

Indice

<i>Premessa</i>	pag. 9
<i>Introduzione</i>	11
1 Il microclima	15
2 Danno, degrado e rischio. Variabili microclimatiche	25
2.1. Danno, degrado e rischio	25
2.2. Temperatura	28
2.3. Vapor d'acqua e umidità relativa	30
2.4. Moti d'aria e trasporto delle polveri	35
2.5. Luce, infrarosso e ultravioletto	37
2.6. Inquinanti e sostanze chimiche	39
2.7. Biodeterioramento	42
3 Misurazione e strumenti di misura	49
4 Il contesto legislativo	55
4.1. ICOM. Le professioni museali e il microclima	55
4.2. Il Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio	60
4.3. I Livelli Uniformi di Qualità dei Musei (DM 21.02.2018) e l'Atto di Indirizzo sui Criteri Tecnico-Scientifici (Decreto 10.05.2001)	62
4.4. Il microclima nei depositi dei Beni Culturali	71

5 	Gli standards per il microclima dei Beni Culturali	pag. 81
3.1.	Standards riferiti al contesto microclimatico	83
3.2.	Standards per la misurazione strumentale e caratteristiche degli strumenti di misura	102
6 	Monitoraggio	127
6.1.	Aspetti, definizioni e termini	129
6.2.	Il Progetto di monitoraggio	134
6.3.	Risultati della Campagna di monitoraggio	145
6.4.	Restituzione dei dati: grafici, diagrammi e mappe	151
6.5.	Allerta e rischio microclimatico	166
7 	Il monitoraggio microclimatico della Biblioteca Malatestiana Memoria del Mondo UNESCO	179
7.1.	Il percorso museale	181
7.2.	I dispositivi per il monitoraggio	186
7.3.	La messa in opera e avvio della Campagna di monitoraggio	193
	<i>Appendice</i>	203
	Bibliografia	204
	Legislazione e Standard	205
	Glossario	207

Introduzione

La tutela e la conservazione dei Beni Culturali, nei musei e/o negli edifici storici, nei laboratori di restauro, negli archivi e nelle biblioteche, si confronta con una molteplicità di agenti e azioni che possono portare al decadimento dello stato di conservazione dell'architettura, dei Beni e degli oggetti conservati. La scienza dei Beni Culturali, la legislazione e la normativa di settore, la formazione ed esperienza dei vari operatori e soggetti coinvolti, cercano di interrompere o, almeno, rallentare il processo di decadimento, affinché sia possibile, per il presente e per il futuro, fruire e trasmettere i Beni artistici, storici e documentali giunti fino a noi.

L'aria è uno degli agenti di degrado più pervasivi per i Beni Culturali, a causa degli scambi di energia e massa che ne modificano i valori di temperatura e umidità, favoriscono il trasporto e il deposito degli inquinanti, interni o esterni, o la diffusione degli insetti. Lo studio dell'aria, ovvero del microclima e del micro-environment, dove il prefisso *micro-* è riferito alla scala dei fenomeni, permette di conoscere, e prevenire, i possibili danni e le condizioni che attivano i processi di degrado dei manufatti. Tale studio non può prescindere dalla conoscenza della storia dell'edificio e delle collezioni.

Il termine 'acclimatare' è concetto cardine: gli oggetti, come le persone, si abituano all'aria che li circonda, vi si adattano fino a trovare le proprie condizioni di 'comfort'; per questa ragione è bene conoscere, garantire e monitorare il comfort degli oggetti, dei manufatti. I Beni Culturali, i manufatti artistici o i documenti, e gli edifici che li conservano, benché simili, sono ciascuno diverso dall'altro e si acclimatano al (micro-) clima in maniera differente.

Il presente libro si propone come un *vademecum* per gli operatori del settore, un prontuario con le nozioni relative al microclima per la conservazioni dei Beni Culturali, uno strumento agile nel quale trovare concetti, metodi e informazioni pratiche, rimandando ai testi di settore e agli specialisti eventuali approfondimenti.

In letteratura esistono alcuni libri caposaldo sull'argomento, quali il ponderoso libro di D. CAMUFFO, *Microclimate for Cultural Heritage. Measurement, Risk Assessment, Conservation, Restoration, and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments*, (Elsevier Science, 2019); il fondamentale testo di G. THOMSON (Scientific Adviser della *National Gallery of London*), *The Museum Environment* (Butterworth-Heinemann, 1986), e il nostro M. PRETELLI, K. FABBRI, *Historic Indoor Microclimate of the Heritage Buildings: A Guideline for Professionals Who Care for Heritage Buildings* (Springer, 2017), oltre ai libri su argomenti o casi specifici nei quali si riportano, nel dettaglio e in maniera approfondita, alcuni degli aspetti affrontati anche in questo libro, in particolare i fenomeni fisici e di degrado.

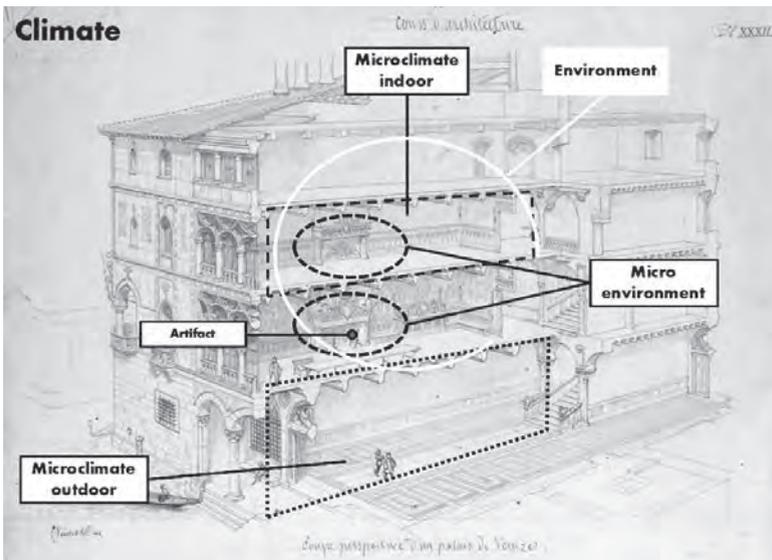
Il volume tratta della scala del micro-clima nel settore dei Beni Culturali; affronta e distingue tra danno, degrado e rischio; individua le principali variabili fisiche, chimiche, luminose e ambientali che caratterizzano il microclima e gli strumenti per la misurazione; riporta i riferimenti del contesto legislativo italiano e gli standards, nazionali e internazionali; descrive i contenuti minimi del monitoraggio, suggerendo i criteri per l'interpretazione dei risultati; infine, illustra il caso studio della *Biblioteca Malatestiana* di Cesena, Memoria del Mondo UNESCO.

L'approccio adottato è simile a quello delle discipline mediche: nonostante i principi generali possano essere applicati a ogni paziente, ciascun paziente, ovvero ciascun Bene Culturale, architettura, manufatto e via dicendo, deve essere trattato come un caso a sé stante rispetto alla sua storia e al contesto nel quale è esposto.

La lettura e interpretazione dei risultati del monitoraggio, ai fini di garantire la salute del Bene, non può essere demandata al rispetto dei valori previsti negli standards. Il Direttore e/o il Restauratore, grazie al confronto con chi si occupa del microclima e il team delle diverse figure coinvolte nell'organizzazione museale, sarà in grado di trovare la soluzione secondo il principio medico: *primum non nocere*.

Altro obiettivo del presente libro è quello di instaurare un confronto e un dialogo con gli operatori del settore: Restauratori, Conservatori, Direttori dei musei e gestori delle collezioni, proprietari o gestori di edifici storici, allestitori, ricercatori e chi, a diverso titolo, è coinvolto nella conservazione, restauro ed esposizione di opere d'arte e architettura storiche, Beni documentali e archivistici. Il confronto tra esperti contribuisce alla creazione di un *corpus* di procedure e prassi.

Commenti e osservazioni: kristian.fabbri@gmail.com



FIGG. 1.1.

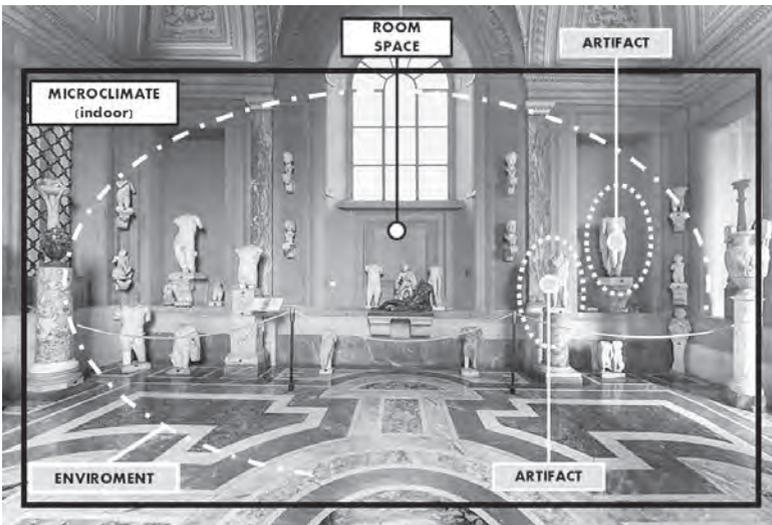
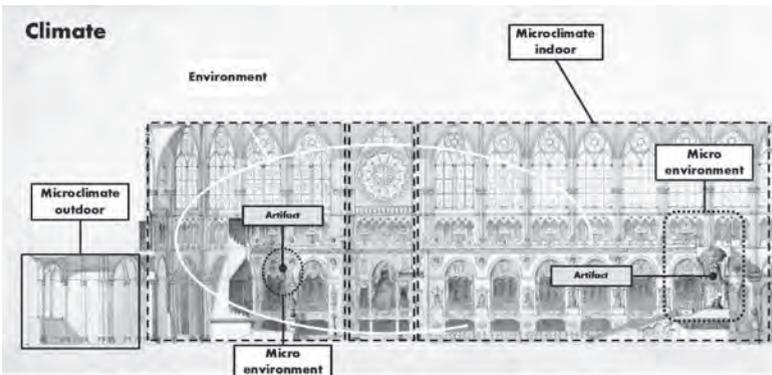


FIG. 1.2.

PARAMETRO	RACCOMANDAZIONI	SUBSTRATO DI INTERESSE
SO ₂ (anidride solforosa)	< 0.4 ppb	Carta e ambienti interni
NO ₂ , HNO ₃ (acido nitrico)	BAT	Carta e ambienti interni
NO _x (ossidi di azoto)	< 2.5 ppb	Ambienti interni
O ₃ (ozono)	1 ppb	Carta e ambienti interni
Particolato	Rimozione 95% con dimensioni > 2 µm	

TABELLA 2.1. Qualità dell'aria per la protezione degli oggetti nei musei e librerie (Fonte: P. Brimblecombe, "The composition of museum atmosphere", in Atmospheric Environmental, Vol. 24B, pp 1-8, 1990).

INQUINANTE	EFFETTO / DANNO	SORGENTE INTERNA
SO ₂	Ossidazione metallo Danno pitture e tinte Fragilità e decolorazione carta Riduzione resistenza dei tessuti Indebolimento cuoio Attacco materiale fotografico	Riscaldamento ambienti
H ₂ S (acido solfidrico)	Ossidazione metallo Danno pitture e tinte Attacco materiale fotografico	Effluenti umani Invecchiamento della vernice e della gomma
NO ₂	Sbiadimento dei colori nei tessuti Riduzione resistenza dei tessuti Danno film fotografici	Riscaldamento ambienti Cucina o combustione
O ₃	Fessurazione gomme Sbiadimento dei colori nei tessuti Attacco materiale fotografico	Macchinari elettrici e fotocopiatrici
H ₂ O ₂	Scolorimento stampe fotografiche	Resina alchidica
HCHO	Fotografie e oggetti metallici	Colle, schiume, cartone
Acidi organici	Danni a metalli	Legno, colle
Diethylamino-ethanol	Danni alle vernici	Corrosione
Ammoniaca	Danni alle vernici	Detergenti
Solventi	Danni alle vernici	Detergenti

TABELLA 2.2. Inquinanti atmosferici presenti all'interno di musei e biblioteche che possono comportare il degrado degli oggetti. (Air pollution of importance in the preservation of object stored within museums and libraries (Fonte: P. Brimblecombe, "The composition of museum atmosphere", in Atmospheric Environmental, Vol. 24B, pp 1-8, 1990).

2.7 Biodeterioramento

Il biodeterioramento è il deterioramento causato dagli esseri viventi (*bios-*), in particolare i piccoli esseri viventi: muffe, funghi e insetti, che infestano i materiali organici quali legno, pergamena e carta. La letteratura di settore riporta la tassonomia biologica, il tipo di danno che l'insetto può portare e i materiali che può attaccare: carta, cartone, legno, fotografie, tessuti, cuoio, etc. Lo studio *ICCROM International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property*, e il fondamentale testo di Fausta Gallo, *Il biodeterioramento di libri e documenti* (Centro di studi per la conservazione della carta ICCROM), costituiscono i testi di riferimento sull'argomento.

Gli insetti comportano un danno di tipo cumulativo, del quale ci si accorge quando il danno è in atto. La prevenzione può essere realizzata monitorando le condizioni microclimatiche che possono favorire l'incubazione o il periodo larvale di tali insetti. Il danno viene scoperto quando l'insetto è già attivo. Al pari della disinfestazione delle zanzare, occorre quindi agire sulle larve. Gli interventi sono finalizzati alla messa in sicurezza della zona dove si è verificato l'attacco degli insetti.

Gli insetti che infestano musei, biblioteche e archivi si dividono nei seguenti gruppi:

- **Blattoidea, Thysanura, Isoptera (termiti)** che vive nell'ambiente e si nutre di carta, cuoio, pergamena;
- **Corrodentia (Psocoptera)**, che si nutre di muffe e si sviluppa sui libri e sui muri;
- **Coleoptera: Anobiidae, Dermestidae**, che nasce e vive all'interno dei libri e materiali lignei;
- **Coleoptera: Lyctidae, Cerambycidae**, che compie il ciclo vitale all'interno dei materiali lignei dei quali si nutre.

Di seguito si riportano le tabelle con i gruppi degli insetti che danneggiano i materiali librari e le opere d'arte, suddivisi in base al ciclo di vita: periodo di incubazione, vita larvale e vita adulta.

GRUPPO I: INSETTI CHE VIVONO NELL'AMBIENTE E SI NUTRONO DI MATERIALI LIBRARI			
Ordini	Famiglie	Tipi di danno	Materiali ai quali arrecano danni
Blattoidea	Blattellidae	Erosioni superficiali a contorno irregolare, talvolta con i loro escrementi fluidi causano macchie nere a forma di virgole	Carta, cartone, cuoio, pergamena, adesivi di origine animale e vegetale, fotografie.
	Blattidae		
Thysanura	Lepismatidae	Erosioni superficiali a contorno irregolare che si differenziano da quelle delle blatte perché più minute	Carta, cartone, adesivi di origine animale e vegetale, fotografie, tessuti di rayon, lino, cotone.
Isoptera	Rhinotermitidae Hodotermitidae Termitidae Kalotermitidae	Nel libri scavano voragini a forma di cratere o fanno erosioni estese, profonde, di forma irregolare che si diramano dal taglio verso l'interno. In alcuni casi distruggono quasi completamente i volumi lasciando intatti soltanto i tagli e i dorsi. Nel legno scavano gallerie che corrono parallele alle fibre, preferendo gli strati più teneri, di conseguenza il legno assume un aspetto lamellare, oppure distruggono la parte interna lasciando intatta soltanto una pellicola superficiale, che cede se sottoposta ad una leggera pressione. Sia il primo che il secondo tipo di erosione possono provocare il crollo di strutture lignee portanti (travi ecc.). Le termiti, con i loro escrementi fluidi, fanno sui materiali danneggiati piccole macchie color sughero.	Legno, carta tessuti, cuoio, pergamena. Danneggiano talvolta osso, avorio, corno e rivestimenti di cavi elettrici. Sono capaci di perforare anche materiali plastici e sottili lamine metalliche.
GRUPPO II: INSETTI CHE VIVONO NELL'AMBIENTE E SI NUTRONO DI MUFFE			
Ordini	Famiglie	Tipi di danno	Materiali ai quali arrecano danni
Corrodentia	Lipocelidae	Minutissime erosioni superficiali a contorno irregolare	Sebbene i liposcelidi si nutrano di funghi microscopici presenti sui materiali, tuttavia, arrecano talvolta danni di lieve entità anche agli adesivi, alla carta, agli erbari, alle collezioni di insetti.

TABELLA 2.4. *Insetti che danneggiano i materiali librari. (Fonte: F. Gallo, Il biodeterioramento di libri e documenti, Centro di studi per la conservazione della carta – ICCROM). (segue alla pagina successiva) >*

3. Misurazione e strumenti di misura

Le variabili sopra descritte consentono di conoscere il microclima, indoor e outdoor, e i relativi rischi di danno e/o degrado correlato; tali variabili possono essere oggetto di **misurazione** all'interno di un Piano di monitoraggio. La misurazione¹ consiste in una serie di operazioni e non si limita alla sola posa in opera di strumentazioni o sensori per il rilevamento dei dati. L'attività di misurazione comprende:

- l'**osservazione** dello stato dei luoghi, delle caratteristiche architettoniche, geometriche, tecnologiche dei locali, dotazione impiantistica, accesso e flusso dei visitatori, presenza e frequenza di visita dei custodi o altro personale, attività di pulizia, apertura di finestre (informazioni che possono essere acquisite anche mediante interviste o colloqui con il personale), rilievo del numero, dimensioni e caratteristiche dei manufatti conservati, incluso l'arredo, modalità espositive, sensazioni termiche, olfattive, luminose percepite *in loco*. L'osservazione, ai fini del Piano di monitoraggio, deve raccogliere tutte informazioni utili per la messa in opera delle strumentazioni, inclusa la verifica della rete elettrica (prese, luci), della connessione dati Wi-Fi (se presente), le modalità di accensione/esercizio/spegnimento degli impianti tecnici;
- l'**elaborazione** e la **rappresentazione statistica dei dati**, ovvero scelta delle modalità di restituzione di quanto misurato dai sensori per la loro interpretazione, ivi incluse la periodicità e la finalità di tale restituzione dati: report annuale periodico, prevenzione guasti; sistema di *alert* dei rischi (definizione dei rischi e relativi *range*); anamnesi o diagnosi a seguito di guasto, danno o deterioramento; definizione del microclima storico per il prestito o per l'esposizione temporanea o permanente; studio della storia del microclima dell'edificio;
- la **definizione della frequenza delle osservazioni**, o **campionamento**, che può essere ogni 5 minuti, o 15 minuti, ogni ora o più, con osservazioni e restituzione del dato medio orario, giornaliero, e via dicendo;

- il **tempo di risposta del sensore**, il quale varia in base alla variabile misurata, alla tipologia e accuratezza dei sensori, in particolare per le variabili chimiche;
- la **durata del tempo di osservazione**, che può variare da qualche ora o giorno, se l'oggetto è il comfort o discomfort microclimatico di custodi o visitatori, a qualche settimana, mese oppure periodi più lunghi, che vanno da un anno (tempo minimo per definire il microclima storico) a più anni, oppure senza termine.

La durata del tempo di osservazione può influenzare la scelta dei dispositivi e della finalità del monitoraggio, le modalità di raccolta dei dati (in sito, manuale, online, scarico dati manuale, automatico, etc.) e la definizione dei ruoli dei soggetti preposti alle attività di monitoraggio, per garantire la continuità dello stesso.

Nella prassi operativa la durata della misurazione e del monitoraggio dipende dalla finalità dello stesso: il monitoraggio può essere *temporaneo*, ovvero con un obiettivo a breve termine per rispondere a un quesito/problema specifico, oppure può essere *permanente*, con un monitoraggio in continuo con rilevazione dei parametri che possono comportare o favorire la formazione di fenomeno di danno e/o degrado. Il periodo di osservazione incide, inoltre, sulla rappresentatività del dato misurato.

Il **microclima storico** (UNI EN 15757) è riferito ad almeno un anno di monitoraggio, perché un anno è in grado di definire quali sono le caratteristiche microclimatiche alle quali il manufatto, l'oggetto, l'opera d'arte si è acclimatata. Nel caso di periodi inferiori, occorre verificare se il giorno o la settimana o altro periodo scelto per la durata del monitoraggio sia rappresentativo.

Nel momento in cui si predispone la misurazione del microclima e il relativo Piano di monitoraggio è bene aver chiaro l'oggetto della misura, come misurare, per quali finalità, per quanto tempo, a chi dovranno essere restituiti i dati misurati e i risultati del monitoraggio.

La misurazione deve essere *rappresentativa*² rispetto allo spazio e al tempo, ovvero la misurazione deve garantire che il dato puntuale rilevato non sia soggetto a influenze e disturbi date dalla conformazione del locale (correnti d'aria, radiazione dovuta alla presenza di finestre o dei terminali impiantistici, etc.) e che sia in un punto significativo rispetto alla geometria dello stesso. La misurazione deve garantire che, nel tempo, il dato sia rilevato con continuità e non vi siano interruzioni o malfunzionamenti. Il numero di misure rilevate e il loro periodo di acquisizione dipende dalla durata del monitoraggio: per esempio, rilevare il dato ogni cinque minuti per un

periodo di monitoraggio della durata di un anno può fornire un numero di rilevazioni eccessivo per la loro elaborazione, un punto misura ogni mezz'ora oppure ogni ora può essere sufficiente. Viceversa, nel caso di monitoraggio di breve durata, un giorno o una settimana, rilevare il dato ogni ora può non essere sufficiente.

In altri termini, la misurazione del microclima non si limita all'acquisto dei sensori e delle sonde, si tratta di un **progetto** che prevede una dotazione hardware, software e **personale preposto alla sua gestione e alla sua manutenzione**, garantita per la sua intera durata.

L'interpretazione dei dati misurati richiede esperienza: il monitoraggio è simile alle indagini diagnostiche mediche, da un lato vi è la strumentazione (TAC, radiografie, analisi di laboratorio, etc.) e il report delle analisi da parte del tecnico di laboratorio (es. tecnico radiologo, laboratorio analisi, et.), dall'altro lato vi è il medico, che deve interpretare i dati rispetto alla storia clinica del paziente e alla sua risposta alla malattia. Tecnico e medico hanno una specifica preparazione ed esperienza nella lettura dei dati, un background che gli consente di interpretare i dati e non affidarsi ai soli riferimenti normativi.

La strumentazione prevede dispositivi per misurare:

- la *temperatura dell'aria*, quali termocoppie, termometri bimetallici, termo-igrometro, sensori di temperatura o di temperatura e umidità relativa; la misura della temperatura superficiale, quali sensori a contatto, radiometro, termocamera;
- l'*umidità dell'aria*, quali igrometro a capello, a film sottile, psicometro, etc. ;
- il *moto dell'aria indoor* (velocità dell'aria) con anemometri a filo caldo (campo di misura tra 0 m/s e 0,5 m/s) o anemometri a ventola.

A questi si aggiungono strumenti per la misurazione dell'illuminamento (lux) e delle radiazioni UV-A, e la strumentazione per la misurazione dei parametri chimici quali polveri, polveri sottili (PM), anidride carbonica (CO₂), composti organici volatili (VOC), etc.

Quale sia lo strumento o sensore scelto per la misurazione, la scheda tecnica di prodotto dovrà riportare le caratteristiche e i parametri metrologici risultanti dalle prove di laboratorio, certificati di calibrazione che assicurano la correttezza metrologica secondo la norma tecnica vigente. I certificati di calibrazione devono essere rilasciati

QUANTITÀ	SIMBOLO	CLASS C (COMFORT)			CLASS S (STRESS)		
		Range di misura	Accuratezza	Tempo di risposta (90%)	Range di misura	Accuratezza	Tempo di risposta (90%)
Temperatura aria	t_a	10°C – 40°C	Richiesto: ±0.5°C Desiderabile: ±0.2°C	(*)	-40°C/ +120°C	Richiesto: -40°C to 0°C (±0.5°C+0.01 t_a) > 0°C – 50°C±0.5°C > 50°C – 120°C ± [0.5°C+ 0.04 (t_a -50)] °C	(*)
Temperatura media radiante	t_r	10°C – 40°C	Richiesto: ±2°C Desiderabile: ±0.2°C	(*)	-40°C/ +150°C	Richiesto: -40°C to 0°C (± 5°C+0.02 t_r) > 0°C – 50°C±5°C > 50°C – 150°C± [5°C+0.8 (T_r -50)]°C	(*)
Air velocity	v_a	0.5 – 1 m/s	Richiesto: ± (0.05 + 0.05 v_a) m/s Desiderabile: ± (0.03 + 0.07 v_a) m/s	Richiesto: 0.5 sec Desiderabile: 0.2 sec.	0.2 – 20 m/s	Richiesto: ± (0.01 + 0.05 v_a) m/s Desiderabile: ± (0.05 + 0.07 v_a) m/s	(*)
Umidità assoluta	p_a	0.5 – 3.0 kPa	±0.15 kPa Livello da garantire con differenza t_r - t_a di 10°C	(*)	0.5 – 6.0 kPa	±0.15 kPa Livello da garantire con differenza t_r - t_a di 20°C	(*)
Temperatura della superficie	t_s	0.6 – 50°C	Richiesto: ±1°C Desiderabile: ±0.5°C	(*)	-40°C / +120°C	Richiesto: < -10°C ± [1+0.05(- t_s -10)] – 10°C/50°C ±1 > -50°C ± [1+0.05(- t_s -50)] Desiderabile: (Richiesto/2)	(*)

(*) Il più breve possibile. Valore da specificare come caratteristiche dello strumento di misurazione.

TABELLA 3.1. Caratteristiche degli strumenti di misura. Esempio, dati estratti dalla norma UNI EN ISO 7726 Ergonomia degli ambienti termici - Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche.

da laboratori di prova e taratura accreditati e certificati secondo la UNI CEI EN ISO/IEC 17025³.

I principali valori riportati nelle schede tecniche di prodotto di sonde e sensori sono:

- il *principio*, ovvero il sensore e/o la modalità con la quale viene misurata la grandezza e la norma tecnica di riferimento;

- il *campo di misura*, il *range* con il valore minimo e massimo che il sensore può misurare in date condizioni di applicazione;
- la *soglia*, il valore minimo o il valore massimo della variabile che è possibile misurare;
- l'*accuratezza* (*accuracy* o incertezza di misura), che esprime la differenza tra il valore misurato rispetto al valore considerato, espresso come rapporto di errore (+/-). Il livello di accuratezza incide (anche) sul costo del sensore: sensori più accurati possono avere costi maggiori e/o richiedere condizioni per l'applicazione in sito specifiche;
- la *risoluzione* (*resolution*) o leggibilità del dato, la più piccola variazione che lo strumento/sensore è in grado di rilevare;
- il *tempo di risposta*, il tempo che un sensore, posto da un ambiente a un altro, impiega prima di rilevare le nuove condizioni ambientali;
- la *deriva* (*drift*), la graduale deviazione del sensore rispetto alle caratteristiche originarie;
- l'*incertezza* (*di misura*), parametro associato al risultato di una misurazione, che caratterizza la dispersione dei valori ragionevolmente attribuibili (ISO UNI CEI ENV 13005⁴ e *Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés* (VIM) UNI CEI 70099⁵).

NOTE AL CAP. 3

¹ Dal *Vocabolario Treccani online*: «L'operazione del misurare, consistente nel confrontare una determinata grandezza fisica con la sua unità di misura, allo scopo di determinare il valore (o misura) della grandezza stessa».

² In metrologia la rappresentatività è definita come una misura non affetta da errori strumentali.

³ UNI CEI EN ISO/IEC 17025 – *Requisiti generali per la competenza dei laboratori di prova e taratura*.

⁴ UNI CEI ENV 13005 – *Guida all'espressione dell'incertezza di misura*.

⁵ UNI CEI 70099 – *Vocabolario Internazionale di Metrologia. Concetti fondamentali e generali e termini correlati (VIM)*.

4.4 Il microclima nei depositi dei Beni Culturali

I musei sono organismi complessi nella loro gestione e organizzazione, con una pluralità di ambienti e funzioni non limitata alla sola parte espositiva, sia essa permanente o temporanea. A queste attività si aggiungono il prestito delle opere, i laboratori di restauro, ove presenti, e i depositi, locali dove le opere e i manufatti persistono per lunghi periodi. Il prestito e trasporto dei Beni Culturali, i laboratori di restauro e la gestione dei depositi richiedono figure, imprese e personale con alta specializzazione ed esperienza nel settore.

In merito ai depositi, la Direzione Generale Sicurezza del Patrimonio Culturale del Ministero dei Beni Culturali (ex MIBAC/MIBACT, ora MiC Ministero per la Cultura) ha predisposto le *Linee Guida* per i depositi dei Beni Culturali: ***Linee guida per l'individuazione, l'adeguamento, la progettazione e l'allestimento di depositi per il ricovero temporaneo di Beni Culturali mobili con annessi laboratori di restauro.***

In merito ai requisiti per la conservazione dei Beni, le ***Linee Guida per i depositi*** al Capitolo 3, riportano che

«i depositi al ricovero temporaneo di Beni Culturali devono garantire parametri alla loro conservazione anche in periodi di lunga permanenza. Ogni manufatto è inserito in un ambiente (con fattori condizionanti lo stato di conservazione: temperatura, umidità, luce, inquinanti, presenza di organismi/microorganismi nocivi) che interagisce costantemente con esso; al fine di assicurare una conservazione adeguata – anche per un periodo di tempo non definitivo – un locale di deposito e di laboratorio per la messa in sicurezza, dovrà possedere requisiti idonei a tal fine lo stato di conservazione di un oggetto è come noto relazionabile anche alla sua composizione materica, in base alla quale si potrà determinare il grado di vulnerabilità.»

I valori di riferimento dei parametri termoigrometrici per i *depositi* sono riportati nelle **Tabb. 4.10–4.12.**

TIPOLOGIE DI OGGETTI	U.R. (%)	TEMPERATURA (°C)
Armature in ferro, armi	< 40	–
Avori, ossa	45 – 65	19 – 24
Bronzo	< 55	–
Carta, cartapesta	50 – 60	19 – 24
Collezioni mineralogiche, marmi e pietre	45 – 60	< 30
Cuoio, pelli, pergamena	50 – 60	–
Dischi, nastri magnetici	40 – 60	10 – 21
Erbari e collezioni botaniche	–	40 – 60
Film	30 – 50	- 5 + 15*
Fotografie (b/n)	20 – 30	2 – 20 **
Insetti e scatole entomologiche	40 – 60	19 – 24
Lacche orientali	50 – 60	19 – 24
Legno	40 – 65	19 – 24
Legno dipinto, sculture policrome	45 – 65	19 – 24
Libri, manoscritti	50 – 60	19 – 24
Materiale etnografico	40 – 60	19 – 24
Materiale organico in genere	50 – 65	19 – 24
Materie plastiche	30 – 50	–
Metalli e leghe levigati, ottone, argento, peltro, piombo, rame	< 45	–
Mobili con intarsi e lacche	50 – 60	19 – 24
Mosaici e pitture murali	45 – 60	Min 6°C (inverno) – Max 25°C (estate) – Con max gradiente giornaliero 1.5 °C/h
Oro	< 45	–
Papiri	35 – 50	19 – 24
Pastelli, acquerelli, disegni, stampe	50 – 60	19 – 24
Pellicce, piume	45 – 60	15 – 21
Pitture su tela	35 – 50	19 – 24
Porcellane, ceramiche ***, gres, terracotta	20 – 60	–
Seta	50 – 60	–
Tessuti, tappeti, arazzi, tappezzeria in stoffa	40 – 60	–
Vetri e vetrate stabili	25 – 60	–

* in funzione della sensibilità delle pellicole; ** L'intervallo è valido per fotografie con supporti in carta, materiale plastico, vetro. Invece per supporti a base di nitrato e per vetri con emulsione al collodio sono consigliate temperature più basse; *** Per particolari manufatti ceramici cotti a temperatura piuttosto bassa il valore dell'UR deve essere minore del 45%.

TABELLA 4.10. Valori di riferimento dei parametri termoigrometrici per i depositi. Linee Guida MIBAC (le voci e i valori presenti in tabella corrispondono quasi integralmente a quelli di Tab. 4.4 relativi ai manufatti in genere).

FOTOGRAFIE	UR (%)*	T (°C)*
Dagherrotipi, lastre ambrotipiche e ferrotipiche, lastre di vetro (gelatina, albumina, colloidio a secco e a umido), lastre a colori screen e lastre per lanterna	30 – 40	18
Stampe ad immagine argenticia B/N, silver due bleach, dye/silver diffusion transfer, due imbibition, processi ai pigmenti e diazo	30 – 40	16
Pellicole in poliestere: processo argento-gelatina B/N, termico, vescicolare	20 – 50	21
Pellicole in esteri di cellulosa B/N ** (triacetato, acetato butirato e acetato propionato di cellulosa o loro miscela)	20 – 30 20 – 40 20 – 50	7 5 2
Pellicole in nitrato di cellulosa	20 – 50	2
Pellicole in poliestere diazo	20 – 30	2
Stampe a colori a sviluppo cromogeno	30 – 50 30 – 40	2 5
Pellicole in esteri di cellulosa (a colori) cromogeniche	20 – 50 20 – 40	-10 -3
Pellicole in poliestere (a colori) silver dye bleach	20 – 50	21
Stampe elettrofotografiche (EP)	30 – 50	16
Stampe termiche o thermal dye transfer o dye sublimation, stampe inkjet (colorati o pigmenti)	30 – 50 30 – 40	2 5
Pellicole cinematografiche in nitrato/acetati di cellulosa, poliestere B/N e colore	***	***
Supporti audiovisivi meccanici [cilindri, dischi macrosolco (per grammofono), dischi istantanei laccati (rivestimento in nitrato di cellulosa), dischi istantanei in acetato, dischi microsolco (LP, vinili), dischi ottici [CD (CD-R, CD-ROM, CD-\$V o RAM), DVD (<i>Divital Versatile o Video Disc</i>), HD, DVD BD (<i>Blu-ray Disc</i>), MiniDisc rewriTabella, (dischi magnetici-ottici, M-O), nastri magnetici in acetato in poliestere e <i>hard disk</i>], supporti magnetici	40 – 50	8 – 12****

* All'interno degli intervalli di UR e di T il valore stabilito potrà subire solo oscillazioni molto ristrette: $\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $\pm 5\%$ do UR per un periodo di 24 h; ** La variazione di UR non deve essere maggiore di $\pm 5\%$; *** Valori equivalenti a quelli indicati per le pellicole fotografiche; **** Si deve comunque tenere presente che all'interno degli intervalli di T e il valore stabilito potrà subire oscillazioni massime di $\pm 3^{\circ}\text{C}$.

TABELLA 4.11. Intervalli di UR e T max consigliati per assicurare le condizioni ottimali di conservazione chimico-fisica delle fotografie, pellicole cinematografiche e supporti audiovisivi. Linee Guida MIBAC.

CATEGORIE DI FOTOSENSIBILITÀ		E MAX (LUX)
1 – BASSA	Reperti e manufatti relativamente insensibili alla luce. Metalli, materiali lapidei, ceramiche, gioiellerie, smalti, vetri, reperti fossili.	> 300 *
2 – MEDIA	Reperti e manufatti moderatamente sensibili alla luce. Pitture ad olio ed a tempera verniciate – materiali organici non compresi nei gruppi 3 e 4 quali quelli in corno, osso, avorio, legno.	150
3 – ALTA	Reperti e manufatti altamente sensibili alla luce. Tessuti, costumi, arazzi, tappeti, tappezzeria: acquerelli, pastelli, stampe, libri, cuoio tinto, pitture e tempere non verniciate, pittura a guazzo, pitture realizzate con tecniche miste o "moderne" con materiali instabili, disegni a pennarello, materiale etnografico.	50
4 – MOLTO ALTA	Reperti e manufatti estremamente sensibili alla luce. Sete, inchiostri, coloranti e pigmenti a maggior rischio di scoloritura.	50

* Con limitazioni sugli effetti termici in particolare per smalti, fossili, etc.

TABELLA 4.12. Categorie di fotosensibilità e livelli massimi di illuminamento. Linee Guida MIBAC.

5. Gli standards per il microclima dei Beni Culturali

Gli standard e le norme tecniche italiane (UNI) europee (CEN) e internazionali (ISO), che, a vario titolo, si occupano del microclima dei Beni Culturali, si distinguono in (a) norme tecniche che trattano del microclima e del monitoraggio dei Beni Culturali, e (b) norme tecniche relative alla misurazione delle variabili fisiche, chimiche, etc. e le caratteristiche degli strumenti di misura e della misurazione stessa.

In linea generale, quando la norma tecnica riporta i *range* dei valori limite per le diverse variabili per la conservazione dei Beni Culturali, tali *range* definiti dal legislatore o dal normatore sono ampi e larghi, e sempre riferiti al materiale (legno, carta, metalli etc.) e non agli oggetti che, in genere, sono costituiti da più materiali con caratteristiche diverse e uniti tra loro con diverse tecniche meccaniche (chiodi, etc.), chimiche (colle, adesivi sigilli, etc.).

I dati della norma tecnica sono da prendere come riferimento limite per i materiali ma non per gli oggetti per i quali, in assenza di dati specifici sull'acclimatazione e sul clima storico, è bene considerare valori più restrittivi e cautelativi.

Nel settore vi sono standard di rango europeo (EN) o internazionale (ISO) e norme tecniche emanate soltanto dall'UNI (Ente Normatore Italiano), probabilmente a causa dell'alto numero di Beni Culturali presenti in Italia.

▪ **Standards riferiti al contesto microclimatico utili anche ai fini del Progetto di monitoraggio**

Standards internazionali

- ISO 11799: Information and documentation – *Document storage requirements for archive and library materials.*
- UNI EN 15759-1: Conservazione dei Beni Culturali – Clima interno – *Parte 1: Linee guida per riscaldamento delle chiese, cappelle e altri luoghi di culto.*

- UNI EN 15759-2: Conservazione dei Beni Culturali – Clima interno – *Parte 2: Gestione della ventilazione per la protezione degli edifici che appartengono al Patrimonio Culturale e delle collezioni.*

Norme tecniche italiane

L'ente normatore italiano, visto il consistente Patrimonio edilizio nazionale e il numero relativo di operatori e soggetti coinvolti, nel tempo, ha ritenuto necessario redigere ed emanare delle normative verticali sul controllo del microclima per la conservazione dei Beni Culturali.

- UNI 10969: Beni Culturali – *Principi generali per la scelta e il controllo del microclima per la conservazione dei Beni Culturali in ambienti interni.*
- UNI 10829: Beni di interesse storico e artistico – *Condizioni ambientali di conservazione – Misurazione ed analisi.*

■ Standards per il processo di misurazione strumentale e caratteristiche degli strumenti di misura

Standard internazionali

- UNI EN 15757: Conservazione dei Beni Culturali – *Specifiche concernenti la temperatura e l'umidità relativa per limitare i danni meccanici causati dal clima ai materiali organici igroscopici.*
- UNI EN 15758: Conservazione dei Beni Culturali – *Procedure e strumenti per misurare la temperatura dell'aria e quella della superficie degli oggetti.*

Norme tecniche italiane

- UNI 11131: Beni Culturali – *Misurazione in campo dell'umidità dell'aria.*
- UNI 11120: Beni Culturali – *Misurazione in campo della temperatura dell'aria e della superficie dei manufatti.*
- UNI 11182: Beni Culturali – *Materiali lapidei naturali ed artificiali-- Descrizione della forma di alterazione – Termini e definizioni.*

A questi si aggiungono documenti di settore, ad esempio per le Biblioteche storiche IFLA¹ ha emanato il documento “*IFLA Principles for the Care and Handling of Library Material*” tradotto anche dalla sede italiana in “*Principi dell'IFLA per la cura e il trattamenti dei materiali di biblioteca*”².

Bene di interesse storico e artistico	$\theta 0^{(*)}$	$\Delta\theta_{\max}^{(**)}$	$U0^{(1)}$	$\Delta U_{\max}^{(***)}$	E_{\max}	UV_{\max}	$LO_{\max}^{(****)}$
MATERIALI / OGGETTI DI NATURA ORGANICA							
Manufatti artistici di carta, cartapesta, veline, tappezzerie ⁽²⁾	da 18 a 22	1.5	da 40 a 55	6	50	75	0.2
Tessuti, velari, tendaggi, tappeti, tappezzerie in stoffa, arazzi, seta, costumi, abiti, paramenti religiosi, materiali in fibra naturale, sisal, juta ⁽³⁾	da 19 a 24	1.5	da 30 a 50	6	50	75	0.2
Cere, cere anatomiche ⁽⁴⁾	< 18	NR ⁽⁵⁾	NR ⁽⁵⁾	NR ⁽⁵⁾	150	75	–
Erbari e collezioni	da 21 a 23	1.5	da 45 a 55	2	50	75	0.2
Collezioni entomologiche	da 19 a 24	1.5	da 40 a 60	6	50	75	0.2
Animali e organi anatomici conservati in formalina	da 15 a 25	–	NR ⁽⁵⁾	NR ⁽⁵⁾	50	75	0.2
Animali, organi anatomici essiccati, mummie	da 21 a 23	1.5	da 20 a 35	–	50	75	0.2
Pellicce, piume, animali e uccelli impagliati	da 4 a 10	1.5	da 30 a 50	5	50	75	0.2
Disegni, acquarelli, pastelli e simili su supporto cartaceo	da 19 a 24	1.5	da 45 a 60	2	50	75	0.2
Collezioni etnografiche, maschere, cuoio, indumenti in cuoio	da 19 a 24	1.5	da 45 a 60	6	50	75	0.2
Dipinti su tela, pitture a olio su tela e canovaccio, tempere, guazzi	da 19 a 24	1.5	da 40 a 55	6	150	75	0.5
Documenti archivistici su carta o pergamena, papiri, manoscritti, volumi a stampa, collezioni filateliche	da 13 a 18	–	da 50 a 60	5	150 ⁽⁶⁾	75 ⁽⁶⁾	–
Legature di libri con pelle o pergamena	da 19 a 24	1.5	da 45 a 55	6	50	75	0.2
Lacche, mobili intarsiati, decorati o laccati	da 19 a 24	1.5	da 50 a 60	4	50	75	0.2
Sculture policrome di legno, legno dipinto, pitture su legno, icone, pendole di legno, strumenti musicali di legno	da 19 a 24	1.5	da 50 a 60	4	50	75	0.2
Sculture di legno non dipinte, oggetti di vimini, pannelli di legno o corteccia	da 19 a 24	1.5	da 50 a 60	4	150	75	0.2

TABELLA 5.2. *Categorie di Beni e parametri di riferimento (UNI 10829. Appendice A. Prospetto A.1) Materiali / oggetti di natura organica, Materiali di natura organica, Oggetti misti (segue nella pag. successiva).*

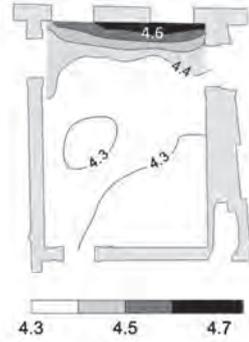
MATERIALI DI NATURA INORGANICA							
Porcellane, ceramiche, grès, terracotta, tegole non da scavo e da scavo se demineralizzate	NR ⁽⁵⁾	–	NR ⁽⁵⁾	10	NR ⁽⁵⁾	–	–
Pietre, rocce, minerali, meteoriti (porosi) stabili	da 19 a 24	–	da 40 a 60	6	NR ⁽⁵⁾	–	–
Mosaici di pietre, pietre, rocce, minerali, meteoriti (non porosi), fossi e collezioni di pietre (7)	da 15 a 25	–					
da 20 a 60	10	NR ⁽⁵⁾	–	–			
Metalli, metalli levigati, leghe metalliche, argenti, armature, armi, bronzi, monete, oggetti in rame, stagno, ferro, acciaio, piombo, peltri (8)	NR ⁽⁵⁾	–	< 50	–	NR ⁽⁵⁾	–	–
Metalli con siti di corrosione attivi	NR ⁽⁵⁾	–	< 40	–	NR ⁽⁵⁾	–	–
Ori	NR ⁽⁵⁾	–	NR ⁽⁵⁾	–	NR ⁽⁵⁾	–	–
Gesso	da 21 a 23	1.5	da 45 a 55	2	150	75	0.5
Vetri instabili, iridescenti, sensibili, mosaici di vetro sensibili	da 20 a 24	1.5	da 40 a 45	–	150	75	0.5

OGGETTI MISTI							
Pittura murale, affreschi, sinopie (staccate)	da 10 a 24	–	da 55 a 65	–	NR ⁽⁵⁾	–	–
Pitture murali a secco (staccate)	da 10 a 24	–	da 50 a 45	–	150	75	0.2
Avorio, corna, collezioni malacologiche, uova, nidi, coralli	da 19 a 24	1.5	da 40 a 60	6	150	75	0.5
Dischi fonografici	da 10 a 21	–	da 40 a 55	–	50	75	0.2
Fibre sintetiche	da 19 a 24	–	da 40 a 60	–	50	75	0.2
Film, fotografie a colori (9)	da 0 a 15	–	da 30 a 45	–	50	75	0.2
Film, fotografie in bianco e nero (9)	da 0 a 15	–	da 30 a 45	–	150	75	0.2
Nastri magnetici (esclusi nastri per computer e videotape) (9) da 5 a 15	–	da 40 a 60	–	–	–	–	
Oggetti di materiali organici provenienti da zone di scavo umide (prima del trattamento) (10)	< 4	–					
in aria satura	–	–	–	–			
Materie plastiche	da 19 a 24	–	da 30 a 50	–	< 300	75	–

Segue dalla pag. precedente: **TABELLA 5.2.** *Categorie di Beni e parametri di riferimento (UNI 10829 – Appendice A. Prospetto A.1) Materiali / oggetti di natura organica, Materiali di natura organica, Oggetti misti.*



Key
Numbers and scale refer to mixing ratio (g/kg)



Key
Numbers and scale refer to mixing ratio (g/kg)

FIGURA 5.3. Mappa con riportate le isolinee del mixing ratio (UNI EN 16242).

FIGURA 5.4. Mappa con riportate le isolinee del mixing ratio in prossimità delle murature per valutare l'evaporazione del vapor d'acqua (UNI EN 16242).

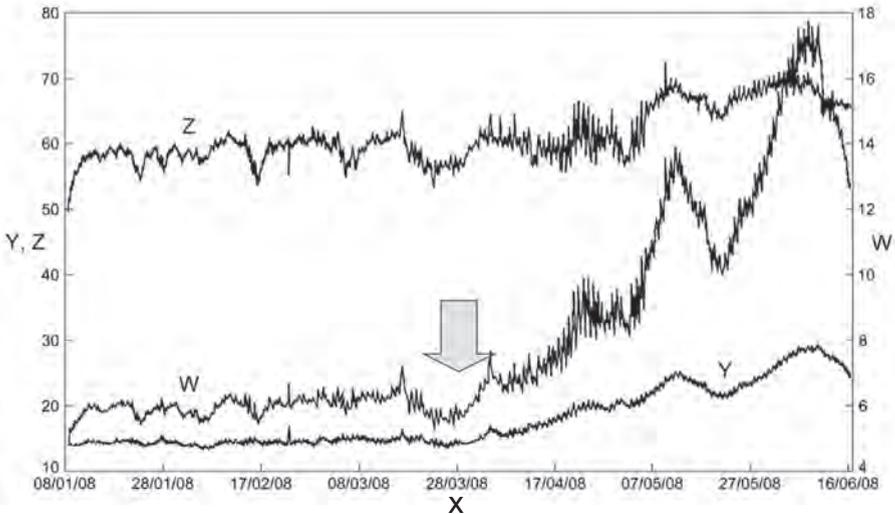


FIGURA 5.5. Andamento dei valori di umidità nel tempo di un muro umido dopo la pioggia. X = data, Y = temperatura (°C), Z = umidità relativa (%), W = mixing ratio (gv/kg) (UNI EN 16242).

6.5 Allerta e rischio microclimatico

Il monitoraggio in continuo del microclima di un museo o di un edificio storico consente di predisporre dei **sistemi di allerta** o **indicatori di allarme** in grado di segnalare e/o prevenire un problema, oppure di definire il **rischio microclimatico** del museo o della collezione.

Il *sistema di allerta* è quel sistema che invia, in automatico, al decisore (Responsabile del monitoraggio, Restauratore, Direttore) un segnale (sonoro, sms, e-mail, etc.) ogni qual volta i valori misurati in continuo risultino al di fuori di un *range* definito dal sistema di monitoraggio stesso.

Il *rischio microclimatico* (*Indoor Microclimate Risk*) è un rischio analogo al rischio climatico o al rischio ambientale, ed esprime l'insieme dei fattori che caratterizzano il microclima espressi rispetto ai possibili danni per l'edificio e/o i manufatti e/o le collezioni conservate. Attualmente, il rischio microclimatico è, prevalentemente, oggetto di dibattito nell'ambito della comunità scientifica e degli addetti ai lavori, non è ancora previsto da disposizioni normative o legislative.

■ **Allerta o indicatori di allarme**

La legislazione e le norme tecniche forniscono, come abbiamo visto, le soglie di alcune variabili fisiche in relazione ai materiali che costituiscono i diversi manufatti storici e artistici. Tali soglie sono da considerarsi indicative e cautelative, nel senso che, data l'enorme varietà di manufatti e contesti, è bene, di volta in volta, adattare e definire le soglie in base al caso specifico, all'esperienza e ai risultati della prima fase del monitoraggio. In particolare, mentre per le variabili temperatura e umidità relativa l'esperienza è ampia, non è così per altre variabili quali l'esposizione alla luce, naturale o artificiale, pertanto il principio da adottare è di natura cautelativa, ovvero se il manufatto è prezioso e delicato, evitare o ridurre al minimo l'esposizione. Lo stesso dicasi per gli inquinanti di natura chimica, in particolare le polveri e le polveri sottili, che occorre mitigare per evitarne il deposito e la cementificazione; mentre per quelli di natura biologica (muffe, insetti, etc.) l'obiettivo deve essere sempre quello di evitare che siano presenti e, se presenti, di individuarne l'origine il prima possibile per bloccarne lo sviluppo e la diffusione.

Il *sistema di allerta* serve per *allertare*, appunto, nel caso in cui si verifichi il rischio di un danno. Il danno, come si è detto, può essere acuto, ovvero immediato, oppure

cronico, quando le condizioni microclimatiche persistono nel tempo. Ad esempio, se la temperatura dell'aria subisce una drastica riduzione da 20°C a 12°C, è probabile che ciò sia dovuto a un guasto dell'impianto termico (danno acuto). In altri casi, invece, il danno può essere dovuto al persistere di condizioni anomale, ad esempio ambienti nei quali il valore di umidità resta al di sopra del 70% per più giorni o settimane, condizione che costituisce un rischio cronico.

A seguito dell'allerta devono seguire delle decisioni e delle azioni da parte di una figura preposta dall'organizzazione museale.

Il criterio con il quale si attiva l'allarme deve prevedere: il **valore dell'indicatore di allarme** (valore singolo o *range*) e il **periodo di persistenza** del valore misurato:

- **L'indicatore di allarme** può riferirsi a un singolo valore di una variabile; ad esempio, solo il valore della temperatura o dell'illuminamento; quando il valore misurato supera tale valore il sistema invia il messaggio di allarme. Possono essere previste anche più soglie di rischio secondo una scala: basso rischio, medio rischio, alto rischio. In altri casi, l'indicatore può essere espresso come *range* di valore, soglia minima e massima, del *range* di tolleranza.

L'indicatore di allarme può essere espresso in base a una combinazione di più valori; ad esempio, in base a un'area di valori di temperatura e umidità relativa espressi sul diagramma psicrometrico: quando i valori misurati sono al di fuori dell'area, il sistema invia l'allarme.

- **Il periodo di persistenza** si riferisce al numero di volte che il valore dell'indicatore viene superato. Ad esempio, può accadere che un valore misurato sia occasionalmente al di fuori di un dato *range*, per ragioni diverse: la temperatura varia perché è stata aperta una finestra, il livello di CO₂ aumenta quando vi è l'ingresso dei visitatori, oppure la sonda è stata manipolata, distaccata, etc. In questi casi il sistema può inviare più volte il segnale di allarme.

La figura preposta a ricevere i segnali di allarme riceve più messaggi che possono non costituire una condizione di rischio. Il periodo di persistenza definisce il numero di volte che un valore misurato è al di fuori della soglia o del *range* definito. Ad esempio, se la temperatura interna è al di sotto del valore soglia per più di 6 ore o di 12 ore, il sistema invia un segnale di allarme perché la condizione di rischio persiste per un lungo periodo.

Le caratteristiche del sistema di allarme, indicatore di allerta, periodo di persistenza e della figura preposta a ricevere i messaggi e ad agire, devono essere definite insieme al decisore/responsabile, ovvero al Direttore del museo, al Restauratore, al Curatore del museo. Il sistema di allerta dovrebbe essere sempre riferito alle caratteristiche dell'edificio e delle collezioni conservate.

In prima battuta, l'indicatore può essere definito rispetto ai *range* e valori previsti dalla legislazione o dalla normativa tecnica (vedi sopra); ciò stante, dato che le collezioni, le modalità di esposizione, i manufatti, i materiali hanno caratteristiche molto differenti tra di loro, è preferibile definire gli indicatori di allerta rispetto ai casi specifici a partire da dati effettivamente monitorati in sito e al microclima storico. La letteratura scientifica riporta diversi casi studio e può fornire utili indicazioni, e resta sempre valido il confronto tra gli operatori del settore museale sui singoli casi studio. Il confronto costituisce la migliore fonte dati perché consente di conoscere come è stato affrontato lo stesso problema o un problema simile in altri contesti.

Un possibile approccio per definire le soglie di rischio può essere definito in analogia con quanto accade nell'ambito della *Indoor Air Quality*. La guida della *World Health Organization* (WHO) sulla qualità dell'aria negli ambienti indoor, distingue tra danni acuti e danni cronici, e persistenti nel tempo, per le diverse sostanze: anidride carbonica, formaldeide, monossido, composti organici volatili, etc., definendo due soglie: una soglia riporta la concentrazione di esposizione all'inquinante alla quale una persona muore, l'altra soglia è riferita a una concentrazione minore e al periodo di esposizione all'inquinante durante il quale la persona sviluppa una patologia cronica. Nel caso dei Beni Culturali e delle collezioni, si può operare nello stesso modo anche a partire da esperienze pregresse. Ad esempio, nel definire la soglia per il metallo si può valutare la concentrazione di vapor d'acqua e la durata del periodo di condensa che può portare alla ossidazione.

■ **Rischio microclimatico (Micro-Climate Risk Assessment)**

Il **rischio microclimatico**¹², nei musei e negli edifici storici, rientra fra i rischi individuati nell'Ambito V "*Sicurezza del Museo*" di cui al DM 10 maggio 2011 ed è riferito, espressamente, al microclima indoor. La legislazione e le norme tecniche non individuano criteri specifici per tale tipologia di rischio, che resta incluso tra i rischi generici, e anche la letteratura scientifica non individua un criterio univoco per esprimere

il rischio microclimatico. In questa sede si riportano alcuni approcci attualmente oggetto di dibattito nel settore.

L'espressione '*rischio microclimatico*' richiama le definizioni '*rischio climatico*' o '*rischio climatico-ambientale*', disciplina che studia i rischi correlati al variare delle condizioni meteo e climatiche e i possibili danni dovuti dai cambiamenti climatici a grande scala: dalle alluvioni alla siccità, agli uragani, etc. Il rischio valuta le probabilità che si manifestino eventi catastrofici, il danno conseguente e le misure di prevenzione e/o di ristoro del danno. La disciplina è ampiamente consolidata in diversi ambiti, dalle previsioni di eventi catastrofici, terremoti, alluvioni, al rischio incendio o incidente rilevante, ai rischi per la salute della popolazione (ad esempio, l'allerta meteo per le ondate di calore), ai rischi valutati in ambito assicurativo.

Alla scala indoor del microclima degli *heritage buildings* e dei musei, manca una definizione e un approccio univoco. A parere del sottoscritto, il rischio microclimatico è assimilabile ai rischi in ambito sanitario e assicurativo, legati allo 'stato di salute' del singolo individuo, valutato confrontando la condizione di rischio della singola persona rispetto a possibili rischi standardizzati (età, attività lavorativa, comune di residenza, malattie pregresse, etc.); così il rischio di formazione di degrado, valutato secondo i *range* della normativa, dev'essere ricalibrato rispetto alle specifiche condizioni microclimatiche del contesto e alle caratteristiche del manufatto.

La definizione del rischio microclimatico consente di *caratterizzare* il microclima e il clima storico specifico. Seguendo l'analogia delle assicurazioni sanitarie, consente di definire il '**profilo di rischio microclimatico**' del museo/edificio storico. In base a tale profilo di rischio è possibile definire le azioni preventive, definire i criteri/*range* di allarme, gestire accessi e/o attivazione impianti. La letteratura scientifica propone diversi approcci:

- (a) indicatore di rischio riferito a una o due variabili fisiche o chimiche;
- (b) indicatore multi-criteriale;
- (c) indicatore di rischio riferito al locale, all'edificio, alla collezione e/o al manufatto.

Nella prima categoria rientrano indicatori di rischio che esprimono il numero di volte nelle quali il/i valore/i e/o l'escursione termica sono al di fuori del *range* fissato dalle normative, espresso secondo un criterio ponderato e percentuale. A titolo d'esempio, si riporta l'indice **PI index** proposto da Corgnati¹⁵ definito come la percentuale di tempo durante il quale le misurazioni dei parametri si trovano all'interno in un

intervallo fisso (t_{in}), riferito a *range* normativi o al clima storico, rispetto alla durata della campagna di misurazione (t_{out}), secondo la formula:

$$PI = 100 \cdot \frac{t_{in}}{t_{out}}$$

L'**indice IME** (*Index of Microclimatic Excursion*) proposto da Ferrarese¹⁴, invece, tiene conto dell'escursione giornaliera di temperatura e umidità relativa e dei loro limiti giornalieri dati dalla UNI 10829, secondo la formula:

$$IME = \frac{n_1 - n_3}{n_{tot}} + 0,5 \left(\frac{n_2 + n_4}{n_{tot}} \right)$$

dove n_1 è il numero di giorno nei quali il valore limite giornaliero è rispettato, n_2 è il numero di giorni che eccedono i limiti di temperatura e di umidità relativa, n_3 e n_4 il numero di giorni durante i quali uno dei due parametri supera i limiti.

I limiti di questi indicatori sono dati dal fatto che si riferiscono a una sola variabile, a valori fissati dalla normativa e non individuano criteri di tolleranze o di magnitudo del rischio. Resta comunque possibile definire i *range* rispetto al clima storico invece che agli standard.

La seconda categoria prevede l'elaborazione di un unico indicatore *multi-criteriale*¹⁵ (*multi-objective assessment* o *fuzzy logic*¹⁶) che raccoglie diverse variabili fisiche, chimiche e illuminotecniche, applicando una media ponderata e pesata a seconda del livello di rischio, o danno, applicabile alle diverse variabili. L'ambizione è superare gli approcci riferiti alle singole variabili e alle sole variabili/fluttuazioni termigrometriche, fornendo informazioni utili anche alla gestione del museo seguendo l'approccio introdotto dalla UNI EN 15757 ovvero il clima storico. L'indicatore della *Indoor Microclimate Quality* (IMQ¹⁷) prevede l'identificazione dei fattori di danno (inquinanti, persone, impianti termici), il livello di degrado delle collezioni, il bilancio degli scambi termici e di massa del microclima indoor, nonché il comfort termico percepito dai visitatori e la possibilità di ottimizzazione degli allestimenti espositivi e/o di confrontare la qualità microclimatica tra diversi edifici.

L'ultima categoria di indicatori si pone l'obiettivo di definire un livello di gradualità delle condizioni di rischio del locale, seguendo lo stesso approccio adottato per valutare il comfort termico (UNI EN ISO 7730¹⁸, ASHRAE 55¹⁹, P.O.Fanger²⁰, etc.). Il rischio

HMR	- 1.00	- 0.80	- 0.60	- 0.40	- 0.20	0.00	+ 0.20	+ 0.40	+ 0.60	+ 0.80	+ 1.00
Risk level	Maximum	High	Medium	Moderate	Low	Minimum	Low	Moderate	Medium	High	Maximum

TABELLA 6.1. Range Heritage Microclimate Risk.

non viene espresso e riferito a un singolo valore, in termine assoluti, ma a un *range* di rischi. Si riportano gli indici HMR e PRD proposti dal sottoscritto²¹:

L'**indice di rischio HMR (Heritage Microclimate Risk)**, rischio microclimatico dei Beni Culturali) e l'**indice PRD (Predicted Risk of Damage)**, sono indici correlati tra loro e consentono di stabilire sia il *livello di aggressività* esercitato dal microclima indoor nei confronti del Patrimonio storico, sia la *probabilità di rischio di danno* a cui sono esposti i materiali specifici che compongono gli oggetti conservati in di una sala indoor. HMR e PRD sono calcolati a partire dai dati di una Campagna di monitoraggio microclimatico, o ottenuti tramite simulazione virtuale.

L'indice *Heritage Microclimate Risk* (HMR), esprime il rischio microclimatico del manufatto (mobili, arredo, quadri, sculture, etc.) e consente di valutare il rischio legato al microclima indoor al quale il manufatto è esposto all'interno di un locale. La base dati necessaria per calcolare il valore di HMR è una Campagna di monitoraggio o un modello virtuale validato.

I valori limite '*high*' e '*low*' del *Heritage Microclimate Risk* (HMR) sono compresi tra: $HMR_{low} = -1$, pari a una condizione di rischio relativo alla '*soglia inferiore (lower)*', ovvero i valori limite inferiori da standard o da monitoraggio; e a $HMR_{high} = +1$, che corrisponde alla condizione di rischio relativo alla '*soglia superiore (higher)*', ovvero i valori limite superiori da standard o da monitoraggio (o simulazione virtuale).

La scala di rischio prevede due valori estremi, $HMR = -1$ o $HMR = +1$, ai quali corrisponde un alto livello di rischio dovuto al microclima del locale, e il valore centrale $HMR = 0$, il quale corrisponde a un livello di rischio microclimatico minimo o neutro. La scala di riferimento è riportata nella **Tab. 6.1**.

Tale suddivisione per livelli di rischio consente di monitorare le varie entità di rischio, considerando non solo le condizioni di rischio estreme (minimo e massimo), ma anche le condizioni di rischio intermedie.

Il calcolo di HMR si distingue in:

- (i) HMR-*standard* (HMR_{st}), dove i valori di minimo ($HMR_{st,low}$) e massimo ($HMR_{st,high}$) di riferimento per la scala sono determinati come valori minimo e massimo definiti su base empirica dagli standard riportati dalla norma UNI 10829 e UNI EN 15757;
- (ii) HMR-*historical* (HMR_{hs}), dove i valori di minimo ($HMR_{hs,low}$) e massimo ($HMR_{hs,high}$) di riferimento per la scala sono definiti della Campagna di monitoraggio in sito o della virtual environmental simulation.

La norma UNI EN 15757 riconosce che per ogni materiale esistono specifici *range* microclimatici più adatti alla conservazione rispetto ad altri, ma, se uno stesso materiale si è acclimatato per anni ad uno specifico microclima storico, un cambiamento repentino delle condizioni microclimatiche non farebbe altro che esporlo ad un rischio di danno. Nel rispetto di tale logica si definisce:

- (a) HMR_{st} (*standard*) si applica negli ambienti dove si sono verificati danni ai manufatti conservati o che non presentino particolari o anomale situazioni microclimatiche; oppure
- (b) HMR_{hs} (*clima storico*) si applica nei casi dove non sono presenti danni da almeno un decennio nonostante le condizioni microclimatiche si presentino come anomale o specifiche. Ad esempio, nel caso di manufatti perfettamente conservati in ambienti con valori di umidità relativa o di temperatura estremi.

L'indice HMR è calcolato secondo la formula:

$$HMR = 1 - \left[\frac{HMR_{high} - HMR_{data}}{HMR_{high} - HMR_{low}} \right] \cdot 2 \quad [-]$$

dove:

HMR_{data} è calcolato dal rapporto $\left(\frac{M_{data}}{N} \right)$, dove M_{data} è la sommatoria dei dati registrati durante la Campagna di monitoraggio per ogni variabile considerata e N è il totale dei valori registrati durante la Campagna di monitoraggio per ogni variabile considerata;

high è il valore *massimo* definito secondo standard (UNI 10829) oppure rilevato dal monitoraggio in sito (clima storico);

low è il valore *minimo* definito secondo standard (UNI 10829) oppure rilevato dal monitoraggio in sito (clima storico).

L'indice *Predicted Risk of Damage* (PRD, rischio di danno previsto) è definito in relazione al rischio che si verifichi un danno e valuta la probabilità di rischio e di danno che le condizioni microclimatiche indoor del locale possono avere su specifici materiali. Il valore di PRD dipende dal microclima, da HMR e dal tipo di materiale: a parità di HMR, i diversi materiali (inorganici, organici, etc.) hanno diversi comportamenti e sono esposti a rischi differenti (es. la carta è più delicata di un tavolo in legno, che è più delicato di una statua in pietra, etc.).

L'equazione per il calcolo di PRD è stata ottenuta su base empirica:

$$PRD = 1 - 0.95 \cdot e^{(-a \cdot HMR^a - b \cdot HMR^2)} \quad [\%]$$

dove:

- HMR è calcolato secondo la formula precedente
- a è un esponente che definisce il rischio di danno dovuto al persistere del Bene in locali dove sono presenti i valori HMR massimo/minimo;
- b è un esponente che definisce l'assenza di rischio di danno dovuto al persistere del Bene in locali dove sono presenti i valori HMR medio/nulla.

I valori di “a” e “b” sono stati determinati su base empirica dagli standard riportati dalla norma UNI 10829 e UNI 15757 **[Tab. 6.2]**.

Le **Figg. 6.29 e 6.30** riportano il grafico HMR/PRD grazie al quale è possibile mettere in relazione il rischio microclimatico dovuto al locale (HMR) rispetto al possibile danno (PRD) in base a diversi materiali. L'esempio è riferito a un valore di HMR basso.

	a	b
Inorganici	1.5	0.5
Organici	2	1
Misti	2	1.5
Dipinti	2	2
Libri e Beni archivistici	4	5
Mobili	4	2.5

TABELLA 6.2. Valori di “a” e “b” per materiale.

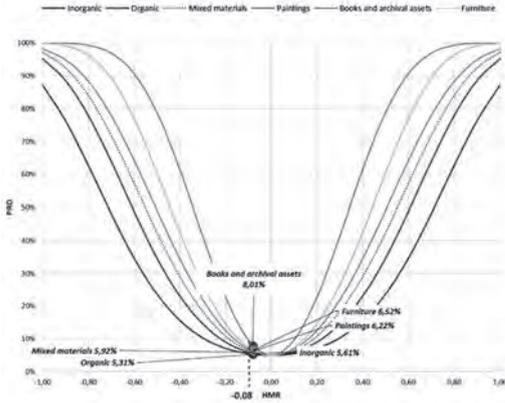


FIGURA 6.29. Esempio risultati del grafico HMR/ PRD Index basato su un valore di HMRhs pari a - 0.09. Il grafico mostra per i diversi materiali il valore di PRD corrispondente (Fonte: K. Fabbri, A. Bonora, "Two new indices for preventive conservation of the cultural heritage: Predicted risk of damage and heritage microclimate risk", in Journal of Cultural Heritage, Vol. 47, January-February 2021, pp. 208-217).

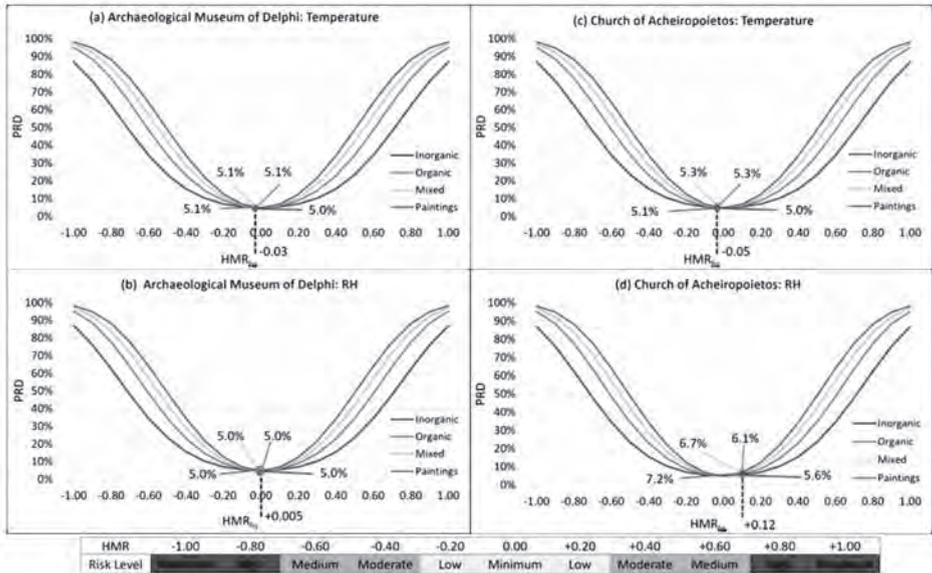


FIGURA 6.30. Esempio risultati del grafico HMR/ PRD applicato al Museo Archeologico di Delphi per le variabili temperatura e umidità relativa (Fonte: E. Tringa, D. Kavroudakis, K. Tolika, "Microclimate-Monitoring: Examining the Indoor Environment of Greek Museums and Historical Buildings in the Face of Climate Change", in Heritage 2024, 7(3), 1400-1418).