più efficace dell'etanolo anidro perché la presenza di acqua favorisce la permeabilità delle membrane cellulari e consente una più efficiente denaturazione delle proteine, potenziando l'azione biocida dell'etanolo.⁷⁷

Negli anni successivi, l'utilizzo dell'etanolo è stato applicato anche a mezzo di vapori, come antifungino, da Bacílková⁷⁸ che studia e verifica l'efficacia su carta da filtro nei confronti di *Penicillium notatum* e *Aspergillus niger* utilizzando concentrazioni comprese tra il 30 e il 90%.

Un primo lavoro in merito all'utilizzo di tale trattamento su supporti fotografici è quello di Lucas et al.⁷⁹ che studia l'effetto biocida nei confronti di *Penicillium chrysogenum* e *Aspergillus niger* testati su stampe alla gelatina all'interno di una camera di vaporizzazione della soluzione di acqua distillata ed etanolo (30:70 v/v) per 2 ore.

Rottier et al.⁸⁰ hanno verificato l'effetto fungicida dell'etanolo su diversi tipi di carte esposte per 24 ore a vapori di soluzione idroalcolica, puntualizzando che l'esposizione minima di 2 ore ha solo effetto fungistatico su una ampia gamma di ceppi fungini.

La miscela di butanolo, o alcol butilico (C₄H₁₀O), è stata sperimentata da Tomšová et al.⁸¹ su carte fotografiche alla gelatina, ottenendo risultati

⁷⁶ FAUSTA GALLO, *Trattamento con gli alcoli dei materiali librari danneggiati dai microrganismi*, «Bollettino dell'Istituto di Patologia del Libro "Alfonso Gallo"», XXX, 1971, pp. 123-134.

⁷⁷ SÍLVIA OLIVEIRA SEQUEIRA, *Fungal Biodeterioration of Paper: Development of Safer and Accessible Conservation Treatments*, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa, 2016, pp. 1-258.

⁷⁸ BRONISLAVA BACÍLKOVÁ, *Study of the Effect of Butanol Vapours and other Alcohols on Fungi*, «Restaurator», XXVII, 2006, 3, pp. 186-199, DOI: 10.1515/REST.2006.186.

⁷⁹ CHLOÉ LUCAS, FRANCK DÉNIÉL, PHILIPPE DANTIGNY, *Ethanol as an Antifungal Treatment for Silver Gelatin Prints: Implementation Methods Evaluation*, «Restaurator», XXXVIII, 2017, 3, pp. 235-248, DOI: 10.1515/res-2017-0003; CHLOÉ LUCAS, GREG HILL, NANCY E. BINNIE, *Disinfection of Photographic Materials with Ethanol Vapours: Preliminary Evaluation of the Effects on Chromogenic Prints*, «Journal of the Canadian Association for Conservation (J.CAC)», XLV, 2020, pp. 29-50, <https://www.cac-accr.ca/wp-content/uploads/dlm_uploads/2021/12/jcac45_doc2_lucas.pdf>.

⁸⁰ VALENTIN ROTTIER, RAPHAEL GOURRONC, CAROLINE TEISSIER, *Traitements aux vapeurs d'éthanol de papiers altérés par des micro-organismes*, «Actualités de la Conservation», XXXVIII, 2023, pp.1-9, <<https://bnf.hal.science/hal-04318663/document>>.

⁸¹ KATEŘINA TOMŠOVÁ, MICHAL ĎUROVIČ, *Influence of Disinfection Methods on the Stability of Black and White Silver Gelatin Prints*, «Journal of Cultural Heritage», XXIV, 2017, pp. 78-85, DOI: 10.1016/j.culher.2016.10.004; KATEŘINA TOMŠOVÁ, MICHAL ĎUROVIČ, KLÁRA DRÁBKOVÁ, *The Effect of Disinfection Methods on the Stability of Photographic Gelatin*, «Polymer Degradation and Stability», CXXIX, 2016, pp. 1-6, DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2016.03.034.

incoraggianti. Knotek e collaboratori⁸² hanno indagato il suo effetto sul supporto in triacetato di cellulosa (TCA)⁸³ di pellicole cinematografiche, rilevando una leggera diminuzione della viscosità intrinseca del polimero plastificato⁸⁴ con trifenilfosfato.⁸⁵ I test condotti con una miscela commerciale di alcol isopropilico (C_3H_8O)⁸⁶ hanno evidenziato una diminuzione delle proprietà meccaniche, del contenuto di plastificante e del valore di viscosità intrinseca dei campioni.

Le modalità di applicazione di soluzioni idroalcoliche a concentrazione nota, individuate mediante test preliminari, sono nella prassi del restauro calibrate a seconda della consistenza quantitativa dei beni, delle caratteristiche dei supporti, della gravità e dell'estensione dell'attacco biologico.

- a) Immersione: prevede l'imbibizione e la permanenza del manufatto nella soluzione individuata, in assenza di mediazioni grafiche solubili;
- b) tamponatura: prevede la somministrazione della soluzione solo su aree ridotte mediante il contatto diretto con un tampone (Fig. 11);
- c) nebulizzazione: produce agglomerati di goccioline di dimensioni infinitesimali che dipendono dalle caratteristiche dell'ugello di erogazione, dal numero di erogazioni per unità di superficie e dal tempo di applicazione sulle diverse porzioni del manufatto;
- d) esposizione a vapori: comporta un cambiamento di stato della sostanza per variazione di temperatura e la sua deposizione sull'oggetto da trattare all'interno di uno spazio confinato. Sono richiesti lunghi tempi di trattamento ma il metodo risulta vantaggioso quando si è in presenza di materiali fortemente degradati che non possano essere sottoposti all'immersione e all'imbibizione, o al contatto diretto con un tampone.

⁸² VÍTEZSLAV KNOTEK et al., *Influence of Disinfection Methods on Cinematographic Film*, «Materials», XVI, 2023, 9, 3493, DOI: 10.3390/ma16093493.

⁸³ TCA, FOMA Bohemia, Czech Republic. Il TCA è un estere di cellulosa e acido acetico e possiede tre gruppi acetilici di $COCH_3$. Il triacetato, difficilmente modellabile a causa della sua elevata temperatura di rammollimento, è stato utilizzato soprattutto come supporto per le pellicole fotografiche e cinematografiche col nome di *safety film*.

⁸⁴ Ricordiamo che al supporto plastico viene aggiunto un plastificante per consentirne la flessibilità.

⁸⁵ Una soluzione acquosa di n-butanolo al 96% in peso preparata mescolando n-butanolo al 99% con acqua deionizzata è stata utilizzata per 48 ore a 23 ± 2 °C. Dopo il trattamento è stato misurato il grado di sostituzione dei gruppi ossidrilici della cellulosa con gruppi acetilici (DS) il quale determina diverse proprietà fisiche e chimiche, in parte influenzate anche dalla tipologia e dalla quantità di plasticizzante aggiunto al polimero per favorirne la lavorabilità.

⁸⁶ Bacillol® AF (Bode Chemie, Hamburg, Germany).



Fig. 11: Rimozione di residui di fango da disegno su carta trasparente e disinfezione localizzata realizzata per tamponatura di soluzione idroalcolica con spugna in alcol polivinilico (PVA).
Foto: Rita Capitani.

B.3) Sali di ammonio quaternario

I composti organici a base di sali di ammonio quaternario (QACs) sono tensioattivi in grado di agire sulla membrana cellulare dei microrganismi per affinità con i fosfolipidi, alterandone le funzioni osmoregolatrici e fisiologiche. Sono considerati microbicidi sporostatici in quanto inibiscono solo la germinazione e la crescita delle spore. I composti possono avere effetti significativi già a diluizioni dell'1%, in acqua o etanolo, per nebulizzazione e a pennello. La loro facilità di diluizione ne ha permesso l'impiego anche come conservanti addizionati agli adesivi.⁸⁷ Noto però è il loro effetto negativo sulla cellulosa e, per le proprietà tensioattive, anche sulla stabilità degli inchiostri. Sui supporti cartacei tendono a persistere e ad accumularsi; alcuni sono considerati altamente tossici con effetto dannoso sul sistema immunitario.⁸⁸ A causa della loro ecotossicità e della parziale sicurezza per gli operatori, tali prodotti sono in via di sostituzione con altri, più sostenibili, in corso di sperimentazione.

Durante la pandemia COVID-19 sono state introdotte sul mercato macchine che utilizzano sali di ammonio quaternario solubili in acqua per la disinfezione automatica dal virus dei volumi correnti delle biblioteche. Si distinguono configurazioni con nastri trasportatori flessibili,⁸⁹ con griglie e

⁸⁷ BENEDETTA PAOLINO, MARIA CRISTINA SORRENTINO, SEVERINA PACIFICO, *Greener Solutions for Biodeterioration of Organic-Media Cultural Heritage: Where Are We?* «Heritage Science volume», XII, 2024, pp. 9-10, 334, DOI: 10.1186/s40494-024-01442-8.

⁸⁸ MATTIAS NITTÉRUS, *Ethanol as Fungal Sanitizer in Paper Conservation*, «Restaurator», XXI, 2000, 1, pp. 101-115, DOI: 10.1515/REST.2000.101.

⁸⁹ Nebula®, <<https://www.depulvera.com/product/nebula>>. I materiali scorrono orizzontalmente attraversando inizialmente una camera di nebulizzazione, nella quale un disinfettante a base di composti di ammonio quaternario viene applicato uniformemente

con carrello *roll*, rampa di risalita e pavimento portante.⁹⁰ Anche prescindendo dagli effetti avversi dei QACs sui materiali ed evitandone quindi l'impiego sui manufatti di pregio, il sistema meccanico utilizzato è applicabile al solo materiale rilegato, privo di fragilità strutturali e che presenti un rivestimento in buono stato di conservazione. Potendo essere trasportate *in loco*, queste macchine vengono proposte dai produttori per la gestione periodica o straordinaria delle operazioni di sanificazione, in associazione a eventuale criodisinfestazione, evitando il trasporto dei materiali presso i laboratori specializzati e riducendo i tempi di indisponibilità dei beni per la consultazione.⁹¹

Sono in commercio sistemi meccanici con camera di trattamento trasparente che associano la depolveratura realizzata mediante un getto d'aria a potenza controllata, senza l'azione diretta di un operatore, all'atomizzazione dell'agente disinfettante.⁹²

Alcune prove sperimentali in corso su miscele di isotiazolinoni,⁹³ come il Khaton®, hanno evidenziato che l'uso di questi biocidi comporta meno problematiche per le apparecchiature rispetto ai QACs, i cui residui tendono ad accumularsi all'interno dei dispositivi elettromeccanici, causando potenziali danni. Si ricorda che tali macchinari sono stati progettati per l'utilizzo su materiali privi di valore storico e in condizioni conservative tali da poter subire operazioni automatiche senza danni meccanici per i supporti. Va sottolineato che la scelta dell'agente biocida per la disinfezione dei beni di archivi e biblioteche – che può comportare rischi di danneggiamento dei materiali nel lungo periodo – così come la selezione dei beni che possano essere sottoposti a trattamenti meccanici automatizzati, devono essere valutate da un restauratore abilitato.

B.4) Composti fenolici

Il meccanismo biocida dei composti fenolici è caratterizzato dalla distruzione della membrana cellulare per inibizione dell'ergosterolo e per un'azione ossidativa. Tra questi ricordiamo il timolo, noto anche come 2-isopropil-5-metilfenolo (IPMP), fenolo monoterpeneico che si trova negli oli essenziali isolati da Lamiaceae (generi *Thymus*, *Origanum*, *Ocimum* e *Monarda*), e l'o-fenilfenolo di sintesi (OPP). Il timolo, con effetto fungistatico e batteriostatico ma anche battericida e in parte fungicida, è un irritante locale e può dar luogo a reazioni allergiche e risultare tossico per le vie aeree. Nonostante la volatilità della sostanza comporti una bassa

sulla loro superficie esterna, in presenza di un sistema di filtrazione e aspirazione; successivamente, passano nella camera di asciugatura.

⁹⁰ Tergeosan®, <<https://www.tergeosan.com/docursan1>>.

⁹¹ *Ibidem*.

⁹² *Ibidem*.

⁹³ Gli isotiazolinoni sono composti eterociclici solubili sia in solventi organici polari che apolari, in grado di ostacolare lo sviluppo di funghi e batteri ed applicabili su vernici, adesivi e film plastici. MALALANIRINA SYLVIA RAKOTONIRAINY, FRANÇOISE FLIEDER, *L'assainissement des aires de stockage par thermonebulisation*, «Nouvelles de l'ARSAG», X, 1994, pp. 16-17.

permanenza di residui nei materiali, dato il suo utilizzo ancora attuale, la persistenza nei manufatti necessiterebbe di ulteriori verifiche scientifiche.

L'OPP, dall'azione disinfettante, ha effetti genotossici sull'uomo ed è irritante per occhi e cute. Può causare inoltre la deposizione di una patina grassa sulle superfici. Gli autori raccomandano di eseguire l'eventuale processo di nebulizzazione in ambiente solo dopo la rimozione delle collezioni.⁹⁴

B.5) Acidi e sali

Tra i sali impiegati nella conservazione dei materiali di archivi e biblioteche figura il propionato di calcio $\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_5\text{COO})_2$, sale dell'acido propionico usato per trattamenti di deacidificazione di supporti cartacei. Il sale è disciolto in alcol in concentrazione tra i 3 e i 3,5 g/L; in acqua, la stessa concentrazione può essere innalzata fino a 5 g/L.⁹⁵ Nonostante la sua blanda attività inibitoria su microfunghi e alcuni batteri, l'efficacia antimicrobica si esprime al meglio a pH debolmente acido e l'aggiunta di sostanze acide non è quasi mai compatibile con la conservazione della carta.⁹⁶

Una formulazione contenente parabeni e propionato di calcio ha mostrato migliore attività antifungina rispetto al solo propionato di calcio.⁹⁷ Zotti et al.⁹⁸ hanno testato l'attività antifungina su carta del propionato in soluzione a base di etanolo e in soluzione acquosa verificando la maggiore efficacia del sale in alcol. Anche Neves et al.⁹⁹ hanno portato avanti un lavoro analogo sull'azione di questo sale. Tra gli effetti sulla cellulosa si evidenziano un debole aumento del pH senza effetti acidificanti e un lieve incremento dell'ingiallimento.

⁹⁴ BEATA GUTAROWSKA et al., *A Modern Approach to Biodeterioration Assessment and the Disinfection of Historical Book Collections*, Institute of Fermentation Technology and Microbiology Lodz University of Technology, 2016.

⁹⁵ ICPAL, BNCF, CFLR, *Capitolato speciale tecnico tipo. Restauro con smontaggio del libro e del documento*, Roma, 2005.

⁹⁶ SILVIA OLIVEIRA SEQUEIRA, EURICO J. CABRITA, MARIA FILOMENA MACEDO, *Antifungals on Paper Conservation: An Overview*, «International Biodeterioration & Biodegradation», LXXIV, 2012, pp. 67-86, DOI: 10.1016/j.ibiod.2012.07.011.

⁹⁷ SILVIA OLIVEIRA SEQUEIRA, *Fungal Biodeterioration of Paper: Development of Safer and Accessible Conservation Treatments*, Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Conservação e Restauro do Património, Especialidade em Ciências da Conservação, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2016.

⁹⁸ MIRCA ZOTTI, ALICE FERRONI, PAOLO CALVINI, *Inhibition properties of simple fungistatic compounds on fungi isolated from foxing spots*, «Restaurator», XXVIII, 2007, pp. 201-217, DOI: 10.1515/REST.2007.201.

⁹⁹ EVA RAQUEL NEVES, STEPHAN SCHÄFER, ALAN JOHN LANDER PHILLIPS, *Antifungal Effect of Different Methyl and Propyl Paraben Mixtures on the Treatment of Paper Biodeterioration*, in «International Biodeterioration & Biodegradation», LXIII, 3, 2009, pp. 267-272, DOI: 10.1016/j.ibiod.2008.07.011.

B.6) Azoli

Questi composti possono contenere due atomi di azoto nell'anello azolico (imidazoli) o tre atomi di azoto (triazoli). Si tratta di biocidi che inibiscono la biosintesi dell'ergosterolo, causando alterazioni nella permeabilità della membrana¹⁰⁰. L'uso di composti azolici per la disinfezione è stato testato da Rakotonirainy et al. (1999) mediante nebulizzazione termica di diversi derivati azolici ad azione fungistatica, non fungicida, in un deposito vuoto dopo contaminazione fungina del materiale archivistico e librario. La maggiore riduzione delle spore nell'aria è stata ottenuta con econazolo al 5% (6,66 ml/m³) e tiabendazolo al 10% (5 ml/m³).

Uno studio¹⁰¹ condotto *in vivo* e *in vitro* su provini di carta artificialmente contaminati con alcuni ceppi fungini biodeteriogeni ha evidenziato come gli azoli avessero un'ottima azione fungicida già a basse concentrazioni (10⁻³ M), in particolare il miconazolo e l'econazolo. Sono state testate con successo formulazioni di clotrimazolo e nanoparticelle di idrossido di calcio e una soluzione al 70% di etanolo su campioni di carta infettati con spore dei funghi più diffusi negli ambienti di conservazione.¹⁰² In Francia è in uso un prodotto commerciale a base di econazolo nitrato (*Econacide alcoolique*), utilizzabile, in soluzione acquosa e alcolica, per il trattamento topico di piccoli quantitativi di materiale infetto.¹⁰³

B.7) Anidride carbonica supercritica

Da menzionare è anche l'anidride carbonica supercritica (scCO₂) utilizzata nel campo della medicina, dei biomateriali e dell'alimentazione. Si tratta di una forma particolare dall'anidride carbonica (CO₂), che assume uno stato fisico-chimico specifico quando è confinata in un ambiente con temperatura e pressione superiori al punto critico¹⁰⁴, cioè T > 31,1 °C e P > 73,8 bar.¹⁰⁵ In queste condizioni, la CO₂ non è più né un gas né un liquido, ma assume

¹⁰⁰ ALEX A. PÉREZ-RIVERA, TING HU, MARYLIN J. AARDEMA, *Evaluation of the Genotoxicity of the Imidazole Antifungal Climbazole: Comparison to Published Results for other Azole Compounds*, in «Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis», DCLXXII, 2009, 1, pp. 27-39, DOI: 10.1016/j.mrgentox.2008.09.011; WILFRIED PAULUS, *Directory of Microbicides for the Protection of Materials – A handbook*, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 2004, pp. 26-28.

¹⁰¹ ANNA ADELE FABBRI et al., *Effect of Different Antifungals on the Control of Paper Biodeterioration Caused by Fungi*, «International Biodeterioration & Biodegradation», XXXIX, 1997, 1, pp. 61-65, DOI: 10.1016/S0964-8305(97)00001-2.

¹⁰² OLIVEIRA SEQUEIRA, *Fungal Biodeterioration of Paper*, cit.

¹⁰³ MARIE-DOMINIQUE PARCHAS, *Comment faire face aux risques biologiques?*, Direction des Archives de France, Paris, 2008.

¹⁰⁴ YAN JUAN WANG et al., *Deacidification of Paper in Supercritical Carbon Dioxide (CO₂SCF) Solvent System with Magnesium Acetate and Calcium Hydroxide*, «Advances Materials Research», CCCXLVII-CCCLIII, 2011, pp. 504-507, DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.347-353.504.

¹⁰⁵ RAJIV KOHLI, *Chapter 5. Applications of Liquid Carbon Dioxide for Removal of Surface Contamination*, in *Developments in Surface Contamination and Cleaning: Applications of Cleaning Techniques*, edit by Rajiv Kohli, K.L. Mittal, Elsevier, XI, 2019, pp. 171-208, DOI: 10.1016/B978-0-12-815577-6.00005-0.

proprietà intermedie tra i due stati.¹⁰⁶ Si comporta quindi come un fluido denso che ha la capacità di diffondere come un gas, ma di dissolvere sostanze come un liquido.

Un primo potenziale prodotto testato per manufatti cartacei antichi interessati da attacco fungino è rappresentato dalla scCO₂ in combinazione con etanolo al 4% e all'8%, in grado di ridurre la contaminazione fungina dei campioni. Il metodo offre vantaggi di eco-compatibilità, economicità e ampia disponibilità, nonché non infiammabilità, senza compromettere la resistenza meccanica delle fibre di cellulosa. Gli autori, Teixeira et al.,¹⁰⁷ ritengono questa procedura un'opzione altamente promettente in futuro per la conservazione e il controllo dei funghi nei materiali cartacei antichi. La sperimentazione di Pydyn et al.¹⁰⁸ mostra alterazioni di cuoio, carta e cotone evidenziate, alle condizioni operative specifiche, con SEM, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), e *X-ray Photoelectron Spectroscopy* (XPS). Lo studio può considerarsi un primo tentativo di determinare dosi efficaci che non comportino danni ai materiali.

B.8) Nanoparticelle metalliche

Le nanoparticelle (NPs) hanno proprietà uniche: una piccolissima taglia e una forte reattività con i materiali tanto da poter essere applicate anche su supporti organici. Alcune NPs composte da argento (Ag), rame (Cu), diossido di titanio (TiO₂) o ossido di zinco (ZnO) mostrano interessanti caratteristiche biocide. La loro azione comporta la distruzione della parete cellulare e della membrana plasmatica con inibizione della sintesi proteica e della replicazione del DNA oltre alla generale ossidazione dei componenti cellulari. Da diversi anni si riportano esperienze di utilizzo di TiO₂ e ZnO depositati in film sottili su materiali cellulosici quali carta e legno¹⁰⁹ come soluzioni *green*. Entrambi producono radicali liberi e perossidi che possono uccidere i microrganismi mediante ossidazione della membrana; tuttavia, le nanoparticelle di TiO₂ necessitano di luce solare o di radiazioni UV, mentre quelle di ZnO agiscono anche al buio.¹¹⁰

¹⁰⁶ Allo stato solido, noto come ghiaccio secco (*dry ice*), l'anidride carbonica viene invece impiegata nella criodisinfestazione, un metodo efficace per l'eliminazione di insetti e acari.

¹⁰⁷ FERNANDA S. TEIXEIRA et al., *Disinfection of Ancient Paper Contaminated with Fungi Using Supercritical Carbon Dioxide*, «Journal of Cultural Heritage», XXX, 2018, pp. 110-116, DOI: 10.1016/j.culher.2017.09.009.

¹⁰⁸ NATALIA PYDYN, KRZYSZTOF KRAŚNICKI, NEL JASTRZĘBIOWSKA, *Assessment of Supercritical CO₂ Treatment on Historical Cotton, Leather, and Paper from the Auschwitz-Birkenau State Museum*, «The Journal of Supercritical Fluids», CCXXV, 2025, 106689, DOI: 10.1016/j.supflu.2025.106689.

¹⁰⁹ ADITYA PRAKASH KANTH, ADITYA KRUSHANG SONI, *Application of Nanocomposites for Conservation of Materials of Cultural Heritage*, «Journal of Cultural Heritage», LIX, 2023, pp. 120-130, DOI: 10.1016/j.culher.2022.11.010; OSAMA M. EL-FEKY et al., *Use of ZnO Nanoparticles for Protecting Oil Paintings on Paper Support against Dirt, Fungal Attack, and UV Aging*, «Journal of Cultural Heritage», XV, 2014, 2, pp. 165-172, DOI: 10.1016/j.culher.2013.01.012.

¹¹⁰ MIAN ADNAN KAKAKHEL et al., *Controlling Biodeterioration of Cultural Heritage Objects With Biocides: A Review*, «International Biodeterioration & Biodegradation», CXLIII, 2019, 104721, DOI: 10.1016/j.ibiod.2019.104721.

Gutarowska et al.¹¹¹ hanno dimostrato che concentrazioni di nanoparticelle di Ag comprese tra 10 e 100 nanomoli (nmol)¹¹² a 90 parti per milione (ppm)¹¹³ erano efficaci nel ridurre i microrganismi presenti sul materiale documentario, isolati nei musei e negli archivi polacchi presi in esame nello studio, pur senza averne completamente chiarito il meccanismo d'azione. Castillo et al.¹¹⁴ hanno investigato nanoparticelle di ossido di magnesio (MgO) per proteggere materiali cartacei del XVIII secolo dall'azione di funghi, senza riscontrare alterazioni sui campioni.

Da tenere in considerazione che, sebbene il Regolamento (UE) 2024/858 della Commissione del 14 marzo 2024 modifichi il regolamento (CE) n. 1223/2009 principalmente per quanto riguarda l'uso dei nanomateriali in cosmesi, esso evidenzia la crescente attenzione normativa verso i nanomateriali, un aspetto rilevante anche per l'impiego di nanoparticelle metalliche nella conservazione dei materiali di archivi e biblioteche, dove vanno valutati i potenziali rischi per gli operatori e i beni.¹¹⁵

B.9) Ozono

L'ozono (O₃) è un allotropo dell'ossigeno, cioè una forma molecolare alternativa dello stesso elemento chimico, costituita da tre atomi di ossigeno anziché due (O₂). Il gas bluastro, che rappresenta uno dei principali costituenti dello smog atmosferico, agisce come inquinante secondario, poiché non viene emesso da una sorgente ma si genera attraverso reazioni chimiche tra inquinanti precursori. A concentrazioni elevate, l'esposizione provoca effetti irritanti, principalmente a livello del tratto respiratorio.¹¹⁶

¹¹¹ BEATA GUTAROWSKA, JUSTYNA SKORA, KATARZYNA ZDUNIAK, *Analysis of the Sensitivity of Microorganisms Contaminating Museums and Archives to Silver Nanoparticles*, «International Biodeterioration & Biodegradation», LXVIII, 2012, pp. 7-17, DOI: 10.1016/j.ibiod.2011.12.002.

¹¹² Unità di misura della quantità di sostanza pari a 10⁻⁹ moli.

¹¹³ L'unità di misura indica il numero di parti di una sostanza presenti in un milione di parti della miscela totale ed è comunemente impiegata per descrivere concentrazioni di gas, inquinanti o soluti.

¹¹⁴ ISABEL FRANCO CASTILLO et al., *Preventing Fungal Growth on Heritage Paper with Antifungal and Cellulase Inhibiting Magnesium Oxide Nanoparticles*, «Journal of Materials Chemistry.B», XLI, 2019, 7, pp. 6412-6419, DOI: 10.1039/C9TB00992B.

¹¹⁵ CATALINA MARAMBIO-JONES, ERIK M.V. HOEK, *A Review of the Antibacterial Effects of Silver Nanomaterials and Potential Implications for Human Health and the Environment*, «Journal of Nanoparticles Research», XII, 2010, 5, pp. 1531-1551, DOI: 10.1007/s11051-010-9900-y; SUSAN W.P. WIJNHOFEN et al., *Nano-Silver – A Review of Available Data and Knowledge Gaps in Human and Environmental Risk Assessment*, «Nanotoxicology», III, 2009, 2, pp. 109-138, DOI: 10.1080/17435390902725914; RADHESH KUMAR, HELMUT MÜNSTEDT, *Silver Ion Release from Antimicrobial Polyamide/Silver Composites*, «Biomaterials», XXVI, 2005, 14, pp. 2081-2088, DOI: 10.1016/j.biomaterials.2004.05.030.

¹¹⁶ ISTITUTO SUPERIORE DI SANITÀ, EPICENTRO, *Inquinamento: gli effetti dell'ozono sulla salute*, <<https://www.epicentro.iss.it/ambiente/ozonoUe>>.

Secondo il D. Lgs. 13 agosto 2010,¹¹⁷ l'ozono è soggetto a livelli di controllo definiti da soglia di informazione e soglia di allarme.

In Italia, soprattutto nella prima fase emergenziale del COVID-19, venivano reclamizzati numerosi dispositivi in grado di generare O₃ per effettuare trattamenti disinfettanti sui materiali archivistici e librari oggetto di consultazione e/o prestito. L'ICPAL, in una nota del maggio 2020,¹¹⁸ sconsigliava di ricorrere a tale uso sia per la mancanza di prove di efficacia sui materiali sia per il rischio di tipo sanitario. In quanto forte ossidante, l'ozono può causare scolorimento di coloranti e pigmenti, ossidazione di carta, pergamena e cuoio, infragilimento di tessuti, di leganti per vernici e di materiali cellulosici. Inoltre, l'ozono, che non è attualmente classificato né come biocida né come presidio medico-chirurgico, presenta criticità legate ai compressori e, più in generale, ai dispositivi impiegati per la generazione del gas, soprattutto nelle applicazioni di sanificazione degli ambienti *indoor*.¹¹⁹ Per i motivi sopra esposti, il suo utilizzo è pertanto sconsigliato.¹²⁰

C) Metodi biologici

C.1) Composti chimici di origine naturale

I prodotti disinfettanti cosiddetti *green* attualmente più studiati sono gli oli essenziali (EO): una miscela di sostanze come idrocarburi, alcoli, fenoli, lattoni, esteri o aldeidi, che, agendo in varie modalità, sono responsabili dell'attività antimicrobica.¹²¹ In particolare, l'attività antifungina è attribuibile alla natura lipofila e al basso peso molecolare dei terpeni e dei terpenoidi che consentono la destabilizzazione della membrana cellulare e della parete cellulare fungina, strutture costituite principalmente da chitina, ergosterolo, β -glucani e mannani.

I composti degli EO possono inibire o arrestare la produzione di queste sostanze causando appunto la distruzione della cellula. Inoltre, oltre a danneggiare gli organelli cellulari, possiedono una azione nociva sulla biosintesi dell'ATP determinando un completo squilibrio dell'attività biologica e morte cellulare. La loro applicazione prevede metodologie a spruzzo e in microatmosfera. Sono in corso sperimentazioni con formulati solidi ottenuti da composti organici volatili (COV) di EO di timolo, carvacrolo ed eugenolo, con elevati livelli di attività antimicrobica e insettorepellente, stabilizzati all'interno di network cristallini di β -ciclodestrine e cocristalli a base di fenazina e carvacrolo, per il trattamento

¹¹⁷ D.Lgs. 13 agosto 2010, n. 155, *Attuazione della direttiva 2008/50/UE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa*.

¹¹⁸ MiBACT IC-RCPAL | 05/05/2020 | 0000672-I | [25.16.01/3/2020], FAQ, cit.

¹¹⁹ ENRICO CINOTTI, *I rischi e i dubbi sull'efficacia del trattamento con l'ozono*, "il Salvagente", 28 aprile 2020, <<https://ilsalvagente.it/2020/04/28/i-rischi-e-i-dubbi-sullefficacia-del-trattamento-con-lozono/>>.

¹²⁰ PARCHAS, *Comment faire face aux risques biologiques?*, cit.

¹²¹ CAPPITELLI, CATTÒ, VILLA, *The Control of Cultural Heritage*, cit.

indiretto dei materiali.¹²² Non sono state rilevate significative variazioni di pH e resistenza alla trazione né variazioni strutturali indagate mediante spettroscopia FTIR e *X-Ray Diffraction* (XRD) su carta Whatman e Kraft invecchiata artificialmente e non invecchiata, sottoposta al trattamento con β -ciclodestrine e cocristalli a base di carvacrolo.¹²³

È stata studiata l'attività antimicrobica di olio di citronella sia nella forma convenzionale (Lg-EO) sia come nanoparticelle (Lg-NE) ottenute mediante tecnica di emulsificazione a bassa energia su quattro ceppi microbici isolati su pergamena antica.¹²⁴ Sono state verificate le proprietà fisiche, meccaniche e morfologiche, della pergamena, sia prima sia dopo invecchiamento artificiale mediante FTIR, SEM, resistenza alla trazione e analisi del colore. La formulazione dell'olio essenziale sotto forma di nanoemulsione ne migliora l'attività antimicrobica, consentendo un effetto biocida maggiore a concentrazioni inferiori rispetto all'olio in forma libera. L'applicazione in forma libera, inoltre, altera le proprietà ottiche dei campioni sia prima sia dopo l'invecchiamento artificiale.

Sebbene la collocazione degli EO sia tra le sostanze *green*, bisogna considerare che molti componenti di questi oli come il carvacrolo o la canfora, per citarne alcuni, possono provocare, a dosi elevate, sensibilizzazione, dermatiti e disturbi endocrini e neurologici.¹²⁵ Si ribadisce che invece la somministrazione in incapsulati di poly(ϵ -caprolactone) o in cocristalli¹²⁶ diminuisce fino all'azzeramento il rischio di fenomeni di sensibilizzazione.¹²⁷ Mentre gli EO sono fitocomplessi idrofobici dalla potenziale tossicità, gli idrolati (ID), idrofili e con bassa attività antimicrobica dovuta all'estrema diluizione dei componenti attivi, risultano essere più versatili, non tossici e poco costosi. Sottoprodotti della

¹²² FELICIA MENICUCCI et al., *Effects of Trapped-into-Solids Volatile Organic Compounds on Paper Biodeteriogens*, «International Biodeterioration & Biodegradation», CLXXIV, 2022, 105469, DOI: 10.1016/j.ibiod.2022.105469.

¹²³ FELICIA MENICUCCI et al., *Antifungal Activity of Carvacrol-Based Solids and their Effects on Whatman and Kraft Paper*, «International Biodeterioration & Biodegradation», CXCIV, 2024, 105894, DOI: 10.1016/j.ibiod.2024.105894.

¹²⁴ NAGAH S. SAADA, GOMA M.M. ABDEL-MAKSoud, MOHAMMED SAYED ABDEL-AZIZ, *Evaluation and Utilization of Lemongrass Oil Nanoemulsion for Disinfection of Documentary Heritage Based on Parchment*, «Biocatalysis and Agricultural Biotechnology», XXIX, 2020, 101839, DOI: 10.1016/j.bcab.2020.101839.

¹²⁵ MARIA SKÖLD et al., *Studies on the Autoxidation and Sensitizing Capacity of the Fragrance Chemical Linalool, Identifying a Linalool Hydroperoxide*, «Contact Dermatitis», XLVI, 2002, 5, pp. 253-318, DOI: 10.1034/j.1600-0536.2002.460504.x.

¹²⁶ Disposizione periodica e ordinata di due molecole le cui proprietà chimico-fisiche dipendono dai componenti cocristallizzati.

¹²⁷ MAGDALÉNA KAPUSTOVÁ, ANDREA PUŠKÁROVÁ, MÁRIA BUČKOVÁ, *Biofilm Inhibition by Biocompatible Poly(ϵ -caprolactone) Nanocapsules Loaded with Essential Oils and their Cyto/Genotoxicity to Human Keratinocyte Cell Line*, «International Journal of Pharmaceutics», DCVI, 2021, 120846, DOI: 10.1016/j.ijpharm.2021.120846.

distillazione delle parti vegetali, solo recentemente, le cosiddette “acque aromatiche” sono state applicate nel campo dei beni culturali.¹²⁸

Presso l'ICRCPAL, nel 2018,¹²⁹ è stato condotto uno studio sugli idrolati (Fig. 12) impiegati come diluenti del gellano, un idrogel utilizzato nella pulitura del materiale cartaceo, saggiandone la resistenza microbica e l'azione citocida.



Fig. 12: Il risultato della distillazione delle piante officinali che evidenzia l'acqua aromatica. Foto: Maria Carla Sclocchi.

Il GELYD (acronimo di Gel+idrolati) ha mostrato efficace attività antifungina su otto delle sedici specie fungine testate, confermandosi un promettente sistema di disinfezione per singoli beni.

Da evidenziare è anche il potenziale utilizzo dell'olio essenziale di cannella in forma incapsulata per proteggere i materiali cartacei da attacchi microbiologici.¹³⁰

¹²⁸ MAURA DI VITO et al., *Anti-Mold Effectiveness of a Green Emulsion Based on Citrus aurantium Hydrolate and Cinnamomum zeylanicum Essential Oil for the Modern Paintings Restoration*, «Microorganisms», X, 2022, 205, DOI: 10.3390/microorganisms10020205; MAURA DI VITO et al., *Hydrolates and Gellan: An Eco-Innovative Synergy for Safe Cleaning of Paper Artworks*, «Studies in Conservation», LXIII, 2018, 1, pp. 1-11, DOI: 10.1080/00393630.2017.1389442.

¹²⁹ DI VITO et al., *Hydrolates and Gellan*, cit.

¹³⁰ LUIGI CAMPANELLA et al., *Capsulated Essential Oil in Gel Spheres for the Protection of Cellulosic Cultural Heritage*, «Natural Product Research», XXXV, 2021, 1, pp. 116-123, DOI: 10.1080/14786419.2019.1616726.

C.2) Enzimi

Oltre all'uso di una microatmosfera di etanolo, Meng et al.¹³¹ propongono una microatmosfera che prevede una combinazione di bioenzimi (papaina, della classe delle idrolasi, in grado di decomporre grandi molecole proteiche) e biosurfattanti (biotensioattivi quali soforolipidi o betaina in grado di ridurre l'adesione delle ife fungine al supporto) capaci di inattivare anche materiali contaminati da agenti fungini. La soluzione così composta viene applicata con metodologia spray sulla superficie del materiale. Lo studio mostra che il 3% di papaina unito al 7% di biosurfattanti in acqua distillata a una T di 35 °C per 30 minuti riesce a rimuovere il 50% dei funghi dalla carta mantenendo colore, valori di pH e resistenza alla trazione entro limiti accettabili. Questi agenti di "pulizia biologica" sembrano essere non pericolosi per l'ambiente e non tossici per le persone.

D) Dopo la disinfezione

È importante ricordare che numerose sostanze chimiche prodotte dai funghi, come le micotossine, possono rimanere inalterate dopo i trattamenti di disinfezione o di sterilizzazione benché questi trattamenti intervengano sulla crescita dei funghi produttori. Alcune molecole come i β -glucani, polisaccaridi complessi facenti parte delle pareti cellulari dei funghi, non vengono distrutti dai trattamenti di disinfezione e possono continuare a espletare la loro azione infiammatoria sulle mucose del sistema respiratorio umano anche dopo la morte dei funghi. Anche soggetti non allergici possono andare incontro a irritazione delle mucose in presenza di elevate dosi nell'aria. Resta quindi fondamentale, dopo gli interventi di disinfezione, eseguire l'aspirazione forzata e con filtri HEPA degli ambienti che conservano i materiali trattati e la pulitura meccanica (v. A.8) dei manufatti.

E) Attività preventive

Gli interventi di disinfezione da eseguire in urgenza, quando il danno ai beni culturali è già avvenuto, comportano un notevole dispendio sia economico sia di tempo, non solo quello necessario per il trattamento, ma anche quello di sottrazione dei materiali dalla consultazione. La maggior parte dei trattamenti, come si è visto, non esplicano un'azione preventiva e l'infezione potrà ripresentarsi se i beni verranno nuovamente esposti a condizioni non ottimali di conservazione. Resta pertanto vantaggioso investire in attività di conservazione preventiva, migliorando le condizioni termoigrometriche e di ventilazione dei depositi e identificando locali idonei alla conservazione.

¹³¹ QINGXIA MENG et al., *A Biological Cleaning Agent for Removing Mold Stains from Paper Artifacts*, «Heritage Science», XI, 2023, 243, DOI: 10.1186/s40494-023-01083-3.

Per il risanamento di ambienti gravati da infezioni del fungo *E. halophilicum*, uno degli xerofili¹³² adattatisi ad ambienti più secchi e freddi, in grado di attecchire persino sui ripiani metallici e sulle guarnizioni in plastica dei *compactus* (Fig. 13),¹³³ così come di altre specie affini, gli istituti del MiC preposti alla tutela dei beni archivistici e librari prescrivono soluzioni tecniche che ostacolino le condizioni favorevoli per la crescita fungina.



Fig. 13: Infezione fungina su elemento plastico di una scaffalatura compatta. Foto: Matteo Montanari.

In particolare, vengono richiesti:

- il monitoraggio in continuo della temperatura e dell'umidità relativa (U.R.) che si inserisce più in generale nell'analisi dell'ambiente conservativo volta all'adeguata gestione dell'U.R. e della temperatura. Il monitoraggio avrà una durata pari ad almeno un anno o suoi multipli interi allo scopo di descrivere sia i cicli stagionali sia le fluttuazioni a breve termine. Si ricorda in proposito che la UNI 10829:1999¹³⁴ e la EN 15757:2010¹³⁵ consigliano misurazioni su base

¹³² I microrganismi xerofili sono specie capaci di vivere e svilupparsi in ambienti con bassa disponibilità d'acqua, dove la maggior parte degli organismi non potrebbe sopravvivere.

¹³³ MATTEO MONTANARI et al., *Fungal Biodeterioration of Historical Library Materials Stored in Compactus Movable Shelves*, «International Biodeterioration & Biodegradation», LXXV, 2012, pp. 83-88, DOI: 10.1016/j.ibiod.2012.03.011.

¹³⁴ UNI 10829:1999, *Beni di interesse storico e artistico – Condizioni ambientali di conservazione – Misurazione ed analisi*, Milano: UNI, 1999.

¹³⁵ Comité Européen de Normalisation (EN) 15757:2010, *Conservation of Cultural Property – Specifications for Temperature and Relative Humidity to Limit Climate-Induced Mechanical Damage in Organic Hygroscopic Material*, Bruxelles: EN, 2010 (confirmed 2025).

almeno oraria, mentre la UNI 10586:1997¹³⁶ suggerisce intervalli non maggiori di 30 minuti;

- una sostenuta circolazione dell'aria con eventuali sistemi di ventilazione forzata che garantiscano un numero sufficiente di ricambi d'aria per ora in modo da evitare fenomeni di condensa;
- la misura delle condizioni igrometriche dei materiali con appositi strumenti in grado di valutare il loro contenuto idrico e l'attività dell'acqua (a_w);¹³⁷
- la filtrazione dell'aria garantita mediante filtri HEPA in entrata per eliminare la maggior parte degli inquinanti chimici e biologici;
- l'eventuale deumidificazione degli ambienti monitorando gli impianti per intervenire in maniera rapida in caso di variazioni repentine dell'U.R. dovute a guasti e perdite di acqua di condensa che potrebbero determinare periodi di inattività da parte dell'impianto;
- con particolare riferimento alle scaffalature compatte, dove necessaria e applicabile, la sostituzione dei montanti continui con altri in lamiera perforata e l'introduzione di ripiani forati che garantiscano il ricambio dell'aria o la rimozione delle guarnizioni dei *compactus* che impediscano lo scambio con l'esterno;
- l'uso di stabilizzatori passivi, in particolare i gel di silice quali il PROSorb®, biossido di silicio al 97% e ossido di alluminio al 3%, privo di cloruro di litio (dannoso per i metalli), o il Propadyn®, regolatore di umidità biodegradabile proveniente dal settore alimentare, per limitare gli effetti dell'umidità all'interno di arredi e contenitori;¹³⁸
- in presenza di armadi con ante vetrate interessate da fenomeni di condensa, il loro allontanamento dalle pareti, l'apertura delle ante e, dove indispensabile, la loro sostituzione con materiali che garantiscano il ricircolo dell'aria;
- per quanto riguarda i locali compartimentati con porte tagliafuoco che incidano sul ricircolo dell'aria causando fenomeni di condensa, dove applicabile, l'installazione di chiudiporta o sistemi di rilascio elettromagnetici che le facciano sbloccare e chiudere automaticamente in caso di incendio, garantendo condizioni di aerazione ottimali in assenza di allarmi in corso;
- l'igiene degli scaffali e della pavimentazione con prodotti a rapida evaporazione e tessuti ben "strizzati";

¹³⁶ UNI 10586:1997, *Documentazione. Condizioni climatiche per ambienti di conservazione di documenti grafici e caratteristiche degli alloggiamenti*, Milano: UNI, 1997.

¹³⁷ L'attività dell'acqua rappresenta la disponibilità dell'acqua per reazioni chimiche e biologiche, cioè quanto l'acqua può essere utilizzata da microrganismi.

¹³⁸ I materiali tampone stabilizzano il tasso di U.R. mettendo il loro contenuto in vapore acqueo in equilibrio con quello dell'ambiente. Permettono quindi una stabilità climatica all'interno di un ambiente confinato.

- l'eventuale installazione di contenitori o separatori in cartone idoneo alla conservazione rispondente alla norma UNI ISO 16245:2024¹³⁹ per quanto riguarda i beni cartacei e pergamenacei e per i beni fotografici materiali testati PAT¹⁴⁰ che li isolino dai ripiani metallici nel caso si presentino fenomeni di condensa;
- la garanzia di sopralluoghi periodici volti a monitorare il ripresentarsi di crescite microbiche.

Per migliorare la qualità dell'aria *indoor* degli ambienti di conservazione e abbattere polveri sottili e microrganismi sono in commercio, in maggior numero dopo la pandemia da COVID-19, dispositivi calibrati sulla volumetria degli spazi da trattare, collocati a parete o *stand alone* (Fig. 14), all'interno di armadi verticali.¹⁴¹ Si tratta di sistemi di ventilazione meccanica controllata ad alta portata d'aria che permettono la deumidificazione e la condensazione dell'umidità degli ambienti associate al filtraggio dell'aria mediante filtri HEPA che agiscono prima e dopo la deumidificazione. Può essere prevista l'associazione con filtri per i composti organici volatili (COV).



Fig. 14: Dispositivo *stand alone* per il trattamento dell'aria in un deposito di biblioteca. Foto: Matteo Montanari.

Sono stati inoltre sviluppati *compactus* "intelligenti" che, grazie a sensori ambientali e appositi algoritmi, adeguano dal punto di vista termoigrometrico gli spazi interni a fronte di variazioni esterne. In tal modo

¹³⁹ UNI ISO 16245:2024, *Information and Documentation – Boxes, File Covers and other Enclosures, Made from Cellulosic Materials, for Storage of Paper and Parchment Documents*, Geneva: ISO, 2024.

¹⁴⁰ *Photography Activity Test*: test sviluppato dall'Image Permanence Institute (IPI), Rochester Institute of Technology, che valuta le interazioni chimiche con le immagini.

¹⁴¹ Tergeosan®, cit.

si evitano le condizioni che favoriscono lo sviluppo di funghi cosiddetti "pionieri" per la loro prerogativa di crescere in ambienti poco favorevoli rispetto a quelli della maggior parte dei funghi saprotrofi e occupando nicchie ecologiche differenti e costituendo un "*pabulum*" ideale anche per acari e insetti.

Il superamento di determinate soglie è comunicato tramite una piattaforma wireless agli operatori che possono intervenire sull'ambiente, anche da remoto, con strategie di controllo ambientale. Sono impiegabili deumidificazione, ventilazioni attive o passive, purificazione dell'aria oppure sistemi chimici di inibizione della germinazione, ad esempio terpeni volatili accoppiati a cocristalli (v. C.1). Il metodo si basa sull'utilizzo, in spazi ridotti e confinati – come all'interno delle scaffalature compatte –, di cocristalli, in cui la parte attiva è un terpene (carvacrolo) presente nell'olio essenziale di timo inglobato su supporto solido.¹⁴²

Considerazioni e conclusioni

In passato, il controllo dello sviluppo microbico nei materiali di archivi e biblioteche è stato affidato a trattamenti basati su sostanze ad elevata tossicità, che hanno rappresentato un serio rischio per la salute degli operatori. Il divieto, con atto di recente emanazione da parte della UE, (Direzione di esecuzione UE 2025/1074), di utilizzo delle miscele di ossido di etilene, segna un'importante svolta nell'approccio al problema dei trattamenti chimici dei materiali. Anche alcuni metodi e composti tuttora impiegati presentano comunque delle criticità, sia in termini di efficacia a lungo termine, sia per i potenziali effetti nocivi sulla salute umana, per l'ambiente e per l'impatto negativo sui materiali trattati.

Alla luce di una crescente attenzione verso la tutela della salute degli operatori e dei fruitori del patrimonio culturale, unitamente a una maggiore sensibilità nei confronti delle problematiche ambientali, si assiste oggi a un interesse sempre più marcato per lo sviluppo e la sperimentazione di sistemi alternativi a minore eco-tossicità. L'affermarsi della cultura del minimo intervento nelle pratiche di tutela e conservazione dei beni culturali e l'approfondimento degli studi sugli effetti a lungo termine dei trattamenti conservativi hanno orientato la ricerca verso soluzioni in grado di garantire un'interazione ridotta con gli originali. In questo contesto, l'esplorazione di nuovi trattamenti antimicrobici si configura come un ambito di ricerca ancora aperto e intrinsecamente complesso, che richiede un equilibrio tra efficacia, sicurezza e compatibilità con i supporti storici.

I danni biologici conseguenti a eventi eccezionali e calamità naturali risultano oggi sempre più frequenti. Nei paesi in via di sviluppo privi di una legislazione specifica, o a causa della gravità e dell'estensione di tali

¹⁴² Di riferimento è il sistema BLOCKBACTERIA di Makros Srl. Si veda in merito DONATELLA MATÈ, *Innovazioni tecnologiche al servizio del biologo in archivi, biblioteche, fototeche e cineteche. Ne parliamo con Maria Carla Sclocchi e Massimo Luise*, «Kermes», CXXXVII, 2025, pp. 6-8.

emergenze, quando diventano prioritari il ripristino delle strutture civili e la salvaguardia delle vite umane, possono verificarsi ritardi significativi nel reperimento delle risorse necessarie al recupero dei beni di archivi e biblioteche. In questo scenario, l'introduzione dei piani di emergenza per la gestione delle collezioni, la cui diffusione è stata promossa dal Ministero della Cultura italiano a partire dal 2004, dovrebbe assumere carattere capillare, coinvolgendo in particolare le piccole biblioteche e gli archivi a livello locale, spesso caratterizzati da risorse umane e strumentali limitate. La verifica periodica dei piani di emergenza, le esercitazioni che simulano i diversi scenari emergenziali e la formazione continua del personale rappresentano in questo senso non solo strumenti di prevenzione, ma anche forme di protezione attiva del patrimonio culturale. I piani di emergenza, le barriere e i sensori anti-inquinamento, costituiscono attualmente gli strumenti più efficaci per la mitigazione degli effetti delle calamità.

Per quanto riguarda il biodeterioramento provocato dalla permanenza dei materiali in condizioni ambientali inidonee, la corretta gestione dei parametri termoigrometrici dei depositi e un utilizzo razionale degli spazi contribuiscono in modo significativo alla riduzione del rischio di infezioni biologiche e del rischio di bagnamento. In tale prospettiva, il monitoraggio biologico degli ambienti confinati mediante sensori rappresenta un ambito di particolare interesse. In Italia, sono recentemente stati introdotti sul mercato armadi cosiddetti "intelligenti" che impiegano cocristalli con rapporti variabili di terpeni che si attivano qualora le condizioni termoigrometriche interne diventino favorevoli allo sviluppo di microrganismi, aprendo di fatto nuove possibilità per la prevenzione del biodeterioramento.

Queste soluzioni appaiono promettenti per lo sviluppo di future strategie integrate di contrasto alle infezioni in archivi e biblioteche. Parallelamente, tra le tecnologie emergenti, alcune metodologie stanno progressivamente estendendo il loro ambito di applicazione dal settore medico a quello della conservazione del patrimonio culturale, come il plasma freddo e le radiazioni ionizzanti. Sebbene la ricerca in questi settori sia ancora parziale e in fase di consolidamento, i risultati preliminari suggeriscono un potenziale significativo per futuri sviluppi nel campo della disinfezione dei beni culturali.

