

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

DOTTORATO DI RICERCA IN
ARCHITETTURA E CULTURE DEL PROGETTO

Ciclo 33

Settore Concorsuale: 08/E2 - RESTAURO E STORIA DELL'ARCHITETTURA

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/19 - RESTAURO

LO STUDIO DEL MICROCLIMA INDOOR PER LA CONSERVAZIONE
PREVENTIVA DEL PATRIMONIO STORICO ARTISTICO E CULTURALE

Presentata da: Anna Bonora

Coordinatore Dottorato

Prof.ssa Arch. Annalisa Trentin

Supervisore

Prof. Arch. Marco Pretelli

Co-supervisore

Arch. Kristian Fabbri

Esame finale anno 2021

Indice:

Ringraziamenti	pag. 7
Premessa e obiettivi	pag. 10
Struttura della tesi	pag. 14

Capitolo I

Il microclima e la conservazione preventiva

1.1. Le premesse	pag. 16
1.1.1. Breve antologia: i padri della disciplina del restauro	pag. 16
1.1.2. Lo stato dell'arte	pag. 18
1.1.3. <i>Indoor Microclimate</i> (IM), <i>historical climate</i> e <i>Historic Indoor Microclimate</i> (HIM)	pag. 21
1.4. La normativa vigente nell'ambito delle condizioni ambientali per la conservazione preventiva	pag. 22
1.5. I fenomeni di degrado dei materiali dovuti all'interazione con il microclima	pag. 25
1.6. Progetto dell'architettura e determinazione del microclima	pag. 25
1.6.1. Il rapporto tra progettazione dell'architettura e microclima prima del XIX secolo	pag. 25
1.6.2. Il rapporto tra progettazione dell'architettura e microclima dopo il XIX secolo	pag. 30
1.7. Il <i>comfort</i> dei visitatori	pag. 31
1.7.1. <i>Comfort</i> termico: una questione anche culturale	pag. 31
1.7.2. Gli indici per la misurazione del <i>comfort</i> termico (PMV e PPD)	pag. 31
1.8. Edifici storici ad uso museale: il difficile equilibrio tra conservazione e fruizione	pag. 32
1.9. Esempi di gestione di impianti di climatizzazione in edifici storici ad uso museale	pag. 34
1.10. Conclusioni	pag. 37
Riferimenti	pag. 38

Capitolo II

Metodologia

2.1. Metodologia per la valutazione del <i>Historic Indoor Microclimate</i>	pag. 46
2.2. Conoscenza storico-architettonica	pag. 46
2.3. Campagna di monitoraggio microclimatico	pag. 47
2.4. Analisi dei dati monitorati	pag. 48
2.5. Costruzione del modello virtuale	pag. 49
2.5.1. Errori e semplificazioni adottate	pag. 52
2.6. Validazione del modello virtuale	pag. 53
2.7. Conclusioni e definizione di eventuali proposte di intervento	pag. 54
Riferimenti	pag. 55

Capitolo III

Casi-studio

3.1.	Caso-studio I: Reggia di Venaria Reale – la sala 33	pag. 58
3.1.1.	Finalità della ricerca	pag. 58
3.2.	Conoscenza storico-architettonica	pag. 59
3.2.1.	Venaria Reale: Fasi costruttive	pag. 61
3.2.1.1.	Filippo Juvarra: spunti e riferimenti per i suoi interventi alla Reggia	pag. 63
3.2.3.	Modifiche d'uso e interventi architettonici	pag. 69
3.2.3.1.	Accenni sul restauro (2001-2007)	pag. 70
3.2.3.2.	Gli impianti	pag. 71
3.2.4.	I beni conservati nelle sale 33 e 38 e i rispettivi standard per la conservazione	pag. 73
3.3.	Campagna di monitoraggio microclimatico	pag. 74
3.3.1.	Errori e semplificazioni adottate	pag. 75
3.4.	Analisi dei dati monitorati	pag. 76
3.4.1.	Calcolo dell'anno-tipo	pag. 84
3.4.2.	Discussione dei risultati	pag. 88
3.5.	Costruzione del modello virtuale dello stato di fatto (<i>Virtual Building 1</i>)	pag. 89
3.5.1.	Errori e semplificazioni adottate	pag. 92
3.6.	Validazione del <i>Virtual Building 1</i>	pag. 92
3.7.	Scenario virtuale – HVAC off (<i>Virtual Building 2</i>)	pag. 98
3.7.1.	Simulazione termodinamica	pag. 99
3.7.2.	Discussione dei risultati	pag. 101
3.8.	Confronto dei risultati: simulazioni dei <i>Virtual Building 1-2</i>	pag. 101
3.8.1.	Temperatura dell'aria	pag. 102
3.8.2.	PMV	pag. 103
3.8.3.	PPD	pag. 105
3.8.4.	Discussione dei risultati	pag. 105
3.9.	Ipotesi di scenari futuri – <i>Climate Change (Virtual Building 3 e 4)</i>	pag. 106
3.9.1.	Confronto dei risultati: simulazioni dei <i>Virtual Building 1-3-4</i>	pag. 106
3.9.2.	Discussione dei risultati	pag. 108
3.10.	Conclusioni	pag. 108
	Riferimenti	pag. 110
3.11.	Caso-studio II: Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca (BUSAL)	pag. 111
3.11.1.	Finalità della ricerca	pag. 111
3.12.	Conoscenza storico-architettonica	pag. 112
3.12.1.	Modifiche d'uso e interventi architettonici	pag. 116
3.12.2.	I beni conservati nella BUSAL e i rispettivi standard per la conservazione	pag. 119
3.13.	Campagna di monitoraggio microclimatico	pag. 120
3.13.1.	Errori e semplificazioni adottate	pag. 122
3.13.2.	Il sistema di monitoraggio MHS (<i>Monitoring Heritage System</i>)	pag. 122
3.14.	Analisi dei dati monitorati	pag. 123
3.14.1.	Discussione dei risultati	pag. 140
3.14.2.	Studio della stratificazione dell'aria	pag. 140

3.14.2.1.	Discussione dei risultati	pag. 146
3.14.3.	Calcolo dell'anno-tipo	pag. 147
3.14.4.	Analisi delle oscillazioni giornaliere	pag. 156
3.14.5.	Confronto tra dati climatici <i>outdoor</i> e dati microclimatici <i>indoor</i>	pag. 158
3.14.6.	Sonda 17: valori anomali	pag. 159
3.15.	Costruzione del modello virtuale dello stato di fatto	pag. 165
3.16.	Validazione del modello virtuale	pag. 167
3.17.	Simulazione dell'andamento <i>indoor</i> della luce naturale	pag. 175
3.18.	Conclusioni parziali	pag. 179
3.19.	Aspetti architettonici e microclima: BUSAL e Biblioteca Malatestiana a confronto	pag. 180
3.19.1.	Conclusioni	pag. 189
	Riferimenti	pag. 190
3.20.	Caso-studio III: Cattedrale di Santiago de Compostela – il Portico della Gloria	pag. 191
3.20.1.	Finalità della ricerca	pag. 191
3.21.	Conoscenza storico-architettonica	pag. 191
3.21.1.	Modifiche d'uso e interventi architettonici	pag. 193
3.21.1.1.	Restauro del Portico della Gloria	pag. 195
3.21.2.	I beni conservati nel Portico della Gloria e i rispettivi standard per la conservazione	pag. 197
3.22.	Campagna di monitoraggio microclimatico	pag. 197
3.22.1.	Errori e semplificazioni adottate	pag. 198
3.23.	Analisi dei dati monitorati	pag. 198
3.23.1.	Discussione dei risultati	pag. 211
3.23.2.	Analisi delle oscillazioni giornaliere	pag. 212
3.23.3.	Confronto tra dati climatici <i>outdoor</i> e dati microclimatici <i>indoor</i>	pag. 213
3.23.4.	Influenza dei visitatori	pag. 217
3.23.5.	Analisi del funzionamento degli impianti	pag. 225
3.24.	Costruzione del modello virtuale dello stato di fatto (<i>Virtual Building 1</i>)	pag. 229
3.24.1.	Errori e semplificazioni adottate	pag. 230
3.25.	Validazione del <i>Virtual Building 1</i>	pag. 231
3.26.	Confronto dei risultati: stato di fatto - scenario virtuale con UTA <i>off</i> (<i>Virtual Building 2</i>)	pag. 234
3.27.	Ipotesi di scenari futuri: confronto delle simulazioni dei <i>Virtual Building 3-4-5</i>	pag. 236
3.27.1.	<i>Virtual Building 3</i> e <i>Virtual Building 4</i> a confronto	pag. 237
3.27.2.	<i>Virtual Building 4</i> e <i>Virtual Building 5</i> a confronto	pag. 237
3.28.	Conclusioni	pag. 238
	Riferimenti	pag. 240

Capitolo IV

Indici di Rischio Microclimatico

4.1.	Il rischio microclimatico	pag. 242
4.1.1.	Finalità della ricerca	pag. 242
4.2.	Metodologia	pag. 242
4.2.1.	Indice <i>Heritage Microclimate Risk</i> (HMR)	pag. 242
4.2.2.	Indice <i>Predicted Risk of Damage</i> (PRD)	pag. 246

4.3.	Applicazione al caso-studio di Venaria Reale	pag. 247
4.3.1.	Risultati: HMR <i>historical</i> e PRD	pag. 249
4.3.2.	Risultati: HMR <i>standard</i> e PRD	pag. 250
4.4.	Discussione dei risultati e conclusioni	pag. 251
	Riferimenti	pag. 253

Capitolo V Conclusioni e prospettive

5.1.	Discussione dei risultati	pag. 256
5.2.	Conclusioni	pag. 259
5.3.	Possibili sviluppi	pag. 261
	Riferimenti	pag. 262
	Nomenclatura	pag. 265
	Normativa di riferimento	pag. 266
	Glossario	pag. 267
	Registro delle immagini	pag. 268
	Bibliografia	pag. 271
	Siti consultati	pag. 282
	Apparato I	pag. 284
	Apparato II	pag. 291
	Apparato III	pag. 292
	Apparato IV	pag. 293
	Apparato V	pag. 294
	Apparato VI	pag. 295
	Apparato VII	pag. 296

Ringraziamenti

Questi tre anni di ricerca mi hanno permesso di entrare in contatto con varie persone, con la comune passione per l'architettura ed il restauro, ma di diverse nazionalità, differente retaggio culturale e formativo. La possibilità di confrontarmi con ciascuno di loro mi ha consentito di conoscere nuovi punti di vista, sia per quanto riguarda le tematiche inerenti alla mia ricerca di Dottorato, sia per ciò che concerne il lato sociale (ho potuto conoscere tradizioni, opinioni e storie di vita diverse dalla mia, alcune delle quali mi hanno fatta riflettere; altre mi hanno trasmesso malinconia ed altre ancora mi hanno fatta sorridere). È stato un vero e proprio viaggio -d'altronde sono stati pur sempre tre anni della mia vita- per il quale mi sento di ringraziare in *primis* il mio tutor Marco Pretelli, conosciuto durante il percorso di Laurea Magistrale, al quale nel 2015 chiesi di poter intraprendere il tirocinio con lui, perché era uno dei pochi professori in cui avevo notato un reale interesse per gli argomenti che insegnava in aula. Il tirocinio è diventato una tesi di Laurea Magistrale e successivamente un Dottorato di ricerca. Tramite il Prof. Pretelli ho conosciuto il mio Co-tutor Kristian Fabbri, che condivide con Marco la stessa passione per il proprio lavoro ed anche la medesima ironia, oltre ad avere infiniti interessi, tra i quali quello per il teatro, passione in cui riesce anche piuttosto bene! Li ringrazio entrambi per avermi accompagnata in questo percorso.

Per ogni caso-studio indagato in questa tesi ho ricevuto aiuto da parte di esperti e tecnici nel campo della conservazione e del restauro, ringrazio dunque: Giulia Favaretto; Leila Signorelli; Alessia Zampini e Elena Pozzi, Architetti e Dottoresse in architettura, che con me si sono sempre dimostrate disponibili nel dispensare utili consigli; Lorenzo Appollonia, Direttore dei laboratori scientifici del Centro Conservazione e Restauro La Venaria Reale (CC&R); Marco Nervo, responsabile dell'area servizi e sistema di gestione qualità dal CC&R; Alessandro Bovero, esperto in grafica 3D; l'Arch. Vincenzo Scarano, che ha lavorato al restauro della Reggia di Venaria Reale; Georges S. Zouain, fondatore di GAIA-heritage, ex direttore del settore cultura presso l'UNESCO e ex vicedirettore del World Heritage Centre, che si è dimostrato interessato al mio percorso di ricerca e mi ha messa in contatto con la Fondazione Santa Maria la Real del Patrimonio histórico (FSMR), a Valladolid, in Spagna; tutti i componenti del team della FSMR, impegnato nella conservazione preventiva e nello sviluppo di sistemi MHS (Monitoring Heritage System), con cui ho potuto collaborare per lo studio del microclima *indoor* della Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, all'interno del progetto europeo HeritageCARE; in particolare Begoña García, Joaquín García Álvarez e Paco Alonso. Ringrazio inoltre Davide Marangoni, Dottore di ricerca in Matematica; Giovanni Litti, del Dipartimento EMIB (Energia e Materiali in Infrastrutture ed Edifici), presso l'Università di Anversa; il Prof. Juan Monjo-Carrió, conosciuto al congresso Rehabend 2018, a Cáceres, per avermi messo in contatto con il Prof. Javier Neila González e con la Prof.ssa Soledad García Morales, Direttrice del dipartimento di costruzione e tecnologia architettonica dell'Università Politecnica di Madrid, impegnata nel restauro degli interni della Cattedrale di Santiago de Compostela e nello studio del microclima *indoor* del Portico della Gloria, nartece della Cattedrale.

Ringrazio le lettrici per aver revisionato il mio elaborato in una fase preliminare; in particolare ringrazio la Prof.ssa Cristina Tedeschi, che con curiosità e cortesia mi ha spronata a rivedere alcuni passaggi della tesi per sottolineare gli aspetti innovativi e i punti di forza della mia ricerca, senza lasciare nulla per scontato. Le sue correzioni, fatte a mano e spesso in notturna, sono state per me preziosissime e molto apprezzate.

Infine, grazie a coloro che costituiscono le basi della mia quotidianità: i miei amici, la mia famiglia e il mio ragazzo, che è un misto di entrambe le cose. Grazie a loro la mia realtà è supportata dalla cosiddetta "*comfort zone*", in maniera costante, perché vicini o distanti riescono a trasmettermi sicurezza, serenità e sostegno. Nel corso di questa ricerca mi sono confrontata spesso con la persona con la quale da quando ho sei anni ho la fortuna di poter esprimere sia la più grande sciocchezza sia il più grande tormento, ovvero la mia migliore amica (Benni) e con altri quattro pilastri della mia vita (Letizia, Alice, Sofia e Silvia), con cui ci siamo da sempre comprese, interessate, ricordate vicendevolmente quali siano le vere priorità nella vita per cui vale la pena stressarsi, riuscendo a darci coraggio in qualsiasi contesto e a trovare il lato positivo e ironico delle vicende che ci riguardano, anche quando le cose non vanno esattamente come avevamo pianificato. Tra i miei "pilastri" rientrano anche Caterina, Virginia, Maddalena, Giulia, Federica, Vittoria, Anna e Silvia, con le quali mi sono confrontata meno per quanto riguarda questa tesi (per questione di interessi), ma con cui condivido da anni momenti ed esperienze stupende e su cui so di poter contare in qualsiasi circostanza...e questa è un'enorme fortuna, che mi dà tantissima forza e sicurezza. Ne approfitto poi per fare una "sviolinata" alla nonna "Pupa", anche lei di periodo ante rivoluzione industriale come i miei casi-studio (non è vero nonna, non ti arrabbiare), ma con esperienze di vita caratterizzate da una mentalità più aperta e moderna di tutti noi: tra viaggi per l'intero globo e la vita arricchita da otto nipoti (circa, credi!), è sempre stata per me guaritrice di tutti i mali e dispensatrice di buon umore. Grazie a te mamma, per essere così libera, possibilista,

dolce e risolutiva; capace di far innamorare chiunque del tuo sorriso e della tua allegria, ma anche di mantenere il punto quando necessario, esattamente con quell'attitudine che mi suggerisci sempre tu: gentile e coraggiosa. Grazie papà, perché sei riuscito a darmi da sempre un equilibrio: bilanciando la tua ironia, il tuo prenderti cura, lo spronarci a non avere paura (sia nello sport, sia nell'affrontare situazioni scomode) e a fare ciò che ci rende felici, il tutto accompagnato da una sostanziosa dose di concretezza, che mi riporta spesso con i piedi per terra, ma con la convinzione che tutto sia fattibile. Grazie Federico, perché avere te come fratello maggiore è la cosa più bella che mi potesse accadere: grazie perché sei protettivo, altamente dispettoso (ahaha) e creativo; hai sempre trovato il modo di non farmi annoiare, di capirmi anche quando la pensiamo diversamente e di fare squadra sempre e comunque. Mi hai avuta "tra i piedi" da quando sono nata e io mi sono divertita tantissimo, tanto che ci resterò per sempre (tò mò). Grazie Deb per essere un'ascoltatrice dolce e attenta e per rendere Fede così completo e spensierato! *Dulcis in fundo*, grazie Giacomo per essere premuroso, costantemente curioso, voglioso di assaporare la vita e collezionare esperienze, contribuendo a rendere la mia esistenza meravigliosa, con te! Dunque, grazie a tutti voi, che mi date -ognuno a modo suo- quella giusta dose di leggerezza nell'affrontare qualsiasi sfida con il sorriso e con determinazione, ma senza paura di cadere.

Premessa e obiettivi

Il campo di indagine nel quale si è svolta la ricerca è quello del patrimonio storico, artistico e culturale¹; il fine è verificare come lo studio dei dati microclimatici di un ambiente *indoor* e l'individuazione dei fattori dai quali dipendono le sue modifiche², se analizzati e compresi, costituiscano una base conoscitiva fondamentale, da cui architetti e restauratori possono partire per definire strategie *ad hoc*, volte alla conservazione preventiva del Patrimonio. In questa ricerca, l'analisi dei dati microclimatici è stata associata alla conoscenza della storia edilizia dell'architettura ed alla simulazione virtuale.

Si specifica che con questa tesi non si vuole giungere alla definizione di un insieme di linee guida per una buona gestione degli edifici storici ad uso museale, ma si vuole presentare lo studio del microclima *indoor* come uno degli strumenti a cui sarebbe buona pratica affidarsi, prima di elaborare tali linee guida per la definizione di azioni selettive, mirate alla conservazione preventiva del Patrimonio.

Uno degli esiti più innovativi della ricerca è stata la definizione di due indici di rischio. Sono stati infatti definiti due nuovi indici [1] (*Heritage Microclimate Risk* -HMR- e *Predicted Risk of Damage* -PRD-) legati al microclima degli edifici che ospitano beni e manufatti che costituiscono il patrimonio storico artistico e culturale. Tali indici sono stati definiti tenendo conto di tutte le variabili da cui il microclima dipende e dei fattori che ne determinano l'evolversi nel tempo e nello spazio.

Nella presente tesi si discute in modo critico e ci si interroga su come, prima della rivoluzione industriale, si potesse controllare in architettura il microclima *indoor* degli edifici, in assenza di sistemi impiantistici tecnologici modernamente intesi. Tale analisi è stata condotta soprattutto attraverso la lettura della trattatistica in materia, sono stati presi in considerazione gli specifici contributi di Leon Battista Alberti, Palladio, Pellegrino, Vignola, Vitruvio, Valadier.

Infatti, nel passato preindustriale, architetti, costruttori e progettisti erano obbligati all'adozione di strategie tecnologiche ed architettoniche, utili a controllare e definire i fattori -molteplici- che possono determinare il degrado di una fabbrica, con il fine di garantire la conservazione di quest'ultima, di ciò che viene conservato in essa e del *comfort* termico di chi ne usufruisce, potendo contare solo in minima parte su quelli che oggi sono genericamente noti con la dizione di "impianti" (si veda al proposito la definizione di proto-impianti, contenuta in [2]). L'architettura era essa stessa elemento che, per forma, esposizione, tecnologia costruttiva, etc., determinava il proprio microclima caratteristico. Qualsiasi edificio storico preindustriale rappresenta l'esito di un processo ideativo e realizzativo che deriva strettamente dall'adozione di quel tipo di scelte progettuali e soluzioni tecnologico-costruttive.

L'introduzione dei cosiddetti impianti, a partire dagli inizi del XIX secolo, ha man mano modificato questo approccio, arrivando a determinare uno squilibrio tra soluzione architettonica e soluzione impiantistica, con funzioni separate e non sempre coordinate tra i due universi fenomenologici. Inutile aggiungere che tale rivoluzione ha quasi sempre investito, nel corso di duecento anni, anche le architetture costruite precedentemente a quella data, con esiti che, fino a poco tempo fa, faticavano a tenere conto dell'influsso negativo che gli impianti possono avere sulla conservazione di tali edifici.

Oggi è ormai indifferibile la necessità di una gestione degli edifici storici che tenga conto di quanto sopra osservato: tale gestione deve essere sostenibile; deve garantire una efficace tutela di quel patrimonio; deve,

¹ Da qui in avanti per Patrimonio si intende l'insieme degli edifici e dei beni dal riconosciuto valore storico, artistico e culturale in essi contenuti.

² Le variazioni microclimatiche dipendono da numerosi fattori: es. cambiamenti climatici *outdoor*; presenza/assenza di visitatori; introduzione/rimozione di impianti di condizionamento e ventilazione dell'aria; modifiche architettoniche e/o strutturali; ecc.

per quanto possibile, assicurare la migliore efficienza energetica; rendendone attuale e concreta la conservazione preventiva e, nello stesso tempo, garantendone la più ampia fruibilità.

Appare dunque fondamentale individuare scelte e percorsi che permettano di conoscere, preservare, tutelare e rendere fruibile il patrimonio storico artistico e culturale. Ciononostante, purtroppo, non sempre è facile, né banale, coniugare due finalità che possono presentarsi come conflittuali, quali il “fruire” ed il “preservare”. L’approccio che permette la convivenza di tali obiettivi deve essere fortemente caratterizzato da trasversalità ed interdisciplinarietà. La scienza della tutela e della conservazione, infatti, è una materia particolarmente articolata, che include diverse figure e professionalità appartenenti a più settori: dalla fisica-tecnica; all’architettura; alla chimica; all’ingegneria ambientale; ecc. In questa ricerca si approfondirà il tema all’interno di una visione che consideri in maniera coordinata la conservazione del bene e tutte le variabili da cui essa dipende, con particolare riguardo all’influenza esercitata sulle condizioni microclimatiche *indoor* dalla storia dell’edificio, ossia l’evoluzione nel tempo delle caratteristiche architettoniche, strutturali, impiantistiche, ma anche d’uso e dunque connesse agli effetti legati dalla fruizione degli spazi sulla conservazione degli stessi.

Lo studio del microclima *indoor* degli edifici storici rappresenta dunque un problema architettonico, storico, gestionale ed anche di restauro, nel suo pieno senso di conservazione, reintegrazione e prevenzione. Tale multidisciplinarietà è forse una delle cause per le quali oggi non risulta ancora del tutto chiaro cosa si intenda per ambiente “idoneo” a custodire e preservare specifici beni e per cui stabilire delle linee di intervento per la conservazione dei beni culturali spesso non sia un problema dalla soluzione intuitiva e immediata. Questo aspetto problematico viene trattato al Capitolo I, dove si affrontano le complessità legate alla definizione degli Standard europei: dibattito aperto da anni. Il più delle volte ci si trova di fronte ad architetture e oggetti che si sono acclimatati per anni in specifici ambienti e che necessitano di condizioni climatiche non standardizzate.

Ciò sottolinea come le esigenze, di qualsiasi bene, vengano fortemente connotate e condizionate dal relativo percorso storico. In questo senso risulta efficace l’approccio proposto da Marco Pretelli e Kristian Fabbri, che definiscono un nuovo concetto nell’ambito della conservazione: HIM (*Historic Indoor Microclimate*) [3]. HIM valuta l’evoluzione nel corso del tempo delle caratteristiche microclimatiche *indoor* di un edificio e la relazione tra queste ed il degrado dei beni: comprendere le relazioni tra i cambiamenti nel tempo del microclima *indoor* ed il degrado delle opere, permette di definire strategie specifiche, mirate alla conservazione preventiva.

Per la redazione di questo elaborato è stata definita una metodologia di indagine specifica: alla conoscenza storico-architettonica dell’edificio, è stata affiancata la modellazione e la simulazione virtuale: l’utilizzo di sonde termoigrometriche con accesso da remoto ha permesso di effettuare un monitoraggio microclimatico degli ambienti; per proseguire con l’analisi dei dati rilevati è stato realizzato un modello virtuale delle architetture indagate, tramite un *software* di simulazione dinamica: IES.VE³. La realizzazione del modello -che si presenta come una copia coerente della fabbrica reale, sia dal punto di vista geometrico, sia da quello microclimatico- ci permette di simulare il reale comportamento fisico del microclima *indoor* dell’edificio, attraverso simulazioni termodinamiche e fluidodinamiche. Il suddetto procedimento consente di elaborare ipotetici scenari, con il fine di comprendere le conseguenze che specifiche modifiche (es. rimozione di pareti divisorie; accensione o spegnimento degli impianti di

³ Integrated Environmental Solutions Virtual Environment.

condizionamento e ventilazione dell'aria; ecc.) avrebbero sul microclima dell'ambiente studiato. Tutto ciò risulta utile se indagato e compreso prima di prendere decisioni su come intervenire sulla fabbrica reale.

La premessa necessaria è che un tale tipo di studio non ha nessuna possibilità di essere utilmente condotto nei tempi che connotano il dottorato di ricerca italiano, vista la necessità di raccogliere ed elaborare una mole di dati -quelli che caratterizzano il microclima- estesa su tempi relativamente lunghi, se rapportati al triennio su cui la ricerca si deve sviluppare; e che tale raccolta richiede indagini che implicano l'impiego di strumentazioni relativamente sofisticate, in ambienti nei quali non è per nulla semplice collocare elementi di relativo disturbo visivo, quali sono quelle richieste nello specifico. Nel corso del primo periodo della ricerca è stato quindi necessario procedere all'individuazione dei possibili casi-studio, sulla base di una triade di fattori, tutti a loro modo necessari ma nessuno, di per sé sufficiente. Primo fattore era la rilevanza dell'oggetto dal punto di vista della Storia della cultura architettonica, poiché la ricerca stessa voleva fare luce sui problemi di conservazione programmata di manufatti e contenuti che avessero una rilevanza in tal senso. Secondo fattore, che su tali manufatti fossero già state svolte indagini di carattere microclimatico; che tali dati fossero resi disponibili da chi li aveva raccolti e che il periodo di raccolta dei dati di cui al punto precedente, fosse sufficientemente esteso da rendere le indagini al centro di questo studio rilevanti e significative (la significatività dei dati migliora anche in funzione della durata del monitoraggio). Terzo fattore, che presentassero tutti una destinazione riassumibile nella generica definizione di museale, sia che tale funzione fosse svolta *in toto*, sia anche solo parzialmente, dal complesso in esame; fondamentale che vi fosse una presenza ampia ed estesa di pubblico: la gestione dei visitatori, intesa in termini microclimatici, impone scelte e decisioni in questo campo che devono garantire il rispetto di un equilibrio tra le necessità dettate dalla fruibilità per il pubblico e gli obblighi imprescindibili di conservazione.

Date tali premesse, i casi presi in esame sono stati: 1. la Sala 33 della Reggia di Venaria Reale, in provincia di Torino, Italia; 2. la Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, in Spagna; 3. il Portico della Gloria della Cattedrale di Santiago de Compostela, in Spagna.

La metodologia adottata per l'analisi e l'interpretazione dei dati di ciascun caso-studio prevede la comprensione e la messa in relazione tra: a. scelte costruttive; b. vicende evolutive delle singole architetture; c. fattori che ne determinano il microclima, letti (o ipotizzati) nelle relative modifiche diacroniche; d. degrado delle architetture e dei beni che sono custoditi in esse. Tale metodologia si è dimostrata efficace per l'analisi microclimatica degli edifici indagati: è stato possibile associare la modellazione e simulazione virtuale allo studio dei dati microclimatici *indoor*, per comprendere i fattori che determinano le attuali condizioni microclimatiche e dunque di conservazione dei beni e prevedere gli effetti di possibili cambiamenti (d'uso; architettonici; ...) futuri, partendo da una profonda conoscenza della fabbrica e delle sue evoluzioni; tenendo conto degli usi, di eventuali modifiche strutturali e dell'introduzione o modifica dei sistemi di condizionamento e ventilazione dell'aria. La conoscenza e la comprensione del passato diviene dunque un metodo per stabilire ed attualizzare soluzioni per un futuro sostenibile, da un punto di vista storico, economico e sociale.

Al centro della ricerca vi è dunque il microclima *indoor*, le sue modifiche ed il suo controllo, tramite l'individuazione, la comprensione e la gestione dei fattori che lo caratterizzano.

Riferimenti

- [1] K. Fabbri, A. Bonora, Two new indices for preventive conservation of the cultural Heritage: Predicted Risk of Damage and Heritage Microclimate Risk., *Journal of Cultural Heritage*. 47 (2021) 208-217. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.09.006>.
- [2] K. Ambrogio, M. Zuppiroli, “Energia e restauro. Il miglioramento dell’efficienza energetica in sistemi aggregati di edilizia pre-industriale tra istanze conservative e prestazionali”, Francoangeli, Milano, 2013.
- [3] M. Pretelli, K. Fabbri, *Historic Indoor Microclimate of the Heritage Buildings - A Guideline for Professionals who care for Heritage Buildings*, Springer International Publishing, Gewerbestrasse, 2018. <http://www.springer.com/it/book/9783319603414>.

Struttura della tesi

Il primo capitolo presenta una disamina su quei “padri fondatori” del restauro che hanno toccato temi in vario modo di interesse per questo studio; e l’antologia della letteratura scientifica, restituendo un quadro chiaro dell’attuale stato dell’arte sulla tematica della conservazione del *Cultural Heritage* e sullo studio del microclima *indoor*. Successivamente vengono presentate e discusse due questioni: la prima riguarda gli standard europei e la normativa vigente in ambito di conservazione preventiva; la seconda questione riguarda invece l’indagine, attraverso la lettura di trattatistica dell’architettura, su come l’architetto, prima e successivamente l’introduzione degli impianti di condizionamento, procedesse nella progettazione e costruzione degli edifici, tenendo conto di quanto queste scelte (localizzazione geografica, materiali, orientamento, spessore delle pareti, ...) incidano sul microclima *indoor*. Il capitolo procede con un breve approfondimento sulla relazione che esiste tra parametri microclimatici e degrado dei materiali e si conclude con una riflessione sugli edifici storici ad uso museale, evidenziando quanto sia complesso garantire la più ampia accessibilità al Patrimonio e al contempo la sua stessa conservazione.

Il secondo capitolo descrive la metodologia che è stata applicata ai casi-studio: dalla conoscenza dell’edificio dal punto di vista storico e architettonico; alla raccolta dei dati del monitoraggio microclimatico; all’analisi dei dati monitorati; alla realizzazione del modello virtuale e rispettiva validazione; fino alla definizione di eventuali proposte di intervento.

Il terzo capitolo si concentra sui casi-studio: la sala 33, all’interno della Reggia di Venaria Reale; la Biblioteca Generale Storica dell’Università di Salamanca; il Portico della Gloria, narcece della Cattedrale di Santiago de Compostela. Per ciascuno di essi vengono esplicitate le finalità della ricerca; riportate informazioni storico-architettoniche; analisi; risultati e conclusioni. Inoltre, nella restituzione dei risultati, per tutti i casi-studio, sono state evidenziate le principali difficoltà riscontrare, eventuali errori e semplificazioni adottate.

Il quarto capitolo tratta il tema del rischio microclimatico e propone due nuovi indici di rischio: *Heritage Microclimate Risk* (HMR) e *Predicted Risk of Damage* (PRD), presentandone un’applicazione pratica a titolo esemplificativo sul caso-studio della Reggia di Venaria Reale.

Il quinto capitolo avanza considerazioni conclusive su quanto emerso dalla ricerca, mettendone in luce gli aspetti innovativi, ciò che è stato possibile apprendere da ciascun caso-studio e dall’intero percorso di indagine sulla tematica presentata e i possibili sviluppi futuri.

Capitolo I

Il microclima e la conservazione preventiva

1.1. Le premesse

1.1.1. Breve antologia: i padri della disciplina del restauro

Le tematiche della conservazione preventiva sono da sempre presenti in nuce nelle pagine dei padri della disciplina, come anche i temi del controllo del microclima interno ai monumenti. Già John Ruskin (1819-1900) nel 1849 affermava [1] che: *“il principio che vive oggi [...] consiste nel trascurare gli edifici per procedere poi al loro restauro. Prendetevi cura solerte dei vostri monumenti, e non avrete alcun bisogno di restaurarli”*⁴. Una raccomandazione che ad oggi non pare avere ottenuto significativi effetti se ancora enti privati e pubblici continuano a non tenere nel dovuto conto un approccio manutentivo preventivo a lungo termine e se si continua ad attendere che i beni si trovino in condizioni tali da richiedere interventi di restauro “d’urgenza”.

A tale considerazione si deve aggiungere che, secondo Ruskin, il restauro conduce ad una progressiva falsificazione e che quindi sia sempre da preferirgli un intervento di carattere conservativo, dunque manutentivo, in termini di costante e giornaliera cura, evitando perciò la necessità di ricostruzioni e integrazioni. Se si prende in considerazione l’altro “padre” teorico, Eugène Viollet-le-Duc (1814-1979), che pure aveva una concezione di restauro che tendeva ad una riscrittura e dunque nella riprogettazione dell’edificio storico, si può rilevare come egli manifesti attenzione per gli aspetti microclimatici dell’architettura storica pur in una visione che tende a privilegiare il concetto di *comfort* per i visitatori [2]⁵.

L’attenzione agli aspetti della manutenzione viene sottolineata nei vari documenti noti come “Carta del Restauro”⁶ almeno fin dal 1931, dove secondo quanto suggerito da Gustavo Giovannoni (1873-1947) si può leggere all’articolo 1: *“che al di sopra di ogni altro intento debba la massima importanza attribuirsi alle cure assidue di manutenzione e alle opere di consolidamento, volte a dare nuovamente al monumento la resistenza e la durevolezza tolta dalle menomazioni o dalle disgregazioni”*⁷.

Tra i temi che hanno costituito uno dei filoni di ricerca vi è quello della modellizzazione, anticipato in alcune pagine de *Il culto moderno dei monumenti, la sua essenza e il suo sviluppo* (1903) [3]: le condizioni tecnologiche attuali paiono finalmente rispondere a pieno a quello che un grande teorico del restauro, Aloïs Riegl (1858-1905), suggeriva nel suo saggio: tutte le ipotesi sia sull’evoluzione storica, sia relative a interventi di carattere architettonico, vanno verificate su modelli, anziché sulla fisicità costruita dell’architettura. Oggi, le possibilità offerte dall’impiego delle nuove tecnologie, tra le quali spetta un posto fondamentale a quelle per il monitoraggio e ai *software* di simulazione dinamica, permettono di verificare preventivamente gli esiti che modifiche di carattere edilizio, impiantistico, o d’uso, possono

⁴ Cit. J. Ruskin, *“Le sette lampade dell’architettura”*, Jaca Book, Milano, 1982, pag. 228.

⁵ « *Qu’un architecte se refuse à faire passer des tuyaux de gaz dans une église, afin d’éviter des mutilations et des accidents, on le comprend, parce qu’on peut éclairer l’édifice par d’autres moyens ; mais qu’il ne se prête pas à l’établissement d’un calorifère, par exemple, sous le prétexte que le moyen âge n’avait pas adopté ces systèmes de chauffage dans les édifices religieux, cela tombe dans le ridicule.* » Cit. E. Viollet-le-Duc, *“Dictionnaire raisonné de l’architecture française du XI^e au XV^e siècle”*, vol. 8, B. Bance editore, Parigi, 1854, pag. 32.

Traduzione: che un architetto si rifiuti di far passare dei tubi del gas all’interno di una chiesa, per evitare danni e incidenti, è comprensibile, perché si può illuminare l’edificio con altri mezzi; ma ch’egli non si presti a installare un calorifero, ad esempio, con il pretesto che nel medioevo non avevano adottato questi sistemi di riscaldamento negli edifici religiosi, questo è ridicolo.

⁶ Le carte del restauro forniscono alla disciplina un corpus ordinato e condiviso di regole e norme; ogni documento è memoria dei passi che, dal punto di vista culturale, hanno contraddistinto l’evoluzione del dibattito disciplinare, a sua volta influenzato dall’evoluzione più generale della società. Attraverso le carte, che sanciscono dunque i principi per regolare gli interventi di restauro, si legge il modo in cui si è evoluto il dibattito sul come conservare la città storica.

⁷ Cfr. *“Carta del Restauro Italiana”*, Roma, 1931, art. 1.

avere sul microclima *indoor*. L'andamento di quest'ultimo ha un peso fondamentale in termini proprio di conservazione del Patrimonio.

Questo lavoro, rivolto ad indagare aspetti del tutto diversi da quelli teorici della disciplina, per i quali si rimanda alla copiosa letteratura in materia, vuole, con le righe che precedono, mettere in chiaro come le questioni al centro di questa ricerca rappresentino uno dei tanti aspetti che segnano (o che avrebbero dovuto segnare) il dibattito disciplinare. Molto più vicino ai temi trattati in queste pagine è lo specifico dibattito animato da due dei protagonisti del mondo del restauro italiano, Cesare Brandi e Giovanni Urbani.

Questi ultimi ebbero un ruolo centrale nella definizione e, soprattutto, nella teorizzazione relativa ai temi della tutela e della conservazione preventiva. Cesare Brandi (1906-1988), fondatore -con Giulio Carlo Argan- dell'Istituto Centrale del Restauro (ICR) nel 1939 e Giovanni Urbani (1925-1994), direttore dello stesso istituto dal 1973 al 1983, diedero definizioni chiare e univoche in materia. Brandi, contrario agli snaturamenti, ai rifacimenti ed alle aggiunte, definiva la patina "la pelle del dipinto", sostenendo che essa andasse rispettata e mantenuta; introducendo il tema dei tempi del restauro, chiariva che essi non potessero che riferirsi all'oggi, ma che le relative cause originavano nel periodo che intercorreva tra la creazione dell'opera e il momento nel quale si effettuava il restauro, chiarendo dunque in modo definitivo come quanto accaduto in tale periodo -e dunque anche l'importanza delle condizioni nelle quali le opere erano state conservate- era da ritenersi "responsabile" di quanto si doveva "correggere" con il restauro. Urbani, partendo dalle teorizzazioni di Brandi, del quale era stato allievo, giunse a rendere chiaro il concetto di "restauro preventivo", formulato dallo studioso senese, introducendo quello conseguente di "conservazione programmata": proponendo il controllo costante delle condizioni degli ambienti di conservazione [4], in modo tale da *"rallentare quanto più possibile la velocità dei processi di deterioramento, intervenendo in pari tempo e se necessario con trattamenti manutentivi appropriati ai vari tipi di materiali"*⁸.

Brandi aveva reso chiaro come esistesse una consequenzialità rigorosa tra interventi di restauro, soprattutto urgenti, ritenuti i più pericolosi per la conservazione delle opere d'arte, e politiche e strategie di conservazione delle stesse. Urbani, come riportato in [5], attua un ampliamento della problematica, riconoscendo come essa non riguardasse tanto il singolo bene, quanto le condizioni più generali del contesto in cui esso è ospitato e dal quale derivano le possibili cause del suo degrado: *"In ogni caso, anche con la migliore delle tecniche, il restauro rimane pur sempre un intervento post factum, cioè capace tutt'al più di riparare un danno, ma non certo d'impedire che si produca né tanto meno di prevenirlo. Perché questo sia possibile occorre che prenda corpo di azione tecnica quel rovesciamento del restauro tradizionale finora postulato solo in sede teorica come "restauro preventivo"."*⁹

Il pensiero di Urbani risulta estremamente attuale ed in linea con quanto sostenuto nella presente tesi, ovvero che lo studio del microclima che caratterizza un ambiente *indoor*, permetta di comprendere come intervenire, in termini di controllo del microclima stesso, con il fine di rifuggire o quantomeno rallentare, il processo di deterioramento dei beni, esposti a rischio microclimatico. Urbani, infatti, scriveva: *"Una simile tecnica, alla quale diamo il nome di conservazione programmata, è di necessità rivolta prima che verso singoli beni, verso l'ambiente che li contiene e dal quale provengono tutte le possibili cause del loro deterioramento. Il suo obiettivo è*

⁸ Cit. G. Urbani, "Piano Pilota per la conservazione dei beni culturali in Umbria", 1976. Che poi si è evoluta in "Carta del rischio del patrimonio architettonico", in seguito al terremoto del 1980, in Basilicata e Campania. Cfr. <https://www.beniculturali.it/comunicato/manutenzione-e-cura-del-territoriosintesi-degli-orientamenti-maturati-con-il-seminario-del-21-ottobre-2016-promosso-dalla-diocesi-di-brescia-e-dall-istituto-mnemosyne>.

⁹ Cit. G. Urbani, "Intorno al restauro", a cura di B. Zanardi, Milano, 2000, pag. 104.

pertanto il controllo di tali cause, per rallentare quanto più possibile la velocità dei processi di deterioramento, intervenendo, in pari tempo e se necessario, con trattamenti manutentivi appropriati ai vari tipi di materiali”¹⁰.

1.1.2. Lo stato dell’arte

Nel corso della seconda metà del Novecento si è sviluppato un forte dibattito tra i ricercatori e studiosi nel campo dell’architettura, accompagnato ad una progressiva presa di coscienza, a livello nazionale ed internazionale, dell’impatto che hanno le condizioni microclimatiche sulla conservazione del patrimonio. Da qui si sono sviluppate teorie e ipotesi, non solo attorno ai concetti di “restauro e “conservazione”, ma anche rispetto agli indici e agli standard¹¹ da adottare. In questo senso, furono attive istituzioni come ICOM¹² e ICCROM¹³. Diversi studi condotti da ricercatori, facenti parte di queste istituzioni, sottolinearono l’importanza del controllo ambientale per ridurre il degrado materico e favorire la conservazione preventiva¹⁴.

Garry Thompson (1925-2007) fu tra i primi ricercatori a trattare la tematica del microclima e della conservazione preventiva: negli anni Settanta affrontò la tutela dei beni mobili preservati in ambito museale. Egli, inoltre, nel 1967 partecipò alla prima conferenza dedicata alla climatologia museale ([6]), durante la quale vennero presentati diversi studi, anche riguardanti l’analisi dei tipici parametri microclimatici (temperatura dell’aria; umidità relativa; illuminamento; ecc.) e di come questi possano influire sulla conservazione del patrimonio.

Negli anni Ottanta, la pratica del monitoraggio, fin lì esclusivamente *indoor*, comincia ad estendersi anche agli ambienti esterni, che ospitano importanti monumenti architettonici. Le pubblicazioni di Dario Camuffo (1941) offrono un rilevante contributo scientifico in questo ambito. Camuffo, inoltre, dimostrò tramite i suoi studi, l’effetto cumulativo dei parametri ambientali che possono danneggiare un bene; scostandosi dal precedente approccio di Thomson, che li valutava singolarmente e separatamente. Nelle sue pubblicazioni, Camuffo, chiarisce il suo concetto di “clima storico” [7]: condizione microclimatica nella quale è stato conservato un manufatto nel corso degli anni.

Sempre in questi anni Gaël de Guichen, ingegnere chimico e membro dell’ICCROM, propose specifiche metodologie, pensate per gli edifici museali. Nella sua pubblicazione “Cahiers d’étude” [8], risalente al 1995, De Guichen invita il lettore ad ampliare la propria visione, dal particolare al generale: dalla sala all’edificio; dall’oggetto alla collezione; dal conservatore all’equipe multidisciplinare; ecc. De Guichen, inoltre, tramite l’ICCROM, aveva tenuto diversi corsi, tra i quali “*Conservation in Museum*” nel 1978; “*Museum climate*” nel 1980, insieme a Garry Thomson. I corsi miravano a sensibilizzare sul tema della fragilità del patrimonio culturale enfatizzando la correlazione tra microclima e prevenzione; ne scaturì la definizione di cinque categorie di “aggressor”, utili a redigere il Piano di Conservazione Preventiva. Le

¹⁰ Cit. G. Urbani, “*Intorno al restauro*”, a cura di B. Zanardi, Milano, 2000, pag. 104.

¹¹ Standard e normative verranno trattati al paragrafo 1.4.

¹² International Council of Museums. Fondata nel 1946.

¹³ Centro Internazionale di Studi per la Conservazione ed il Restauro dei Beni Culturali: Associazione intergovernativa nata nel 1956; dal 1978 denominato ICCROM, sigla che nasce da "The International Centre for Conservation" e "The Roma Center".

¹⁴ <http://www.icom-cc.org/332/-icom-cc-documents/declaration-on-environmental-guidelines/#.Xs5ug2gzZEY>. (Ultima visita: 22/06/2020).

cinque categorie, elencate in una dichiarazione da De Guichendel nel 2009¹⁵, individuano cinque tipologie di rischio che minacciano il Patrimonio: 1. naturale lento; 2. naturale rapido; 3. umano lento; 4. umano rapido; 5. professionale. Gli “aggressori” individuati sono più sinteticamente: le cause naturali¹⁶, in una dinamica 1. Lenta 2. Rapida; l’uomo¹⁷, anch’egli in una dinamica 3. Lenta 4. Rapida 5. Professionale¹⁸.

Ricerche recenti -come [9], [10], [11], [12], [13]- hanno trattato il tema del microclima all’interno dei musei e studiato strategie per indagare le condizioni di conservazione dei beni ivi custoditi, (es. tramite protocolli di valutazione). La *literature review* della ricercatrice Elena Lucchi [14] mostra come numerosi ricercatori ed associazioni si sono cimentati, a partire dagli anni Novanta, nel monitoraggio microclimatico e nelle simulazioni energetiche, studiando efficienza energetica, *comfort* termico e qualità ambientale: si legge che, in questo specifico ambito di ricerca, le tematiche legate all’illuminamento (LUX) risultano quelle maggiormente trattate dal 1965 al 1975; la Temperatura dell’aria (T) e l’Umidità Relativa (UR) sono tutt’oggi fortemente studiate; mentre le pubblicazioni inerenti alla qualità *indoor* dell’aria (IAQ) hanno avuto un incremento a partire dagli anni ‘80, principalmente in Scandinavia e Stati Uniti; infine, gli studi sull’efficienza energetica cominciarono ad essere pubblicati con più frequenza a partire dal 2005, soprattutto in Europa, in seguito alle direttive¹⁹ del Parlamento Europeo sulla prestazione energetica.

Per quanto riguarda il rischio di alterazione o degrado di materiali *indoor* dovuto al microclima, la letteratura scientifica segue diverse linee di ricerca:

a) la misurazione e le campagne di monitoraggio, come negli studi di: [15] [16] [17] [18] [19] che dimostrano l’utilità dei dati del monitoraggio microclimatico *indoor*, in termini di conservazione preventiva e riduzione dei costi di futuri interventi o strategie conservative. Questi articoli trattano il tema dello studio del microclima non finalizzato alla conservazione di un bene specifico (affresco, dipinto, ecc.), ma in riferimento ad un locale che li contiene: da studi come questi nasce la riflessione sulla necessità di approfondire la questione scindendo il rischio legato al microclima del locale (HMR) e il rischio di danno sui beni di prestigio ivi conservati (PRD)²⁰;

b) la modellazione virtuale degli edifici, come, ad esempio, nelle ricerche di [20][21][22][23][24] che rivelano l’utilità della simulazione virtuale nello studiare le condizioni microclimatiche di un ambiente *indoor*, con il fine di definire strategie che possano favorire la conservazione del *Cultural Heritage*;

c) l’applicazione a singoli casi-studio, come in [25][26][27][28][29][30] [31][32] dove i punti a) e b), o solo uno di essi, vengono testati su un caso-studio reale. Questi studi, come anche quelli di [33][34][35][36][37][38] si riferiscono a beni culturali prestigiosi. Nessuno di questi articoli individua indici replicabili in altri contesti;

¹⁵ www.revista.ge-iic.com: Medio siglo de Conservación Preventiva. Entrevista a Gaël de Guichen - Entrevista realizada por el Comité Científico Técnico del GEIIC (Marisa Gómez y Benoît de Tapol), agosto 2009. (Ultima visita: 22/06/2020).

¹⁶ es. i cambiamenti climatici -siano esse fluttuazioni stagionali (lente) o sbalzi repentini (rapidi)- espongono i materiali a rischio di degrado legato al microclima.

¹⁷ es. la sua stessa presenza può alterare le condizioni microclimatiche in cui i beni vengono conservati, esponendoli a rischio di degrado legato al microclima.

¹⁸ In caso di danneggiamento involontario durante un intervento di restauro.

¹⁹ Commissione Europea, Direttiva 2002/92/EC del parlamento europeo e del consiglio della prestazione energetica degli edifici, Commissione Europea, Bruxelles, 2002;

Commissione Europea, Direttiva 2012/27/UE del parlamento europeo e del consiglio sull’efficienza energetica che modifica l direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE, Commissione Europea, Bruxelles, 2012.

²⁰ Gli indici HMR e PRD sono presentati al capitolo IV.

d) la definizione di indici di rischio legati al microclima, con il fine della conservazione, come nel caso di [39] applicato al caso-studio della Biblioteca Classense a Ravenna, Italia e [40][41][42][9] svoltisi all'interno di musei e di edifici storici. Gli indici di rischio legati al microclima permettono di: valutare le conseguenze dei cambiamenti *outdoor* sulla conservazione del *Cultural Heritage* (es. [43][44]); valutare la qualità dell'aria *indoor* [45][46][47][48][49], che incide non solo sul *comfort* e sulla salute delle persone, ma anche sulla conservazione di architetture e dei beni ivi conservati; prendere decisioni in merito alla gestione di collezioni e altri beni di valore [50][51][52]; verificare come le sostanze inquinanti presenti nell'aria siano indicatori di rischio per la conservazione del *Cultural Heritage*, come negli studi di [53][54].

Le pubblicazioni citate confermano un interesse crescente da parte della comunità scientifica nei confronti di questo campo di ricerca. L'oggetto del presente lavoro è duplice: da un lato, si vuole sottolineare la rilevanza dello studio e della comprensione del microclima *indoor* (valido strumento che aiuta a definire strategie mirate per garantire la conservazione preventiva del patrimonio storico, artistico e culturale); dall'altro (punto d), si vuole arrivare alla definizione del concetto di rischio nel *Cultural Heritage* e all'introduzione di due nuovi indici di rischio legati al microclima. Gli indici proposti fino ad oggi, oltre a non presentare una linea metodologica comune, non chiariscono sufficientemente la relazione che vi è tra microclima e rischio di danno. Inoltre, il più delle volte, non è chiaro se tali indici siano da applicare alla sala *indoor* studiata, o ad un oggetto specifico, ivi conservato.

In tale contesto, con questa tesi ci si è proposti di giungere all'elaborazione e alla relativa descrizione di un indice di rischio microclimatico (HMR) e di un indice di previsione di danno (PRD). Tali indici sono applicabili non solo ai musei, su cui si concentra la maggior parte delle ricerche in questo campo (es. [55][56]), ma anche ad edifici con altre destinazioni d'uso.

La letteratura scientifica degli ultimi dieci anni presenta una serie di casi studio slegati tra loro, in cui vengono utilizzate diverse metodologie, differenti apparecchiature di monitoraggio e diversi *software* di modellazione e simulazione virtuale: in questo campo esistono ricerche con approcci molto differenti. Come già accennato, l'approccio di questa tesi si rifà alle ricerche di Marco Pretelli e Kristian Fabbri [57], a partire da quanto elaborato nel corso degli studi nell'ambito della conservazione preventiva, tramite l'ausilio dello studio microclimatico *indoor*, la definizione del concetto di *Historic Indoor Microclimate* e la modellazione e simulazione virtuale: come nel caso della Biblioteca Malatestiana [37], Cesena; Villa La Petraia, Firenze; Villa Barbaro, Maser [58]. Infatti, generalmente, la *literature review* sulla tematica del microclima *indoor*, appare segnata da una netta distinzione delle questioni (struttura architettonica da una parte; problematiche e strumenti per il controllo del microclima dall'altra). Nel lavoro di ricerca svolto, viceversa, l'approccio è stato il più possibile olistico²¹, con l'obiettivo di tenere assieme, nell'ambito del monitoraggio microclimatico applicato agli edifici storici, anche la dimensione-tempo²², ricavandone dati nuovi ed utili a livello di conoscenza scientifica e operativa.

²¹ Olistico: “*tutto, intero, totale*” Def. 1 *Dizionario Treccani*, 2009. L'approccio adottato tiene infatti conto di tutti i fattori che possono esporre il Patrimonio a rischio di danneggiamento.

²² Ci si riferisce a tutte le modifiche che comportano l'evolversi delle caratteristiche architettoniche, impiantistiche e gestionali di un edificio e del suo contenuto, nel corso degli anni.

1.1.3. *Indoor Microclimate (IM), historical climate e Historic Indoor Microclimate (HIM)*

Questo paragrafo vuole chiarire la distinzione tra *Indoor Microclimate (IM)*, *historical climate* e *Historic Indoor Microclimate (HIM)*.

Come si legge in [59], le variabili che descrivono IM sono: la temperatura dell'aria, l'umidità relativa, la velocità dell'aria, gli inquinanti *indoor* (CO₂, VOC, etc.). Quando si parla *Indoor Microclimate* ci si riferisce ai valori dei parametri microclimatici, rilevati in spazi confinati, il cui *range* spaziale rientra indicativamente tra i 10-100 metri. Possiamo considerare IM come una materia utile alla valutazione del microclima caratterizzante un edificio, in un preciso momento.

Il clima storico (*historical climate*) è un concetto più ampio di IM, poiché non si riferisce limitatamente ai valori microclimatici rilevati in un preciso istante, ma considera il microclima *indoor* che ha caratterizzato l'ambiente di conservazione di un oggetto per un periodo di tempo pari ad almeno un anno. Per la definizione di clima storico si rimanda a quella riportata nella UNI EN 15757:2010 [60]²³, condivisa e approfondita dal ricercatore Dario Camuffo²⁴.

Cosa aggiunge il concetto di HIM a quello di clima storico? HIM si riferisce anche alle trasformazioni nel tempo che hanno coinvolto l'intero edificio. Alcuni fattori, che mutano nel tempo ed incidono sul microclima *indoor*, sono: il microclima *outdoor*, le modifiche interne e/o esterne alla fabbrica; i sistemi di climatizzazione; la presenza di visitatori/occupanti; ecc. HIM è un campo di ricerca che permette di individuare quali tra questi fattori rappresentano le cause di specifici cambiamenti microclimatici *indoor* e di valutare le conseguenze dovute a questi ultimi, durante l'intero ciclo di vita dell'edificio. Con il concetto di *Historic Indoor Microclimate* si propone di ricostruire le diverse fasi della storia microclimatica di un edificio: indagando sulle relazioni tra le condizioni microclimatiche e la conservazione o l'ammaloramento della medesima fabbrica e dei beni ivi conservati, individuando e comprendendo cosa e come ha caratterizzato l'evolversi del microclima *indoor* di quegli ambienti.

Alla definizione di HIM contribuiscono:

- *Original Indoor Microclimate (OIM)*: caratterizza un edificio nel momento in cui esso è stato costruito;
- *Subsequent Indoor Microclimate (SIM)*: analisi delle modifiche apportate all'edificio e delle ricadute che esse hanno sul microclima (es. modifiche strutturali, manageriali, aggiunta di sistemi di condizionamento, ecc.);
- *Actual Indoor Microclimate (AIM)*: microclima *indoor* attuale, il quale può essere misurato e rilevato costantemente.

HIM, partendo dalle discipline che definiscono lo studio del microclima *indoor*, adotta dunque un approccio volto a considerare il contesto architettonico-microclimatico nella sua estensione diacronica, introducendo lo studio delle variabili fisiche che definiscono il microclima *indoor* in una dimensione temporale prolungata²⁵.

²³ “Condizioni climatiche in un microambiente dove un oggetto del patrimonio culturale è stato tenuto sempre, oppure è stato tenuto per un lungo periodo (almeno un anno) e al quale si è acclimatato.” Cit. UNI EN 15757:2010. Pag. 6.

²⁴ Per approfondimenti vedi [55] [79] [59] [24] [80] [25] [81] [82] [83]

²⁵ Da un punto di vista scientifico, si potrebbe affermare che questo approccio costituisca una delle infinite ricadute originatesi dalla rivoluzione storiografica che, circa un secolo fa, investiva il settore degli studi storici: la *longue durée* sostituiva l'*histoire événementielle*. Gli studiosi che seppero dar vita all'esperienza de *Les Annales* guarderebbero con interesse -si spera- questo sviluppo del loro modo di ragionare sui temi della Storia. Infatti, gli storici francesi Lucien Febvre (1878-1956) e Marc Bloch

1.4. La normativa vigente nell'ambito delle condizioni ambientali per la conservazione preventiva

In questo paragrafo si fa riferimento a norme e leggi per le quali si riportano i rispettivi standard -quando indicati- relativi al campo della conservazione preventiva del Patrimonio.

La norma italiana UNI 10829, luglio 1999, “Beni di interesse storico e artistico - Condizioni ambientali di conservazione - Misurazione ed analisi.” [61], prescrive indicazioni e *range* di riferimento, relativi ai parametri ambientali da considerarsi ottimali per la conservazione dei beni di interesse storico e artistico. All'interno di questa norma viene fatta una distinzione per categorie di beni e vengono specificati i rispettivi parametri conservativi di riferimento. Le categorie considerate sono: “materiali/oggetti di natura inorganica”; “materiali/oggetti di natura inorganica”; “oggetti misti”.

Nello stesso anno (1999) ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*) pubblica per la prima volta nel proprio *Handbook* [62] un capitolo dedicato alle linee guida di progettazione per il microclima *indoor* di musei, librerie e archivi. In questa pubblicazione i livelli di temperatura e umidità relativa suggeriti non vengono distinti a seconda della tipologia dei materiali, bensì in relazione al corrispondente rischio di degrado.

In Italia, il D.M. 10/05/2001, “Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei” (D. Lgs. n.112/98 art. 150 comma 6 - Elaborati del Gruppo di lavoro) [63], riporta la “Suddivisione dei beni confinati in base alle categorie di fotosensibilità” (Tabella 1): sono state individuate quattro categorie di fotosensibilità dei materiali e per ogni categoria è stato definito il valore di illuminamento massimo (espresso in lux) a cui ciascuna di esse può essere esposta, senza che ciò rappresenti un fattore di rischio per la conservazione dei materiali stessi.

Tabella 1²⁶. Suddivisione dei beni confinati in base alle categorie di fotosensibilità

Categoria fotosensibilità		Illuminamento massimo (lux)
1 Molto bassa	<i>Reperti e manufatti relativamente insensibili alla luce:</i> metalli, materiali lapidei e stucchi senza strato di finitura, ceramiche, gioielleria, smalti, vetri, vetrate policrome, reperti fossili.	Superiore a 300 ma con limitazioni sugli effetti termici in particolare per stucchi, smalti, vetrate e fossili.
2 Media	<i>Reperti e manufatti moderatamente sensibili alla luce:</i> pitture ad olio ed a tempera verniciate, affreschi – materiali organici non compresi nei gruppi 3 e 4 quali quelli incorno, osso, avorio, legno	150

(1886-1944), fondatori della scuola de *Les Annales*, introdussero il concetto di interdisciplinarietà della storia: che non deve avere confini di spazio e tempo; deve comprendere temi e problemi intersettoriali; come riporta Marc Bloch in un libro da lui incompiuto -*Apologia della storia o mestiere storico* [84]- la storia si pone l'obiettivo di comprendere il presente attraverso lo studio del passato e viceversa. In questi aspetti si trova un parallelismo con l'approccio adottato nella presente ricerca, per lo studio olistico del microclima, che, per comprendere tutti i fattori che originano rischio, tiene conto dell'influenza della storia (da intendersi come susseguirsi di cambiamenti climatici; architettonici; d'uso; ecc.), sulle condizioni microclimatiche e conservative odierne all'interno degli edifici storici. (Per approfondimenti vedi: [85] [86] [87] [88]).

²⁶ Cfr. D.M. 10/05/2001

3 Alta	<i>Reperti e manufatti altamente sensibili alla luce:</i> 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; piume pelli e reperti botanici, materiali etnografici e di storia naturale di origine organica o tinti con prodotti vegetali; carta, pergamena, legni banati	50
4 Molto alta	<i>Reperti e manufatti estremamente sensibili alla luce:</i> mummie; sete, inchiostri, coloranti e pigmenti a maggior rischio di scoloritura come lacche, ecc.	50

Inoltre, il “Codice dei beni culturali e del paesaggio”, emanato nel gennaio 2004, all’Articolo 29 (Conservazione) chiarisce in modo univoco il significato di alcuni termini, strettamente relazionati ai temi qui trattati:

1. La conservazione del patrimonio culturale è assicurata mediante una coerente, coordinata e programmata attività di studio, prevenzione, manutenzione e restauro.
2. Per prevenzione si intende il complesso delle attività idonee a limitare le situazioni di rischio connesse al bene culturale nel suo contesto.
3. Per manutenzione si intende il complesso delle attività e degli interventi destinati al controllo delle condizioni del bene culturale e al mantenimento dell’integrità, dell’efficienza funzionale e dell’identità del bene e delle sue parti.
4. Per restauro si intende l’intervento diretto sul bene attraverso un complesso di operazioni finalizzate all’integrità materiale ed al recupero del bene medesimo, alla protezione ed alla trasmissione dei suoi valori culturali.

In questo stesso anno (2004) lo sviluppo di standard europei per conservare il Patrimonio culturale venne promosso ed avviato dalla maggioranza dei membri²⁷ del CEN (*Comité Européen de Normalisation*). L’obiettivo del comitato tecnico (TC 346) era quello di creare specifici documenti normativi nel campo della conservazione del patrimonio culturale, con un approccio basato sulle esigenze: “*to develop, with a need-based approach, specific normative documents in the field of conservation of cultural heritage*”²⁸ [64]. La definizione di valori specifici e metodologie ha avuto il fine di aiutare chi si occupa della gestione e della manutenzione del Patrimonio, volendo inoltre promuovere la collaborazione tra esperti europei.

Uno dei cinque gruppi di lavoro del comitato tecnico era il “CEN/TC 346 WG4 Environment” (WG4), il cui obiettivo era quello di formulare appunto specifici standard e metodologie di controllo del microclima: quello che caratterizza gli edifici storici e i monumenti *outdoor*.

²⁷ I membri del CEN sono gli enti nazionali di normazione di: Austria, Belgio, Bulgaria, Croazia, Cipro, Repubblica Ceca, Danimarca, Estonia, Finlandia, Francia, Germania, Grecia, Ungheria, Islanda, Irlanda, Italia, Lettonia, Lituania, Lussemburgo, Malta, Olanda, Norvegia, Polonia, Portogallo, Romania, Slovacchia, Slovenia, Spagna, Svezia, Svizzera e Inghilterra.

²⁸ Cit. J. S. Johnsen, Conservation of cultural heritage – European standards on the environment, in A. Burmester, M. Eibl, Climate for Collections. Standards and uncertainties, Doerner Institut, Monaco, 2013. Pag. 35.

La tabella seguente riporta tre standard EN (emessi dal Comitato Europeo di normazione): EN 15757:2010 [60], EN 15758: 2010 [65], EN 15759-1:2011 [66].

Tabella 2.²⁹

EN number	Title	Developed by (until 2012)	Developed by (post 2012)
EN 15757:2010	Conservation of cultural property – Specifications for temperature and relative humidity to limit climate-induced mechanical damage in organic hygroscopic materials	WG4	-
EN 15758:2010	Conservation of cultural property – Procedures and instruments for measuring temperatures of the air and the surfaces of objects	WG4	-
EN 15759-1:2011	Conservation of cultural property – Indoor climate – Part 1: Guidelines for heating churches, chapels and other places of worship	WG4	-

La UNI EN 15757:2010 “Conservazione dei beni culturali - Specifiche concernenti la temperatura e l’umidità relativa per limitare i danni meccanici causati dal clima ai materiali organici igroscopici”, è finalizzata al controllo del clima in edifici dove vengono conservati beni culturali sensibili alle variazioni microclimatiche e sviluppa i concetti base introdotti dalla UNI 10969:2002 [67] “Beni Culturali - Principi generali per la scelta e il controllo del microclima per la conservazione dei beni culturali in ambienti interni”. La norma EN 15757:2010 riconosce che per ogni materiale esistono specifici *range* microclimatici adatti alla conservazione, ma aggiunge che, se uno stesso materiale si è acclimatato per anni ad uno specifico clima storico, un cambiamento repentino delle condizioni microclimatiche non farebbe altro che esporlo ad un rischio di danno. Ragione per cui la norma consiglia di verificare come prima cosa le condizioni di conservazione del bene e, qualora il bene presenti segni di degrado, si deduce che le condizioni conservative siano sfavorevoli e si cerca di creare un microclima che rispetti gli standard consigliati per tipologia di materiale; se invece il bene risulta ben conservato, è giusto mantenere il microclima storico che ha da sempre caratterizzato l’ambiente di conservazione.

In una realtà complessa e variegata come quella del patrimonio storico artistico e culturale, definire degli standard particolarmente rigidi e restrittivi può risultare corretto per determinate casistiche, ma controproducente per molte altre. Questa tesi sostiene un’applicazione “ragionata” degli standard: per definire un *range* ottimale, è necessario studiare l’effettivo comportamento dei singoli edifici, tenendo conto delle variabili dovute al loro uso -corrente e passato- ed alle loro modifiche (strutturali; manageriali; impiantistiche; etc.). Questo approccio risulta essere già adottato e condiviso in Spagna, dal Ministero della Cultura e dal IPCE (Instituto del patrimonio cultural de España)³⁰: nel documento [68]³¹ si legge quanto segue: “*Antes de modificar las condiciones, conocer los niveles previos y los que se van a conseguir, siendo muy prudentes en la alteración de los parámetros, incluso y especialmente cuando estos parecen muy inadecuados*”³².

²⁹ Alcune norme redatte dal WG4 tra il 2004 e il 2012. Cfr. J. S. Johnsen, Conservation of cultural heritage – European standards on the environment, in A. Burmester, M. Eibl, Climate for Collections. Standards and uncertainties, Doerner Institut, Monaco, 2013. Pag. 40.

³⁰ Qui citato perché due su tre casi-studio trattati nel presente elaborato sono situati in Spagna.

³¹ Contiene le norme di conservazione preventiva per l’installazione di sistemi di controllo delle condizioni ambientali all’interno di musei, biblioteche, archivi e edifici storici.

³² Cit. IPCE, Normas de conservación preventiva para la implantación de sistemas de control de condiciones ambientales en museos, bibliotecas, archivos, monumentos y edificios históricos, Madrid, 2009. Pag. 5.

Traduzione: Prima di modificare le condizioni è necessario conoscere i livelli precedenti e quelli da raggiungere ed essere molto prudenti nel modificare i parametri, anche e soprattutto quando questi sembrano particolarmente inadeguati.

1.5. I fenomeni di degrado dei materiali dovuti all'interazione con il microclima

L'obiettivo di una corretta politica di tutela deve essere quello di prolungare quanto più possibile la vita del patrimonio storico artistico e culturale, tramandatoci a sua volta dal passato; tra i vari fattori responsabili della perdita di quello, qui ci siamo concentrati sulle cause del degrado dei materiali da cui esso è composto connesse alle condizioni microclimatiche (con esclusivo riferimento ai fattori T e UR) e a come è possibile intervenire ai fini di migliorare i metodi conservativi e dunque l'azione di conservazione preventiva.

La scelta di indagare esclusivamente i parametri di temperatura e umidità relativa nell'analisi dei dati di monitoraggio³³ dei tre casi-studio presentati in questo elaborato, deriva dal fatto che essi sono i parametri microclimatici che influiscono maggiormente sulla conservazione dei materiali³⁴.

Il degrado dei materiali³⁵ è un processo degenerativo che incide sulle caratteristiche fisiche, chimiche e strutturali della materia e l'analisi e la comprensione delle cause che innescano questi processi sono necessarie per l'individuazione delle modalità di intervento più adeguate a seconda del contesto specifico. Si tratta di una convinzione datata, se solo si pensa che Alberti, nel 1450, affermava che *“anche i medici dicono che l'efficacia dei rimedi dipende per la maggior parte della conoscenza che si ha della malattia”*³⁶. Ciascun materiale possiede determinate caratteristiche che lo rendono più o meno vulnerabile di altri quando esposto a specifici fenomeni microclimatici. Per questa ragione risulterebbe utile potersi affidare ad un indice in grado di valutare il livello di rischio a cui determinati beni sono esposti, potendo mettere in relazione la tipologia di materiale e le caratteristiche microclimatiche in cui esso viene conservato³⁷.

1.6. Progetto dell'architettura e determinazione del microclima

1.6.1. Il rapporto tra progettazione dell'architettura e microclima prima del XIX secolo

Per migliaia di anni gli uomini hanno costruito edifici ad uso pubblico e privato tenendo conto delle condizioni ambientali di contorno, quali il clima del luogo; i materiali disponibili e la destinazione d'uso ultima delle architetture in corso d'opera. Le condizioni climatiche esterne hanno da sempre influenzato l'evoluzione architettonica: sin dalla preistoria gli “edifici”, rappresentati allora da architettura megalitica, avevano il compito primario di proteggere l'uomo dalle condizioni climatiche avverse.

³³ Ci si riferisce alle campagne di monitoraggio microclimatico, disponibili per ciascun caso-studio e citate al Capitolo III.

³⁴ Per sottolineare quanto incidano i parametri di T e UR nella conservazione del Patrimonio, si richiama un esempio risalente alla Seconda guerra mondiale: periodo in cui, per proteggere alcune collezioni da incendi, bombardamenti, saccheggio, ecc., queste venivano spostate in delle cave. Come nel caso di 2000 dipinti della National Portrait Gallery di Londra, che vennero conservati nella cava di Manod, in Galles. Qui le condizioni microclimatiche, in totale assenza di impianti, garantivano temperature attorno ai 15,5-24°C e valori di umidità relativa piuttosto costanti, attorno al 58%: condizioni eccezionalmente stabili che si rivelarono adeguate alla conservazione di questi beni. Quando i dipinti vennero riportati al museo, iniziarono a notarsi rapidamente i primi segni di degrado sulle opere (deformazioni, crepe, ecc.) a causa delle scarse condizioni microclimatiche garantite dalla struttura museale. (Per approfondimenti vedi: [13]).

³⁵ Per approfondimenti vedi: [89] [90]

³⁶ Cit. L. B. Alberti, *“L'architettura [DE RE AEDIFICATORIA]”*, a cura di G. Orlandi, Edizioni il Polifilo, Milano, 1966, pag. 869.

³⁷ Nella presente tesi si è cercato di fare esattamente questo elaborando l'indice PRD, presentato al Capitolo IV. Grazie alla collaborazione dell'Arch. Kristian Fabbri.

Come si legge dalla trattatistica premoderna, prima del XIX secolo, l'ottenimento delle condizioni microclimatiche *indoor* di un'architettura era uno dei principali obiettivi di architetti e progettisti, pertanto si prestava particolare attenzione all'involucro, alla disposizione degli ambienti interni, alle caratteristiche favorevoli e sfavorevoli dell'ambiente, ecc.

Per la scrittura del presente elaborato, si è deciso di selezionare alcuni tra i trattati più noti della storia dell'architettura occidentale, tra il I e gli inizi del XIX secolo: nello specifico, si sono considerati i trattati di: Marco Vitruvio Pollione (80 a.C.-15 a.C. circa) [69]; Leon Battista Alberti (1404-1472) [70]; Andrea Palladio (1508-1580) [71]; Pellegrino Pellegrini, detto Il Tibaldi (1527-1596) [72] e Giuseppe Valadier (1772-1839) [73]. Nei volumi citati gli architetti riportano numerose considerazioni e riferimenti alle conseguenze che clima esterno e microclima interno possono apportare alle opere architettoniche e alla salute delle persone.

Tali trattati presentano una forte omogeneità, almeno con riferimento ai temi trattati in questo studio: nello scritto di Giuseppe Valadier si trova riferimento a quanto sosteneva Leon Battista Alberti, cioè che la principale finalità del progettare fosse il raggiungimento dei tre obiettivi già stabiliti da Leon Battista Alberti: stabilità, comodità e bellezza. Se nel concetto di comodità troviamo un chiaro riferimento ai problemi del microclima, è nelle modalità per raggiungerla che, ancor di più, ritroviamo un comune linguaggio: nel primo volume de *“L'architettura pratica”* si legge infatti: *“Ogni fabbrica ragionata sarà quella in cui si riuniranno i tre gran requisiti, cioè bellezza, commodità e stabilità”*³⁸. Il punto di vista del fruitore della fabbrica viene ripreso più volte nei trattati, come anche il concetto che l'architettura nasca dalla necessità di dare una risposta ai bisogni dell'uomo, tra cui, primi tra tutti comodità e riparo: *“L'uomo, da principio, cercò un luogo per riposarsi in qualche zona senza pericoli. [...] Si cominciò allora a progettare [...] per proteggersi dal sole e dalla pioggia. [...] comprendendo di potersi difendere in tal modo dal gelo, dalle tempeste e dai venti invernali.”*³⁹.

I trattatisti riportano numerosi esempi riguardanti la relazione tra le condizioni microclimatiche e la salute dell'uomo; questi riferimenti possono considerarsi validi, per analogia, anche per la “salute” del patrimonio storico artistico e culturale. Nel libro primo del *De Re Aedificatoria*, Leon Battista Alberti afferma che quanto detto riguardo alle persone è da considerarsi valido anche per la conservazione delle collezioni e di qualsiasi bene storico artistico e culturale: *“[...] è bene evitare l'eventualità che gli abitanti, uscendo da un ambiente freddo, entrino in uno caldo, o da questo in un altro esposto al gelo e ai venti, senza passare per una zona dall'aria a temperatura intermedia; ciò sarebbe grave per la salute di ogni organismo.”*⁴⁰. Si potrebbe oggi parafrasare Alberti dicendo che, così come qualsiasi altro organismo, incluso l'uomo, anche i beni che costituiscono il Patrimonio, non andrebbero esposti a stress termici, poiché questo avrebbe delle ricadute negative sulla loro conservazione.

L'uomo viene identificato il più delle volte come una delle principali cause, insieme all'ingiuria del tempo e alla natura stessa, del degrado dell'architettura: *“E in verità gli edifici crollati a causa di incendi [...] o in seguito ad altre sciagure non sono tanti quanti ne sono andati in rovina solo perché l'incuria dei cittadini li aveva lasciati completamente privi dell'aiuto del tetto. La copertura è un'arma con cui l'edificio si difende dagli assalti del tempo.”*⁴¹, e ancora: *“Quante opere dell'uomo sono andate in rovina solo perché si sono trovate in conflitto con la natura!”*⁴². Quest'ultimo concetto dell'Alberti, con riferimento alla forza della natura -da intendersi come elementi e

³⁸ Cit. L.B. Alberti, op. cit., pag. 14.

³⁹ Cit. L.B. Alberti, op. cit., pag. 20.

⁴⁰ Cit. L.B. Alberti, op. cit., pag. 66.

⁴¹ Cit. L.B. Alberti, op. cit., pag. 79.

⁴² Cit. L.B. Alberti, op. cit., pag. 100.

fenomeni naturali-, viene ripreso anche da Pellegrino Pellegrini in “L’architettura”: [...] *si consideri di non far cose che costi in tutto contra alla natura [...] che saperà vincer e gettar a terra tutto quel che li è contrapposto.*”⁴³.

Nei suddetti trattati vengono definiti quali orientamenti e collocazioni geografiche sono da raccomandare per evitare che parametri microclimatici, come umidità relativa e temperatura dell’aria, possano compromettere la conservazione delle opere e il benessere di chi le vive. Gli architetti descrivono e suggeriscono come procedere nella progettazione, con il fine di sfruttare i possibili benefici legati al clima e al luogo, traendo ottimi apporti di illuminazione; calore durante l’inverno; brezza durante l’estate; ecc. Infatti, la collocazione dei complessi e l’orientamento delle singole stanze, dunque anche delle rispettive finestre, sembra richiamare attenzione ed interesse da parte degli architetti premoderni, i quali consigliano uno studio delle opportunità che offre l’ubicazione, in base al sole, ai venti e all’umidità -si reputa preferibile un clima temperato e si predilige un ambiente freddo e secco piuttosto che caldo e umido: “[...] *per innalzare un edificio consiglierò un ambiente [...] né troppo umido per eccesso d’acqua, né tormentato dalla siccità; bensì accogliente e temperato [...] piuttosto un po’ più freddo e secco che non caldo e umido più del necessario; alla conformazione stessa del luogo*”⁴⁴; alla conformazione del luogo: si dissuade dall’edificare nel fondo di una valle; nei trattati viene suggerita l’edificazione in luoghi elevati, caratterizzati da ricambio d’aria, la quale ci si deve accertare sia salubre -ne “I Dieci Libri dell’Architettura” di Vitruvio si legge: “*Quello fia lo euenato, non coperto di nebbie, né troppo calde, né troppo fredde, ma temperate*”⁴⁵. Infine, anche Valadier, nel I volume di “Architettura Pratica” sottolinea che “*sempre in considerazione degli aspetti migliori di quella località, [...] si adatteranno nella composizione della pianta, le scale, le camere, la biblioteca [...] e tutt’altro, che si desidera [...]*”⁴⁶.

La collocazione del complesso consente di garantire principalmente la salubrità degli ambienti e dunque delle persone e delle cose. Una buona disposizione degli ambienti e delle aperture, a sua volta, permette di ottenere buoni apporti di calore; ottima luce; consente di studiare ottimali correnti d’aria, che possano mantenere gli ambienti mediamente freschi anche durante i periodi estivi: “*Si deue auertire nel far le finestre, che ne piu ne meno di luce piglino, ne siano piu rare, o spesse di quello, che'l bisogno ricerchi. Pero si bauera molto riguardo alla grandezza delle stanze, che da quelle deono riceuere il lume: Percioche cosa manifesta e che di molto piu luce ha dibisogno vna stanza grande, accioche sia lucida, e chiara, che vna picciola: e se si faranno le finestre piu picciole e rare di quello, che si conuenga; renderanno i luoghi oscuri: e se eccederanno in troppo grandezza; li faranno quasi inhabitabili: perche essendoui portato il freddo, & il caldo dall’Aria; saranno quei luoghi secondo le stagioni dell’anno caldissimi, e freddissimi [...]*Le finestre di sopra, cioe quelle del secondo ordine deono essere la sesta parte minori della lunghezza della luce di quelle di sotto [...] *stando in vna parte della casa; si possa vedere fin dall’altra: il che apporta uaghezza, e fresco la Estate, & altri commodi*”⁴⁷.

Leon Battista Alberti afferma che il fine della progettazione sia quello di assegnare agli edifici ed alle parti che li compongono, una posizione adatta all’uso a cui l’edificio e le sue stanze sono destinati e che sia necessario indagare per comprendere se uno stesso genere di disegno possa adattarsi a più opere: “[...] *ognuna di queste parti debba essere bene adatta all’uso a cui è destinata [...]*”⁴⁸. Il Tibaldi, ad esempio, nella parte prima de “L’architettura”, al capitolo I tratta l’argomento delle basiliche e specifica che data la loro

⁴³ Cit. P. Pellegrini, L’Architettura, Edizioni Il Polifilo, Milano, 1990, pag.89.

⁴⁴ Cit. L.B. Alberti, op. cit., pag. 34.

⁴⁵ Cit. M. Vitruvio Pollione, I dieci libri dell’architettura, tradotto e commentato da Daniele Barbaro, Edizioni Il Polifilo, Milano, 1567, pag. 41.

⁴⁶ Cit. G. Valadier, L’Architettura Pratica, Sapere 2000, Roma, 1992, pag. 4.

⁴⁷ Cit. A. Palladio, op. cit., pag. 17.

⁴⁸ Cit. L.B. Alberti, op. cit., pag. 24.

destinazione d'uso, in fase di progettazione si ragionava su come ottenere un buon apporto di luce all'interno, perché vi si potesse leggere e scrivere.

Palladio riprende il tema della disposizione e del dimensionamento degli ambienti anche al capitolo II del secondo libro de *“I Quattro Libri dell'Architettura”*, dove specifica che la costruzione delle cantine sotterranee contribuisce alla conservazione dei piani superiori, poiché li protegge dall'umidità proveniente dal terreno, come sottolinea anche l'Alberti: “[...] abbiano posto ogni cura ad allontanare dall'edificio le acque piovane allo scopo, tra l'altro, di evitare che il terreno su cui poggia l'edificio si impregnasse d'umidità.”⁴⁹ E anche: “Ma contro la vampa del sole e il rigore dell'inverno la cosa migliore è che il terreno non sia umido, ma perfettamente asciutto.”⁵⁰. L'interesse di Palladio nel preservare l'architettura dall'umidità lo si evince anche al capitolo XIX de *“I Quattro Libri dell'Architettura”*, quando, nel pieno della descrizione del tempio di Giove Tonante⁵¹ si legge: “facevano gli Antichi il primo muro molto grosso, acciò che l'humidità non penetrasse nella parte di dentro dell'edificio”⁵². Pellegrini rimarca invece l'importanza del ricircolo dell'aria: “[...] quali vani siano in maniera che abino molta aria, [...] perché l'aria li purga, li risolve e suga le umidità.”⁵³.

Gli architetti specificano che le stanze estive debbano essere ampie, spaziose e preferibilmente rivolte a settentrione, mentre quelle invernali dovranno essere di dimensioni ridotte e orientate a ponente, in modo tale che “[...] le une saranno meglio ventilate, le altre meno vulnerabili al sole [...]”⁵⁴; “perciòche nella estate noi cerchiamo l'ombre, & i uenti, e nell'inuerno i Soli, & le piccole stanze piu facilmente si scaldano che le grandi”⁵⁵. Per proteggersi dal caldo si prediligevano sale con ampie finestre, rivolte a mezzogiorno e “portici internati e quelli coperti a volta”⁵⁶. Studi e librerie, infine, venivano solitamente collocate in stanze volte ad oriente, per via delle condizioni microclimatiche mattutine favorevoli caratteristiche di questo orientamento, che garantisce principalmente una buona illuminazione.

Nel secondo libro dell'opera già citata di Andrea Palladio, l'architetto riporta un esempio della messa in pratica delle teorie appena elencate, riguardo la disposizione degli ambienti: egli descrive la sala principale di Villa Cornaro, a Piombino e specifica che “la sala è posta nella parte più dentro della casa acciòche sia lontana dal caldo e dal freddo”⁵⁷.

La stessa attenzione che viene suggerita per la collocazione e per la composizione degli edifici, viene riproposta per quanto concerne la scelta e la preparazione dei materiali: nel primo de *“I Quattro Libri dell'Architettura”* di Andrea Palladio, è possibile trovare indicazioni in merito ai materiali da utilizzare per la realizzazione delle fabbriche. Il tema viene esplicitato dal titolo del primo capitolo: “Quali cose devono considerarsi e prepararsi avanti che al fabbricar si pervenga”. Suggerimenti simili sono riportati anche dagli altri trattatisti: gli architetti chiariscono quali siano le condizioni climatiche più congrue alla conservazione e preparazione dei metalli; del legno; delle pietre; ecc.; col fine che la qualità di questi materiali possa garantire la realizzazione di edifici stabili, duraturi e adatti alle caratteristiche climatiche e naturali del luogo in cui si è deciso di edificare. Uno dei fini di Leon Battista Alberti, al capito VIII e IX del libro

⁴⁹ Cit. L.B. Alberti, op. cit., pag. 90.

⁵⁰ Cit. L.B. Alberti, op. cit., pag. 986.

⁵¹ Tempio romano andato distrutto, di cui oggi non vi sono testimonianze archeologiche, ma dal trattato di Palladio si intuisce che fosse costruito sulle pendici del Campidoglio.

⁵² Cit. A. Palladio, op. cit., pag. 459.

⁵³ Cit. P. Pellegrini, op. cit., pag. 87.

⁵⁴ Cit. L.B. Alberti, op. cit., pag. 82.

⁵⁵ Cit. A. Palladio, op. cit., pag. 12.

⁵⁶ Cit. L.B. Alberti, op. cit., pag. 976.

⁵⁷ Cit. A. Palladio, op. cit., pag. 201.

secondo del De Re Aedificatoria, è quello di rendere noto quanto siano varie le proprietà delle pietre, in modo tale che l'architetto possa servirsene scegliendo quelle con le caratteristiche più appropriate a seconda della tipologia e della collocazione dell'opera che si vuole realizzare. Si riporta un esempio di seguito: *“Dice Catone: “Estrai la pietra d'estate; la terrai sotto l'aperto cielo; non l'adopererai prima di due anni”. “D'estate”, dunque, perché a mano a mano che le pietre si abituino a subire venti, gelate, piogge e altre intemperie. [altrimenti la pietra] tenderà a scheggiarsi e ad andare in pezzi. [...] “Non prima di due anni”, in modo da non lasciarsi sfuggire quelle pietre che, deboli per propria natura, sarebbero di danno al futuro edificio, e che devono quindi essere separate da quelle più solide.”*⁵⁸. L'architetto specifica, inoltre, che osservare le condizioni delle pietre originarie di un luogo ci fornisce indicazioni preziose in merito alle caratteristiche climatiche dello stesso: la sommità delle pietre che tende a sgretolarsi più del normale, ad esempio, è indicatore di un'atmosfera sottoposta a forti sbalzi di temperatura. Le medesime indicazioni le ritroviamo espresse e riconfermate da Palladio, che, quasi un secolo più tardi, indica anche lui come e quali pietre selezionare per garantire una buona resistenza dell'edificio ai fattori climatici esterni: *“[...] si caiano la Estate, accioche non essendo elle auezzze a' venti, alle piogge, & al ghiaccio; a poco a poco si induriscano, & diuengano atte a resistere a simili ingiurie de' tempi. Et tanto tempo si lasciano, accioche scelte quelle, che saranno state offese; siano poste nelle fondamenta, e l'altre non guaste, come approuate; si pongano sopra la terra nelle fabbriche: perche lungamente si manterranno.”*⁵⁹.

Palladio evidenzia inoltre come possa essere dannoso, per l'edificazione di complessi architettonici, l'utilizzo di sabbie mescolate ad acqua ed esposte a lungo a forti venti e a raggi solari: tali fattori tendono a renderle umide, fangose ed inclini alla comparsa di *“arboscelli, e fichi selvatici, che sono di grandissimo danno alle fabbriche”*⁶⁰. Per quanto riguarda il legno, le indicazioni reperibili dai trattati concernono principalmente il periodo in cui vadano tagliati gli alberi -autunno e inverno-; dove mantenere il legname una volta tagliato, ovvero lontano dal sole, dal gelo, dalle piogge e dal vento; infine il momento della giornata in cui vada lavorato, ossia dopo mezzogiorno, per evitare l'umidità portata dalla rugiada, caratteristica delle prime ore del mattino -ma va evitata anche l'eccessiva secchezza-: *“I Legnami si deono tagliare l'Autunno, e per tutto il Verno, percioche allhora gli alberi ricuperano dalle radici quel vigore, e sodezza, che nella Primavera, e nella Estate per le frondi, e per li frutti era sparso [...] Tagliati; si riporranno in luogo, oue non vengano caldissimi Soli, ne impetuosi venti, ne piogge: e quelli massimamente deono essere tenuti al coperto [...] Non si deono tirare per la rugiada, ma dopo il mezzodi: ne si deono lauorare, essendo di rugiada bagnati, o molto secchi; percio che quelli facilmente si corrompono, e questi fanno bruttissimo lauoro: Ne auanti tre anni saranno ben secchi per vso de' palchi, e delle porte, e delle fenestre.”*⁶¹.

Altre specifiche presenti nei trattati riguardano la qualità dei metalli, ma anche le caratteristiche di muri, pavimenti e soffitti, consigliati per l'indoor, come riportato al libro decimo del De Re Aedificatoria: *“Se poi si deve costruire in un luogo eccessivamente freddo [...] Un muro di selce o di marmo, oltre che freddo, anche umido, perché l'aria, a causa della bassa temperatura di esso, vi si condensa e deposita sotto forma di gocce. Preferibile è un muro di tufo, o anche di argilla [...]”*⁶²; *“[...] se si rivestono le pareti dell'atrio di tessuti di lana, l'ambiente risulterà tiepido; se invece sono di lino, esso sarà piuttosto fresco”*⁶³; *“Applicando un rivestimento al pavimento si raffredderà l'aria [...] Si darà alla sala da pranzo una copertura a volte; e si rimarrà sorpresi di quanto l'ambiente risulti fresco d'estate e tiepido d'inverno.”*⁶⁴.

⁵⁸ Cit. L.B. Alberti, op. cit., pag. 134-136.

⁵⁹ Cit. A. Palladio, *I Quattro libri dell'Architettura*, Hoepli, Milano, 1980, edizione elettronica del 15/09/2009, copia anastatica, pag. 97-98.

⁶⁰ Cit. A. Palladio, op. cit., pag. 127.

⁶¹ Cit. A. Palladio, op. cit., pag. 14.

⁶² Cit. L.B. Alberti, op. cit., pag. 978.

⁶³ Cit. L.B. Alberti, op. cit., pag. 984.

⁶⁴ Cit. L.B. Alberti, op. cit., pag. 986.

Quanto riportato dalla trattatistica storica in materia, sottolinea dunque l'importanza e la considerazione che veniva data al rapporto tra materia, forma, funzionalità e caratteristiche del luogo di insediamento. Le caratteristiche formali e materiche di un edificio determinano quanto le condizioni *outdoor* incideranno sull'*indoor* di una fabbrica.

1.6.2. Il rapporto tra progettazione dell'architettura e microclima dopo il XIX secolo

Secondo Le Corbusier fu l'introduzione del calcestruzzo a marcare un confine tra l'approccio architettonico riportato dai trattati citati nel paragrafo precedente e le nuove logiche dell'architettura moderna, esito dell'applicazione dei principi dell'industrializzazione al campo dell'edilizia⁶⁵, che prendono piede nei primi anni del 1900 circa. L'architetto svizzero-francese, in "Verso una architettura" [74], afferma che l'introduzione del cemento armato avesse liberato gli architetti dai vincoli costruttivi, segnando un distacco tra tecniche progettuali-costruttive e l'ambiente *outdoor*. Si tratta di una affermazione chiaramente parziale, ma che aiuta a comprendere come l'industrializzazione avesse modificato l'atteggiamento tradizionale del progettista, non più chiamato ad un atteggiamento in grado di dominare tutti i problemi dell'architettura, che risultavano divisi tra le varie competenze che caratterizzano i modi della produzione industriale. Il calcestruzzo armato, poi, accanto all'introduzione di altri materiali e tecnologie tese a ridurre lo spessore delle murature esterne, in congiunzione con l'uso più diffuso e massiccio di superfici vetrate, hanno fatto sì che gli edifici non fossero più in sintonia con il clima *outdoor*, in termini di condizioni microclimatiche *indoor* che l'architettura stessa era stata in grado di garantire fin lì. La soluzione di tale discrasia veniva affidata ad un altro specialista: l'impiantista, che, tramite l'utilizzo degli impianti di climatizzazione estiva ed invernale, rimediava al problema. La presenza degli impianti ha fatto sì che fosse possibile pensare architetture con le medesime caratteristiche (forma e materia) per luoghi completamente diversi dal punto di vista delle condizioni macroclimatiche. Tuttavia, manca coscienza dei fattori di rischio legati a questo cambio di rotta. Questo approccio ha generato a sua volta nuove esigenze: una legata ad uno stravolgimento della concezione di *comfort* termico; l'altra legata all'aumento della richiesta energetica.

Per quanto riguarda questa seconda "nuova esigenza", l'uso smodato delle risorse energetiche ha man mano costretto il legislatore a porre un limite a tale tendenza, imponendo controlli e limiti, puntando al contenimento degli sprechi energetici. Grazie anche a queste restrizioni, oggi si torna ad un approccio che tenta di unire lo sviluppo della tecnologia e l'esperienza: cosa abbiamo imparato dagli esiti delle buone e cattive pratiche del passato? Il passato ci ha insegnato quanto sia doveroso e conveniente nei confronti di noi stessi e dell'ambiente che ci circonda, poter progettare edifici in grado di rispondere alle esigenze microclimatiche *indoor* con minimi apporti energetici. Dopo aver toccato il punto più basso, a partire dagli anni Settanta⁶⁶, nell'ambito della costruzione e progettazione di nuovi edifici, il rapporto tra architettura e clima riveste grande importanza in termini di risparmio e controllo energetico: alla fine degli anni Settanta nasce in Germania l'architettura bioclimatica, volta al rispetto dell'ambiente naturale, al risparmio energetico e alla sostenibilità, tramite una progettazione in grado di sfruttare le condizioni che il clima ed il contesto offrono, privilegiando l'utilizzo nella progettazione di tecniche e materiali non inquinanti per l'ambiente e non nocive per la salute dell'uomo. Questo approccio, ancora oggi non sempre adottato, ha

⁶⁵ Per approfondimenti vedi: Saggio introduttivo di A. Cottone in: [91]

⁶⁶ I limiti della disponibilità dell'energia di origine fossile vennero rivelati per la prima volta proprio con la crisi energetica che ha segnato gli anni Settanta (Guerra del Kippur, 1973).

sensibilizzato l'architettura moderna a una progettazione cosciente, che tiene in conto anche i limiti delle risorse energetiche e che ci si augura venga sempre più praticata e diffusa.

1.7. Il *comfort* dei visitatori

1.7.1. *Comfort* termico: una questione anche culturale

Le condizioni microclimatiche *indoor* influiscono tanto sulla conservazione dei manufatti presenti negli edifici storici (es. dipinti, arredi, collezioni, ecc.), quanto sull'edificio stesso e sul *comfort* termico di chi visita, vive o lavora in questi spazi.

Il *comfort* è un concetto soggettivo, condizionato dal contesto culturale; dalle abitudini; da fattori fisici, fisiologici e psicologici (es. metabolismo, vestiario, temperatura, umidità relativa, velocità dell'aria, ecc.). Pertanto, l'evoluzione del concetto di *comfort* nel corso del tempo ha trasformato a sua volta anche l'architettura. L'ingegnere David Boswell Reid, come si legge in [75], ha definito l'architettura come: “*the act of enclosing and servicing an interior atmosphere, a notion not developed until the 20th century.*”⁶⁷. Infatti, come emerge dal paragrafo precedente, l'introduzione del controllo microclimatico tramite impiantistica all'interno di ogni tipologia di edificio, oltre ad incidere sulla struttura e sull'estetica della fabbrica, condiziona radicalmente le aspettative relative al benessere da parte dei visitatori: una volta che la tecnologia permette di riscaldare e raffrescare i locali *indoor* degli edifici, si hanno delle ripercussioni sulla concezione e sulle pretese riguardanti il *comfort* di chi vive queste architetture e sulla disponibilità delle risorse energetiche sfruttate per ottenere tali prestazioni.

Gli impianti di climatizzazione consentono infatti di controllare il microclima *indoor* in maniera più precisa e continua rispetto al solo edificio, o all'edificio associato a sistemi puntuali (stufe camini, etc.) e la progettazione ragionata⁶⁸ in funzione del microclima *indoor*, non è sufficiente ad assicurare condizioni di *comfort* comparabili e continue come quelle garantite dai sistemi HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*)⁶⁹. Per queste ragioni, ad oggi difficilmente viene considerato accettabile un museo, un ristorante, o un'abitazione privata senza un sistema di raffrescamento durante i mesi più caldi, o priva di riscaldamento durante l'inverno, poiché ottime condizioni di *comfort indoor* presuppongono temperature stabili garantite attorno ai 20°C, anche quando le condizioni climatiche esterne sono sottozero.

1.7.2. Gli indici per la misurazione del *comfort* termico (PMV e PPD)

Nel 1970, lo studioso olandese Povl Ole Fanger sviluppò un modello empirico⁷⁰ capace di prevedere il *comfort* termico di un gruppo di occupanti all'interno di un ambiente. Tale modello permette di calcolare

⁶⁷ Traduzione in italiano: “*l'atto di racchiudere e mantenere un'atmosfera interna, una nozione sviluppata solo nel XX secolo.*”. <https://online.ucpress.edu/jsah/article/37/3/143/57007/Central-Heating-and-Forced-Ventilation-Origins-and> (ultima visita: 15/06/2020).

⁶⁸ Volta ad ottenere un determinato microclima *indoor*.

⁶⁹ Impianti di condizionamento e ventilazione dell'aria.

⁷⁰ <http://pcfarina.eng.unipr.it/dispensearch00/gottardini133241/gottardini133241%20nuovo/gottardini133241.htm> (ultima visita: 15/02/2020).

gli indici PMV (Predicted Mean Vote⁷¹) e PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied⁷²), i cui criteri sono definiti dagli standard ISO 7730: 2006 [76] e ASHRAE 55:2013 [77].

Questi indici verranno considerati nel Capitolo III e IV della presente tesi.

-PMV (Predicted Mean Vote): indice che prevede il valore medio dei voti di sensazione termica espressi da numerose persone esposte alle stesse condizioni ambientali. Valori di PMV compresi tra: $-0,5 < PMV < +0,5$ indicano che la maggior parte delle persone risultano soddisfatte; $-3 < PMV < -0,5$ è indicatore di un microclima percepito dalle persone come troppo freddo; $+0,5 < PMV < +3$ troppo caldo.

- PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied): indice inversamente proporzionale all'indice PMV; prevede la percentuale di insoddisfatti espressa da numerose persone esposte alle stesse condizioni ambientali. Viene calcolato su una scala da 0% a 100%.

1.8. Edifici storici ad uso museale: il difficile equilibrio tra conservazione e fruizione

Fino al XVIII secolo, collezioni ed opere di valore venivano principalmente custodite e commissionate dalle casate nobiliari, con il fine di celebrarne il prestigio. Tali collezioni erano fruibili per pochi soggetti: si pensi alle Wunderkammer⁷³ -camere delle meraviglie-, che dal XVI al XVIII secolo custodivano beni di straordinario valore all'interno di residenze nobiliari aperte a pochissimi fortunati, con criteri estremamente selettivi, basati principalmente sull'estrazione sociale. Il primo museo aperto al pubblico risale al 1734, quando, sotto il pontificato di Papa Clemente XII, venne aperta la collezione dei Musei Capitolini, a Roma. Altra data chiave nella storia della nascita dei musei è il 19 settembre 1792: data di fondazione del Museo del Louvre e giorno in cui il ministro francese Jean-Marie-Roland (1734-1793), decretò il passaggio delle collezioni reali d'arte della corona di Francia alla nazione francese: da allora le opere non solo erano accessibili al pubblico, a prescindere dalla classe sociale alla quale ciascuno appartenesse, ma erano del pubblico: proprietà della nazione francese. A partire da allora il museo rafforza il suo ruolo educativo e culturale⁷⁴.

Da quel passaggio, si assiste ad una espansione e diversificazione del concetto di museo. Negli ultimi decenni, poi, l'immagine del museo è mutata notevolmente: da luogo di esposizione, catalogazione e ricerca; “[...] *istituzione permanente, senza scopo di lucro [...] aperto al pubblico e compie ricerche che riguardano testimonianze materiali e immateriali dell'umanità e del suo ambiente; le acquisisce, le conserva e, soprattutto, le espone a fini di studio, educazione e diletto*”⁷⁵, il museo si presenta oggi come uno spazio maggiormente flessibile e dinamico, nel tentativo di meglio rispondere alle sollecitazioni economiche, turistiche e sociali. Le tradizionali funzioni di ricerca, conservazione ed esposizione, sono state integrate con necessità di comunicazione, marketing ed intrattenimento: all'interno dei musei non ci stupiamo di trovare caffetterie; ristoranti; organizzazioni e promozioni di workshops; ecc. Tutto ciò rende le scelte in merito al controllo del microclima di questi spazi più complicata. Nei musei odierni sono infatti numerosi gli interessi⁷⁶ a cui

⁷¹ Traduzione: Voto Medio Previsto.

⁷² Traduzione: Percentuale Prevista di Insoddisfatti.

⁷³ Es. Museo kircheriano, fondato nel 1651 dal padre gesuita Athanasius Kircher nel Collegio Romano, Roma, Italia.

⁷⁴ Per approfondimenti vedi: [92] pag. 81-90, [93]; [94] pag. 87

⁷⁵ Definizione di museo, XV Assemblea generale dell'ICOM a Buenos Aires, Argentina, il 4 Novembre 1986.

⁷⁶ La dichiarazione di intenti del Metropolitan Museum of Art a New York (https://www.metmuseum.org/-/media/files/about-the-met/annual-reports/2010_2011/mission-statement.pdf ultima visita: 15/06/2020) espone le

concorrono gli attori che fanno parte del mondo museale: è necessario garantire una conservazione preventiva dell'edificio e di ciò che esso conserva per le generazioni future; si vuole minimizzarne il deterioramento; massimizzare l'accessibilità; ridurre i costi degli impianti; aumentare il numero di visitatori; rendere il museo finanziariamente autosufficiente; ecc. Combinare necessità come: *comfort*; conservazione dell'edificio; conservazione ed esposizione delle opere; accessibilità; affluenza; ecc. all'interno di un edificio storico ad uso museale è particolarmente complicato.

Il dilemma "fruire vs conservare" include problematiche complesse, tra cui la necessità di garantire un microclima *indoor* salubre per i visitatori, ma prima ancora adeguato alla conservazione preventiva dell'edificio e dei beni ivi custoditi, e non sempre i parametri cosiddetti "ottimali" per adempiere a queste tre necessità coincidono. Nella conservazione preventiva del patrimonio culturale, la conservazione si intende sia per l'edificio "ospitante", sia per i beni di valore "ospitati": i valori di umidità relativa e temperatura, le loro modifiche e fluttuazioni nel corso delle giornate, dei mesi e degli anni, sono di vitale importanza.

Nella maggior parte dei casi, considerando esclusivamente il *comfort* dei visitatori, gli edifici storici museali vengono climatizzati unicamente durante le ore di apertura al pubblico e possono essere caratterizzati da fluttuazioni e sbalzi di temperatura particolarmente marcati e dannosi per la conservazione del patrimonio. Infatti, il *comfort* termico dei visitatori è generalmente (non sempre) più suscettibile al parametro della temperatura, che non a quello dell'umidità; ma regolare il microclima *indoor* di un edificio museale, in base alle esigenze dei visitatori, influenza il rischio di degrado dovuto a processi chimici, fisici e biologici dei materiali che compongono gli stessi edifici e le collezioni ivi custodite. Dunque, rispondere alle esigenze dei visitatori può aumentare il rischio di danno a cui edificio e collezioni sono esposti: un'elevata ventilazione, ad esempio, andrebbe incontro alle esigenze dei visitatori durante i periodi estivi, ma potrebbe aumentare il rischio di fluttuazioni di temperatura e umidità relativa, incrementando il rischio di deterioramento delle opere più delicate; così come il riscaldamento degli ambienti *indoor* durante periodi invernali, volto ad aumentare il *comfort* termico di lavoratori e visitatori, accresce il rischio di decomposizione e formazione di muffe su opere e superfici. Infatti, in zone geografiche caratterizzate da temperature *outdoor* particolarmente basse, l'accensione degli impianti di riscaldamento provoca una diminuzione dell'umidità relativa e aumenta il rischio di degrado fisico dei materiali. Per ovviare questo problema sarebbe necessaria la presenza di umidificatori all'interno della struttura. Allo stesso tempo umidificare l'aria *indoor* aumenta il rischio di attacchi biologici. Tuttavia, se ci troviamo in zone caratterizzate da clima tropicale, ridurre le temperature tramite impianti di raffrescamento e mantenere dei bassi livelli di umidità relativa, può diminuire la possibilità di degrado chimico e biologico dei materiali, ma -se prima di queste modifiche le opere sono state conservate in un ambiente con livelli tipicamente superiori di temperatura e umidità relativa- aumenterà il rischio di degrado fisico.

In alternativa, un errore a cui si assiste tipicamente è l'adeguamento delle condizioni microclimatiche per la conservazione preventiva delle collezioni, senza considerare le esigenze di conservazione della fabbrica:

necessità conflittuali tipiche degli edifici museali su cui è necessario trovare un punto di incontro: "*The mission of The Metropolitan Museum of Art is to collect, preserve, study, exhibit, and stimulate appreciation for and advance knowledge of works of art that collectively represent the broadest spectrum of human achievement at the highest level of quality, all in the service of the public and in accordance with the highest professional standards.*"⁷⁶ (12 settembre, 2000).

Traduzione in italiano: "La missione del museo è raccogliere, preservare, studiare, esporre, oltre a stimolare l'apprezzamento e l'avanzamento della conoscenza dei lavori d'arte che rappresenta per la collettività il più ampio spettro delle conquiste dell'umanità al più alto livello qualitativo, tutto al servizio del pubblico e coerentemente con i più alti standard professionali".

molte collezioni sono conservate all'interno di edifici storici ad uso museale le cui caratteristiche strutturali, architettoniche e geografiche, si presentano tali per cui ridurre il rischio microclimatico a cui sono esposte le opere implicherebbe un'esposizione al suddetto rischio a spese dell'edificio stesso.

Per queste ragioni e per come si presenta generalmente oggi la distribuzione degli spazi all'interno dei musei, risulta conveniente gestire il microclima *indoor* suddividendoli per zone, a seconda delle necessità che si considerano predominanti. È difficile che ogni area del museo abbia la stessa necessità primaria: caffetteria, ristorante, biglietteria, uffici, sono zone dedicate a *staff* e visitatori, ma non alle collezioni; nelle aree espositive lo spazio viene condiviso tra visitatori e opere, in questo caso il *comfort* risulta in secondo piano rispetto alla conservazione del patrimonio storico artistico e culturale. Nonostante ciò, proprio per le aspettative condizionate dal contesto culturale relative al concetto di *comfort* esplicitate al paragrafo 1.7.1., tutt'oggi emerge la necessità di trovare un equilibrio tra interessi contrastanti legati a due obiettivi distinti: accessibilità (garantendo *comfort* termico ai visitatori) e conservazione (del Patrimonio); il che rappresenta un'impresa di difficile compimento.

1.9. Esempi di gestione di impianti di climatizzazione in edifici storici ad uso museale

La comprensione e il controllo dei fattori che influiscono sul microclima all'interno degli edifici storici museali, è tanto complessa quanto rilevante. Gli impianti possono rappresentare causa e soluzione nei confronti della conservazione preventiva e dell'accessibilità: soluzione perché possono garantire un controllo efficiente dei parametri microclimatici *indoor*, causa in quanto in caso di malagestione o malfunzionamento degli stessi si può avere la perdita dello stesso controllo a cui si auspicava con la loro introduzione, esponendo il Patrimonio a rischio di danno e lavoratori e visitatori a *discomfort* termico.

Un esempio di quanto sia complessa l'individuazione e la gestione di un sistema impiantistico adeguato all'interno di questi edifici⁷⁷ viene riportato in [13]: è il caso del National Museum di Stoccolma, in Svezia, costruito nel 1860. Nel 1923 in questo edificio venne installato un sistema di stufe elettriche che permise di portare la temperatura dell'aria fino a 18,5°C durante il mese di aprile, temperature mai raggiunte prima in questi spazi. Di conseguenza l'umidità relativa nel 1923 scese a dei livelli che le collezioni non avevano mai sperimentato: circa 20% (evidenziato dalla freccia alla Figura 1: l'umidità relativa cala a causa dell'attivazione dell'impianto di riscaldamento, che ha portato la temperatura da -0,8°C a 18,5°C). La conseguenza si fece presto sentire, provocando una contrazione degli oggetti in legno e si decise di spegnere gli impianti. Otto anni dopo venne installato un sistema di ventilazione dell'aria, ma nessun sistema di umidificazione. In questo caso l'interesse trainante fu quello di attirare un maggior numero di visitatori aumentando il *comfort* termico, ma non si tenne in conto l'influenza che l'umidità relativa aveva già mostrato avere anni prima sulla conservazione delle opere. Durante il primo inverno apparirono i primi segni di danneggiamento sui dipinti su tavola (es. distacco del colore) e dunque nel 1932 gli impianti vennero implementati con un sistema di umidificazione.

⁷⁷ Ci si riferisce agli edifici storici ad uso totalmente o parzialmente museale, di cui fanno parte i tre casi-studio su cui si concentra la presente tesi al Capitolo III.

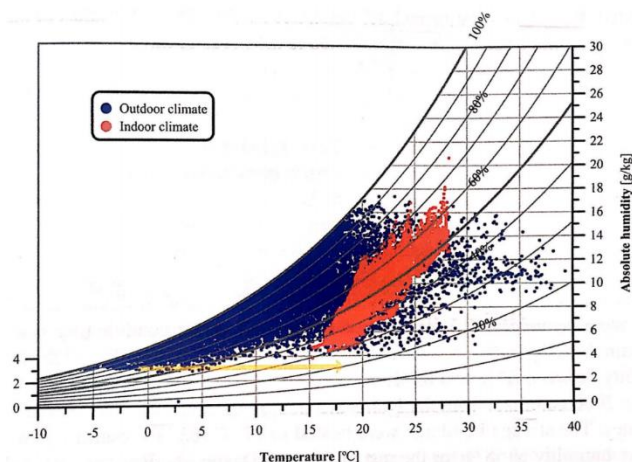


Figura 1_ Grafico psicometrico, National Museum, Svezia⁷⁸

L'esempio appena riportato è un esperimento pionieristico; in tempi a noi vicini, si sono verificati episodi di malfunzionamento degli impianti, che hanno avuto ricadute sulla conservazione del patrimonio, come nel caso della Galleria degli Uffizi, a Firenze; o nel caso del museo di Messina; o ancora in quello della Pinacoteca di Brera, a Milano. Nei primi due casi, il malfunzionamento del sistema H(eating) V(entilation) A(ir) C(onditioning) ha impedito rispettivamente ai visitatori: il 4 agosto del 2017, di entrare per ore all'interno della Galleria degli Uffizi, causando lunghe file (Figura 2); nel 2019, al Museo regionale di Messina diversi turisti hanno richiesto il rimborso del biglietto a causa del malfunzionamento dell'aria condizionata: temperature troppo elevate, non in linea con il concetto di *comfort* termico dei visitatori. Inoltre, le attuali condizioni *indoor* del museo, aggiornate al 16 agosto 2020⁷⁹, riportano temperature interne superiori ai 32 °C; assenza di impianti di raffrescamento, "sostituiti" -per limitare i rischi di deterioramento delle opere- dalla scelta di aprire tutte le porte delle uscite di emergenza del museo (esponendo così fortemente il microclima interno all'andamento del clima *outdoor*) e dall'installazione di deumidificatori portatili.



Figura 2_Galleria degli Uffizi, Firenze, Italia⁸⁰

Il caso della Pinacoteca di Brera, a Milano, risalente al 7 gennaio 2017, rappresenta un esempio più grave, poiché a causa di un improvviso abbassamento della percentuale di umidità relativa *indoor*, sono state

⁷⁸ Registro delle immagini. p.268.

⁷⁹ https://messina.gazzettadelsud.it/articoli/cronaca/2020/08/17/messina-condizionatori-guasti-al-museo-regionale-opere-darte-a-rischio-3873dc94-9c38-465f-8032-f463c5825bcd/?fbclid=IwAR3-cE-x89hZ1RNRV3-Z_F9POVVkrctccYoQbMBK1BzbyZLtz3s99ZShFjRA (ultima visita: 9/09/2020)

⁸⁰ Registro delle immagini. p.268.

messe a rischio alcune opere. In questa occasione, il clima *outdoor* particolarmente freddo e secco, associato al malfunzionamento del sistema HVAC della Pinacoteca ha reso necessario il noleggio di cinque umidificatori per poter alzare il livello di umidità relativa all'interno delle sale. Il sistema di monitoraggio era collegato a un sistema di allarme, che ha trasmesso i valori anomali all'amministrazione della Pinacoteca, che ha potuto intervenire in tempi piuttosto brevi per mettere in sicurezza le opere.

Nonostante ciò, alcuni dipinti hanno riportato sollevamenti importanti ed è stato necessario spostarli nei laboratori di restauro (es. Il Cristo alla colonna di Bramante⁸¹; Le Storie di San Gerolamo di Lazzaro Bastiani⁸²); circa altri 40 dipinti sono stati immediatamente velinati (es. La Pala di Brera di Piero della Francesca⁸³ -Figura 3-) e non hanno riportato perdita di colore.



Figura 3_La Pala di Brera⁸⁴

Dal momento che il malfunzionamento degli impianti può causare condizioni microclimatiche dannose per le collezioni museali, rischiando di comprometterne la conservazione, si reputa che l'installazione di sistemi impiantistici, specialmente all'interno di edifici storici, dovrebbe essere considerata come ultima risorsa. Quando possibile, è consigliabile procedere con un controllo passivo: un buon isolamento termico; ombreggiamento solare naturale; una gestione ragionata delle aperture, ne sono un esempio.

La presente tesi condivide quanto affermato da Edgar Neuhaus, ingegnere specializzato nell'ottimizzazione del microclima all'interno dei musei per la conservazione preventiva, nel proprio contributo pubblicato in [78] successivamente al Convegno sul Clima a Monaco il 7-9 2012: “*The functioning of a HVAC system should therefore not be trusted blindly but some level of caution should be taken. Monitoring indoor climate conditions independently from the HVAC system is essential.*”⁸⁵. Questa affermazione non vuole scoraggiare l'utilizzo degli impianti HVAC, ma suggerisce che essi vengano monitorati propriamente (es. con la possibilità di stabilire delle soglie oltre le quali vengano inviati degli *alert* automatici via e-mail o SMS ai manutentori; con l'installazione di sonde termoigrometriche negli ambienti per monitorare ed

⁸¹ Dipinto a tempera e olio su tavola, databile al 1480-1490 circa e conservato nella Pinacoteca di Brera, a Milano.

⁸² Dipinto a tempera su tavola, del 1485 circa, conservato nella Pinacoteca di Brera, a Milano.

⁸³ Dipinto a tempera e olio su tavola, del 1472 circa, conservato nella Pinacoteca di Brera, a Milano.

⁸⁴ Registro delle immagini. p.268.

⁸⁵ Cit. E. Neuhaus, A critical look at the use of HVAC systems in the museum environment, in A. Burmester, M. Eibl, Climate for Collections. Standards and uncertainties, Doerner Institut, Monaco, 2013. Pag. 117.

Traduzione: Non bisognerebbe fidarsi alla cieca del funzionamento degli impianti HVAC: andrebbero prese delle precauzioni. Monitorare le condizioni climatiche *indoor* indipendentemente dagli impianti di condizionamento e ventilazione dell'aria è essenziale.

identificare per tempo eventuali anomalie dannose per le collezioni museali; ...): in questo modo tali impianti possono rappresentare un valido contributo alla conservazione preventiva.

1.10. Conclusioni

Usare un'architettura storica e soprattutto riusarla, come tipicamente accade per gli edifici storici ad uso museale su cui si è indagato nel corso della ricerca, significa caricare un edificio di funzioni che, anche se analoghe, differiscono profondamente oggi da quelle che vi venivano svolte in passato. Innanzitutto, tale operazione significa esporre l'edificio a nuovi livelli di rischio, che rimangono quasi sempre non esplicitati, sia per l'architettura oggetto dell'intervento, sia per il suo contenuto. L'elaborazione di strategie utili a individuare quali essi siano e a verificarne, accanto alla natura, la relativa misura⁸⁶ è passaggio ineludibile per definire come intervenire, se non per scongiurarli in modo assoluto, almeno per minimizzarli; ed è passaggio centrale del più ampio approccio preventivo ai problemi della conservazione, tanto ritenuto condivisibile quanto poco praticato. Le indagini microclimatiche sono una base dati, spesso sottovalutata, fondamentale per procedere con la definizione di tali interventi.

Con questo primo capitolo si è voluto introdurre la tematica del microclima *indoor* e della conservazione preventiva, sottolineando:

1. gli aspetti su cui si concentra la ricerca, ossia l'analisi del microclima *indoor* degli edifici storici ad uso museale e l'individuazione dei fattori che lo caratterizzano;
2. l'assenza in letteratura di indici capaci di valutare il rischio microclimatico esercitato da un'ambiente *indoor* nei confronti del Patrimonio e di calcolare la probabilità di danno a cui lo stesso microclima espone specifici materiali: da cui l'elaborazione di due indici di rischio microclimatico, HMR e PRD⁸⁷;
3. le principali difficoltà, all'interno degli edifici storici ad uso museale, nel coniugare esigenze legate ad accessibilità e conservazione, spesso in contrasto tra loro in termini di controllo microclimatico.

Questi tre punti sono strettamente collegati tra loro e portano alle seguenti conclusioni: note le complessità descritte in merito al difficile equilibrio tra accessibilità e conservazione in edifici -totalmente o parzialmente- museali (3.), prima di prendere decisioni riguardo al controllo del microclima *indoor* (che potrebbero favorire il *comfort* dei visitatori, ma mettere a rischio la conservazione del Patrimonio, o viceversa), la presente ricerca considera imprescindibile conoscere il *Historic Indoor Microclimate*, dunque indagare quali modifiche (d'uso, architettoniche, impiantistiche, climatiche, ecc.) e in che modo hanno coinvolto un'architettura nel corso degli anni, caratterizzandone l'evolversi dei parametri microclimatici *indoor* (1.), i quali incidono fortemente sulla conservazione del Patrimonio. Per queste ragioni è emersa la necessità, nel corso della ricerca, di definire gli indici HMR e PRD (2.), fino ad oggi non presenti in letteratura, elaborati dall'autore e dall'Arch. Kristian Fabbri, in grado di valutare il rischio microclimatico e il rischio di danno a cui il Patrimonio è esposto, in ambienti *indoor*.

⁸⁶ Ci si riferisce alla possibilità di definire il livello di rischio microclimatico a cui il Patrimonio è esposto, tramite indici specifici.

⁸⁷ Presentati al Capitolo IV.

Riferimenti

- [1] J. Ruskin, *Le sette lampade dell'architettura*, Jaca Book, Milano, 1982.
- [2] E. Viollet-le-Duc, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*, B. Bance editore, Parigi, 1854.
- [3] A. Riegl, *Der Moderne Denkmalkultus: Sein Wesen Und Seine Entstehung* (1903), Kessinger Publishing, 2010.
- [4] ICR, – Istituto Centrale del Restauro, *Piano pilota per la conservazione programmata dei beni culturali in Umbria. Progetto esecutivo a cura di Ministero per i Beni Culturali e Ambientali*, (1976).
- [5] G. Urbani, *Intorno al restauro*, a cura di B. Zanardi, Milano, 2000.
- [6] G. Thomson, *Contributions to the London Conference on museum climatology. 18-23 Settembre 1967*, *Int. Ist. Conserv. Hist. Artist. Work.* (1967).
- [7] D. Camuffo, *Il clima storico per la conservazione dei beni culturali : materiali organici e variazioni microclimatiche*, *U&C.* 9 (2014) 11–12.
- [8] G. de Guichen, *La conservation préventive: un changement profond de mentalité*, *Cah. d'étude Com. Conserv.* (1995).
- [9] V. D'Agostino, F.R. D'Ambrosio Alfano, B.I. Palella, G. Riccio, *The museum environment: A protocol for evaluation of microclimatic conditions*, *Energy Build.* 95 (2015) 124–129. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.009>.
- [10] R.P. Kramer, H.L. Schellen, A.W.M. van Schijndel, *Impact of ASHRAE's museum climate classes on energy consumption and indoor climate fluctuations: Full-scale measurements in museum Hermitage Amsterdam*, *Energy Build.* 130 (2016) 286–294. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.016>.
- [11] G. Pavlogeorgatos, *Environmental parameters in museums*, *Build. Environ.* 38 (2003) 1457–1462. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00113-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00113-6).
- [12] A.W. Brokerhof, B. Ankersmit, F. Ligterink, *Risk Management for Collections*, 2017.
- [13] M.H.L. Stappers, B. Ankersmit, *Managing Indoor Climate Risks in Museums*, Original D, Springer, International Publishing, Amsterdam, 2017.
- [14] E. Lucchi, *Review of preventive conservation in museum buildings*, *J. Cult. Herit.* (2017) 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.09.003>.
- [15] A. Neri, S. Corbellini, M. Parvis, L. Arcudi, S. Grassini, M. Piantanida, E. Angelini, *Environmental monitoring of heritage buildings*, *IEEE Work. Environ. Energy, Struct. Monit. Syst. EESMS.* 2009 (2009) 93–97. <https://doi.org/10.1109/EESMS.2009.5341308>.
- [16] D. Camuffo, *Microclimate for cultural heritage*, 1998. <https://doi.org/10.2307/1506674>.
- [17] B. Krupińska, R. Van Grieken, K. De Wael, *Air quality monitoring in a museum for preventive conservation: Results of a three-year study in the Plantin-Moretus Museum in Antwerp, Belgium*, *Microchem. J.* (2013). <https://doi.org/10.1016/j.microc.2013.05.006>.

- [18] M. Pretelli, A. Ugolini, K. Fabbri, “ Historic plants as monuments” preserving, rethinking and re-using historic plants, *J. Cult. Herit.* 14 (2013) S38–S43. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.12.013>.
- [19] F. Becherini, A. Bernardi, E. Frassoldati, Microclimate inside a semi-confined environment: Valuation of suitability for the conservation of heritage materials, *J. Cult. Herit.* (2010). <https://doi.org/10.1016/j.culher.2010.01.005>.
- [20] J. Ferdyn-Grygierek, Indoor environment quality in the museum building and its effect on heating and cooling demand, *Energy Build.* (2014). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.014>.
- [21] J.E. Christensen, C.G. Kollias, Hygrothermal evaluation of a museum storage building based on actual measurements and simulations, *Energy Procedia.* 78 (2015) 651–656. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.051>.
- [22] A. Bonora, K. Fabbri, M. Pretelli, Widespread Difficulties and Applications in the Monitoring of Historical Buildings: The Case of the Realm of Venaria Reale, *Heritage.* 3 (2020) 128–139. <https://doi.org/10.3390/heritage3010008>.
- [23] F. Frasca, E. Verticchio, C. Cornaro, A.M. Siani, Optimising Conservation of Artworks , *Energy Performance and Thermal Comfort Combining Hygrothermal Dynamic Simulation and On-Site Measurements in Historic Buildings Department of Physics , Sapienza Università di Roma , Rome , Italy Department of Earth Sc,* (2019) 2856–2863.
- [24] J. Leissner, R. Kilian, L. Kotova, D. Jacob, U. Mikolajewicz, T. Broström, J. Ashley-Smith, H.L. Schellen, M. Martens, J. Van Schijndel, F. Antretter, M. Winkler, C. Bertolin, D. Camuffo, G. Simeunovic, T. Vyhlídal, Climate for culture: Assessing the impact of climate change on the future indoor climate in historic buildings using simulations, *Herit. Sci.* 3 (2015) 1–15. <https://doi.org/10.1186/s40494-015-0067-9>.
- [25] A. Bernardi, D. Camuffo, M. Del Monte, C. Sabbioni, Microclimate and weathering of a historical building: The Ducal Palace in Urbino, *Sci. Total Env.* 46 (1985) 243–260. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(85\)90297-9](https://doi.org/10.1016/0048-9697(85)90297-9).
- [26] D. Camuffo, P. Brimblecombe, R. Van Grieken, H.J. Busse, G. Sturaro, A. Valentino, A. Bernardi, N. Blades, D. Shooter, L. De Bock, K. Gysels, M. Wieser, O. Kim, Indoor air quality at the Correr Museum, Venice, Italy, *Sci. Total Environ.* 236 (1999) 135–152. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00262-4](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00262-4).
- [27] E. Vuerich, F. Malaspina, M. Barazutti, T. Georgiadis, M. Nardino, Indoor measurements of microclimate variables and ozone in the church of San Vincenzo (Monastery of Bassano Romano - Italy): A pilot study, *Microchem. J.* 88 (2008) 218–223. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2007.11.014>.
- [28] C. Bonacina, P. Baggio, F. Cappelletti, P. Romagnoni, A.G. Stevan, The Scrovegni Chapel: The results of over 20 years of indoor climate monitoring, *Energy Build.* 95 (2015) 144–152. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.018>.
- [29] S.P. Corgnati, M. Filippi, Assessment of thermo-hygrometric quality in museums: Method and in-field application to the “ Duccio di Buoninsegna” exhibition at Santa Maria della Scala (Siena, Italy), *J. Cult. Herit.* 11 (2010) 345–349. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2009.05.003>.
- [30] F. García-Diego, M. Zarzo, Microclimate monitoring by multivariate statistical control: The renaissance frescoes of the Cathedral of Valencia (Spain), *J. Cult. Herit.* (2010). <https://doi.org/10.1016/j.culher.2009.06.002>.

- [31] A. Caratelli, A.M. Siani, G.R. Casale, A. Paravicini, K.H. Fiore, D. Camuffo, Stucco panels of Room VI in the Galleria Borghese (Rome): Physical-chemical analysis and microclimate characterization, *Energy Build.* 61 (2013) 133–139. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.013>.
- [32] T. Cardinale, G. Rospi, N. Cardinale, The influence of indoor microclimate on thermal comfort and conservation of artworks: The case study of the Cathedral of Matera (South Italy), *Energy Procedia.* 59 (2014) 425–432. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.398>.
- [33] D. Dagostino, A. Macchia, R. Cataldo, L. Campanella, A. Campbel, Microclimate and salt crystallization in the crypt of lecces duomo, *J. Arch. Herit.* 9 (2015) 290–299. <https://doi.org/10.1080/15583058.2013.777862>.
- [34] P. Pasquarella, C. Balocco, G. Pasquariello, G. Petrone, E. Saccani, P. Manotti, M. Ugolotti, F. Palla, O. Maggi, R. Albertini, A multidisciplinary approach to the study of cultural heritage environments: Experience at the Palatina Library in Parma, *Sci. Total Env.* 536 (2015) 557–567. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.10>.
- [35] K. Maroy, M. Steeman, A. Janssens, L. De Backer, M. De Paepe, Conservation climate analysis of a church containing valuable artworks, *Energy Procedia.* 78 (2015) 1269–1274. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.286>.
- [36] E. Schito, L. Dias Pereira, D. Testi, M. Gameiro da Silva, A procedure for identifying chemical and biological risks for books in historic libraries based on microclimate analysis, *J. Cult. Herit.* 37 (2019) 155–165. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.10.005>.
- [37] K. Fabbri, M. Pretelli, Heritage buildings and historic microclimate without HVAC technology: Malatestiana Library in Cesena, Italy, UNESCO Memory of the World, *Energy Build.* 76 (2014) 15–31. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.051>.
- [38] N. Aste, R.S. Adhikari, M. Buzzetti, S. Della Torre, C. Del Pero, H.E. Huerto C, F. Leonforte, Microclimatic monitoring of the Duomo (Milan Cathedral): Risks-based analysis for the conservation of its cultural heritage, *Build. Environ.* 148 (2019) 240–257. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.015>.
- [39] M. Andretta, F. Coppola, A. Modelli, N. Santopuoli, L. Seccia, Proposal for a new environmental risk assessment methodology in cultural heritage protection, *J. Cult. Herit.* 23 (2017) 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.08.001>.
- [40] H.E. Silva, F.M.A. Henriques, T.A.S. Henriques, G. Coelho, A sequential process to assess and optimize the indoor climate in museums, *Build. Environ.* 104 (2016) 21–34. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.023>.
- [41] H. Janssen, J.E. Christensen, Hygrothermal optimisation of museum storage spaces, *Energy Build.* 56 (2013) 169–178. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.043>.
- [42] G. Litti, A. Audenaert, J. Braet, K. Fabbri, A. Weeren, Synthetic scan and simultaneous index aimed at the Indoor Environmental Quality evaluation and certification for people and artworks in heritage buildings, *Energy Procedia.* 78 (2015) 1365–1370. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.155>.
- [43] G. Forino, J. MacKee, J. von Meding, A proposed assessment index for climate change-related risk for cultural heritage protection in Newcastle (Australia), *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 19 (2016) 235–248. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.09.003>.

- [44] Z. Huijbregts, R.P. Kramer, M.H.J. Martens, A.W.M. van Schijndel, H.L. Schellen, A proposed method to assess the damage risk of future climate change to museum objects in historic buildings, *Build. Environ.* 55 (2012) 43–56. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.008>.
- [45] E. Schito, D. Testi, W. Grassi, A proposal for new microclimate indexes for the evaluation of indoor air quality in museums, *Buildings*. (2016). <https://doi.org/10.3390/buildings6040041>.
- [46] C. Zhu, N. Li, Study on indoor air quality evaluation index based on comfort evaluation experiment, *Procedia Eng.* 205 (2017) 2246–2253. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.066>.
- [47] S.P. Corgnati, M. Filippi, M. Perino, A new approach for the IEQ (Indoor Environment Quality) assessment, in: *Proc. 3rd Int. Build. Phys. Conf. - Res. Build. Phys. Build. Eng.*, 2006.
- [48] S.P. Corgnati, V. Fabi, M. Filippi, A methodology for microclimatic quality evaluation in museums: Application to a temporary exhibit, *Build. Environ.* (2009). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.09.012>.
- [49] E. Bucur, A. Vasile, R. Diodiu, A. Catranguiu, M. Petrescu, Assessment of indoor air quality in a wooden church for preventive conservatio, *J. Environ. Prot. Ecol.* 16 (2015) 7–17. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84946744489&partnerID=40&md5=1c721de8d84a8923b1cae267912dd45b>.
- [50] H.E. Silva, F.M.A. Henriques, Microclimatic analysis of historic buildings: A new methodology for temperate climates, *Build. Environ.* 82 (2014) 381–387. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.005>.
- [51] H.E. Silva, F.M.A. Henriques, Preventive conservation of historic buildings in temperate climates. The importance of a risk-based analysis on the decision-making process, *Energy Build.* 107 (2015) 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.067>.
- [52] V. Živković, V. Džikić, Return to basics - Environmental management for museum collections and historic houses, *Energy Build.* 95 (2015) 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.023>.
- [53] F. Karaca, An AHP-based indoor Air Pollution Risk Index Method for cultural heritage collections, *J. Cult. Herit.* 16 (2015) 352–360. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2014.06.012>.
- [54] A. Marchetti, S. Pilehvar, L. 't Hart, D. Leyva Pernia, O. Voet, W. Anaf, G. Nuyts, E. Otten, S. Demeyer, O. Schalm, K. De Wael, Indoor environmental quality index for conservation environments: The importance of including particulate matter, *Build. Environ.* 126 (2017) 132–146. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.09.022>.
- [55] E. Schito, P. Conti, D. Testi, Multi-objective optimization of microclimate in museums for concurrent reduction of energy needs, visitors' discomfort and artwork preservation risks, *Appl. Energy*. (2018). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.076>.
- [56] H. Sharif-Askari, B. Abu-Hijleh, Review of museums' indoor environment conditions studies and guidelines and their impact on the museums' artifacts and energy consumption, *Build. Environ.* 143 (2018) 186–195. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.07.012>.
- [57] M. Pretelli, K. Fabbri, *Historic Indoor Microclimate of the Heritage Buildings - A Guideline for Professionals who care for Heritage Buildings*, Springer International Publishing, Gewerbestrasse, 2018. <http://www.springer.com/it/book/9783319603414>.
- [58] A. Bonora, K. Fabbri, M. Pretelli, Study of the indoor microclimate for preventive conservation and sustainable management of historic buildings : the case of Villa Barbaro , Maser, EEHB2018 3rd Int. Conf. Energy Effic. Hist. Build. (2018).

- [59] D. Camuffo, *Microclimate for Cultural Heritage: Conservation, Restoration, and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments: Second Edition*, 2014. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-00676-7>.
- [60] EN 15757:2010, *Conservation of Cultural Property. Specifications for temperature and relative humidity to limit climate-induced mechanical damage in organic hygroscopic materials*, (2010).
- [61] UNI 10829, *Works of art of historical importance. Ambient conditions for the conservation. Measurement and analysis*, (1999).
- [62] American society of heating, refrigeration and air-conditioning engineers, *ASHRAE Handbook HVAC Applications: Museums, galleries, archives and libraries*, Atlanta, 1999.
- [63] MIBACT, Ref.B) MIBACT, Ministerial Decree, *Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei*, 10th May 2001, (2001).
- [64] CEN/TC346, *Business Plan, Draft 4*, (2012) 5, (n.d.).
- [65] EN 15758:2010, *Conservation of cultural property – Procedures and instruments for measuring temperatures of the air and the surfaces of objects*, (2010).
- [66] EN 15759-1:2011, *Conservation of cultural property — Indoor climate — Part 1 : Guidelines for heating churches , chapels and other places of worship Contents*, (2011) 1–24.
- [67] UNI 10969. *Cultural heritage. General principles for the choice and the control of the microclimate to preserve cultural heritage in indoor environments*, (2002).
- [68] IPCE, *Normas de conservación preventiva para la implantación de sistemas de control de condiciones ambientales en museos, bibliotecas, archivos, monumentos y edificios históricos*, Ministerio de cultura, Madrid, 2009.
- [69] M. Vitruvio Pollione, *I dieci libri dell'architettura*, tradotto e commentato da Daniele Barbaro, Edizioni Il Polifilo, Milano, 1567.
- [70] L. B. Alberti, *De Re Aedificatoria*, Vol. 1-2, Edizioni Il Polifilo, Milano, 1966.
- [71] A. Palladio, *I Quattro libri dell'Architettura*, edizione elettronica del 15 Settembre 2009, copia anastatica, Hoepli, Milano, 1980.
- [72] P. Pellegrini, *L'Architettura*, Edizioni Il Polifilo, Milano, 1990.
- [73] G. Valadier, *L'Architettura Pratica*, Vol. I-II-III-IV-V, Sapere 2000, Roma, 1992.
- [74] Le Corbusier, *Verso una nuova architettura*, Collana Grandi Libri, Longanesi, Milano, 1923.
- [75] R. Bruegmann, *Central Heating and Forced Ventilation: Origins and Effects on Architectural Design*, *J. Soc. Archit. Hist.* 37 (1978) 143–160. <https://doi.org/https://doi.org/10.2307/989206>.
- [76] ISO 7730:2006, *Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale*, (2006).
- [77] ASHRAE, *Standard 55-2013, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, (2013).
- [78] A. Burmester, M. Eibl, *Climate for Collections. Standards and uncertainties*, Munich, 2013.

- [79] D. Camuffo, A. Bernardi, Indoor and outdoor microclimate case studies : the Trajan Column and Sistine Chapel, in: *Sci. Technol. Eur. Cult. Herit.*, 1991. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-0237-2.50034-4>.
- [80] D. Camuffo, C. Bertolin, The earliest temperature observations in the world: The Medici Network (1654-1670), *Clim. Change.* (2012). <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0142-5>.
- [81] D. Camuffo, Environment and microclimate, in: *Sci. Technol. Eur. Cult. Herit.*, 1991. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-0237-2.50012-5>.
- [82] D. Camuffo, G. Sturaro, A. Valentino, Showcases : a really effective mean for protecting artworks, 365 (2000) 65–77.
- [83] D. Camuffo, R. Van Grieken, H.J. Busse, G. Sturaro, A. Valentino, A. Bernardi, N. Blades, D. Shooter, K. Gysels, F. Deutsch, M. Wieser, O. Kim, U. Ulrych, Environmental monitoring in four European museums, *Atmos. Environ.* (2001). [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(01\)00088-7](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(01)00088-7).
- [84] M. Bloch, *Apologia della Storia o Mestiere dello Storico.*, Torino, 2009.
- [85] L.M. Possati, *Ricoeur e l'esperienza storica. L'ermeneutica filosofica nella tradizione delle "Annales,"* Edizioni Carrocci collana Biblioteca di testi e studi, Roma, 2008.
- [86] P. Burke, *Una rivoluzione storiografica. la scuola delle "Annales" (1929-1989)*, Laterza Collana Universale, Laterza, 2019.
- [87] J. Nora, J. Le Goff, *Faire de l'histoire*, 3 vol., Gallimard, Parigi, 1974.
- [88] F. Braudel, S. Matthews, *Sulla Storia*, The University of Chicago Press, Chicago, 1982.
- [89] S. Franceschi, L. Germani, *Il degrado dei materiali nell'edilizia. Cause e valutazioni delle patologie*, DEI Editore, Milano, 2012.
- [90] S.F. Musso, *Recupero e restauro degli edifici storici. Guida pratica al rilievo e alla diagnostica*, Roma, 2016.
- [91] T. Basiricò, S. Bertorotta, *L'industrializzazione nei quartieri di edilizia residenziale pubblica*, ARACNE editrice, Roma, 2013.
- [92] H.C. Ackermann, The Basle Cabinets of Art and Curiosities in the sixteenth and seventeenth centuries, in: *Orig. Museums Cabinet Curiosit. Sixt. Seventeenth-Century Eur.* 2nd Ed., Londra, 2001.
- [93] M. Alexander, E. Porter, *Museums in motion: an introduction to the history and functions of museums.*, Rowman & Littlefield, Maryland, 2008.
- [94] B. Benedetti, Il concetto e l'evoluzione del museo come premessa metodologica alla progettazione di modelli 3D, *SCIRES-IT.* 3 (2013). <https://doi.org/10.2423/i22394303v3n1>.

Capitolo II

Metodologia

2.1. Metodologia per la valutazione del *Historic Indoor Microclimate*

La metodologia applicata a ciascun caso-studio riportato nella presente ricerca è composta da più fasi, ciascuna delle quali ci permette di ottenere informazioni utili per la definizione del *Historic Indoor Microclimate*⁸⁸ di ogni ambiente indagato.

Tale metodologia prevede:

- I. la conoscenza fisica del manufatto architettonico, mediante:
 - a. ricerche bibliografiche e d'archivio, per verificare le caratteristiche geometriche, materiali e termofisiche (se non è possibile reperirle si dovrà procedere con rilievi *in situ*); la storia delle destinazioni d'uso degli ambienti e di eventuali modifiche architettoniche; ecc. (Questa tipologia di informazioni può essere raccolta anche mediante interviste ad attuali proprietari e/o gestori);
 - b. monitoraggio in sito, per verificare le caratteristiche del microclima *indoor* attuale (*Actual Indoor Microclimate* - AIM);
 - c. analisi dei dati monitorati;
- II. lo studio simulato del microclima, mediante:
 - a. costruzione di un modello virtuale, che deve presentare le stesse caratteristiche formali, ma soprattutto fisiche della fabbrica reale;
 - b. validazione del modello virtuale, ovvero un confronto tra i valori del microclima *indoor* risultanti dal modello virtuale con quelli del monitoraggio *in situ*, per verificare lo scarto/errore tra il modello virtuale e quello reale;
 - c. simulazione virtuale di scenari passati o ipotetici scenari futuri: se il modello virtuale è validato rispetto ai dati del monitoraggio microclimatico *indoor*, si può procedere ipotizzando scenari alternativi a quello attuale: 1. è possibile simulare il microclima *indoor* dell'edificio in un preciso momento della sua storia, precedente ad oggi; 2. ipotizzando future modifiche (di gestione, architettoniche, impiantistiche, climatiche *outdoor*, ecc.), si possono verificare virtualmente quali alterazioni del microclima *indoor* esse determinerebbero in futuro;
- III. conclusioni e definizione di eventuali proposte di intervento: se in seguito all'analisi dei dati del monitoraggio e all'interpretazione dei risultati delle simulazioni, si valuta che il patrimonio storico artistico e culturale oggetto di studio sia esposto a rischio di danno, vengono suggerite soluzioni di intervento da effettuare sull'edificio (che possono essere di carattere gestionale, architettonico, impiantistico, ecc.), con il fine di garantire la conservazione preventiva dei beni studiati.

2.2. Conoscenza storico-architettonica

La conoscenza del fabbricato, da un punto di vista geometrico e storico, permette di raccogliere un insieme di informazioni utili all'analisi ed alla comprensione delle evoluzioni microclimatiche di un ambiente *indoor*: per l'approccio adottato nella presente ricerca, oltre a conoscere le informazioni riguardanti la composizione e la geometria dell'ambiente indagato, è fondamentale conoscere eventuali modifiche d'uso, impiantistiche, interventi architettonici e di restauro, che hanno caratterizzato l'edificio

⁸⁸ Cfr. paragrafo 1.1.3.

nel corso della sua storia, incidendo anche sulla definizione e sull'evolversi del microclima *indoor* di quest'ultimo.

In questa ricerca, per una conoscenza preliminare dei casi-studio sono state fatte indagini tramite consultazione di bibliografia dedicata; ricerche d'archivio; sopralluoghi; interviste ad architetti, manutentori ed altro personale sul campo. Questo ha anche permesso di verificare quali beni fossero conservati all'interno degli ambienti indagati e di individuare gli standard suggeriti dalla normativa di riferimento, per la conservazione preventiva degli specifici materiali che costituiscono tali beni. Inoltre, in questa fase, è stato possibile reperire alcune planimetrie, prospetti e sezioni dei casi-studio, che hanno permesso di proseguire con la fase II della metodologia, ovvero lo studio simulato del microclima tramite la costruzione dei modelli virtuali⁸⁹.

2.3. Campagna di monitoraggio microclimatico

Il monitoraggio microclimatico è la procedura che permette di rilevare le condizioni del microclima in ambienti *indoor* e *outdoor*. Questa ricerca si è concentrata sul monitoraggio *indoor*: la possibilità di monitorare l'insieme dei parametri microclimatici che caratterizzano uno specifico ambiente, consente di individuare i criteri per la conservazione dei beni che esso custodisce; di identificare le cause di deterioramento degli stessi; di mantenere nel tempo condizioni microclimatiche ottimali e di constatare che le norme e i parametri di legge siano rispettati. Infatti, il monitoraggio microclimatico risulta essere un sistema efficace per il controllo, la manutenzione e, soprattutto, per la prevenzione: permette di rilevare per tempo⁹⁰ condizioni anomale o inadeguate alla conservazione del Patrimonio.

Il monitoraggio in sito deve prevedere: la scelta, il posizionamento e il settaggio delle sonde utilizzate per il rilevamento dei dati; la definizione della durata della campagna di monitoraggio e i parametri che si decide di monitorare per descrivere le caratteristiche microclima. Per quanto riguarda il posizionamento delle sonde, è consigliabile collocarle in una posizione centrale all'interno dell'ambiente studiato; possibilmente più di una⁹¹; a circa 1m dal pavimento⁹² e ad almeno 1m di distanza dalle pareti, in modo tale da rilevare i parametri fisici che caratterizzano l'ambiente, senza che essi siano viziati dalla vicinanza con pareti, soffitti o pavimenti. Inoltre, per ciò che concerne invece la durata della campagna di monitoraggio, è evidente che più il periodo di monitoraggio sarà esteso, più informazioni si avranno sull'andamento microclimatico *indoor* (es. quanto incidono su di esso i cambiamenti climatici *outdoor* dovuti all'alternarsi delle stagioni). La normativa EN 15757:2010 [6] suggerisce infatti periodi di monitoraggio microclimatico pari ad almeno un anno. I parametri considerati per tutti i casi-studio riportati nella presente tesi sono: temperatura dell'aria, misurata in °C e umidità relativa, misurata in %. Riguardo alle modalità e agli strumenti di monitoraggio, si è seguito quanto previsto dagli Standard [1] [2] [3] [4] [5].

Generalmente, la composizione ed il funzionamento dei sistemi di monitoraggio è il seguente: le sonde, o "nodi", sono dotate di più sensori, in grado di rilevare le caratteristiche fisiche del microclima *indoor* (pressione, illuminamento, temperatura dell'aria, CO₂, umidità relativa, ...); tramite connessione *Wireless*, tali sonde trasmettono i dati ad un *Bridge*, che funge a sua volta da ponte di trasmissione dati, trasferendoli

⁸⁹ Cfr. paragrafo 2.5.

⁹⁰ Prima che tali condizioni possano causare l'ammaloramento del Patrimonio.

⁹¹ Perché in caso di problemi tecnici di una o più sonde, le altre compenseranno i *gap* di rilevamento dati.

⁹² Se si vuole valutare anche la stratificazione dell'aria è necessario posizionare più sonde, a diverse altezze dal pavimento, per poi poter confrontare i rispettivi valori della temperatura dell'aria rilevati.

dalle sonde ad una piattaforma online, alla quale si può accedere da remoto tramite dispositivi mobili (computer, cellulare, tablet, ...), monitorando i dati in qualsiasi momento e da qualsiasi luogo. Tali dati vengono archiviati sulla piattaforma online di riferimento e sono consultabili da più utenti, ai quali viene consentito l'accesso tramite l'inserimento di un codice identificativo e *password*. Nella maggioranza dei casi i sistemi di monitoraggio sono customizzabili a seconda delle esigenze (es. scelta dei parametri da monitorare; numero di sensori per ciascuna sonda; frequenza di rilevazione del dato⁹³; ecc.). Come si evince da quanto appena descritto, la presenza di una rete *Wi-fi* è *conditio sine qua non* per il trasferimento dei dati alla piattaforma online e la conseguente possibilità di gestione da remoto; ragione per cui, per un corretto funzionamento del sistema di monitoraggio, è necessario valutare la stabilità della connessione, che incide anche sulla scelta del posizionamento delle sonde. Infatti, in assenza di un'ottima connessione *Wi-fi*, se le sonde fossero posizionate troppo distanti tra loro, il segnale potrebbe non raggiungerle, impedendo il trasferimento dei dati dai nodi al *Bridge* e alla piattaforma online; così come se si collocassero più sonde in sale differenti, separate da pareti molto spesse, queste potrebbero ostacolare il corretto funzionamento della connessione *Wireless*: si tratta di circostanze da valutare in fase di posizionamento delle sonde.

2.4. Analisi dei dati monitorati

Successivamente al rilevamento dei dati, la metodologia prevede l'analisi di questi ultimi. In fase di analisi è possibile elaborare alcuni grafici tramite i fogli di calcolo del *software* Microsoft Excel: la soluzione grafica permette di rendere i risultati emersi chiaramente e rapidamente leggibili e di confrontare e analizzare nel dettaglio i parametri microclimatici rilevati. Le analisi che è possibile effettuare con i dati della campagna di monitoraggio a disposizione, sono molteplici: si possono studiare i profili di distribuzione di frequenza e di frequenza cumulata⁹⁴; valutare e mettere a confronto i *trend* dei parametri microclimatici rilevati da più sonde; verificare l'incidenza della presenza dei visitatori sull'alterazione del microclima; studiare la stratificazione dell'aria; valutare l'alterazione fisica⁹⁵ dovuta all'attivazione /spegnimento degli impianti di condizionamento e ventilazione dell'aria; individuare valori anomali e comprendere da quali fattori essi dipendano; ecc. Dunque, l'analisi dei dati monitorati, al pari di pratiche quali il rilievo architettonico, o la ricerca storica d'archivio, ci permettono di ottenere nuove informazioni su un'ambiente indagato (che sia esso una singola sala, o un intero edificio).

In questa ricerca, la metodologia proposta ha utilizzato questo genere di informazioni, relative al microclima *indoor*, per verificare se le condizioni microclimatiche *indoor* di uno specifico ambiente siano adatte alla conservazione dei beni ivi custoditi. Inoltre, grazie all'analisi dei dati è possibile trarre valutazioni anche in merito al *comfort* termico percepito dagli utenti che frequentano gli ambienti indagati, nonostante questo resti un fine secondario -in questa tesi- rispetto alla verifica delle condizioni microclimatiche *indoor* in relazione alla conservazione preventiva del Patrimonio.

⁹³ I dati vengono solitamente rilevati ogni 15 minuti, o ogni ora.

⁹⁴ I profili di distribuzione di frequenza e i profili frequenza cumulata permettono rispettivamente di verificare la percentuale di volte che viene registrato uno determinato valore e quella in cui si registrano valori inferiori ad uno specifico valore percentuale.

⁹⁵ Si fa riferimento ai parametri fisici, o variabili oggettive, che determinano il microclima (T, UR, velocità dell'aria, ecc.)

2.5. Costruzione del modello virtuale

Il modello virtuale deve presentare le medesime caratteristiche dell'architettura reale; può essere semplificato da un punto di vista geometrico, ma, al momento della simulazione del microclima *indoor*, i valori dei parametri microclimatici risultanti da tale simulazione devono essere validati⁹⁶ con quelli registrati dalle sonde all'interno della fabbrica reale.

La realizzazione del modello virtuale, per i casi-studio presentati in questo elaborato, è stata effettuata con l'ausilio coordinato di più *software*, ovvero AutoCAD, SketchUp e IES.VE (*Virtual Environment by Integrated Environmental Solutions*). Quest'ultimo è un *software* BIM (*Building Information Modeling*) capace di simulare le condizioni microclimatiche *indoor* di edifici anche complessi, tenendo conto di numerose variabili che caratterizzano questi ultimi, tra cui: variabili geometriche; geografiche; climatiche; scambi di energia; illuminamento naturale e artificiale; dati climatici *outdoor*; presenza/assenza di persone; funzionamento degli impianti HVAC; ecc.

IES.VE nasce per elaborare analisi di performance energetica e ambientale per la modellazione della sostenibilità degli edifici. Inoltre, grazie alla sua compatibilità con programmi Autodesk® come Revit® e SketchUp®, consente di lavorare con protocolli internazionali e di ottenere certificazioni BREEAM, LEED e Green Star. IES.VE permette infine di realizzare simulazioni dinamiche del sistema edificio-impianto e verificare le prestazioni dell'edificio attuali, ma può valutare anche condizioni passate e ipotetici scenari futuri. Il motore di calcolo utilizzato è stato approvato da *U.S. Department of Energy* (DOE) e permette di integrare le valutazioni energetiche alla fluidodinamica interna degli ambienti; a simulazioni di illuminazione artificiale e naturale; alla ventilazione naturale e ibrida ed alla simulazione degli impianti di condizionamento.

Il primo passaggio per la realizzazione del modello virtuale consiste nel reperimento del materiale tecnico per poter disegnare la base del modello (es. planimetrie, prospetti e sezioni). Per i casi presentati, parte del modello è stata realizzata tramite il *software* SketchUp, per due ragioni fondamentali:

- 1) nonostante sia possibile realizzare l'intero modello direttamente in IES.VE, con questo *software* non è possibile disegnare elementi curvi -caratteristici invece degli edifici storici-, che sono stati quindi realizzati in SketchUp e successivamente caricati in IES.VE, grazie ad un *plug-in*;
- 2) il riconoscimento del modello virtuale rileva meno errori se il passaggio avviene da SketchUp a IES.VE, anziché da Revit a IES.VE.

Si riporta un esempio (Figura 4) di un soffitto disegnato in SketchUp e caricato su IES.VE prima di procedere con successive modifiche:

⁹⁶ Il processo di validazione è descritto al paragrafo 2.6.

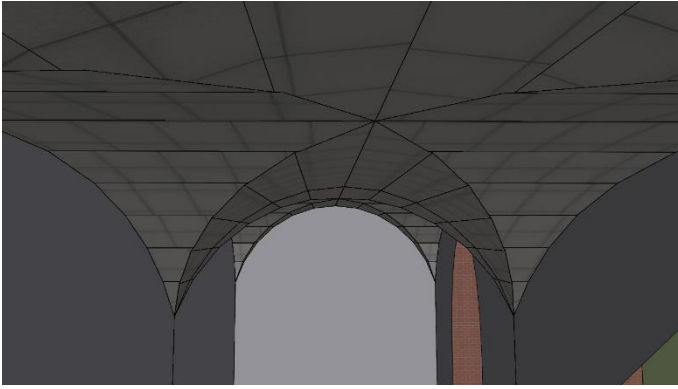


Figura 4_Portico della Gloria (caso-studio III)⁹⁷

Per proseguire con la costruzione del modello virtuale, oltre alla configurazione geometrica è necessario fornire al software IES.VE un insieme di informazioni riguardanti alcune variabili che incidono sul microclima *indoor* dell'edificio. Le principali variabili da definire sono: l'orientamento e la localizzazione geografica; la stratigrafia; la gestione di porte e finestre (apertura e chiusura); i dati climatici esterni; l'attivazione degli impianti con le specifiche riguardanti il loro funzionamento (set-point, set-back, orari di attivazione, ...); la destinazione d'uso e la gestione dell'accessibilità dell'ambiente studiato.

Le informazioni riguardanti le geometrie dell'edificio vengono già "tradotte" in IES.VE una volta importate da qualsiasi altro *software* capace di dialogare con IES.VE; successivamente, le prime informazioni che vanno date al programma riguardano la localizzazione dell'edificio ed il suo orientamento, tramite "APlocate". Dopo aver georeferenziato il modello è possibile accedere al "Building Template Manager" per impostare la totalità del resto delle informazioni elencate sopra.

Con il fine di mostrare un esempio, si riportano di seguito alcune tabelle riassuntive estrapolate da IES.VE, con le informazioni principali della variabile stratigrafica inserita per il caso-studio di Venaria Reale (caso-studio I):

Tabella 3. Muri esterni

Material	Thickness mm	Conductivity W/(m·K)	Density kg/m ³	Specific Heat Capacity J/(kg·K)	Resistance m ² K/W	Vapour Resistivity GN·s/(kg·m)	Category
[BRO] BRICKWORK (OUTER LEAF)	255.0	0.8400	1700.0	800.0	0.3036	-	Brick & Blockwork
[SST] SANDSTONE	500.0	1.8300	2200.0	712.0	0.2732	262.000	Sands, Stones and Soils
[BRO] BRICKWORK (OUTER LEAF)	255.0	0.8400	1700.0	800.0	0.3036	-	Brick & Blockwork

Tabella 4. Partizioni interne

Material	Thickness mm	Conductivity W/(m·K)	Density kg/m ³	Specific Heat Capacity J/(kg·K)	Resistance m ² K/W	Vapour Resistivity GN·s/(kg·m)	Category
[BRO] BRICKWORK (OUTER LEAF)	225.0	0.8400	1700.0	800.0	0.2679	-	Brick & Blockwork
[SST] SANDSTONE	450.0	1.8300	2200.0	712.0	0.2459	262.000	Sands, Stones and Soils
[BRO] BRICKWORK (OUTER LEAF)	225.0	0.8400	1700.0	800.0	0.2679	-	Brick & Blockwork

Tabella 5. Porte

Material	Thickness mm	Conductivity W/(m·K)	Density kg/m ³	Specific Heat Capacity J/(kg·K)	Resistance m ² K/W	Vapour Resistivity GN·s/(kg·m)	Category
[F] PINE (20% MOIST)	40.0	0.1400	419.0	2720.0	0.2857	-	Timber

⁹⁷ Registro delle immagini. p.268.

Tabella 6. Finestre

Material	Thickness mm	Conductivity W/(m·K)	Angular Dependence	Gas	Convection Coefficient W/m ² ·K	Resistance m ² K/W	Transmittance	Outside Reflectance	Inside Reflectance	Refractive Index	Outside Emissivity	Inside Emissivity	Visible Light Specified
[CF6] CLEAR FLOAT 6MM	6.0	1.0600	Fresnel	-	-	0.0057	0.780	0.070	0.070	1.526	-	-	No
Cavity	12.0	-	-	-	-	0.1586	-	-	-	-	-	-	-
[CF6] CLEAR FLOAT 6MM	6.0	1.0600	Fresnel	-	-	0.0057	0.780	0.070	0.070	1.526	-	-	No

Tabella 7. Soffitti e pavimenti

Material	Thickness mm	Conductivity W/(m·K)	Density kg/m ³	Specific Heat Capacity J/(kg·K)	Resistance m ² K/W	Vapour Resistivity GN·s/(kg·m)	Category
[BRO] BRICKWORK (OUTER LEAF)	40.0	0.8400	1700.0	800.0	0.0476	-	Brick & Blockwork
[SC1] SCREED	30.0	0.4100	1200.0	840.0	0.0732	50.000	Screeds & Renders
[USIN0001] INSULATION BOARD - HF-B2	30.0	0.0430	32.0	837.0	0.6977	238.000	Insulating Materials
[USCB0000] LW CONCRETE BLOCK - HF-C2	50.8	0.3800	609.0	837.0	0.1337	0.000	Concretes
[BRO] BRICKWORK (OUTER LEAF)	101.6	0.8400	1700.0	800.0	0.1210	-	Brick & Blockwork
[PLL] PLASTER (LIGHTWEIGHT)	20.0	0.1600	600.0	1000.0	0.1250	45.000	Plaster

Tabella 8. Copertura

Material	Thickness mm	Conductivity W/(m·K)	Density kg/m ³	Specific Heat Capacity J/(kg·K)	Resistance m ² K/W	Vapour Resistivity GN·s/(kg·m)	Category
[CYT] CLAY TILE	19.0	0.8400	1900.0	800.0	0.0226	200.000	Tiles
[USIN0001] INSULATION BOARD - HF-B2	40.0	0.0430	32.0	837.0	0.9302	238.000	Insulating Materials
[WWSL] WOOD-WOOL SLAB	25.0	0.1000	500.0	1000.0	0.2500	28.000	Timber

Come mostrano le tabelle soprastanti, una volta inseriti i dati principali riguardanti la stratigrafia -quali spessore e tipologia di materiale- il *software* calcola autonomamente informazioni aggiuntive, come, ad esempio, la conducibilità del materiale; la capacità termica; la permeabilità al vapore acqueo; etc. Si specifica che, tra le opzioni proposte da IES.VE, non sempre è possibile trovare il materiale specifico utilizzato per l'edificio originale. La scelta, in questi casi, verte su materiali che presentano proprietà fisiche e chimiche analoghe a quelli che compongono la fabbrica reale.

Riguardo alle aperture è necessario inserire informazioni aggiuntive, come:

- tipologia di esposizione;
- modalità di apertura;
- capacità di apertura degli elementi (espressa in percentuale);
- angolo massimo di apertura;
- rapporto altezza/lunghezza;
- coefficiente di flusso;
- gradi di temperatura del davanzale;
- periodi di apertura nell'arco della giornata.

Di seguito un esempio delle informazioni inserite per le finestre presenti all'interno della Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca (caso-studio II):

Tabella 9.

Windows	Exposure type Opening category Openable area Max angle open Proportions	Exposed wall Window side-hung 90 % 80° Length/Height > 2
---------	---	--

	Crack flow coefficient	Crack Length	0,150 (l/smPa)
	Opening threshold	Modulating profile	5% of opening perimeter
			Off continuously

Infine, per quanto riguarda la definizione della variabile climatica *outdoor*, è possibile scegliere tra varie località per le quali IES.VE presenta già le informazioni necessarie, nella sezione *APlocate*; quando la località non rientra tra quelle disponibili, è necessario creare un apposito file (se si dispone di un monitoraggio *outdoor*) o scaricarlo da siti dedicati⁹⁸, in formato *epw*.

2.5.1. Errori e semplificazioni adottate

Nella fase di disegno dei modelli virtuali realizzati per questa ricerca, sono state effettuate delle semplificazioni: alcune perché necessarie ed altre perché permettevano di velocizzare il procedimento, senza interferire con la successiva validazione del modello⁹⁹.

Le semplificazioni geometriche necessarie per caricare il modello realizzato in SketchUp, sul *software* IES.VE, riguardano lo spessore dei muri: le pareti sono state disegnate su SketchUp senza spessore (Figura 5), perché altrimenti ogni muro sarebbe stato letto da IES.VE come una stanza. Tale semplificazione è stata poi compensata intervenendo direttamente su IES.VE con inserimento manuale delle informazioni riguardanti lo spessore dei muri, per tutti i casi studio.

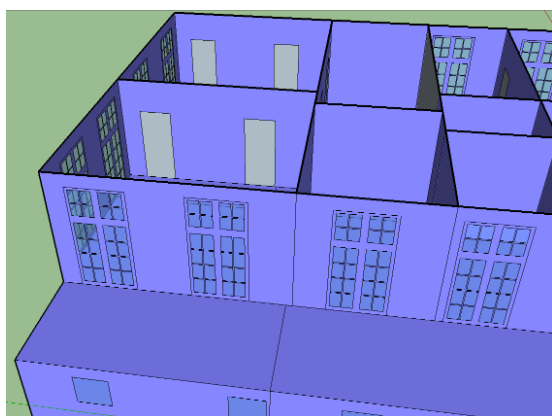


Figura 5_Modello di Venaria Reale (caso-studio I) - SketchUp

Le semplificazioni che hanno permesso di velocizzare la costruzione del modello, senza influire sulla validità¹⁰⁰ dello stesso, riguardano invece gli ambienti direttamente adiacenti a quelli studiati: per questi spazi sono state riportate le corrette geometrie, quando disponibili, altrimenti sono stati disegnati spazi con geometrie approssimative e indicate diverse specifiche, prima tra tutte la presenza/assenza degli impianti. Questo procedimento permette di caricare un'informazione aggiuntiva sul programma, ovvero che la zona studiata è adiacente ad un'ambiente *indoor*, riscaldato o non riscaldato: dettaglio che influisce sui risultati delle simulazioni virtuali.

⁹⁸ Ad esempio: <https://energyplus.net/weather> (ultima visita: 21/10/2020).

⁹⁹ Ci si riferisce al processo di validazione del modello virtuale, descritto al prossimo paragrafo: 2.6.

¹⁰⁰ Ibidem.

2.6. Validazione del modello virtuale

Il modello virtuale, per essere attendibile e dunque utilizzato per riprodurre scenari correnti, passati e futuri, deve restituire dati microclimatici coincidenti -con un margine di errore accettabile definito- a quelli reali. Per validare le simulazioni microclimatiche *indoor* ottenute tramite il modello virtuale, è necessario dunque comparare i dati delle simulazioni virtuali con i dati realmente rilevati dalle sonde termoigrometriche, situate all'interno dell'ambiente indagato.

In questa tesi, per la validazione dei dati è stato fatto riferimento a quanto riportato dalla *Guideline 14 ASHRAE* per validazione calibrazione *software* [7]. Dunque, gli indicatori statistici utilizzati per verificare se i modelli fossero validati sono stati i seguenti¹⁰¹:

- 1) coefficiente di variazione del valore quadratico medio, utilizzato in questa tesi per stimare la differenza quadratica tra i valori di T e UR simulati e i valori rilevati dalle sonde:

$$CV (RMSE) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{(M_i - S_i)^2}{N_i} \right]}}{\frac{\sum_{i=1}^n M_i}{n}} \quad (1)$$

Il modello si considera validato se $CV (RMSE) > 30\%$.

- 2) Mean Bias Error MBE, che calcola la differenza tra il valore medio dei dati simulati ed il valore medio dei dati rilevati:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (2)$$

Il modello si considera validato se $MBE > 10\%$.

- 3) Coefficiente di determinazione R^2 , ovvero il quadrato del coefficiente di correlazione:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{M})^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad (3)$$

Il modello si considera validato se $R^2 > 0,5$.

- 4) Indice di correlazione di Pearson, che calcola la covarianza di due variabili statistiche, divisa per il prodotto delle deviazioni standard delle stesse due variabili (nel caso della presente tesi le variabili sono state rispettivamente T e UR dei dati simulati e dei dati rilevati dalle sonde):

$$PEARSON = \frac{\sigma_{MS}}{\sigma_M \sigma_S} \quad (4)$$

La correlazione tra i dati simulati e misurati si considera: se $PEARSON > 0,7$ (forte); se $0,3 < PEARSON < 0,7$ (media); se $PEARSON < 0,3$ (debole).

¹⁰¹ Per approfondimenti vedi [8].

Nelle formule soprelencate (1-4) M_i e S_i sono rispettivamente i dati misurati dalle sonde e i dati simulati virtualmente; \bar{M} è la media della variabile considerata (T o UR); n è il numero totale dei dati misurati; σ_{MS} è la covarianza tra i dati misurati e i dati simulati della variabile considerata (T o UR); σ_M e σ_S sono la deviazione standard rispettivamente dei dati misurati e dei dati simulati.

2.7. Conclusioni e definizione di eventuali proposte di intervento

Grazie all'analisi e all'interpretazione dei dati di una campagna di monitoraggio è possibile trarre conclusioni in merito alle condizioni microclimatiche *indoor* in cui vengono conservati determinati beni; se queste indagini possono essere associate ad una conoscenza approfondita della storia dell'edificio (per quanto concerne le modifiche architettoniche, d'uso, ecc. che hanno caratterizzato la fabbrica nel corso degli anni) e alla simulazione virtuale, sarà allora possibile avere una base dati che consente di valutare e prevedere le interazioni tra il bene e il microclima *indoor*, nelle condizioni attuali, passate e ipotizzando scenari futuri. La metodologia descritta permette di individuare quali fattori espongono il Patrimonio a rischio di danno (presenza dei visitatori; gestione di apertura/chiusura di porte e finestre; introduzione di impianti di climatizzazione e ventilazione dell'aria; ecc.). Con queste basi sarà dunque più facile individuare scelte e percorsi di intervento *ad hoc*, con il fine di garantire la conservazione preventiva del patrimonio storico artistico e culturale.

Riferimenti

- [1] CEN – European Committee for Standardization, EN 15758:2010, Conservation of cultural property – Procedures and instruments for measuring temperatures of the air and the surfaces of objects, (2010).
- [2] CEN – European Committee for Standardization, EN 15759-1:2011, Conservation of cultural property — Indoor climate — Part 1: Guidelines for heating churches , chapels and other places of worship Contents, (2011) 1–24.
- [3] UNI – Ente Nazionale Italiano di Unificazione (1999) UNI 10829:1999 Beni di interesse storico e artistico - Condizioni ambientali di conservazione - Misurazione ed analisi.
- [4] UNI – Ente Italiano di Unificazione (2005) Norma UNI 11131:2005 Beni culturali. Misurazione in campo dell'umidità dell'aria.
- [5] UNI – Ente Italiano di Unificazione (2004) Norma UNI 11120:2004 Beni culturali. Misurazione in campo della temperatura dell'aria e della superficie dei manufatti.
- [6] CEN – European Committee for Standardization, EN 15757:2010, Conservation of Cultural Property. Specifications for temperature and relative humidity to limit climate-induced mechanical damage in organic hygroscopic materials, (2010).
- [7] ASHRAE. Guideline 14, Measurement of Energy and Demand Savings. Technical report, American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, Georgia, (2014).
- [8] V. Costanzo, K. Fabbri, S. Piraccini, Stressing the passive behavior of a Passivhaus : An evidence-based scenario analysis for a Mediterranean case study, Build. Environ. 142 (2018) 265–277. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.035>.

Capitolo III
Casi-studio

3.1. Caso-studio I: Reggia di Venaria Reale – la sala 33

Nel 2017 è stata attivata una collaborazione tra l'Università di Bologna, Alma Mater Studiorum e il Centro di Conservazione e Restauro (CC&R) La Venaria Reale, allora impegnato nel progetto europeo EPICO (European Protocol In preventive CONservation¹⁰²). Tale collaborazione ha permesso di avviare la presente ricerca di analisi delle condizioni microclimatiche che caratterizzano due delle sale della Reggia di Venaria Reale: la sala 33¹⁰³ e la sala 38¹⁰⁴.

Detta collaborazione ha infatti consentito di accedere ai dati di un monitoraggio microclimatico *indoor* pluriennale¹⁰⁵ di due sale che compongono la Reggia, facenti parte del percorso accessibile ai visitatori. Nel corso della ricerca si è deciso di procedere con lo studio della sola sala 33, per le ragioni esplicitate al paragrafo 3.4.1.

3.1.1. Finalità della ricerca

Con il presente contributo ci si è posti l'obiettivo di individuare logiche, finalità ed esiti che hanno guidato e caratterizzato un importante intervento di restauro, iniziato nel 2001 e conclusosi nel 2007, che ha coinvolto l'intera Reggia di Venaria Reale, in provincia di Torino (Italia). Per raggiungere questo fine ci si è affidati allo studio dell'evoluzione storico-architettonica della Reggia, affiancato dall'analisi di dati microclimatici pluriennali della sala 33¹⁰⁶ e dall'ausilio della simulazione virtuale.

Nello specifico, la ricerca svolta su questo caso-studio ha voluto:

1. applicare una metodologia¹⁰⁷ in linea con il campo di ricerca del *Historic Indoor Microclimate*;
2. simulare virtualmente uno scenario alternativo a quello attuale, che presuppone l'inattivazione dei sistemi HVAC, per valutare quali condizioni microclimatiche *indoor* potrebbero essere garantite dalle caratteristiche architettoniche e materiali odierne della Reggia, risultanti dal progetto di restauro che ha avuto inizio nel 2001;
3. verificare il ruolo degli impianti di condizionamento all'interno della sala 33, in termini di microclima *indoor* e *comfort* dei visitatori;
4. simulare virtualmente due scenari futuri che ipotizzano un cambiamento climatico *outdoor* pari a 1,5°C, verificando le conseguenze che si avrebbero sull'*indoor*, con e senza sistemi di condizionamento;
5. comprendere che tipo di approccio ha guidato l'intervento di restauro della Reggia, valutando se si è trattato di restauro conservativo, riqualificazione, valorizzazione, ecc.

¹⁰² Cfr. <https://www.centrorestaurovenaria.it/ricerca-e-innovazione/progetti/epico-project-european-protocol-preventive-conservation> (ultima visita 12/03/2020).

¹⁰³ Gabinetto di Toeletta della Regina.

¹⁰⁴ Camera da letto del Re.

¹⁰⁵ Dal 7/08/2007 al 3/08/2011 per la sala 38, dal 7/08/2007 al 16/03/2017 per la sala 33.

¹⁰⁶ Scelta come campione per studiare le condizioni microclimatiche *indoor* delle sale aperte al pubblico all'interno della Reggia.

¹⁰⁷ Descritta al Capitolo II.

3.2. Conoscenza storico-architettonica

La Venaria Reale è un complesso di 950.000 mq situato in Italia, nel Centro Storico di Venaria, alle porte di Torino. Il complesso comprende i giardini, la Reggia e le rispettive pertinenze. L'intera Reggia, inclusi i giardini, volevano “rispecchiare ed esprimere la concezione dello Stato assoluto, nel solco degli interventi realizzati nelle corti europee quali Versailles, Marly e successivamente, Caserta”¹⁰⁸. Lo stesso architetto Amedeo di Castellamonte, nel suo libro dedicato alla Venaria Reale, ribadisce l'importanza della metafora della Magnificenza come strumento essenziale per il buon governo.

Venaria, inoltre, rappresenta il più esteso complesso edilizio voluto dalla dinastia Sabauda, destinato a luogo di piacere e di caccia. Il complesso fa parte delle *maisons de plaisance*, realizzate tra il Cinquecento e il Settecento per volere della famiglia sabauda, con il fine di circondare Torino dalla cosiddetta “Corona di Delizie”¹⁰⁹.

La Reggia di Venaria Reale risale a due epoche differenti: la facciata intonacata risale a metà Seicento, quella con i mattoni a vista al Settecento (Figura 6).



Figura 6_Reggia di Venaria Reale¹¹⁰

Questa architettura è il frutto degli interventi di sei architetti: Amedeo Castellamonte (1613-1683), che redisse il primo progetto (1659-1679) della residenza venatoria, per volontà di Carlo Emanuele II; Michelangelo Garove (1648-1713), incaricato dal duca Vittorio Amedeo II per la ricostruzione del palazzo e dei giardini (1700-1713), poiché il duca riteneva che il complesso precedentemente realizzato fosse inadatto alle nuove esigenze di corte; Filippo Juvarra (1678-1736), che fu a capo del cantiere dal 1716 al 1730, incaricato dallo stesso Vittorio Amedeo II, successivamente alla morte di Garove; Benedetto Alfieri (1699-1767), con il compito di mettere a regime il complesso (1739-1767), per volontà di re Carlo Emanuele II, poiché quanto realizzato fino ad allora non appariva ancora riunito in un sistema ben collegato ed abitabile; Giuseppe Battista Piacenza (1735-1818) e Carlo Randoni (1755-1831), i quali realizzarono il nuovo scalone (1789-1798), segnando il cessare delle vicende architettoniche, sino al recente restauro (2001-2007). La Reggia è caratterizzata infatti dal mescolarsi di fasi costruttive, stili e tecniche (Figura 7).

¹⁰⁸ Cit. C. Roggero, M. Turetta, A. Vanelli, “*Le residenze sabauda*”, Allemandi, 2018, Torino, pag. 7 [1].

¹⁰⁹ Per approfondimenti vedi [2]

¹¹⁰ Registro delle immagini. p.268.

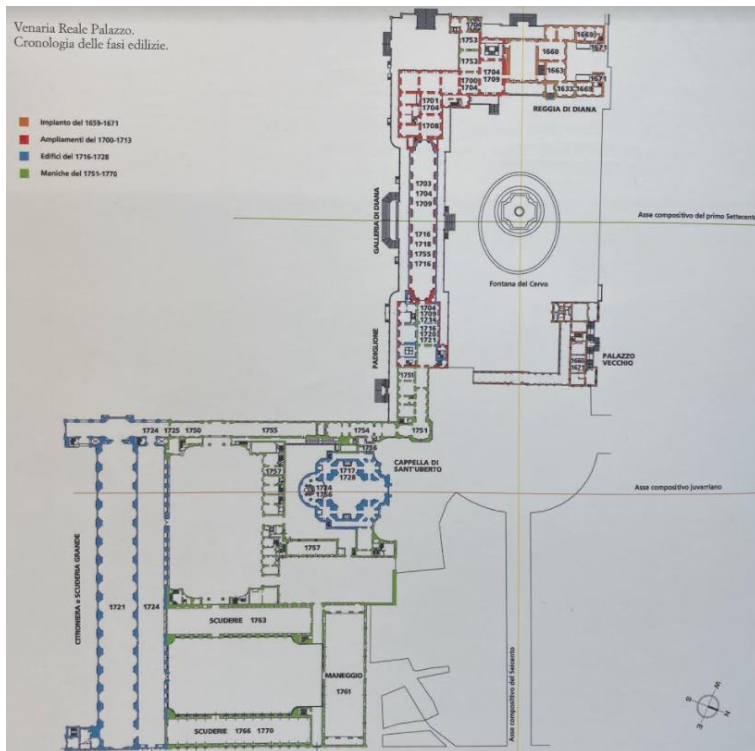


Figura 7_Complexo di Venaria Reale (1655-1770)¹¹¹

Le vicende costruttive della Reggia si sono dunque protratte oltre un secolo ed hanno visto l'avvicinarsi dei maggiori architetti che hanno operato in Piemonte tra il 1600 e il 1700, nessuno dei quali ha mai portato interamente a termine il lavoro iniziato, consolidando il carattere di “non finito” che contraddistingue la fabbrica. Juvarra è stato sicuramente l'architetto il cui approccio è risultato essere maggiormente significativo ed incisivo.

¹¹¹ Registro delle immagini. p.268. Legenda: arancione: impianto del 1655-1671; rosso: ampliamenti del 1700-1713; blu: edifici del 1716-1728; verde: maniche del 1751-1770.

3.2.1. Venaria Reale: Fasi costruttive

La realizzazione del complesso della Reggia di Venaria Reale ebbe inizio con il duca Carlo Emanuele II, nel 1659, secondo il progetto di Amedeo Castellamonte: un complesso composto da un palazzo con una corte quadrata, preceduta da un'anti-corte di dimensioni più contenute.

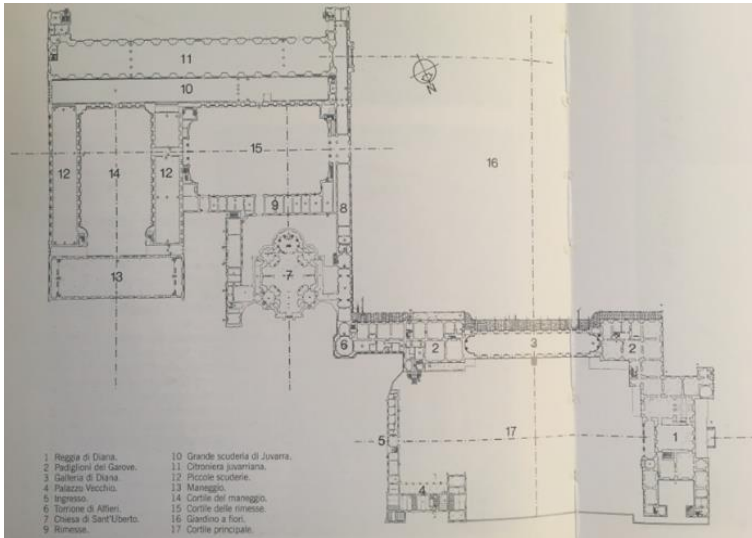


Figura 8_Pianta del Palazzo di Venaria¹¹², ricostruzione di G. Gritella¹¹³

In seguito a una distruzione parziale di quanto progettato e realizzato da Castellamonte -per mano delle truppe francesi, che incendiarono e saccheggiarono il palazzo nel 1693-, Michelangelo Garove ottenne l'incarico di riprogettare quegli spazi col fine di realizzare una ricostruzione più ampia dell'intero complesso: tra il 1699 e il 1713 edificò il Padiglione a Mezzogiorno e la Galleria Grande. Garove modificò inoltre il precedente assetto progettando due ali simmetriche, poste in direzione est-ovest, andando a delimitare con queste ultime la nuova corte d'onore (Figura 9).

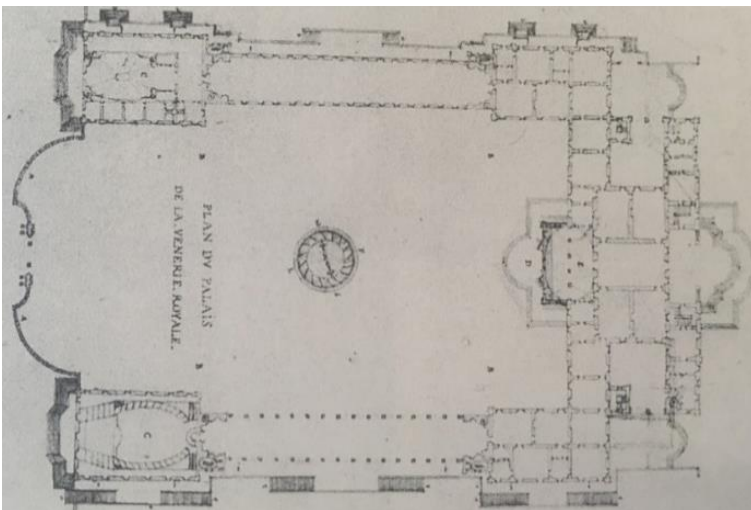


Figura 9_ M. Garove, Piano della Reggia di Venaria Reale¹¹⁴

¹¹² Registro delle immagini. p.268.

¹¹³ (1959) Laureato in Architettura al Politecnico di Torino, si è a lungo occupato dell'opera di Filippo Juvarra, di cui è autore di una monografia in due volumi [3]

¹¹⁴ Registro delle immagini. p.268.

Questa disposizione venne ripresa da Filippo Juvarra, che a partire dal 1716 intervenne con diverse modifiche e introducendo nuovi progetti a Venaria Reale. Egli trasformò la reggia in un capolavoro Barocco. In [4] D. Severo afferma che *“Non conosciamo il suo piano generale che probabilmente comprendeva il sistema degli edifici di servizio [...] e gli spazi aperti che erano stati realizzati nel corso del Settecento. Sicuramente egli ribadisce la rotazione, già operata da Garove, delle residenze verso il nucleo urbano esistente, organizzando un asse, ortogonale al precedente, su cui colloca i nuovi edifici”*¹¹⁵. L'architetto modificò la Galleria Grande e realizzò il padiglione verso il borgo cittadino; la Cappella di Sant'Uberto; la Citroneria; la Scuderia. Egli però non aveva previsto nessun collegamento tra queste architetture e la Reggia¹¹⁶.

I collegamenti della Cappella con la Reggia, infatti, si devono a Benedetto Alfieri, che nel 1739, quando Filippo Juvarra fu chiamato alla corte di Filippo V di Spagna, prese il suo posto come Primo Architetto Regio a Venaria Reale. Alfieri realizzò inoltre una nuova Galleria che conduce alla Citroneria e, nella parte settentrionale dell'edificio, un complesso di scuderie, ad oggi sede del Centro di Conservazione e Restauro La Venaria Reale.

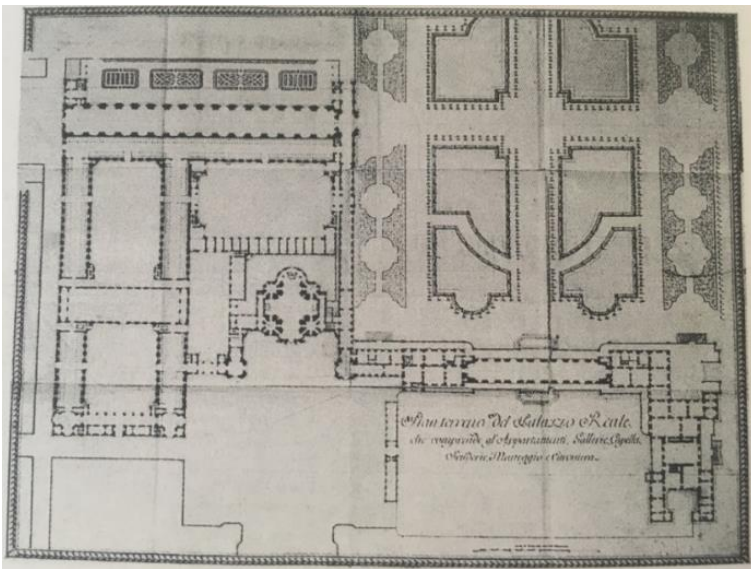


Figura 10_Rilievo e progetto del complesso di Venaria, redatto da B. Alfieri¹¹⁷

Il compito di Alfieri era quello di conferire al complesso un aspetto unitario. Egli, inoltre, caratterizzò le decorazioni interne del palazzo con un'impronta rococò.

Infine, Giuseppe Battista Piacenza e Carlo Randoni progettarono, tra il 1789 e il 1798, la scala aulica per collegare gli appartamenti del primo piano. Nell'immagine sottostante (Figura 11) si riporta la scala prima e dopo il recente restauro (2001-2007).

¹¹⁵ Cit. D. Severo, *“Filippo Juvarra”*, Zanichelli, 1996, Milano, pag. 145.

¹¹⁶ Gli interventi di Juvarra sono descritti ed approfonditi al paragrafo 3.2.1.1.

¹¹⁷ Registro delle immagini. p.268.



Figura 11_Recupero della scala ottocentesca di G.B. Piacenza e C. Rondoni¹¹⁸

3.2.1.1. Filippo Juvarra: spunti e riferimenti per i suoi interventi alla Reggia

Filippo Juvarra (Messina 1678 - Madrid 1736), architetto e scenografo, allievo di Carlo Fontana, fu uno dei massimi esponenti del Barocco; operò molti anni a Torino, nelle vesti di architetto di casa Savoia; ma esercitò molto anche a Madrid, Lisbona e Roma. I dieci anni trascorsi a Roma, tra il 1704 e il 1714, dove egli condusse anche i suoi studi architettonici, gli permisero di costruirsi una dimensione culturale europea, grazie alla quale si avvicinò ed imparò a cimentarsi in tipologie architettoniche che i sovrani assoluti del tempo reputavano indispensabili per affermare la propria grandezza ed il proprio potere. Fu proprio lavorando in questo ambito che Juvarra poté conoscere Vittorio Amedeo II (Messina, 1714). Come si riporta in [5]: *“Il sovrano Sabauda cercava riconoscimenti internazionali guardando a Luigi XIV e alla Francia, per decenni naturale e costante riferimento dei duchi di Savoia, ma anche agli Asburgo e a Vienna, dove un Savoia, il principe Eugenio [...] si rivelava un raffinato e superbo mecenate, aperto verso Roma e Parigi”*¹¹⁹.

Per ventun anni, dal 1714 al 1735, Juvarra ha la possibilità di dedicarsi al modello urbanistico e architettonico della città di Torino, allora città-stato, con il fine di conferirle la dignità di capitale europea. La personalità di Juvarra rispecchia la mutazione della cultura architettonica italiana nel corso del XVIII secolo: rappresenta una figura chiave nel processo di transizione dal Barocco all’architettura del primo Ottocento.

Alla Reggia di Venaria Reale, Filippo Juvarra ridisegnò gli spazi della Galleria Grande, modificando il precedente progetto di Michelangelo Garove: sopraelevandola; accentuando la strombatura delle aperture e modificandone la dimensione; aumentando la luminosità della sala tramite l’aggiunta di aperture su entrambi i lati e creando effetti di luce grazie ai riflessi sullo stucco bianco e omogeneo delle superfici interne. La Galleria ritrae un’altissima espressione dell’architettura e dell’arte barocca del XVII e del

¹¹⁸ Registro delle immagini. p.268.

¹¹⁹ Cit. A. Bonet Correa, B. Blasco Esquivias, G. Cantone, *“Filippo Juvarra e l’architettura europea”*, Electa, 1998, Napoli, pag. 75.

XVIII secolo. Si riporta di seguito il disegno per l'esecuzione del pavimento in marmo della Galleria Grande. Inchiostro, acquerello e matita su carta, composto di più fogli e allegato all'istruzione per l'esecuzione dell'opera a firma di Carlo Camerata, collaboratore di Juvarra.

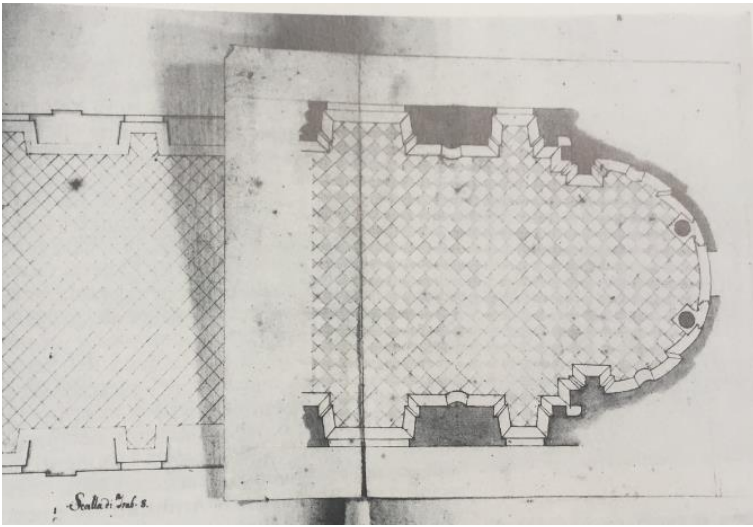


Figura 12_Disegno per l'esecuzione del pavimento in Marmo della Galleria Grande¹²⁰

Artefici degli apparati decorativi di questo ambiente furono quattro stuccatori della seconda metà del Settecento: Pietro Filippo Somasso, Giuseppe Bolina, Antonio Papa e Giovambattista Sanbartolomeo. Il pavimento attuale è stato realizzato nel 1995 e riprende quello disegnato da Filippo Juvarra nel Settecento; mentre la pavimentazione originale venne smontata durante l'occupazione francese ed utilizzata per la Galleria del Beaumont a Torino (Figura 13).

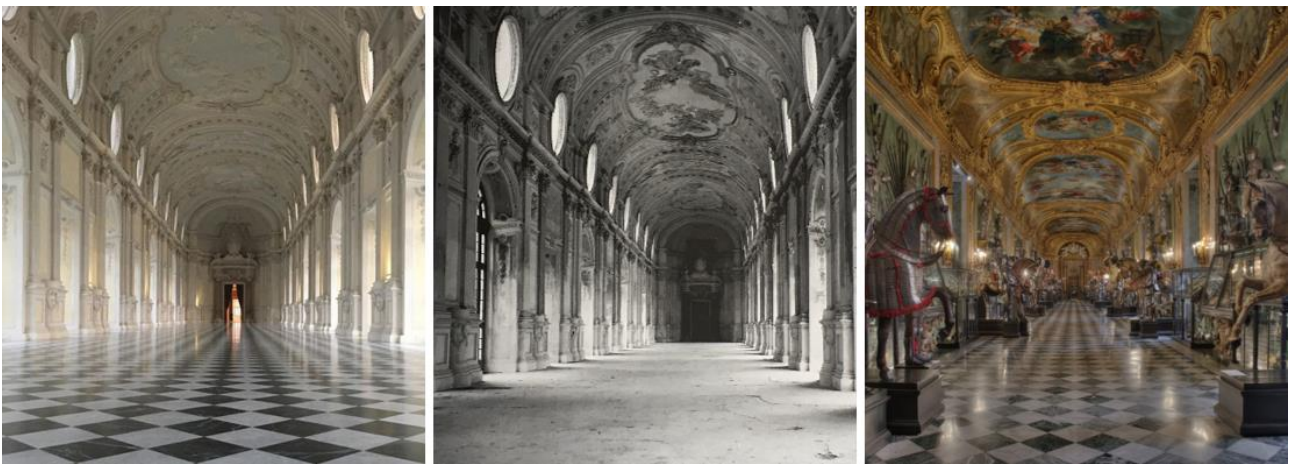


Figura 13_Pavimento della Galleria Grande oggi (sinistra); Galleria Grande, pavimento originale (centro); Galleria del Beaumont, Torino (destra)¹²¹

La Galleria Grande, che collegava l'appartamento di re Carlo Emanuele III a quello dell'erede al trono, Vittorio Amedeo III, si estende per una lunghezza di 73,5 metri, è larga 11 metri e l'altezza al centro di volta equivale a 15 metri circa; è chiusa sui due lati corti da due esedre, che permettono l'accesso agli altri ambienti e danno luminosità alla sala; i lati lunghi, invece, sono caratterizzati dalla presenza di 44 grandi aperture, che alternano finestrone ad arco, progettati da Juvarra, a finestre rettangolari del Garove e, in

¹²⁰ Registro delle immagini. p.268.

¹²¹ Ibidem.

alto, vi sono 22 aperture ovali, raccordate alla trabeazione, le quali risultano rettangolari se viste dall'esterno. La luminosità che ne deriva contribuisce a conferire fascino a questo spazio. Le vetrate affacciano a Sud Ovest e a Nord Est, con vista sui giardini e sulle Alpi. La luce, inoltre, esalta le decorazioni ivi presenti, tra cui stucchi e bassorilievi, evidenziando ciò che essi raccontano: rendono omaggio a re Carlo Emanuele III, alle sue virtù, con gli attributi del Governo e del potere, le scienze, le arti, ecc. La volta a lunetta si suddivide longitudinalmente in tre parti ed è attraversata trasversalmente da alcuni archi, i quali confluiscono nelle lesene sottostanti.

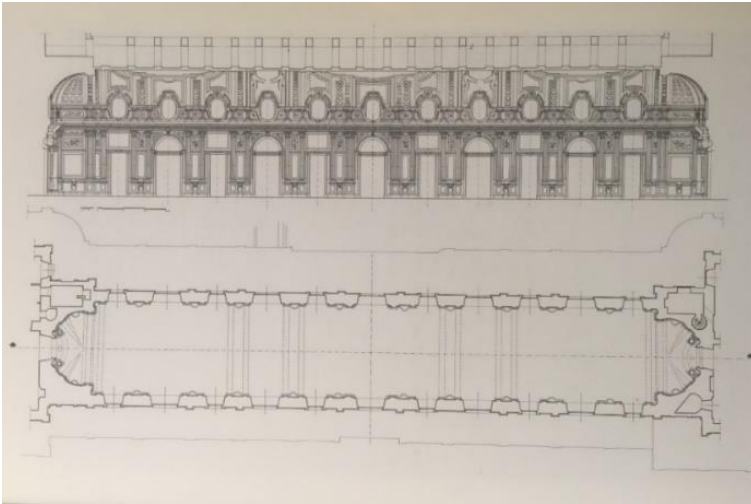


Figura 14_Sezione longitudinale e pianta della Galleria Grande¹²²

L'incavo ovale di una nicchia, destinata a contenere un busto, inserita sopra alla porta, evoca direttamente il repertorio borrominiano e berniniano: il portale del salone di Palazzo Barberini; la loggia del primo piano del palazzo di Propaganda Fide; la galleria di Palazzo Pamphili.

Vi è inoltre una cupoletta ellittica nascosta, molto schiacciata e aperta alla sommità con una minuscola camera di luce a sezione lenticolare: essa riconduce a Borromini in S. Giovanni in Laterano. I precedenti della Galleria Grande erano rappresentati, per gli architetti della generazione di Garove e de Cotte, da quella celebre di Versailles. Secondo Giovanni Battista Sacchetti (1690-1764)¹²³ Juvarra preparò 4 differenti disegni per gli ornati in stucco all'interno della Galleria, attualmente non se ne conosce nessuno.

Nel 1716 Juvarra progettò la Cappella di Sant'Uberto -santo protettore dei cacciatori- (Figura 15), dimostrando grande capacità di tenere insieme molteplici direttrici spaziali; abilità che gli permise, nel caso della Reggia di Venaria Reale, di ottenere una *“complessa residenza regia, imperniata su più nuclei monumentali e al centro di assi compositivi multipli”*¹²⁴. La realizzazione dell'altare maggiore e delle quattro statue dei “Dottori della Chiesa”¹²⁵, poste nelle nicchie dei pilastri centrali, si deve allo scultore Giovanni Baratta (1670-1747).

¹²² Registro delle immagini. p.268.

¹²³ Architetto, allievo di Filippo Juvarra.

¹²⁴ Cit. D. Severo, *“Filippo Juvarra”*, Zanichelli, 1996, Milano, pag. 151.

¹²⁵ Sant'Agostino, Sant'Ambrogio, Sant'Atanasio e San Giovanni Crisostomo.



Figura 15_Cappella di Sant'Uberto ¹²⁶

Questa chiesa contribuì a costruire, assieme a Superga, S. Maria al Monte dei Cappuccini del Vitozzi, la Cappella della SS. Sindone ed il santuario di Vicoforte di Mondovì, i caratteri del paesaggio sacro dell'età barocca.

Il progetto si basa su uno schema a croce greca e lo spazio centrale è costituito da un ottagono irregolare. Sui lati corti di quest'ultimo si trovano quattro pilastri, che sorreggono il tamburo della cupola. I pilastri sono stati incisi in modo tale da formare delle nicchie convesse, dove sono collocate le statue. Con questa scelta Juvarra riprende il modello della basilica di San Pietro, a Roma (Figura 16).

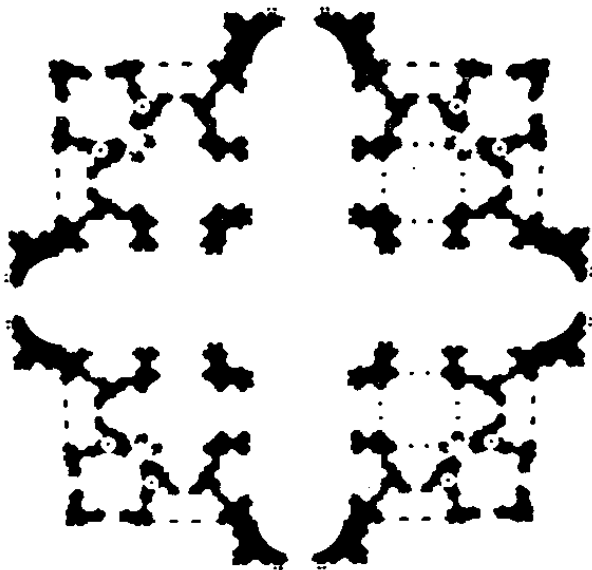


Figura 16_Pianta bramantesca di San Pietro a Roma ¹²⁷

¹²⁶ Registro delle immagini. p.268.

¹²⁷ Ibidem.

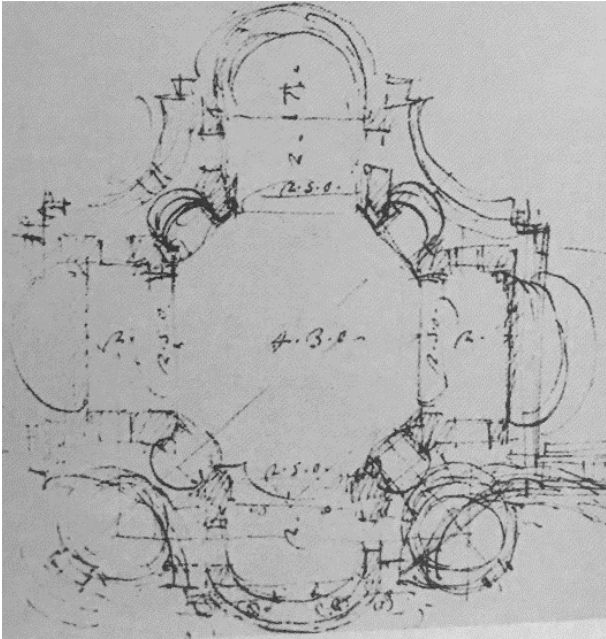


Figura 17_schizzo della pianta della Cappella di Sant'Uberto (destra) ¹²⁸

In questa architettura è evidente l'influenza che deriva da prototipi cinquecenteschi e settecenteschi, come S. Maria di Carignano, a Genova; la chiesa della Steccata, a Parma; SS. Celso e Giuliano, a Roma.

L'edificio, inoltre, si basa su una geometria a raggiera, Juvarra sembra aver voluto conferire a questo edificio il ruolo di fulcro dell'intero complesso. Il prospetto della chiesa è arretrato di 12 metri circa rispetto al corpo della Galleria Grande, il che rende possibile la configurazione di una piazza, che un tempo veniva sfruttata per lo svolgersi di cerimonie di corte ed eventi pubblici e religiosi, ai quali prendeva parte anche il popolo.

La piccola sala di luce, inserita da Juvarra nello spazio cilindrico della cappella, interrompe il percorso della cornice: quest'ultima cambia il senso del proprio moto circolare per inflettersi all'interno, con un'espansione convessa. Questo esempio richiama il progetto di Jules Hardouin Mansart (1646-1748) per la chiesa della Visitation, a Parigi. Tale soluzione permette, nella Cappella di S. Uberto, di creare particolari effetti di illuminazione: un fascio di luce proveniente dall'alto, illumina l'altare. Questo espediente prelude quanto progettato da Juvarra nell'altare di S. Giuseppe nella chiesa di Santa Teresa e nelle cappelle del Carmine, a Torino.

La presenza di un falso timpano permette di rendere meno netto lo stacco tra la finestra e la linea orizzontale del cornicione. Il timpano è composto da due volute contrapposte, connesse tramite una ghirlanda di fiori. Le mensole sottostanti, realizzate a fine decorativo, si allontanano dal muro in una torsione, assecondando l'andamento della cornice. La plasticità decorativa che caratterizza questa architettura rimanda a precedenti esperienze romane: Borromini, Bernini, Pietro da Cortona. *"Una tale libertà espressiva nei confronti del codice architettonico si riscontra, ma con minore efficacia, solo nelle opere più convincenti del Dientzenhofer - chiese di S. Nicola e S. Caterina a Praga, Villa Amerika -"*¹²⁹, ma anche in altre opere dello

¹²⁸ Registro delle immagini. p.268.

¹²⁹ Cit. G. Gritella, *"Juvarra: l'architettura"*, Vol.1, Franco Cosimo Panini, 1992, Modena, pag.339.

stesso Juvarra, come nella Chiesa del Carmine e in una delle sale del Castello di Rivoli “[...] e raggiungerà effetti estremi in Vittone”¹³⁰.

Lo spazio a disposizione per la realizzazione della Cappella era piuttosto limitato: questo impedì la realizzazione della cupola, che venne dunque affrescata come trompe-l’oeil da Giovanni Antonio Galliari (1714-1783). In diverse zone della chiesa, come nelle vele delle lunette, nei settori delle volte doriche, nel catino absidale, ecc., vi è una trama di cassettoni quadrati ed esagonali, decorati da rosette: tema che ricorre spesso in Juvarra e che deriva dai suoi studi in San Tommaso di Villanova a Castel Grandolfo. Altri progetti nei quali ritroviamo il suddetto tema sono: Superga; Rivoli; nella Galleria Grande, a Palazzo Madama, in San Andre a Chieri e nella cupola del Duomo di Como.

All’interno della Chiesa di S. Uberto l’ordine principale è il corinzio, caratterizzato da paraste o colonne scalinate. Il progetto originario prevedeva, nelle cappelle circolari, l’ordine ionico sormontato dal composito, ma Juvarra optò per la sovrapposizione dell’ordine dorico su quello ionico. Inoltre, l’altare maggiore, arretrato sul fondo dell’abside, richiama quelli progettati da Carlo Fontana per la Chiesa di S. Maria in Traspontina, a Roma.

Risultano essere dunque numerosi i precedenti architettonici dai quali Juvarra attinge spunti, che gli consentono di realizzare una maestosa opera come questa chiesa. Nella progettazione di questo spazio, infatti, risultano fondamentali anche gli studi degli organismi chiesastici rinascimentali e seicenteschi a pianta centrale, che hanno caratterizzato l’iter progettuale di Juvarra sin dal periodo romano; la scelta distributiva delle cappelle satellitari riprende S. Pietro di Bramante, ma risente anche dei progetti di Masart per la chiesa di Versailles e per la cappella funeraria dei Borboni a S. Denis. Inoltre, la chiesa è caratterizzata da un impianto geometrico proporzionato, regolare ed armonico, che ricorda modelli noti: il Duomo nuovo di Brescia; il Gesù a Montepulciano (in riferimento ai coretti diagonali e le finestre ellittiche sotto ai pennacchi); la chiesa della Steccata a Parma; i corridoi perimetrali e le cappelle in fondo alle navate si S. Alessandro a Milano.

Lo stesso architetto sottolinea la propria ispirazione alle opere di Borromini in una lettera del 1725, autografata indirizzata al conte Carlo Giacinto Roero, allegata ad un libro di suoi disegni: “*in essi [disegni] scorgerà osservata per quanto si può la sodezza dell’arte secondo l’insegnamento di Vitruvio e Palladio e di tutti i più celebri autori: di qual sodezza io sono sempre stato amatore del semplice, in cui ogni arte riconosce, a mio credere la sua perfezione: non però che io abbia negletto gli ornati, ma me ne son servito cò sobrietà ed ho procurato a tutto mio potere d’imitare in questo lo stile del cavalier Borromini, il quale più di ogni altro ha ornato i suoi disegni ed ha introdotto cotal genere nel Popolo.*”¹³¹

In seguito, Juvarra progettò altri nuovi edifici, tra i quali la Citroniera, anche detta “Limonaiia” e la Scuderia Grande, nella zona sud-orientale. I lavori terminarono nel 1730.

Per la realizzazione del tetto della scuderia l’architetto si basò su soluzioni adottate in precedenza da Michelangelo Garove e su modelli austriaci e francesi: la copertura è composta da falde spezzate, come nel caso delle scuderie di Chantilly, con abbaini destinati ad ospitare gli alloggi del personale di servizio, che richiamano lo stile dell’architetto Jules Hardouin Mansart (1646-1748).

¹³⁰ Cit. G. Gritella, “*Juvarra: l’architettura*”, Vol.1, Franco Cosimo Panini, 1992, Modena, pag.339.

¹³¹ Cfr. L. Rovere, V. Viale, “*Filippo Juvarra*”, Oberdan Zucchi, 1937, Milano, pag. 80-81. [6]

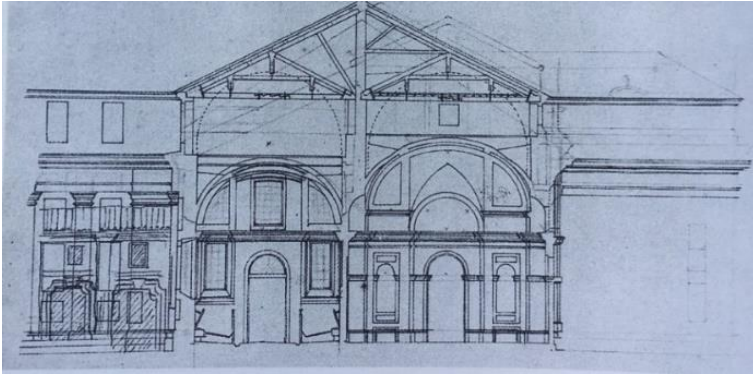


Figura 18_Studio della sezione trasversale e dell'armatura del tetto¹³²

3.2.3. Modifiche d'uso e interventi architettonici

Il patrimonio architettonico che compone la Reggia di Venaria Reale ha subito, nel corso della storia, cambiamenti per quanto concerne le destinazioni d'uso; modifiche; demolizioni; aggiunte; ecc. Queste stratificazioni rappresentano delle chiavi di lettura, che ci permettono di studiare le tecniche artistico-architettoniche e di identificare i mutamenti del gusto e delle esigenze pratiche, caratteristiche dei differenti periodi storici.

Nel 1798, con l'arrivo delle truppe napoleoniche, la Reggia di Venaria Reale cessò anche di essere una residenza di corte. Verso la metà del XVIII secolo, infatti, la Reggia venne lentamente abbandonata, in favore della Palazzina di Stupinigi. Il passaggio da residenza di Corte a sede militare ha fortemente influito sulla struttura architettonica della Reggia, lasciando tracce indelebili: numerosi stucchi ed affreschi, ad esempio, sono stati nascosti da strati di pittura; per ridurre le spese di manutenzione vennero tamponate le grandi vetrate della Citroneria Juvariana e numerosi locali furono ripensati e riadattati a nuove destinazioni d'uso. La presenza dei militari, quantomeno, salvaguardò la fabbrica da atti vandalici; i quali sfortunatamente non mancarono dopo l'abbandono anche da parte di questi ultimi. La Reggia, infatti, attraversò un periodo di decadenza, aggravata da atti di vandalismo, che ebbero luogo durante la Seconda guerra mondiale.

I più recenti progetti di restauro dell'intero complesso sono iniziati a metà degli anni Novanta. I lavori hanno avuto inizio nel 2001 e la Reggia è stata inaugurata ed aperta al pubblico nel 2007. Il progetto di recupero è stato promosso dall'Unione Europea e, grazie anche all'aiuto di fondi regionali e ministeriali, ha dato luogo al cantiere di restauro più rilevante in Europa per i beni culturali.

Oggi la Reggia -in seguito a quello che attualmente rimane il più grande progetto europeo di recupero e valorizzazione di un bene culturale, "*perché il gigante malato diventasse Reggia*"¹³³ - è diventata un importante polo di attrazione culturale: vi vengono presentate mostre, concerti, spettacoli ed eventi di carattere internazionale. Il complesso di Venaria Reale, dichiarato Patrimonio dell'Umanità dall'Unesco nel 1997 ed aperto al pubblico nel 2007, risulta attualmente uno dei siti più visitati in Italia, grazie alla bellezza della

¹³² Registro delle immagini. p.268.

¹³³ F. Pernice, "*La Venaria Reale. Ombre e luci*", Celid, 2013, Torino. pag. 7. [7]

sua architettura e delle opere esposte al suo interno. Ciò conferma che *“investire in cultura è tanto irrinunciabile quanto strategico”*¹³⁴.

3.2.3.1. Accenni sul restauro (2001-2007)

Successivamente al suo abbandono, come già sottolineato, il complesso di Venaria Reale passò molti anni che possiamo definire “bui”: lasciata ai vandali ed al tempo (sia inteso come lo scorrere degli anni, sia come agenti climatici), che contribuivano ad aumentare il suo stato di degrado. Fino agli anni Ottanta del Novecento circa, vi era forte disillusione e scetticismo da parte delle amministrazioni, sull’effettiva utilità del recupero del complesso. In questi stessi anni, però, si cominciò a tentare di coinvolgere i cittadini, col fine di richiamare l’attenzione dell’opinione pubblica verso la possibilità di compiere un’opera di restauro per recuperare la Reggia: attraverso riqualificazione e valorizzazione.

Determinanti per un cambiamento di rotta, furono le ideologie degli anni Novanta: *“anche in Italia si prese coscienza del valore oggettivo e delle potenzialità dei beni culturali [...] passando da una logica di intervento di tipo principalmente manutentivo allo sviluppo di progetti organici di recupero. La Reggia è stata uno dei primi monumenti che testimoniano quest’inversione di tendenza”*¹³⁵.

Infatti, l’11 maggio del 1995, durante una giornata di studi, organizzata da Francesco Pernice (allora direttore del Castello di Venaria e dal 2002 Soprintendente per i Beni Architettonici e Paesaggistici del Piemonte), si cominciò per la prima volta a definire ed impostare il Progetto La Venaria Reale. Tramite questo progetto sono state recuperate circa 240.000 mq di superfici coperte, che includono coperture, cortili interni e spazi di servizio; 800.000 mq di terreno: trasformati in giardini e parchi, comprensivi del ripristino della Peschiera e dei canali d’acqua di collegamento con le Fontane d’Ercole e di Diana. Sono stati inoltre recuperati 10.000 mq di stucchi, decorazioni e affreschi; il progetto ha reso possibile la realizzazione del Centro Conservazione e Restauro, situato nell’ex. Ala delle scuderie di Benedetto Alfieri, dove oggi troviamo oltre 8.000 mq adibiti a laboratori ed aule. Inoltre, il progetto “La Venaria Reale” include la riqualificazione del Borgo antico e il Parco della Mandria.

I restauri iniziarono effettivamente nel 2001 e si conclusero nel 2007: il 12 Ottobre 2007 ci fu l’inaugurazione di apertura di La Venaria Reale. Tra i fini del progetto di restauro vi era quello di ottenere un *unicum* territoriale tra la Reggia, il borgo di Venaria, i giardini e il parco della Mandria, valorizzando tutti questi luoghi, tramite un approccio di riqualificazione organica, in grado di determinare ritorni anche in termini di nuove infrastrutture e posti di lavoro.

Per procedere con i lavori di restauro, all’interno della Reggia è stata avviata una campagna diagnostica, per guidare le scelte inerenti alle colorazioni delle malte e per il restauro degli stucchi. Questo ha permesso di prendere decisioni in merito a come intervenire sui materiali e di conoscere le loro condizioni, tenendo conto delle caratteristiche microclimatiche e dello stato di degrado. L’esempio di indagine termica ad infrarosso (Figura 19) riporta la verifica dell’eliminazione dell’umidità alla base di una lesena nella chiesa di Sant’Uberto.

¹³⁴ F. Pernice, *“La Venaria Reale. Ombre e luci”*, Celid, 2013, Torino. pag. 7.

¹³⁵ F. Pernice, *“La Venaria Reale. Ombre e luci”*, Celid, 2013, Torino. pag. 16.

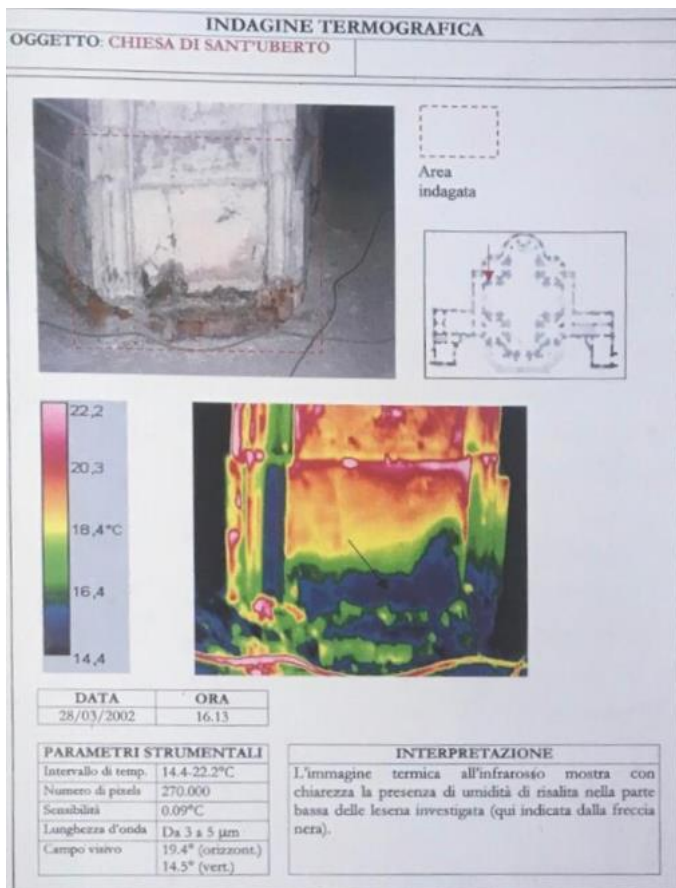


Figura 19_Indagine termografica, Chiesa di Sant'Uberto¹³⁶

Nel corso dei lavori di restauro sono stati recuperati affreschi e stucchi originali, grazie alla collaborazione tra restauratori, archivisti, diagnostici e storici dell'arte. Inoltre, le malte utilizzate per gli interventi di restauro sono state prodotte in laboratori specializzati e riproducono la superficie traslucida e pigmentata che caratterizzava originariamente alcune pareti.

Oggi la Reggia di Venaria Reale è un museo aperto al pubblico, un centro di ricerca e luogo di workshops ed altri eventi nazionali e internazionali. Tutto questo è stato possibile grazie alla stipula di un accordo di programma tra Governo e Regione; di una convenzione dei Beni e Attività Culturali e Regione e alla collaborazione degli enti locali. Il progetto è stato finanziato per oltre 240 milioni di euro, di cui 60 milioni di fondi comunitari e 50 milioni di fondi ministeriali.

Si sottolinea infine che durante i lavori il complesso è sempre rimasto aperto al pubblico: seguendo strategie di visibilità e coinvolgimento dei cittadini.

3.2.3.2. Gli impianti

I saltuari interventi che interessarono la Reggia tra il 1995 e il 2001, furono prettamente finalizzati al riutilizzo funzionale di alcune parti della fabbrica. L'operazione più significativa effettuata in quegli anni fu il

¹³⁶ Registro delle immagini. p.268.

completamento della Galleria Grande, dove venne installato un impianto elettrico a griglia, sopra all'impianto di riscaldamento a serpentina, che vi era stato realizzato in precedenza.

Durante il più recente restauro del 2001, l'integrazione e l'installazione di tutti gli impianti (elettrici, antincendio, di riscaldamento a pavimento, ecc.), è avvenuta utilizzando quanto più possibile i passaggi e i cavedi preesistenti, o predisponendone l'inserimento durante i lavori strutturali. Ad esempio, sono stati collocati nei giardini gli impianti che smistano calore, freddo, energia elettrica ed energia termica: i camini della centrale termica si mimetizzano nel tronco dell'albero in bronzo (Figura 20) realizzato dall'artista Giuseppe Penone, mentre nell'antica Peschiera si svolge la funzione di raffreddamento delle acque della centrale.



Figura 20_Albero di bronzo (a sinistra), Giuseppe Penone¹³⁷

Inoltre, vi sono cinque sotto-centrali adibite allo smistamento dell'aria calda e fredda all'interno degli ambienti che sono stati restaurati. Questo garantisce alla Reggia un controllo ambientale continuo, permettendo la possibilità di ottenere prestiti di opere, nel pieno rispetto degli standard europei.

L'impianto di riscaldamento all'interno della Chiesa di Sant'Uberto è stato realizzato con serpentina a pavimento (Figura 21), che è risultata essere la scelta migliore anche dal punto di vista del risparmio energetico.



Figura 21_Chiesa di Sant'Uberto: impianti di riscaldamento con serpentina a pavimento¹³⁸

¹³⁷ Registro delle immagini. p.268.

¹³⁸ Ibidem.

Nelle numerose sale aperte alla fruizione del pubblico per la visita museale, tra le quali anche la già citata sala 33, la soluzione adottata in termini impiantistici consiste in un impianto a tutt'aria, che adempie alla funzione di climatizzazione invernale ed estiva e alla ventilazione, con bocchette per l'estrazione e l'immissione dell'aria a pavimento, in funzione ogni giorno dalle 8:00 alle 18:00.

Per quanto riguarda gli impianti di illuminazione, si è cercato di garantire massimo risparmio energetico: le lampade LED (collocate negli ambienti più aulici della Reggia), in sostituzione dei corpi illuminanti di 110 piantane progettate dall'architetto e designer Gae Aulenti (1927-2012), garantiscono un basso consumo energetico. Gli ambienti settecenteschi e gli uffici sono invece dotati di piantane tecnologiche e dal design moderno. All'interno della Chiesa di Sant'Uberto gli impianti elettrici si mimetizzano nelle nicchie delle statue laterali. Infine, l'illuminazione degli esterni è costituita da lanterne, ricostruite secondo il disegno di Filippo Juvarra.

Come spesso accade in qualsiasi intervento di restauro architettonico, i tecnici degli impianti hanno dovuto affrontare anche in questo caso alcune problematiche legate principalmente al fatto che le tecnologie impiantistiche risultano "distanti", strutturalmente e formalmente da quelle disponibili al momento del restauro. Le scelte sopraelencate, caratterizzate dall'integrazione ed il mimetizzarsi del sistema impiantistico, confermano un approccio conoscitivo attento e mirato, che ha tenuto conto delle preesistenze, non tanto dal punto di vista funzionale (vi è stato ovviamente un efficientamento) quanto dal punto di vista estetico.

Tali interventi relativi agli impianti all'interno ed all'esterno della Reggia, hanno permesso di scoprire preesistenze architettoniche fino ad allora non ancora rinvenute, come il muro e le grotte seicentesche risalenti all'intervento di Castellamonte, sul Parco Basso della Reggia; la vasca dei canili; ruderi di fabbricati, di cui fino ad allora erano stati rinvenute solo le iconografie seicentesche.

I lavori svolti per il sistema impiantistico, dunque, effettuati con il fine di salvaguardare il *comfort* dei visitatori e dei lavoratori e di garantire la conservazione dei beni nel rispetto delle normative europee, ha anche consentito la riqualificazione delle aree dove sono state reperite testimonianze storiche.

3.2.4. I beni conservati nelle sale 33 e 38 e i rispettivi standard per la conservazione

I materiali che costituiscono i beni conservati all'interno della sala 33 sono: argento; legno; olio su tela, tessuto¹³⁹. Mentre nella sala 38 troviamo: terracotta; legno; bronzo; ottone; olio su tela; tessuto. I beni, riportati all'apparato I di questa ricerca, vengono esposti in queste sale dal 2007.

Gli standard suggeriti dal MIBAC [8] e dalla UNI 10829:1999 [9] riportano i seguenti *range* di UR e T per la conservazione dei materiali sopracitati:

Tabella 10.

Materiale	Range UR (%)	Range T (°C)
Olio su tela	40-55	19-24
Legno	50-60	19-24
Argento	<50	Non rilevante

¹³⁹ Tessuti, tappeti, tappezzerie in stoffa rientrano nella stessa categoria nella UNI 10829:1999 Cfr. pag. 10.

Tessuti, tappeti, tappezzerie in stoffa	30-50	19-24
Terracotta	20-60	Non rilevante
Bronzo	<55	Non rilevante
Ottone	<45	Non rilevante

Settimanalmente viene condotto un controllo dello stato di conservazione dei beni custoditi all'interno delle numerose sale della Reggia di Venaria Reale. Questo consiste in un'ispezione visiva da parte di alcuni restauratori (sempre lo stesso *team*) del CC&R. Da quanto riportato dai restauratori, dal 2007 ad oggi i beni conservati nelle sale 33 e 38 non hanno riportato segni di degrado.

3.3. Campagna di monitoraggio microclimatico

Lo studio microclimatico *indoor* effettuato sulla Reggia di Venaria Reale, che si riporterà in questa tesi, è concentrato su due sale, situate al piano nobile di una partizione dell'edificio, adiacente alla Galleria Grande, dal lato ovest. Grazie alla collaborazione con il Centro di Conservazione e Restauro (CC&R) La Venaria Reale, è stato possibile reperire i dati di Umidità Relativa (UR) e Temperatura (T), relativi ad alcuni anni¹⁴⁰ successivi all'apertura al pubblico delle medesime. Le sale in questione, visibili dalla pianta sottostante, sono indicate con le sigle "T33"; "T38".

Le due sale sono servite dalla CTA (Centrale di Trattamento dell'Aria) n.05.

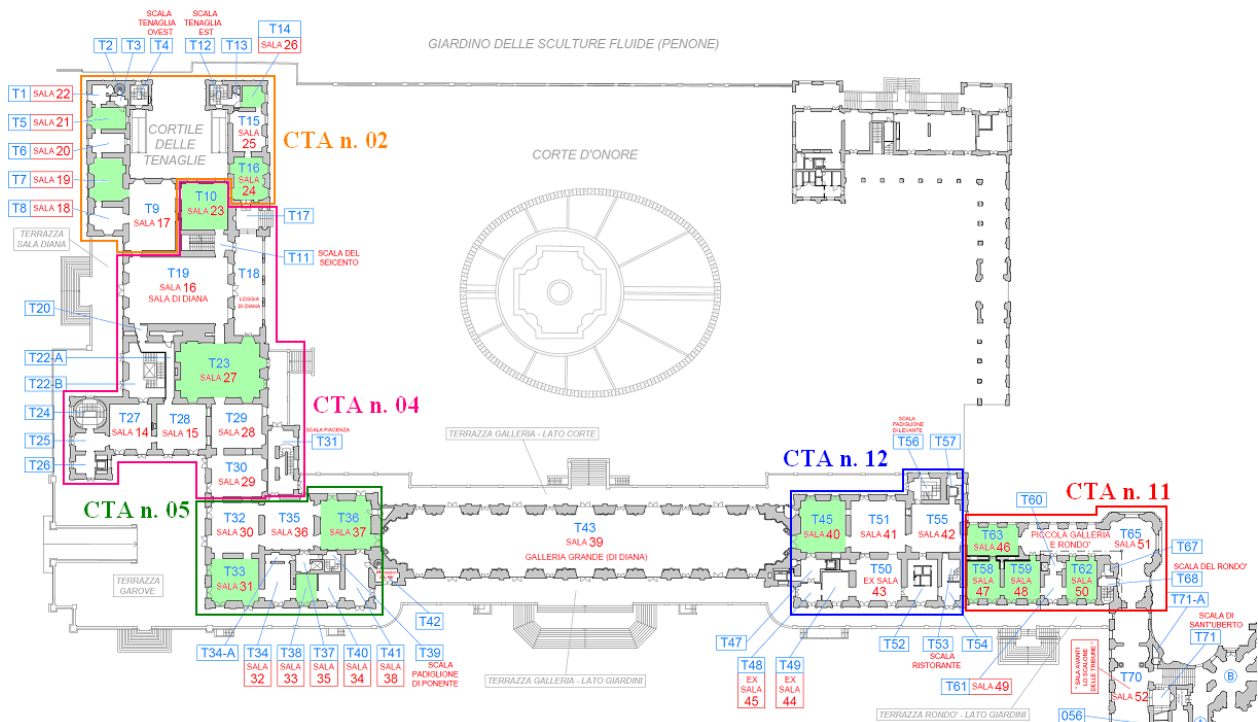


Figura 22_Complexo di Venaria Reale¹⁴¹

¹⁴⁰ dal 7/08/2007 al 3/08/2011 per la sala 38, dal 7/08/2007 al 16/03/2017 per la sala 33.

¹⁴¹ Registro delle immagini. p.268.

In Reggia è attualmente installato un sistema di sonde dotate di trasmettitore per l'invio *wireless* dei dati registrati ad una unità (*gateway*) di raccolta, memorizzazione e invio su rete cellulare. Una serie di ripetitori permette di ampliare la copertura del *gateway*. Gli impianti di climatizzazione sono attivi.

Le caratteristiche tecniche delle sonde sono le seguenti:

- campo di misura di T: $-50 \div +50$ °C;
- accuratezza misure di T: ± 0.4 °C;
- campo di misura di UR: $0 \div 100$ %;
- accuratezza misure di UR: ± 3 %.

3.3.1. Errori e semplificazioni adottate

Le sonde collocate all'interno della sala 33 hanno rilevato i dati relativi alla Temperatura ed all'Umidità Relativa dal 7/08/2007 al 16/03/2017, ma non in modo continuativo. Il rilevamento dei dati presenta infatti dei *gap*, di circa due mesi ciascuno, i quali sono probabilmente legati ad uno scaricamento delle batterie delle stesse sonde o a dei malfunzionamenti dovuti al posizionamento di sonde e/o dei *repeater*, il che può avere impedito la trasmissione delle informazioni al *gateway*. Tali *gap* del rilevamento dei dati vanno dal: 28/08/2007-10/10/2007; 1/04/2009-12/06/2009; 4/02/2016-25/03/2016.

Altri *gap* nel rilevamento dei dati, relativi alla medesima sala, sono invece più importanti: 13/07/2010-29/04/2011; 30/08/2011-24/04/2013. Questi, inizialmente si era ipotizzato non potessero essere legati a “sviste”; scaricamento delle batterie; errori di comunicazione con il *server* o di posizionamento degli impianti utilizzati. Si riteneva invece si potesse trattare di scelte consapevoli, dettate da necessità dovute a riallestimenti o a lavori di restauro all'interno della sala. Contrariamente, dal CC&R ci è stato comunicato che, per sovraccarico di altri impegni, è capitato più volte che non venissero scaricati i dati dalle sonde per molto tempo ed a causa della limitata memoria delle stesse, i dati non si salvavano e venivano perciò sovrascritti con dati più recenti.

La sala 38 presenta dei *gap* di rilevamento inferiori rispetto a quelli individuati per la sala 33: 28/08/2007-03/10/2007; 1/04/2009-12/06/2009. Per questa sala però si dispone di un monitoraggio che termina nel 2011 anziché nel 2017. Probabilmente perché, come spiegato di seguito, i dati delle due sale non risultano particolarmente differenti tra loro ed il Centro di Conservazione e Restauro potrebbe aver valutato di procedere con il monitoraggio di uno solo dei due ambienti e di utilizzare la sonda della sala 38 in altre zone della Reggia.

Le sale di cui ci sono stati forniti i dati erano state scelte per ragioni primariamente legate alla disponibilità dei dati da parte del CC&R di Venaria Reale ed anche in quanto si ipotizzava che queste due sale potessero presentare risultati che, una volta confrontati tra loro, avrebbero dato informazioni piuttosto differenti, dal momento che una sala -la 38- ha due pareti perimetrali, tre porte che danno sull'interno e sono mantenute costantemente aperte e due aperture che affacciano sull'esterno; mentre la sala 33 presenta una sola parete perimetrale, con relativa apertura e due porte costantemente aperte che la collegano con altre sale all'interno della Reggia.

Come si evince dai prossimi paragrafi, i dati emersi dal monitoraggio delle due sale risultano invece molto simili. Ragione per cui, si è deciso di procedere con la simulazione virtuale e conseguenti analisi e ipotesi di scenari futuri, della sola sala 33.

3.4. Analisi dei dati monitorati

Come previsto dalla metodologia¹⁴², dopo aver indagato le evoluzioni storiche che hanno coinvolto la Reggia di Venaria Reale; con i dati della campagna di monitoraggio a disposizione, si è proceduto con l'analisi di questi ultimi: vengono riportati di seguito alcuni risultati esemplificativi, tramite schede commentate, derivanti dall'analisi dei dati microclimatici monitorati per le sale 33 e 38. Si evidenziano le caratteristiche del microclima attuale, l'interpretazione dei dati, la loro rilevanza e le difficoltà riscontrate.

I dati che seguono considerano Temperatura e Umidità Relativa. Si specifica in aggiunta che i valori relativi all'illuminamento artificiale non sono stati considerati, poiché in genere si riferiscono al *comfort* visivo; inoltre, quando si tratta di ambienti museali, o parzialmente museali, l'illuminamento è legato al progetto illuminotecnico (e di allestimento) per la fruizione delle opere: questo è un campo molto specialistico ed estraneo alle tematiche che si è deciso di trattare nella presente ricerca.

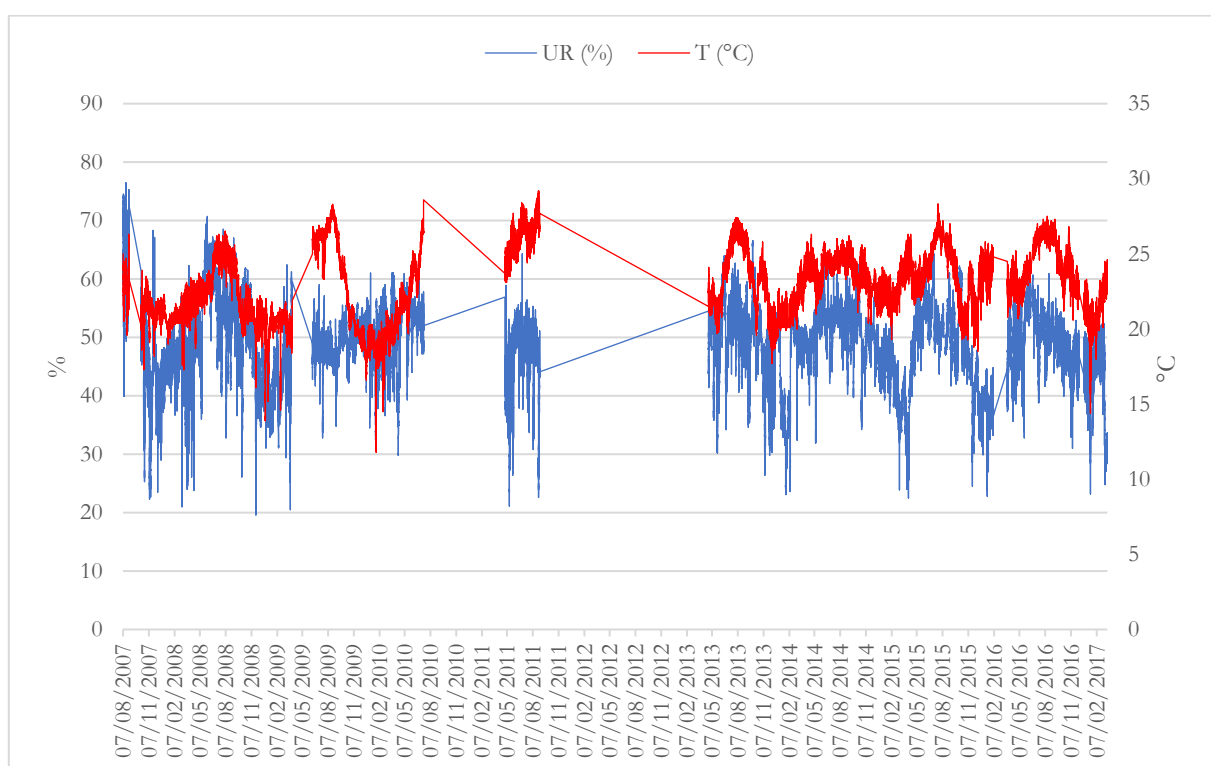


Grafico 1_Trend storico, temperatura e umidità relativa¹⁴³

Periodo monitoraggio: 7 Agosto 2007 – 16 Marzo 2017.

Ambiente monitorato: Sala 33, Reggia di Venaria Reale, Torino, Italia.

Impianti: Impianti di climatizzazione attivi.

Parametri misurati: Temperatura e Umidità Relativa.

¹⁴² Cfr. Capitolo II

¹⁴³ Ciascuna immagine riportata con la dicitura “Grafico” nella presente tesi è stata elaborata dall'autore.

Errori di misurazione: Gap rilevamento dati: 28/08/2007-10/10/2007; 1/04/2009-12/06/2009; 13/07/2010-29/04/2011; 30/08/2011-24/04/2013; 4/02/2016-25/03/2016.

Valori registrati: Range T: 15°C-29°C; Range UR: 20%-76%.

Considerazioni: All'interno della sala 33 si registrano raramente temperature tra i 15°C e i 18°C, dunque, stando a quanto riportato dagli standard del MIBAC e della UNI10829, suggeriti per i materiali attualmente esposti nella sala studiata (19°C-24°C), si può affermare i beni all'interno della sala 33 non sono esposti a rischi dovuti a temperature troppo basse. Risultano invece più pericolose le temperature superiori ai 24°C-25°C. Relativamente alla UR, si notano valori frequentemente inferiori al 40%. Vedremo nei grafici successivi quali valori di T e UR sono stati registrati e con che frequenza, in modo tale da poterli confrontare con gli standard e valutare se e in che modo potrebbero essere rischiosi per la conservazione dei materiali.

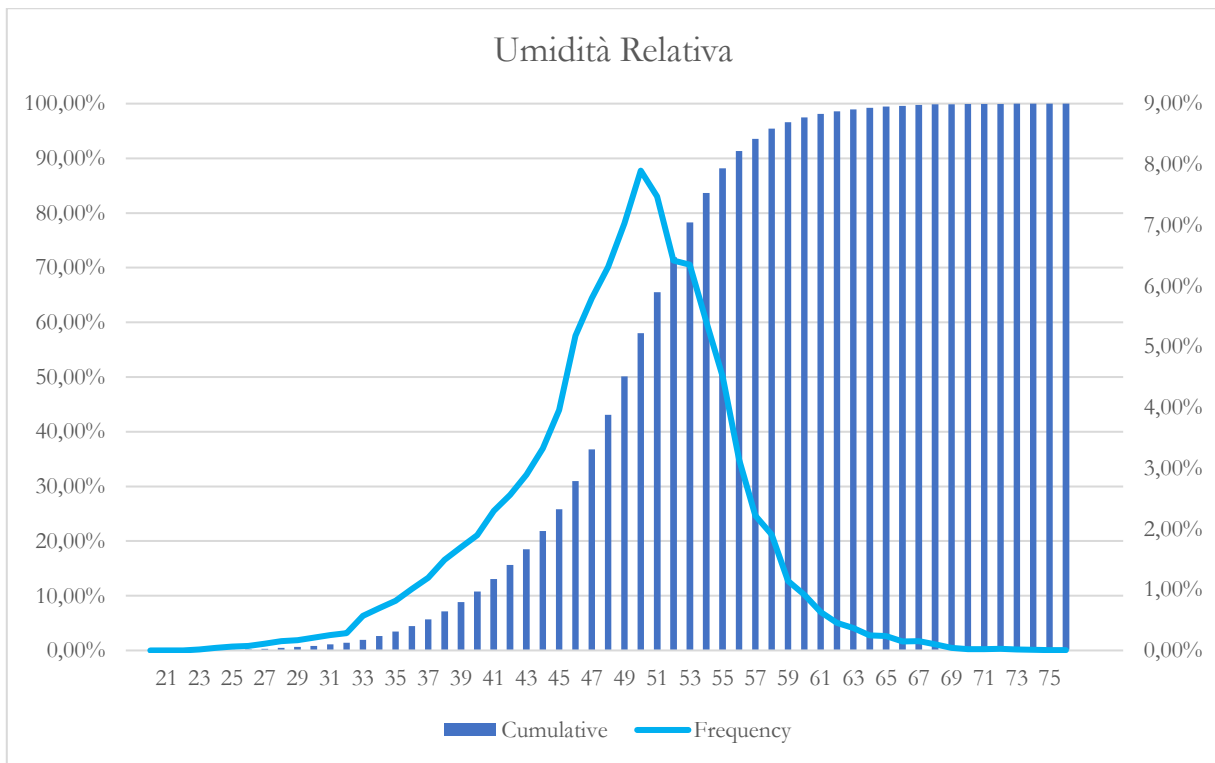


Grafico 2_Umidità relativa, profili di: distribuzione di frequenza e frequenza cumulata

Periodo monitoraggio: 7 Agosto 2007 – 16 Marzo 2017.

Ambiente monitorato: Sala 33, Reggia di Venaria Reale, Torino, Italia.

Impianti: Impianti di climatizzazione attivi.

Parametri misurati: Umidità Relativa.

Errori di misurazione: Gap rilevamento dati: 28/08/2007-10/10/2007; 1/04/2009-12/06/2009; 13/07/2010-29/04/2011; 30/08/2011-24/04/2013; 4/02/2016-25/03/2016.

Valori registrati: Maggioranza di valori: attorno al 50%; non sempre la gaussiana è bassa: code con valori inferiori al 30% e superiori al 65%.

Considerazioni: Il grafico indica sia la percentuale di volte che viene registrato uno specifico valore, sia quella in cui si registra un livello di umidità relativa inferiore ad un determinato valore percentuale, che, in questo caso, va da un minimo di 21% ed un massimo pari al 75%, con una frequenza quasi nulla di rilevamento dei dati inferiori al 25% e superiori al 69%. La maggioranza dei dati riportano valori di UR compresi tra il 45% e il 55%, in linea con gli standard suggeriti per la conservazione dei beni custoditi nella sala 33.

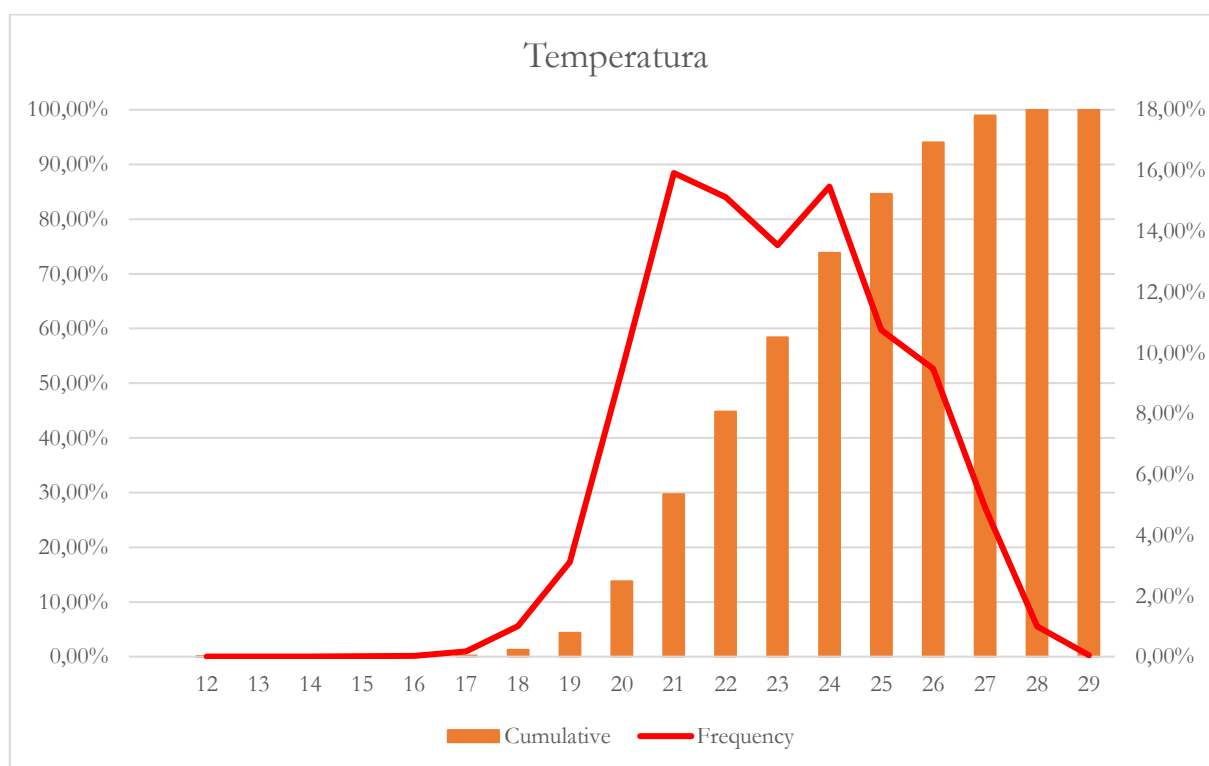


Grafico 3_Temperatura, profili di: distribuzione di frequenza e frequenza cumulata

Periodo monitoraggio: 7 Agosto 2007 – 16 Marzo 2017.

Ambiente monitorato: Sala 33, Reggia di Venaria Reale, Torino, Italia.

Impianti: Impianti di climatizzazione attivi.

Parametri misurati: Temperatura.

Errori di misurazione: Gap rilevamento dati: 28/08/2007-10/10/2007; 1/04/2009-12/06/2009; 13/07/2010-29/04/2011; 30/08/2011-24/04/2013; 4/02/2016-25/03/2016.

Valori registrati: Maggioranza di valori: tra 21°C-25°C; temperature inferiori ai 18°C e superiori ai 28°C: frequenza <2%.

Considerazioni: La distribuzione di frequenza e la frequenza cumulata relativa alle temperature interne dell'ambiente in esame permette di ricavare informazioni importanti per ciò che concerne la stima delle temperature rilevate. Le T registrate nell'arco dei dieci anni di monitoraggio, vanno da un minimo di 12°C ad un massimo di 29°C, con valori inferiori ai 16°C rilevati con una frequenza infinitesimale (si tratta di picchi registrati saltuariamente, come si può notare dal grafico 1). La registrazione di temperature superiori ai 25°C ci segnala un rischio di surriscaldamento dei materiali. Considerando gli oggetti presenti in questa sala, risulta importante monitorare in particolare le condizioni del legno, poiché questo materiale, come anche la carta, tende a seccarsi di più rispetto ad altri. Il rischio che ciò accada appare comunque basso perché temperature superiori ai 25°C sono state registrate con una frequenza compresa tra l'8% e il 2%.

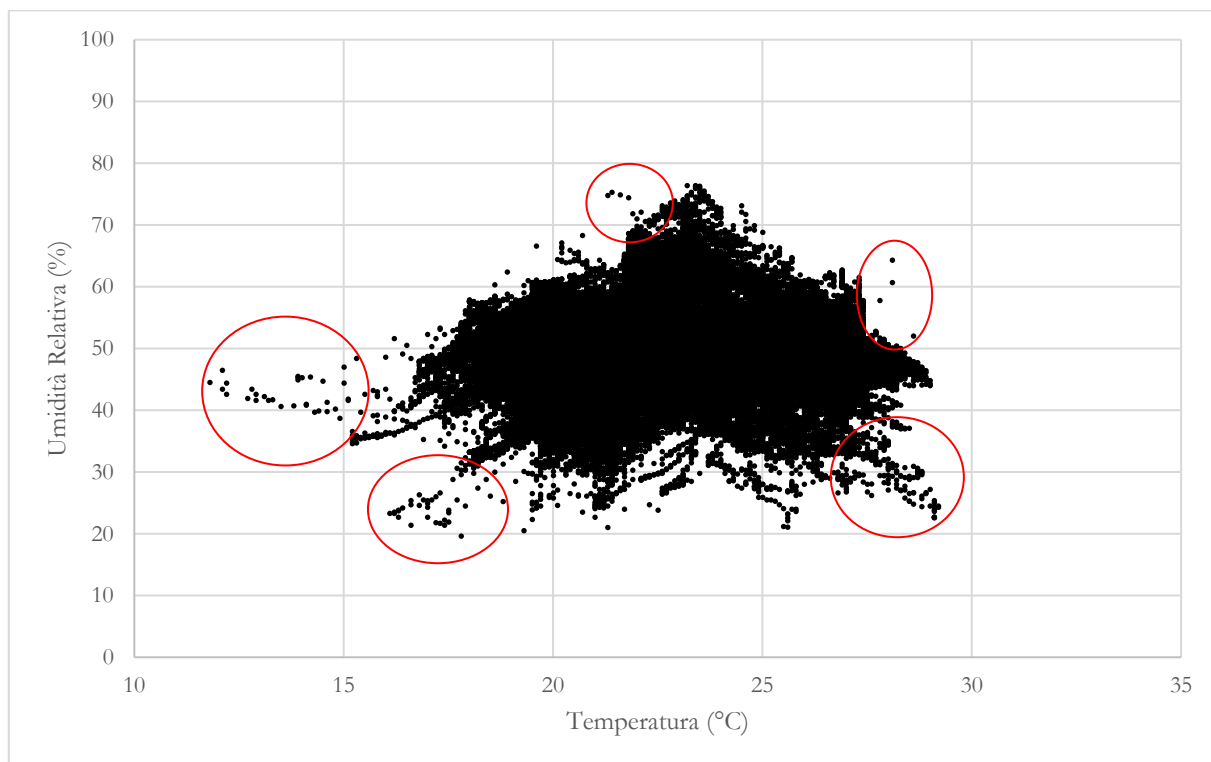


Grafico 4_ Grafico a dispersione

Periodo monitoraggio: 7 Agosto 2007 – 16 Marzo 2017.

Ambiente monitorato: Sala 33, Reggia di Venaria Reale, Torino, Italia.

Impianti: Impianti di climatizzazione attivi.

Parametri misurati: Rapporto tra Temperatura e Umidità Relativa.

Errori di misurazione: Gap rilevamento dati: 28/08/2007-10/10/2007; 1/04/2009-12/06/2009; 13/07/2010-29/04/2011; 30/08/2011-24/04/2013; 4/02/2016-25/03/2016.

Valori registrati: Maggioranza di valori: 17°C-28°C per T; 35%-60% per UR. Si rilevano raramente per entrambi i parametri: valori <15°C, >27°C; valori <30%, >65%.

Considerazioni: Dal grafico si evidenziano alcune situazioni puntuali, come valori inferiori ai 15°C o superiori a 26°C per T e inferiori al 30% o superiori al 65% per UR: si tratta di situazioni non dovute all'efficienza termica dell'involucro, bensì probabilmente legate a delle anomalie dell'impianto di climatizzazione. Inoltre, è interessante notare che mediamente i livelli di umidità risultano essere concentrati principalmente tra il 35% e il 60%: i valori di umidità inferiori al 40% devono richiamare l'attenzione degli addetti alla manutenzione e conservazione perché rivelano la necessità di ragionare sul se e come umidificare l'ambiente.

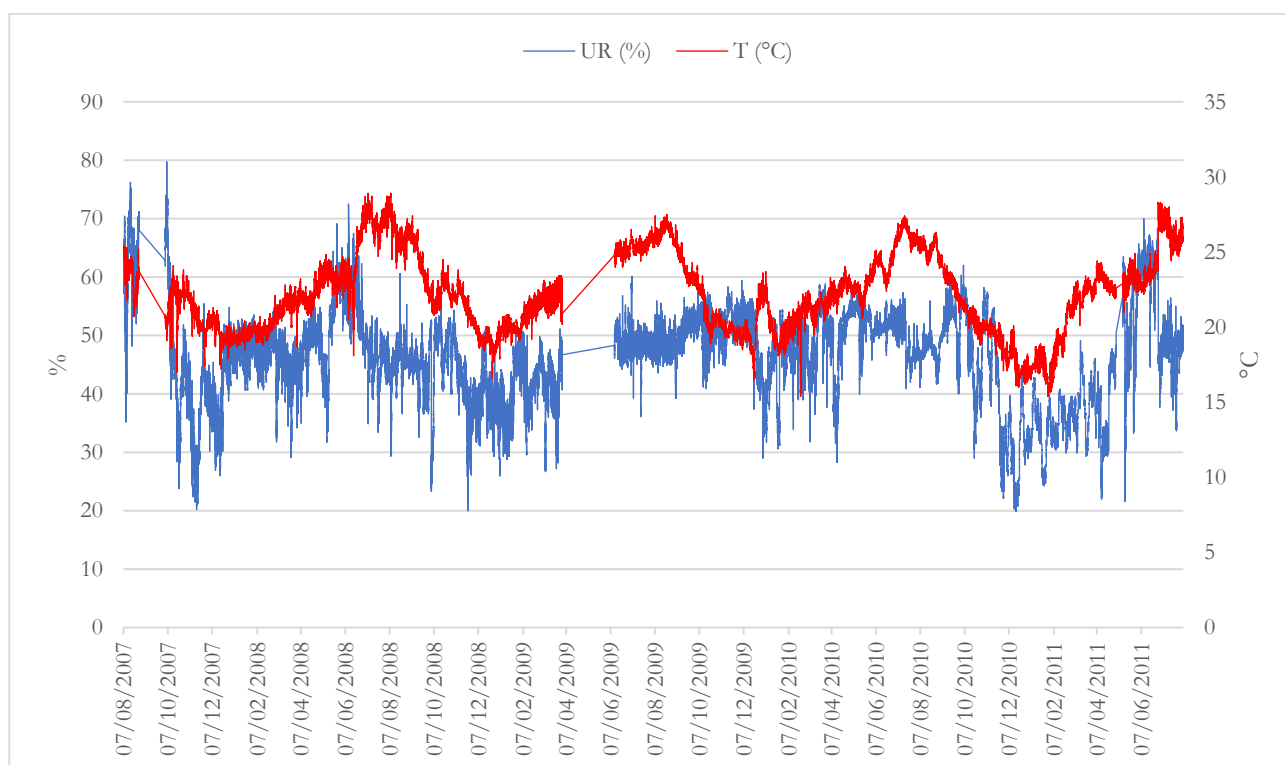


Grafico 5_ Trend storico, temperatura e umidità relativa

Periodo monitoraggio: 7 Agosto 2007 – 3 Agosto 2011.

Ambiente monitorato: Sala 38, Reggia di Venaria Reale, Torino, Italia.

Impianti: Impianti di climatizzazione attivi.

Parametri misurati: Temperatura e Umidità Relativa.

Errori di misurazione: Gap rilevamento dati: 28/08/2007-03/10/2007; 1/04/2009-12/06/2009.

Valori registrati: Range T: 15°C-29°C; Range UR: 20%-60%, con alcuni picchi che raramente superano il 70%.

Considerazioni: Come nel caso della sala 33, prendendo come riferimento gli standard del MIBAC e della UNI10829, le opere non sono esposte a condizioni di rischio dovute a temperature troppo basse. Temperature comprese tra i 15°C e i 18°C sono state rilevate raramente, come approfondito nel grafico 7. Eventuali segni di degrado potrebbero, piuttosto, essere dovuti a temperature superiori ai 24°C-25°C. Relativamente alla UR, il range individuato in questa sala è compreso prevalentemente tra il 20% e il 60%: valori compresi tra 40% e 20% sono indicatori di un ambiente più secco rispetto a quanto suggerito dagli standard MIBAC e UNI10829 per la conservazione di dipinti olio su tela, tessuti e oggetti in legno; mentre possono essere adatti per la conservazione della terracotta, del bronzo e dell'ottone.

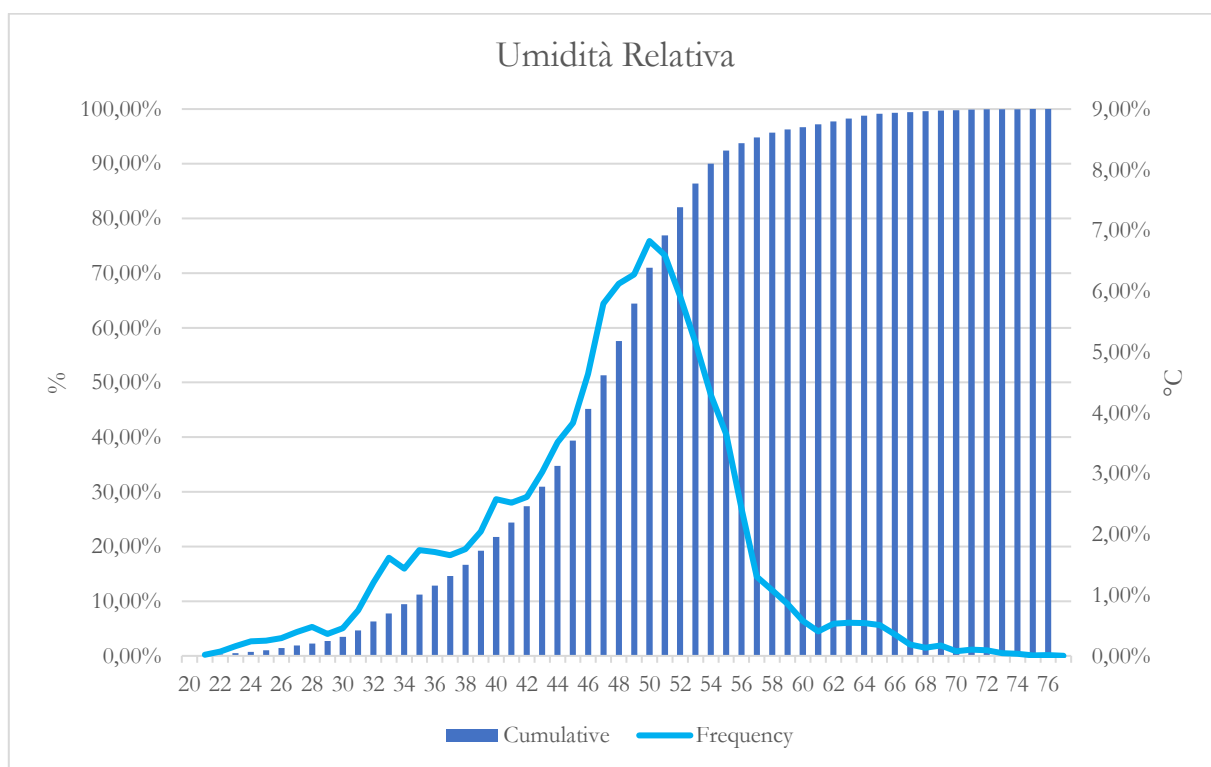


Grafico 6_Umidità relativa, profili di: distribuzione di frequenza e frequenza cumulata

Periodo monitoraggio: 7 Agosto 2007 – 3 Agosto 2011.

Ambiente monitorato: Sala 38, Reggia di Venaria Reale, Torino, Italia.

Impianti: Impianti di climatizzazione attivi.

Parametri misurati: Umidità Relativa.

Errori di misurazione: Gap rilevamento dati: 28/08/2007-03/10/2007; 1/04/2009-12/06/2009.

Valori registrati: Maggioranza di valori: attorno al 50%; non sempre la gaussiana è bassa: code con valori inferiori al 30% e superiori al 65%.

Considerazioni: Nel presente grafico l'umidità relativa registrata va da un minimo di 21% ed un massimo pari al 75%. La maggioranza dei dati riporta valori di UR compresi tra il 45 e il 55%. Si evidenzia inoltre che valori di UR superiori al 60% sono stati rilevati con una frequenza inferiore allo 0,5%; mentre il 23% dei dati è inferiore al 40%: indicatore di un ambiente rispettivamente eccessivamente secco per la conservazione di parte dei materiali conservati nella sala 38.

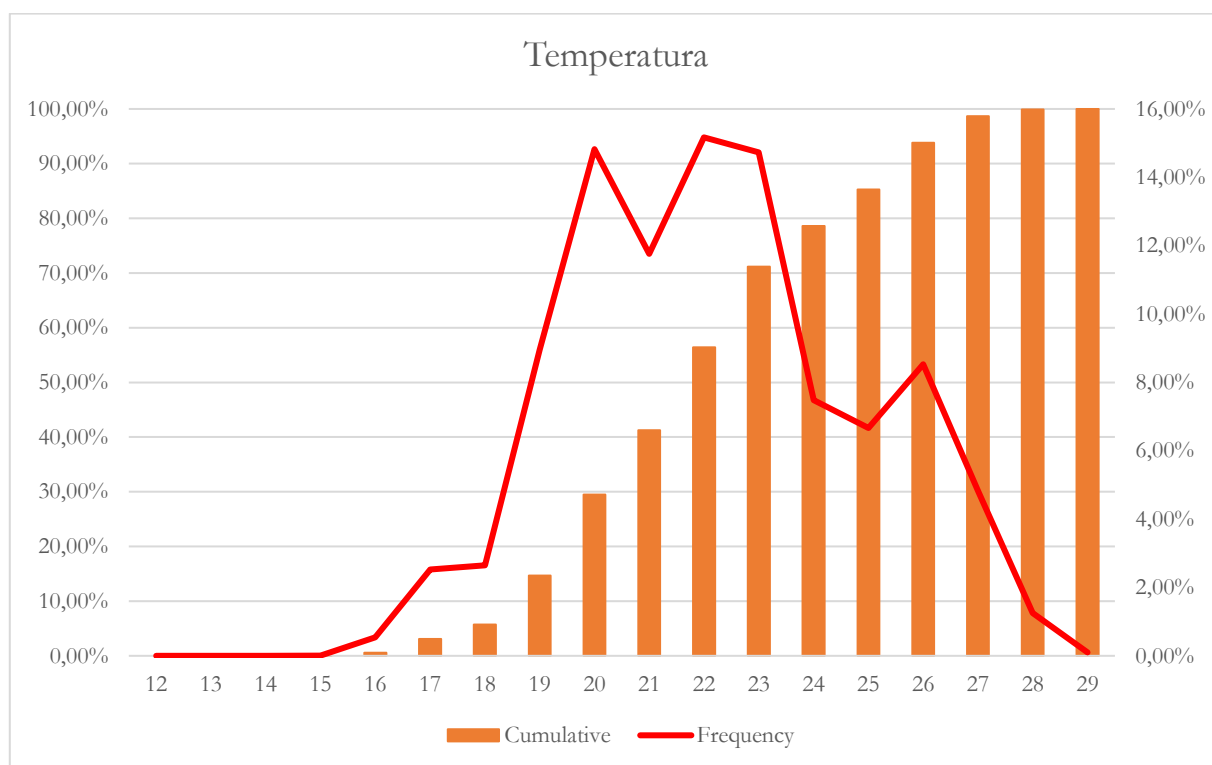


Grafico 7_Temperatura, profili di: distribuzione di frequenza e frequenza cumulata

Periodo monitoraggio: 7 Agosto 2007 – 3 Agosto 2011.

Ambiente monitorato: Sala 38, Reggia di Venaria Rale, Torino, Italia.

Impianti: Impianti di climatizzazione attivi.

Parametri misurati: Umidità Relativa.

Errori di misurazione: Gap rilevamento dati: 28/08/2007-03/10/2007; 1/04/2009-12/06/2009.

Valori registrati: Maggioranza di valori: tra 18 °C – 23 °C (frequenza 15 %); temperature inferiori ai 18°C e superiori ai 27 °C (frequenza <3 %).

Considerazioni:

Il grafico riporta la distribuzione di frequenza e la frequenza cumulata relative alle temperature interne dello spazio studiato. Le temperature registrate nell'arco dei quattro anni di monitoraggio, vanno da un minimo di 15°C ad un massimo di 28°C. Il fatto che vengano rilevate temperature superiori ai 25°C mette in allerta nei confronti di un rischio di surriscaldamento dei materiali, poiché, stando agli standard sopracitati, buona parte dei beni conservati in questa sala andrebbe conservata tra i 19°C e i 24°C.

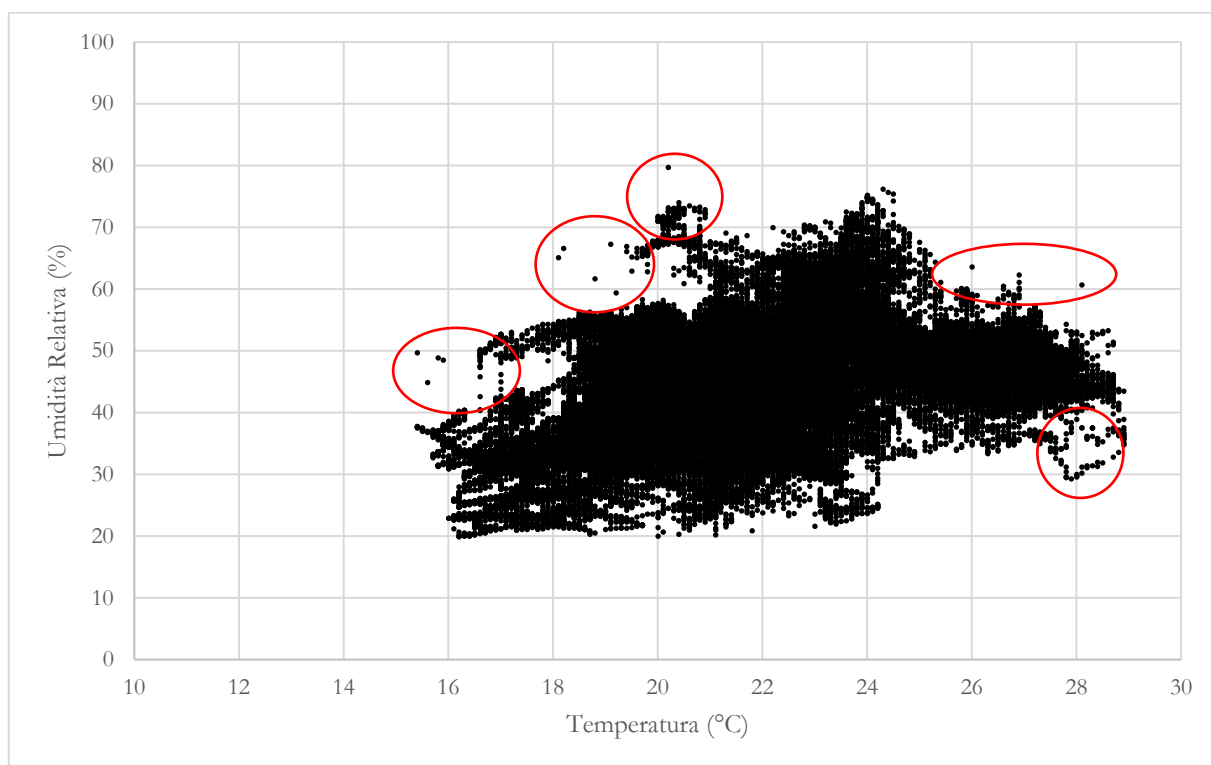


Grafico 8_grafico a dispersione

Periodo monitoraggio: 7 Agosto 2007 – 3 Agosto 2011.

Ambiente monitorato: Sala 38, Reggia di Venaria Reale, Torino, Italia.

Impianti: Impianti di climatizzazione attivi.

Parametri misurati: Rapporto tra Temperatura e Umidità Relativa.

Errori di misurazione: Gap rilevamento dati: 28/08/2007-03/10/2007; 1/04/2009-12/06/2009

Valori registrati: Maggioranza di valori: 17°C-27°C per T; 35%-55% per UR.

Considerazioni: Nel grafico sono stati evidenziate in rosso alcune situazioni puntuali, determinate probabilmente da anomalie di funzionamento degli impianti di climatizzazione (es. valori superiori a 28°C per T o superiori al 70% per UR). Inoltre, si sottolinea che, come per la sala 33, anche in

questa sala sono stati rilevati numerosi dati relativi all'umidità relativa con valori inferiori al 30%, indicatori di un ambiente secco.

3.4.1. Calcolo dell'anno-tipo

Nel caso di entrambe le sale, ci troviamo di fronte ad una raccolta dati che scaturisce da un monitoraggio microclimatico pluriennale (Grafici 10, 11, 13, 14). Tramite tali dati è stato calcolato l'anno-tipo di entrambe le sale (Grafici 12 e 15). L'elaborazione dell'anno-tipo prevede la standardizzazione dei rilevamenti¹⁴⁴ e il calcolo della media di ogni dato per ogni ora di ogni anno dei dati ottenuti dal monitoraggio.

Questo processo permette di avere un'unica base dati di riferimento per effettuare successivamente la validazione¹⁴⁵ del modello virtuale, semplificando il confronto tra il dato reale -monitorato- e il dato simulato, necessario per il processo di validazione.

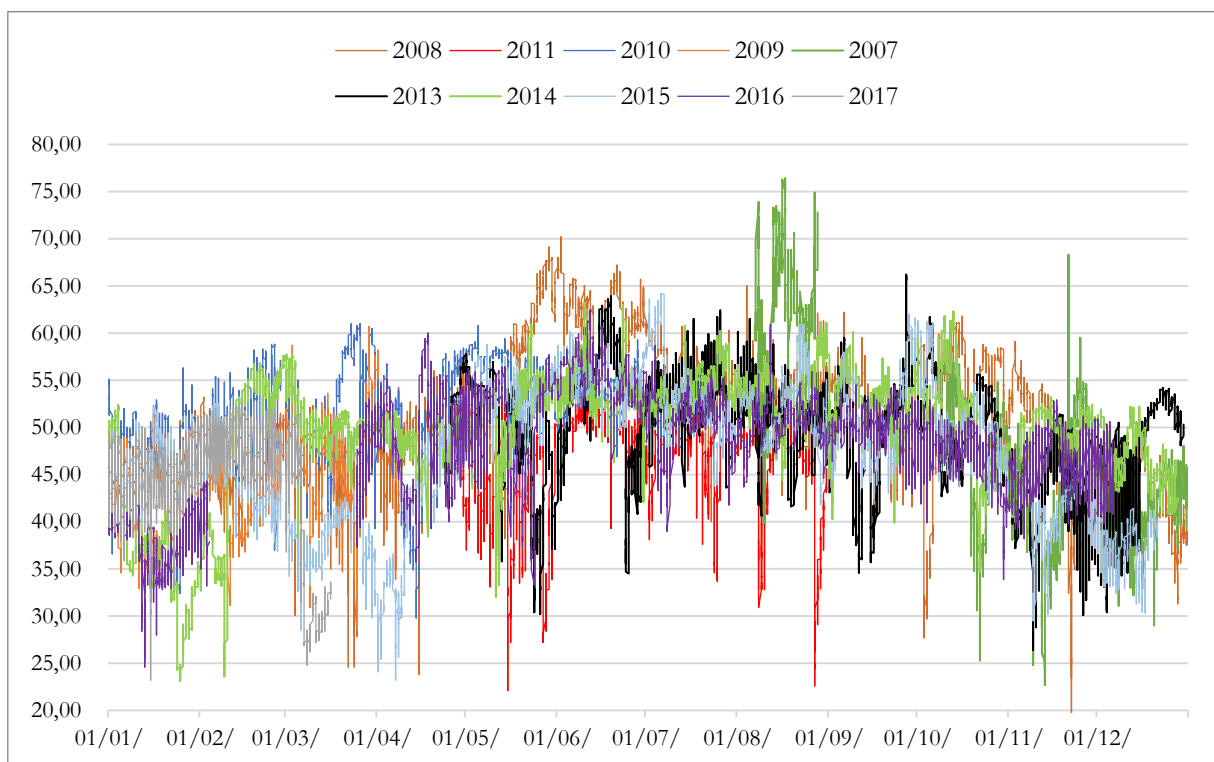


Grafico 10_ Sala 33: umidità relativa - dati del monitoraggio

¹⁴⁴ Es. se durante un anno era stato rilevato un dato ogni 15 minuti, mentre gli anni successivi era stato rilevato un dato ogni ora, si tiene conto dei dati rilevati ogni ora per tutti gli anni e si scartano i dati in eccesso.

¹⁴⁵ Da qui in avanti, quando si parla di validazione dei dati, anche per i prossimi casi-studio, si fa riferimento al procedimento di validazione già descritto al paragrafo 2.6.

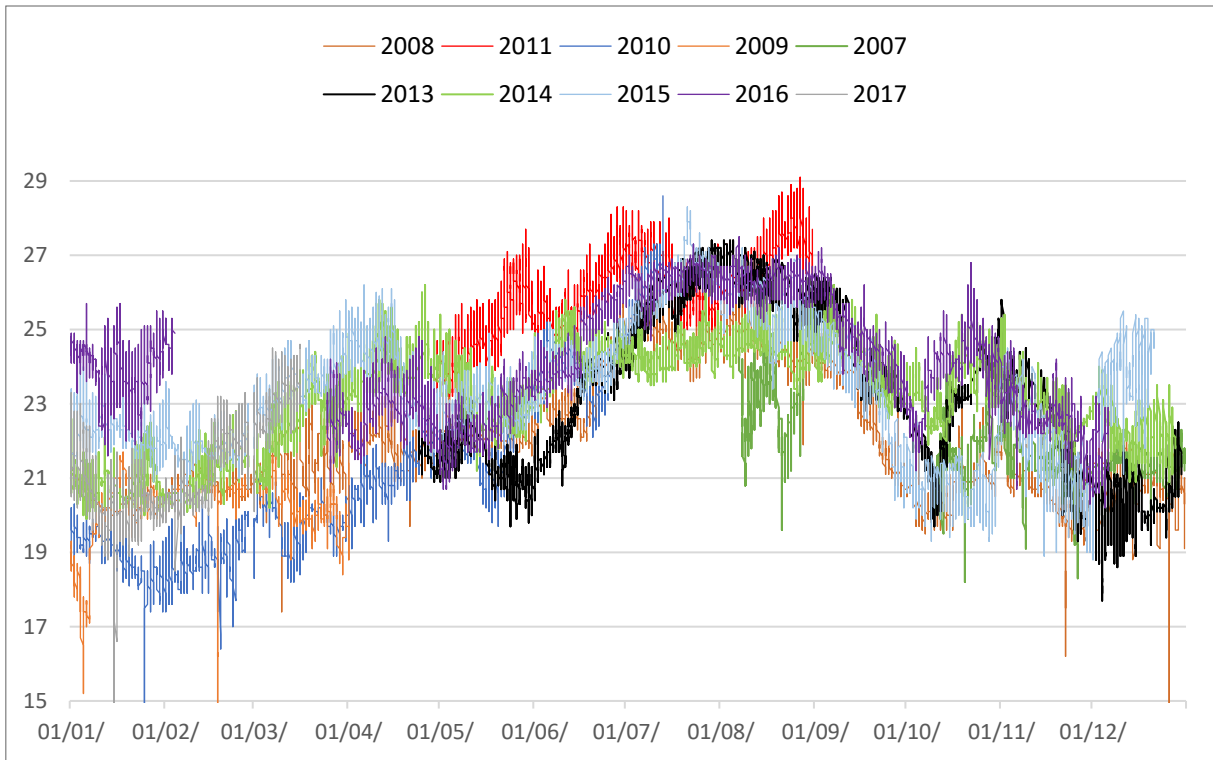


Grafico 11_ Sala 33: temperatura, - dati del monitoraggio

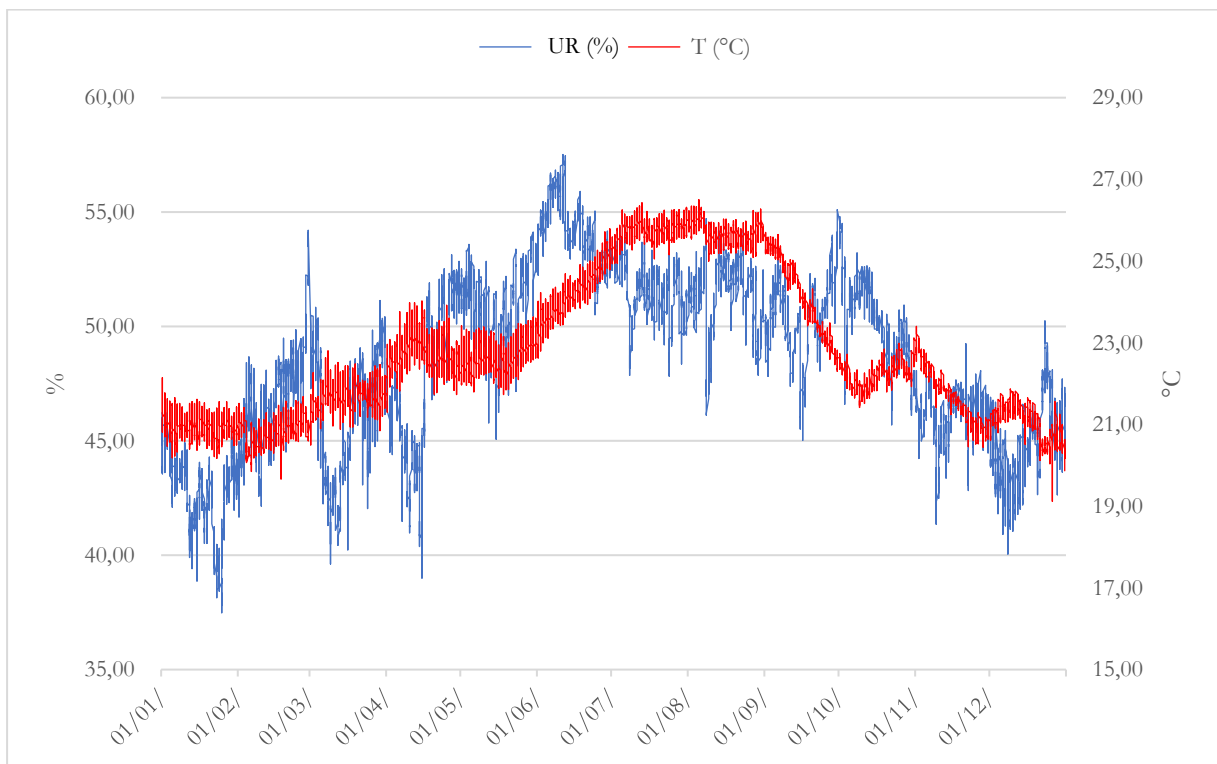


Grafico 12_ Sala 33: anno-tipo

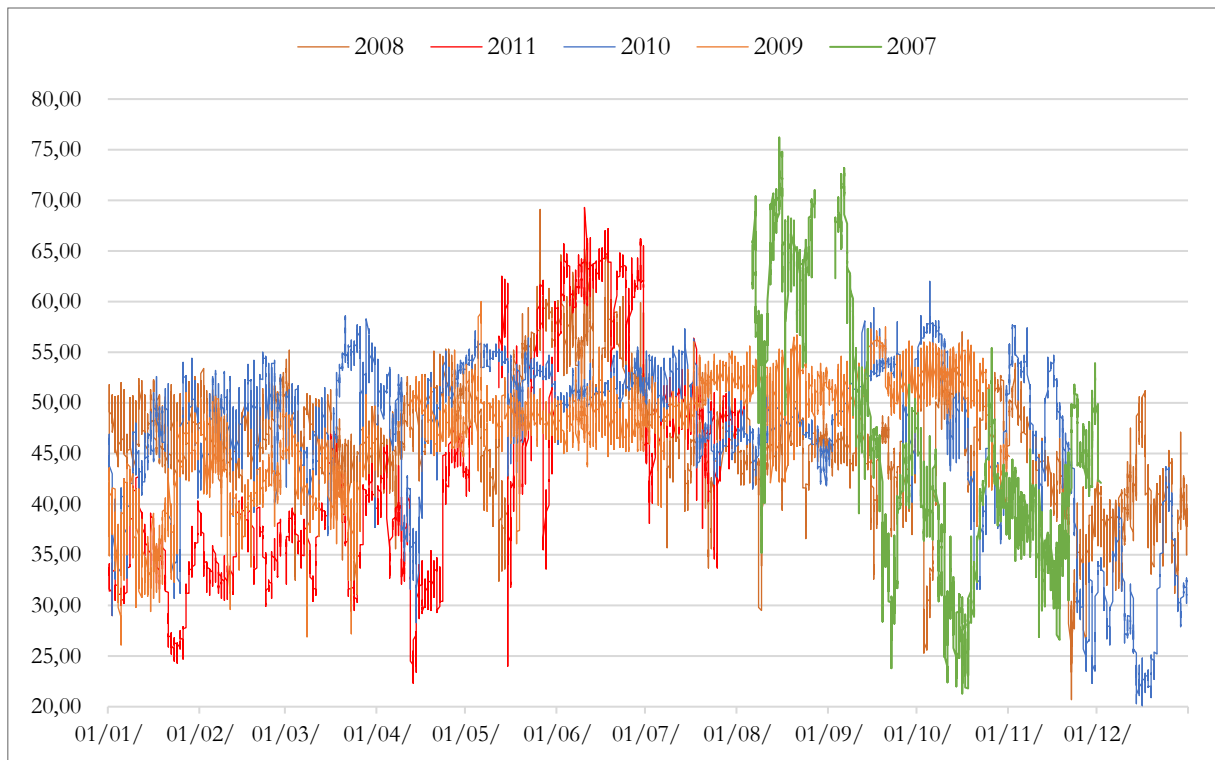


Grafico 13_ Sala 38: umidità relativa - dati del monitoraggio

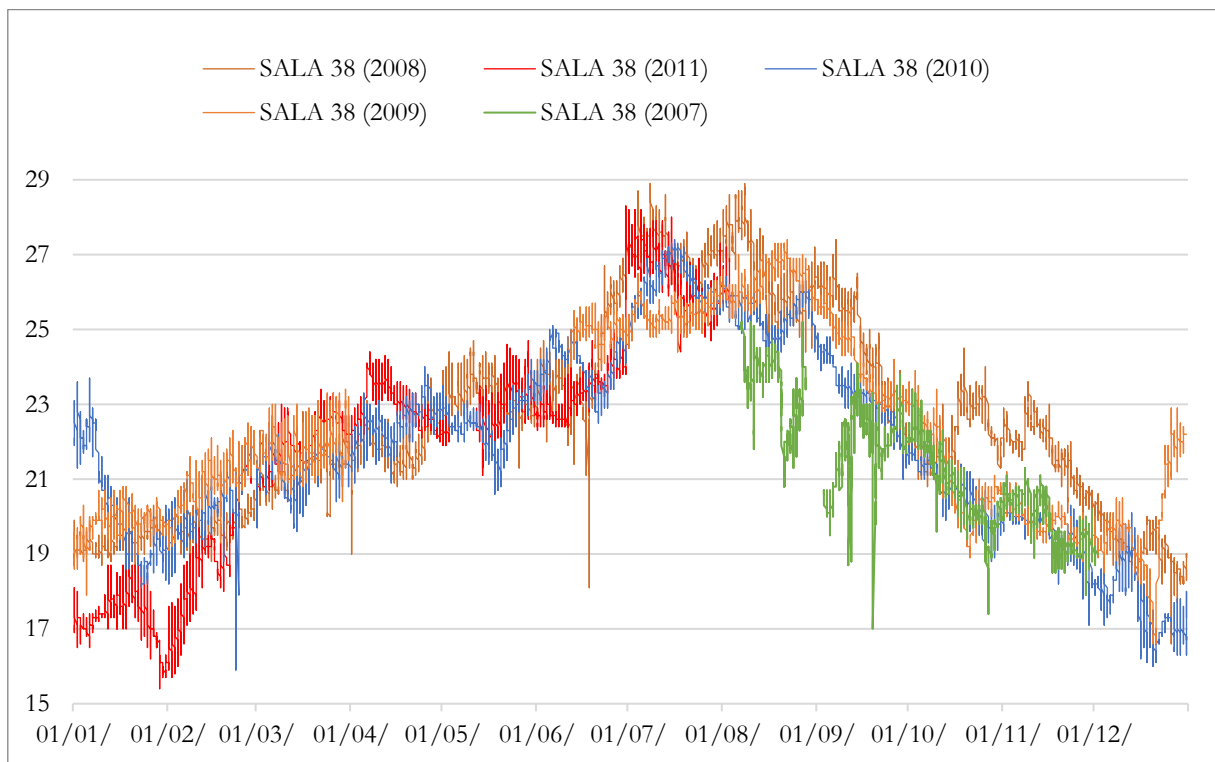


Grafico 14_ Sala 38: temperatura, - dati del monitoraggio

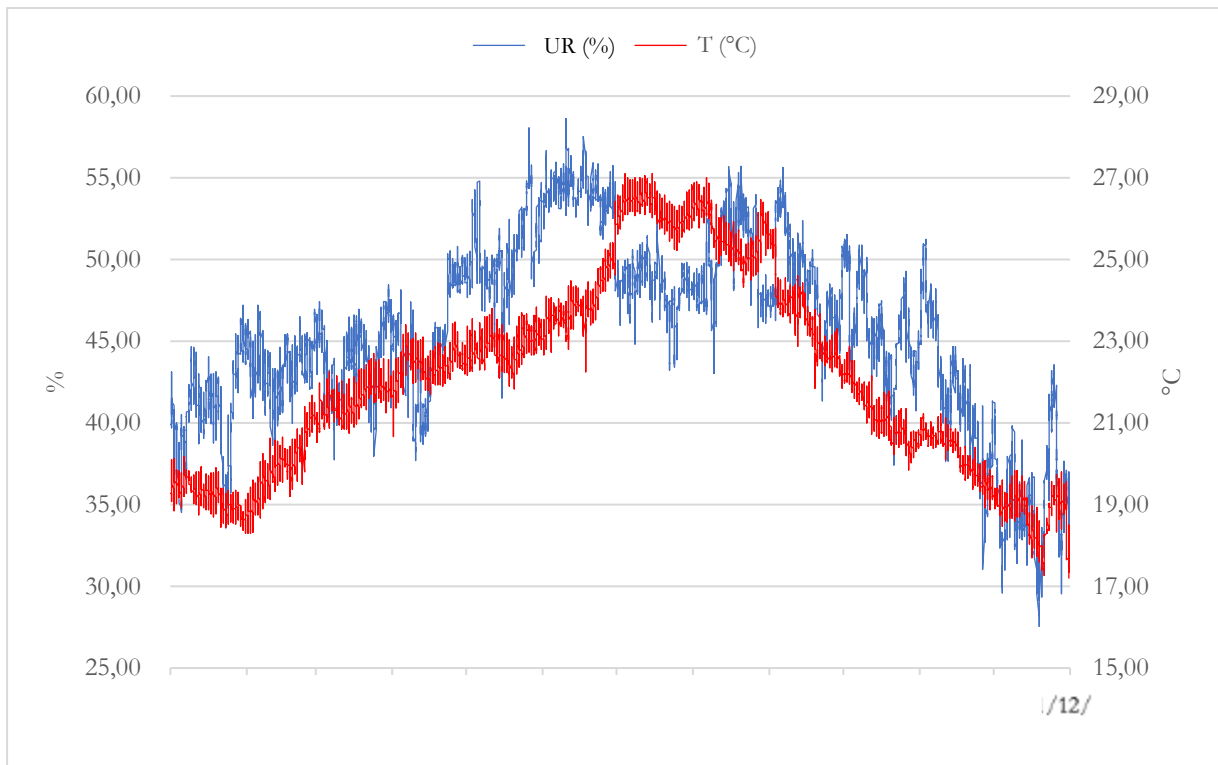


Grafico 15_Sala 33: anno-tipo

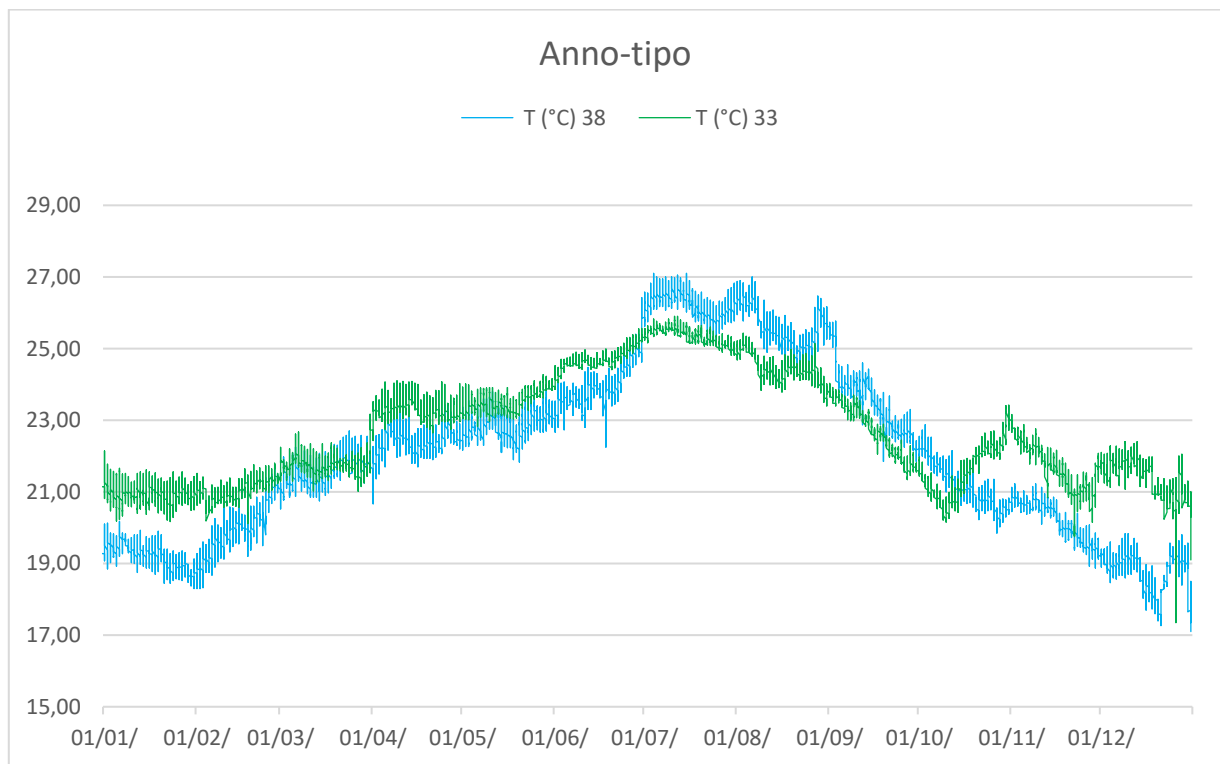


Grafico 16_Temperatura: confronto anno-tipo sala 33-38

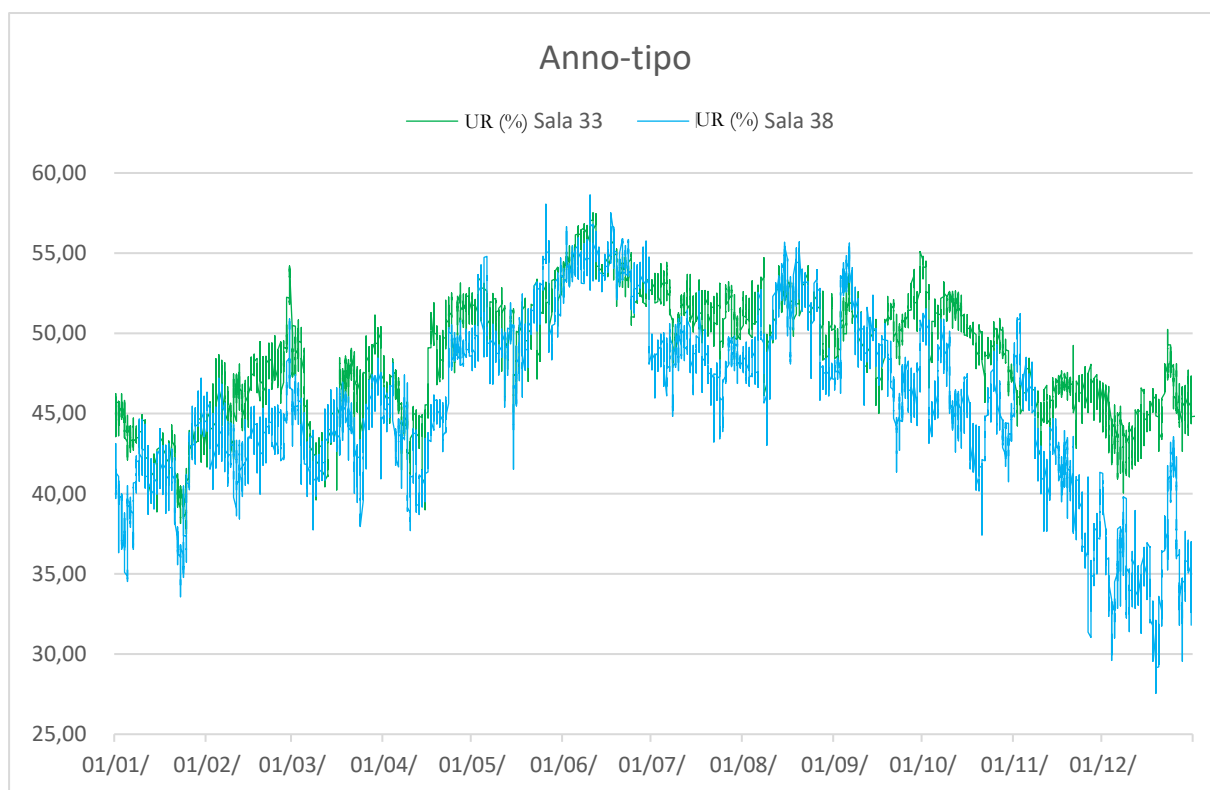


Grafico 17_Umidità relativa: confronto anno-tipo sala 33-38

Nonostante la sala 38 sia più esposta rispetto alla sala 33, gli anno-tipo delle due sale si presentano simili tra loro (Grafico 16 e 17), come anche i grafici commentati al paragrafo precedente. Dopo questa ulteriore conferma, dal momento che il confronto tra i dati delle due sale avrebbe dato risultati pressoché medesimi per l'una e l'altra e dunque di scarso interesse, si è deciso di proseguire con lo studio della sola sala 33. I dati del periodo di monitoraggio di cui disponiamo per la sala 33 arrivano fino al 2017 e non solo fino al 2011, come nel caso dei dati a disposizione per la sala 38.

3.4.2. Discussione dei risultati

Le temperature riportate dall'anno-tipo della sala 33 rientrano mediamente in un *range* compreso tra 20°C e 26°C; i dati dell'umidità relativa mostrano valori minimi leggermente inferiori al 40% e massimi leggermente superiori al 55%. Tali condizioni microclimatiche *indoor* sono garantite dall'attivazione degli impianti dalle ore 8:00 alle 18:00 durante tutto l'anno e risultano: 1. da una prima analisi interpretativa dei dati da parte dell'autore, in grado di garantire *comfort* termico a visitatori e lavoratori (per confermare questa ipotesi sono stati calcolati PMV e PPD¹⁴⁶ tramite una simulazione virtuale ai prossimi paragrafi 3.8.2. e 3.8.3.); 2. adeguate alla conservazione dei beni attualmente conservati all'interno della sala 33, basandosi su quanto indicato dagli standard di riferimento riportati dalla UNI 10829 e dal "Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei", redatto dal MIBAC. In riferimento a quest'ultimo punto (2.), grazie all'analisi dei dati della campagna di monitoraggio, si può dunque affermare che le collezioni all'interno della sala 33 risultano non essere esposte a rischio di danno legato alle condizioni microclimatiche *indoor*. Per avere un'ulteriore conferma

¹⁴⁶ Indici già presentati al paragrafo 1.7.2.

di quanto appena affermato, si specifica che al Capitolo IV sono stati applicati alla sala 33 gli indici di rischio elaborati dall'autore e dall'Arch. Kristian Fabbri in questa ricerca [10], verificando:

- l'indice di rischio microclimatico al quale è esposta la sala 33 (*Heritage Microclimate Risk* - HMR);
- l'indice di rischio di danno al quale sono esposte le singole opere ivi custodite (*Predicted Risk of Damage* - PRD).

3.5. Costruzione del modello virtuale dello stato di fatto (*Virtual Building 1*)

Come descritto al Capitolo II della presente ricerca, per poter effettuare simulazioni che ipotizzino scenari alternativi a quello attuale, è necessario realizzare una simulazione virtuale dello stato di fatto dell'ambiente indagato (in questo caso la sala 33) e validarla. Dunque, prima di procedere con la simulazione virtuale del microclima che si avrebbe nella sala 33 in caso di spegnimento degli impianti HVAC¹⁴⁷ e in caso di cambiamento climatico *outdoor*¹⁴⁸, è stato costruito il modello virtuale della sala 33, allo stato attuale (architettonico, climatico *outdoor*, impiantistico e gestionale) e poi validato con i dati dell'anno-tipo, derivanti dalla campagna di monitoraggio.

Il primo passaggio per la definizione del modello è stato il reperimento di alcune planimetrie, prospetti e sezioni della Reggia¹⁴⁹. Successivamente si è proceduto importando i disegni sul *software* SketchUp, che ha permesso di realizzare il modello tridimensionale della partizione della Reggia di nostro interesse.

La Figura 23 evidenzia in azzurro la porzione della Reggia all'interno della quale si trovano le sale 33 e 38 (Figura 24, in rosso), di cui ci sono stati forniti i suddetti dati del monitoraggio *indoor*.

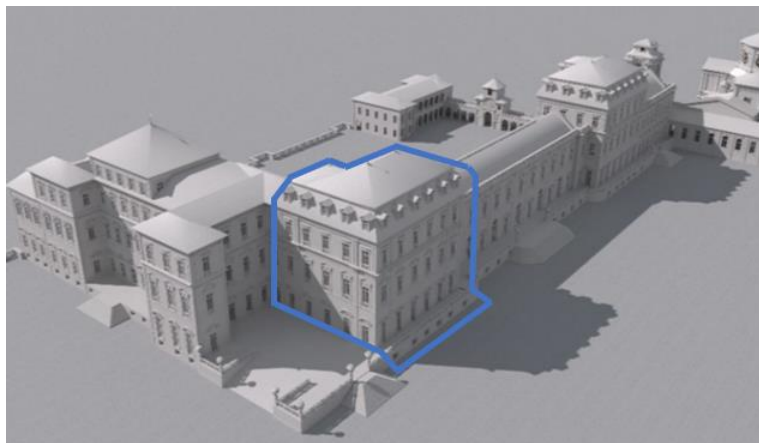


Figura 23_Modello della Reggia – 3D Studio Max¹⁵⁰

¹⁴⁷ Punto 2. delle finalità premesse al paragrafo 3.1.1.

¹⁴⁸ Punto 5. delle finalità premesse al paragrafo 3.1.1.

¹⁴⁹ Ciò è stato possibile grazie alla collaborazione del CC&R La Venaria Reale ed in particolar modo dell'architetto Vincenzo Scarano, che ha partecipato ai cantieri di restauro della Reggia. Vedi Apparati II e III.

¹⁵⁰ Registro delle immagini. p.268.

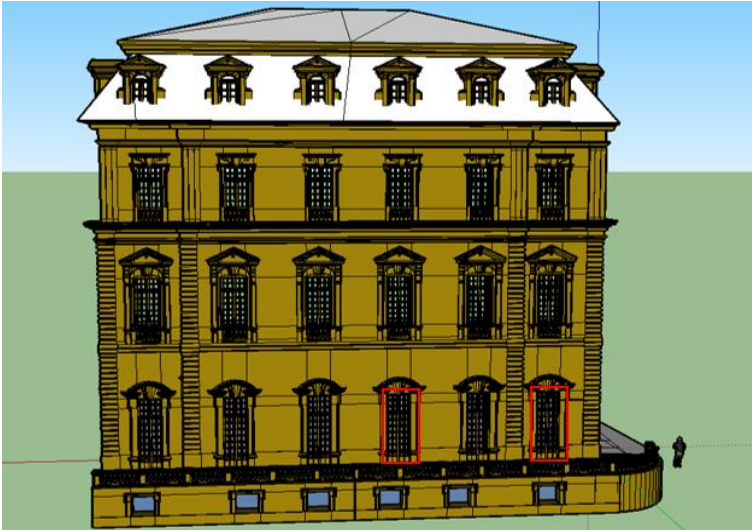


Figura 24_Es. modello di una partizione della Reggia - SketchUp¹⁵¹

L'immagine successiva mostra la fase di riconoscimento degli spazi disegnati in SketchUp, che precede il loro caricamento sul *software* di simulazione dinamica IES.VE, tramite l'ausilio di un *plug-in*: disegnare direttamente l'intero modello su IES.VE sarebbe stato un problema principalmente per la rappresentazione dei soffitti a volta¹⁵².

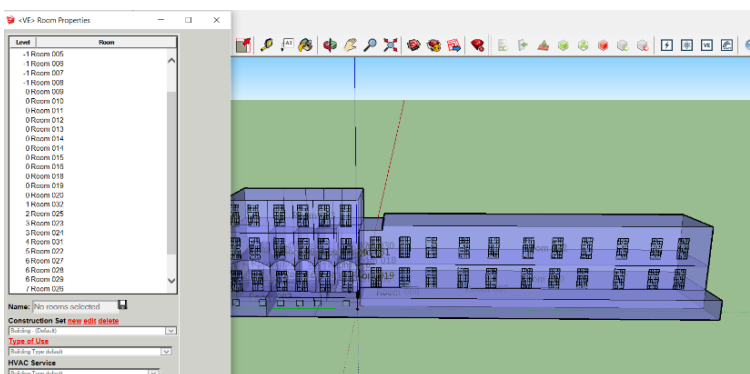


Figura 25_Es. riconoscimento delle geometrie tramite *plug-in* - SketchUp¹⁵³

Una volta che gli ambienti del modello sono stati correttamente “tradotti” e riconosciuti dal *software*, è stato possibile aggiungere alcuni elementi architettonici disegnando direttamente da IES.VE (es. aggiunta dei tetti: Figura 26).

¹⁵¹ Registro delle immagini. p.268.

¹⁵² Come nella maggior parte dei *software* di simulazione dinamica (vedi anche *Design Builder*), su IES.VE non è possibile riportare linee curve.

¹⁵³ Ibidem.

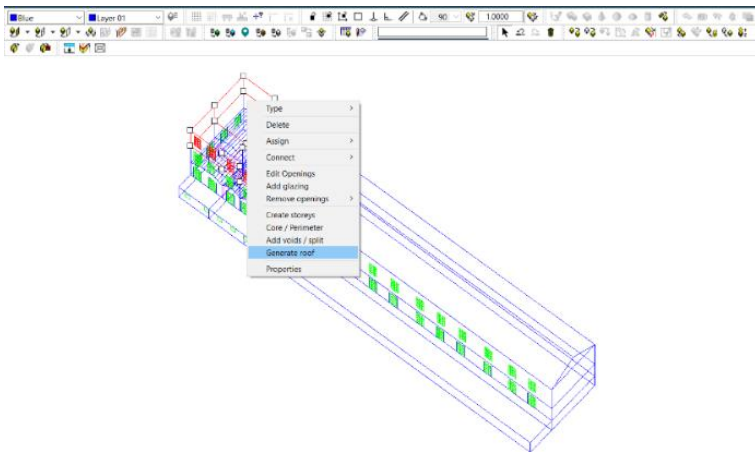


Figura 26_Reggia di Venaria Reale: base del modello, IES.VE¹⁵⁴

Il modello virtuale si presenta, dal punto di vista estetico, come un modello semplificato della fabbrica originale (es. Figura 27).

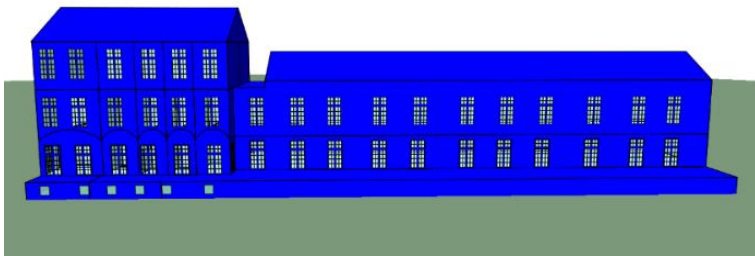


Figura 27_Es. modello della Reggia di Venaria IES.VE¹⁵⁵

Su IES.VE sono state definite una serie di informazioni inerenti a tutti quei fattori che incidono sul microclima *indoor*, tra cui: le coordinate geografiche, i dati climatici *outdoor*, la presenza di protocolli definiti per la gestione dell'apertura e chiusura di porte e finestre, ecc. per fare sì che i parametri del microclima *indoor* simulato tramite il modello possano coincidere con quelli reali, monitorati dal CC&R. Per quanto concerne la variabile geografica e i dati climatici *outdoor*, non essendoci Venaria Reale tra le località disponibili su IES.VE, con relative informazioni climatiche e geografiche, è stato selezionato Torino Bric Della Croce, i cui dati di latitudine e longitudine si discostano di poco rispetto a quelli di Venaria¹⁵⁶. Inoltre, dal momento che l'ambiente indagato è una sala espositiva della Reggia, è stata selezionata l'opzione "*library, museum or gallery*", per definire la destinazione d'uso della sala 33. Infine, si è proceduto con la definizione delle informazioni relative ai materiali e agli spessori che compongono l'intero edificio.

¹⁵⁴ Registro delle immagini. p.268.

¹⁵⁵ Ibidem.

¹⁵⁶ Venaria Reale: 45°7' N, 7°38' E; Torino Bric Della Croce: 45°03' N, 7°73' E.

3.5.1. Errori e semplificazioni adottate

Nonostante la collaborazione e la disponibilità del CC&R, non è stato possibile reperire documentazione dettagliata riguardo ai materiali che compongono la fabbrica (es. stratificazione precisa delle pareti)¹⁵⁷. Come è ovvio, trovandoci in un edificio storico dichiarato Patrimonio dell'Umanità dall'Unesco dal 1997, non è stato possibile effettuare personalmente analisi stratigrafiche approfondite *in situ*. Dunque, come suggerito anche da alcuni architetti che hanno partecipato ai restauri che hanno coinvolto la Reggia di Venaria Reale tra il 2001 e il 2007, le informazioni stratigrafiche inserite per la costruzione del modello virtuale, corrispondono ad una muratura a sacco con paramenti in mattoni.

3.6. Validazione del *Virtual Building 1*

Grazie alla costruzione del modello virtuale dello stato di fatto, sono state simulate le condizioni reali della sala 33: è stata effettuata una simulazione termodinamica con il *software* IES.VE, su un arco temporale di un intero anno. I dati di Temperatura e Umidità Relativa ottenuti dalla simulazione sono stati confrontati con quelli dell'anno-tipo e il modello risulta validato.

La validazione della simulazione virtuale della temperatura dell'aria *indoor*, riporta una forte correlazione tra dati simulati e anno-tipo (Tabella 11).

Tabella 11. Validazione parametri ASHRAE¹⁵⁸ - Temperatura

MBE (%)	-0,28%	Validato se <10%
CV (RMSE) (%)	3%	Validato se <30%
PEARSON	0,90	Validato se: >0,7 (forte correlazione); 0,3-0,7 (correlazione); <0,3 (debole correlazione)
R ²	0,82	Validato se >0,5

Il grafico che otteniamo mettendo sull'asse x i dati misurati (anno-tipo) e sull'asse y i dati simulati è il seguente (Grafico 18), su cui si riporta la retta di taratura R².

¹⁵⁷ Tali informazioni non erano presenti sui disegni tecnici forniti e tantomeno nei documenti redatti in fase di analisi diagnostica e conservati in Reggia.

¹⁵⁸ Parametri già definiti al paragrafo 2.6.

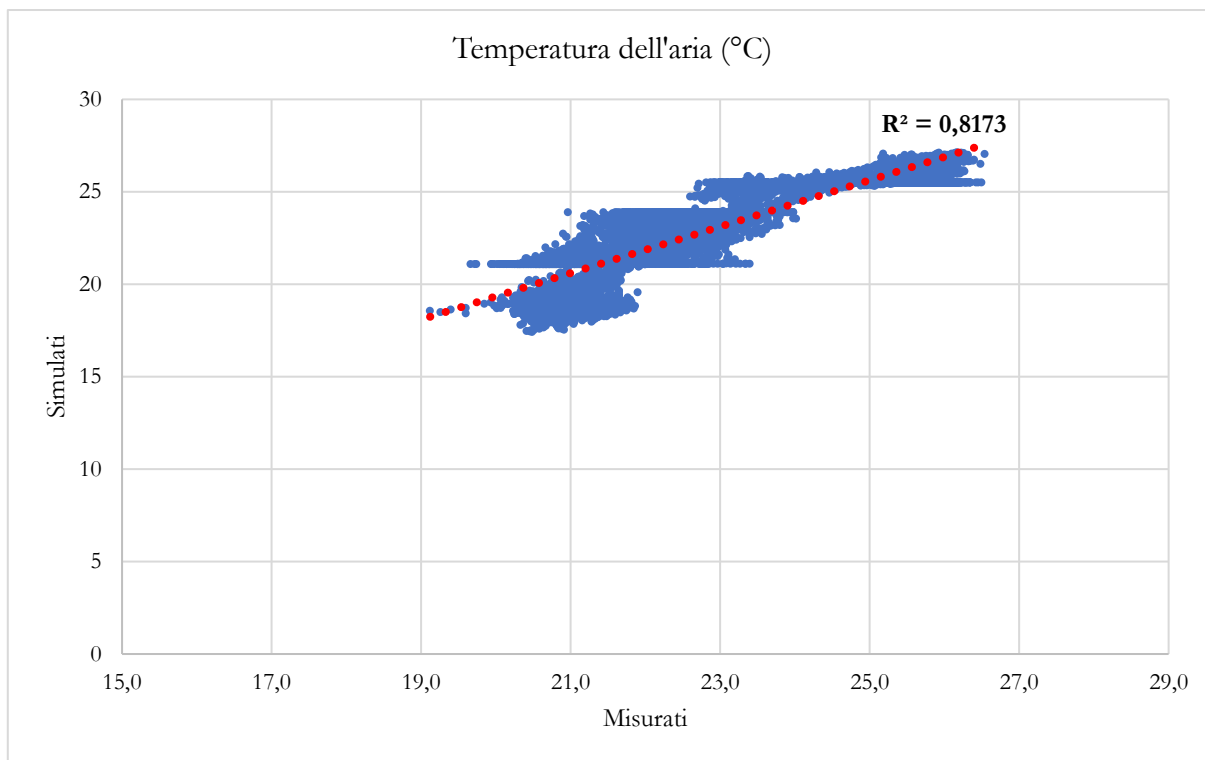


Grafico 18_ Sala 33: validazione temperatura - parametro R²

Di seguito alcuni esempi puntuali della validazione della temperatura dell'aria all'interno della sala 33¹⁵⁹.

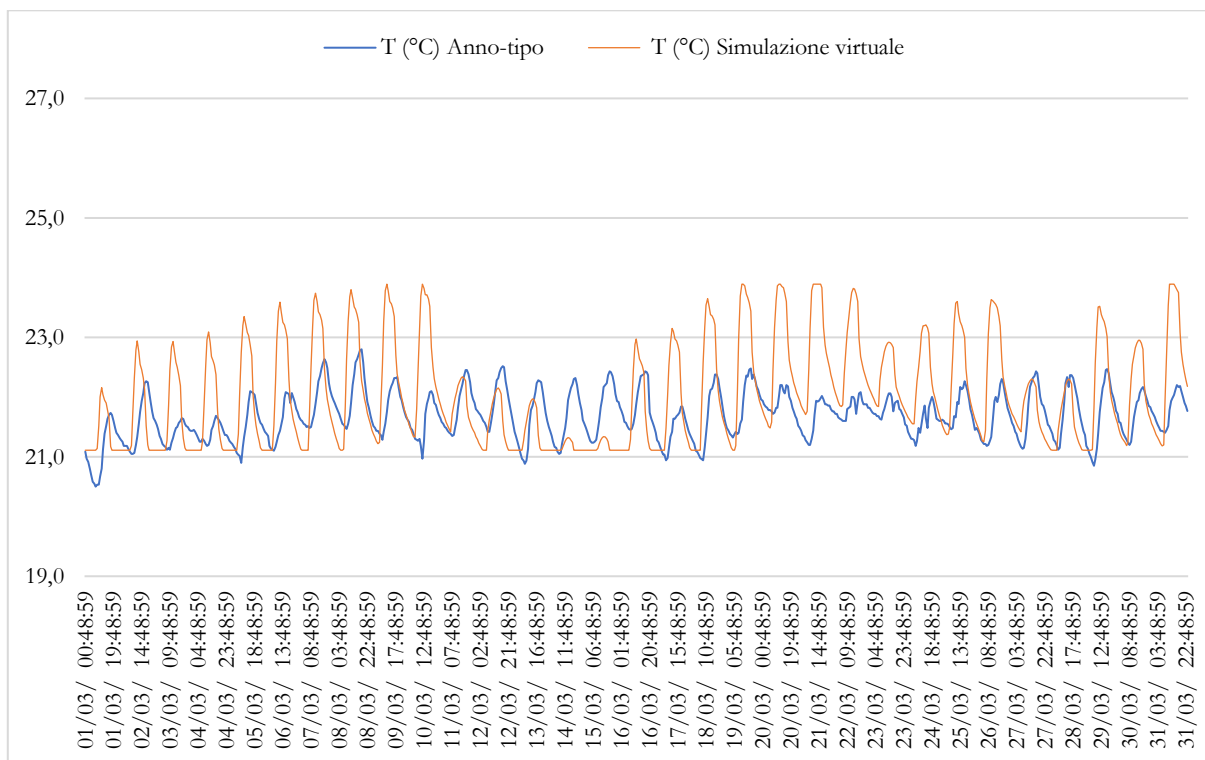


Grafico 19_ Validazione temperatura: estrapolazione del mese di Marzo

Periodo monitoraggio: 1 Marzo – 31 Marzo.

¹⁵⁹ Si specifica che non si riporta il grafico dell'intero anno simulato comparato con l'intero anno-tipo, per una più facile lettura del grafico.

Ambiente monitorato: Sala 33, Reggia di Venaria Reale, Torino, Italia.

Impianti: Impianti di climatizzazione attivi.

Parametri misurati: Temperatura dell'aria *indoor*.

Errori di misurazione: -

Valori registrati: Range T: 20,5°C - 23,78°C.

Considerazioni: Sin da una prima analisi dei valori ottenuti, si riscontra la coincidenza dell'andamento delle due tendenze. Risulta però evidente la differenza delle escursioni giornaliere delle temperature: le escursioni termiche giornaliere registrate dalla simulazione virtuale risultano essere più elevate rispetto a quelle restituite dal *trend* dell'anno-tipo. Ciò accade poiché IES.VE, in fase di simulazione termica, non considera le escursioni termiche giornaliere, ma tiene unicamente conto della media dei valori medi massimi e minimi del clima *outdoor* registrati ogni mese.

Per analizzare nel dettaglio le discrepanze legate all'escursione termica giornaliera, si riporta nei prossimi due grafici un focus ancora più mirato: l'estrapolazione dei dati di una sola settimana e di un solo giorno, all'interno dello stesso mese: marzo.

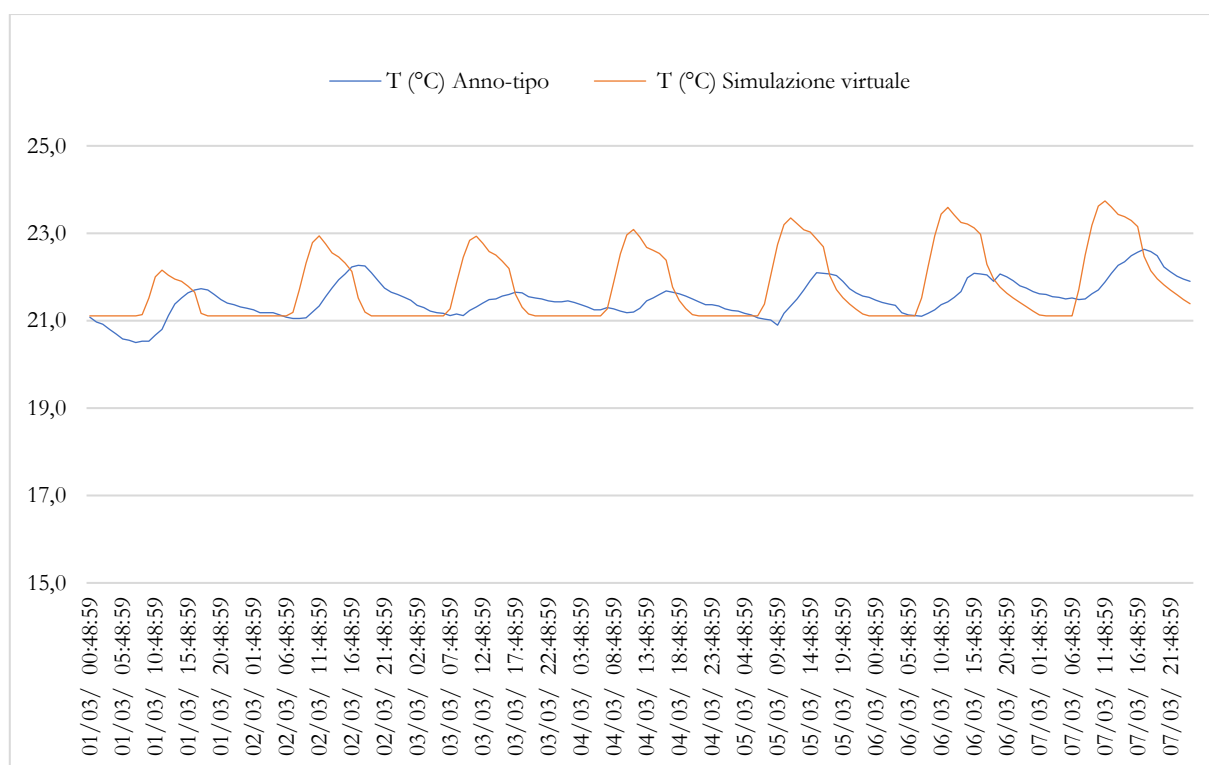


Grafico 20_Validazione temperatura: estrapolazione di una settimana

Periodo monitoraggio: 1 Marzo – 7 Marzo.

Ambiente monitorato: Sala 33, Reggia di Venaria Reale, Torino, Italia.

Impianti: Impianti di climatizzazione attivi.

Parametri misurati: Temperatura dell'aria *indoor*.

Errori di misurazione: -

Valori registrati: *Range T*: 20,5°C - 23,43°C.

Considerazioni: I dati settimanali riportati in questo grafico evidenziano che in alcune giornate vi è una discrepanza legata al calcolo dell'escursione termica. Tra il dato simulato ed il corrispettivo dato dell'anno-tipo, in questa specifica settimana di marzo, il delta massimo è di circa 1,05°C.

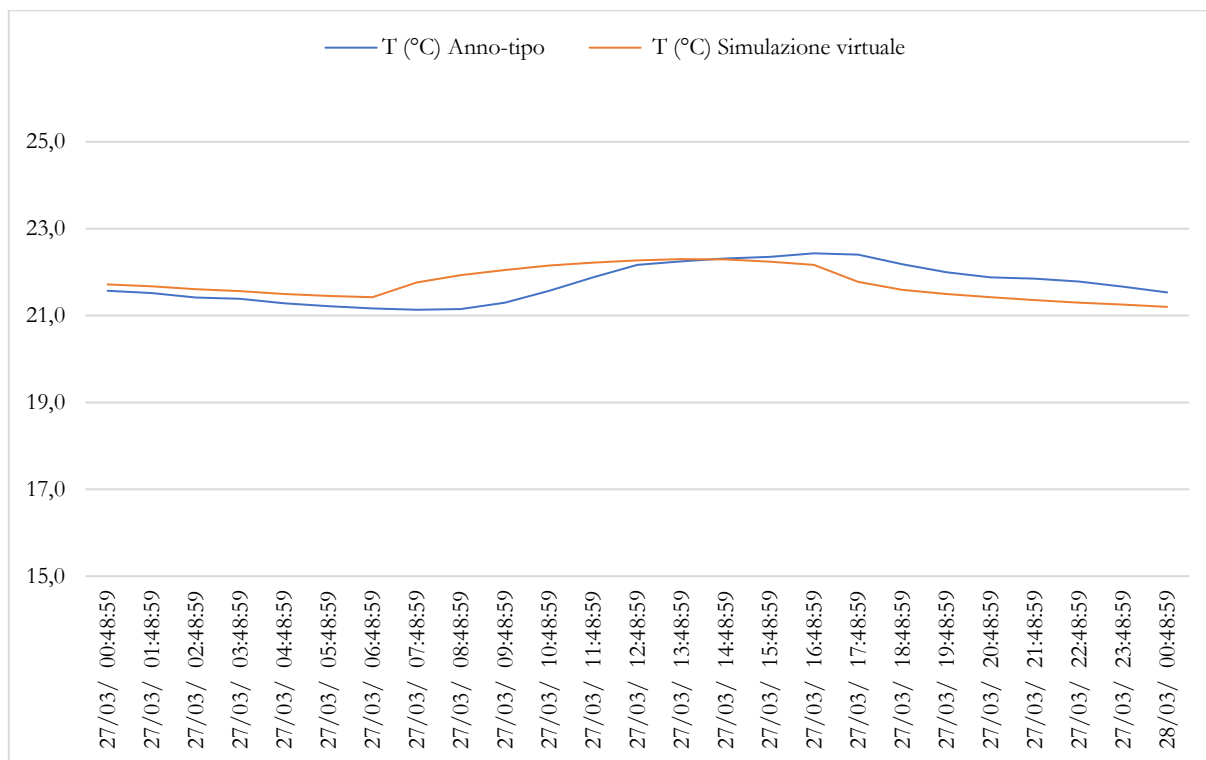


Grafico 21_Validazione temperatura: estrapolazione di un giorno

Periodo monitoraggio: 27 Marzo – 28 Marzo.

Ambiente monitorato: Sala 33, Reggia di Venaria Reale, Torino, Italia.

Impianti: Impianti di climatizzazione attivi.

Parametri misurati: Temperatura dell'aria *indoor*.

Errori di misurazione: -

Valori registrati: *Range T*: 21,2°C – 22,4°C.

Considerazioni: In questa giornata, estratta con criterio casuale dal mese di marzo, si nota ancora una volta come l'andamento dei dati sia estremamente coincidente e come il dato simulato si discosti leggermente da quello dell'anno-tipo, in questo specifico caso, principalmente nelle ore diurne: dalle 8 alle 12 circa. Il delta massimo rilevato in questa giornata è di 0,91°C.

Il modello si conferma validato per il parametro T.

I valori ottenuti dalla comparazione tra i dati di umidità relativa dell'anno-tipo ed i dati di umidità relativa simulati su un anno con IES.VE mostrano correlazione e rientrano nei parametri della *Guideline 14* ASHRAE [11] (Tabella 12).

Tabella 12. Validazione parametri ASHRAE - Umidità Relativa

MBE (%)	-7,85%	Validato se <10%
CV (RMSE) (%)	23%	Validato se <30%
PEARSON	0,72	Validato se: >0,7 (forte correlazione); 0,3-0,7 (correlazione); <0,3 (debole correlazione)
R ²	0,53	Validato se >0,5

Il grafico che segue riporta: sull'asse x i dati misurati (anno-tipo) e sull'asse y i dati simulati. In nero la retta di taratura R².

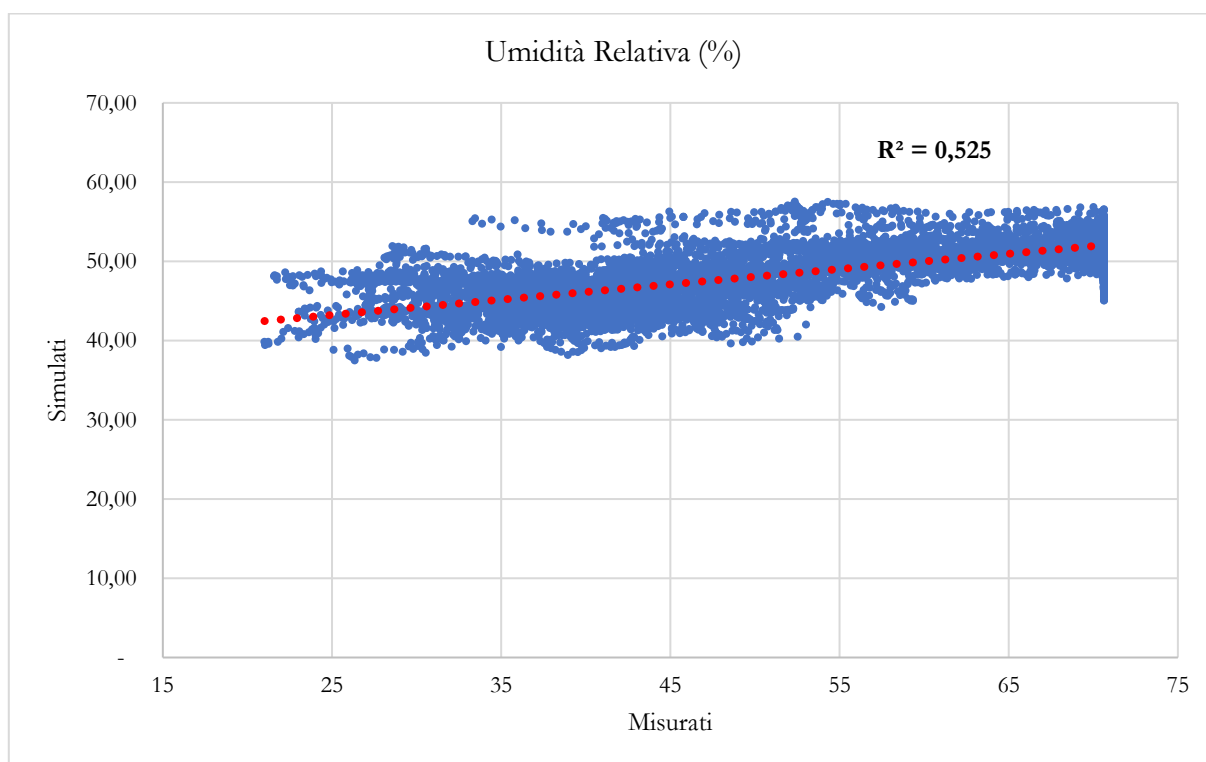


Grafico 22_ Sala 33: validazione umidità relativa - parametro R²

Nei grafici seguenti si riportano due esempi: un focus sul confronto tra i dati di umidità relativa dell'anno-tipo e i dati simulati per una settimana (Grafico 23) e uno su un periodo di soli tre giorni (Grafico 24). Queste restituzioni ci permettono di prendere chiaramente visione delle tendenze dei dati e di quelle che sono le correlazioni e le discrepanze tra i valori riportati.

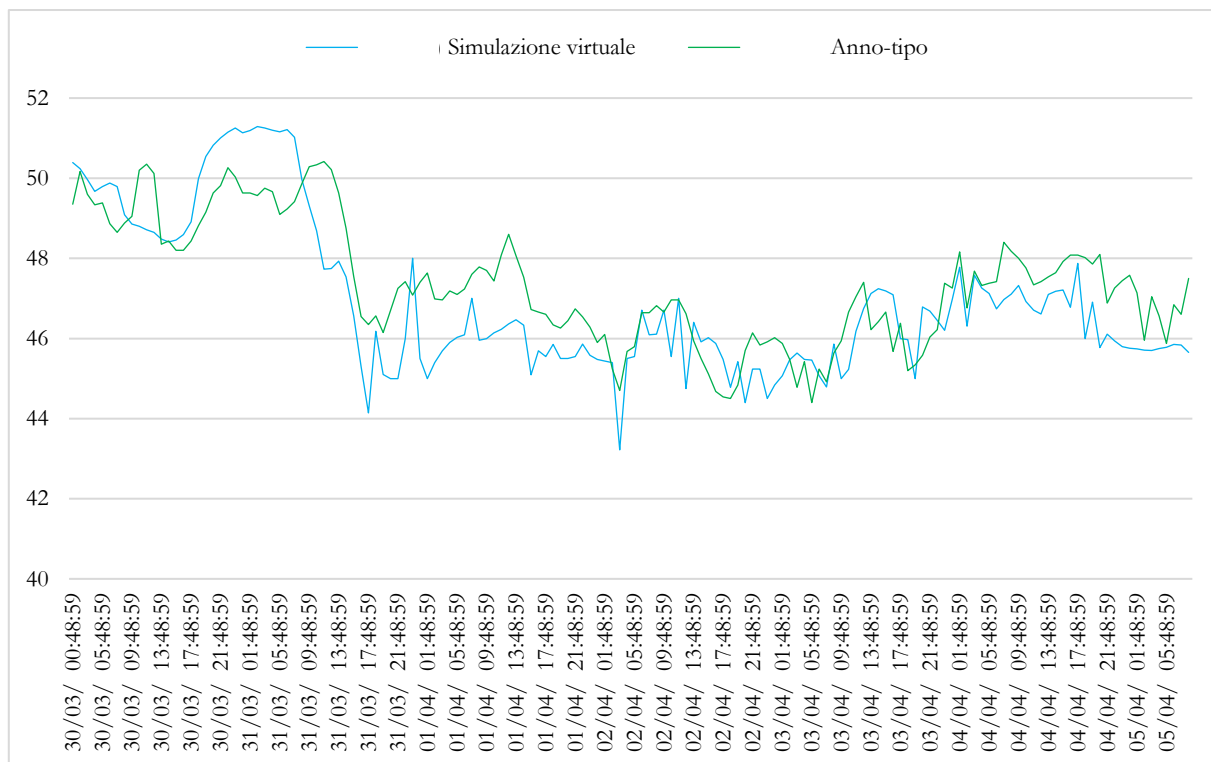


Grafico 23_ Validazione umidità relativa: estrapolazione di una settimana

Periodo monitoraggio: 30 Marzo – 5 Aprile.

Ambiente monitorato: Sala 33, Reggia di Venaria Reale, Torino, Italia.

Impianti: Impianti di climatizzazione attivi.

Parametri misurati: Umidità relativa.

Errori di misurazione: -

Valori registrati: Range UR: 40,35% – 53,18%.

Considerazioni: Il grafico riporta i dati settimanali dell'umidità relativa della sala 33, risultanti dalla simulazione di IES.VE, comparati con i dati dell'anno-tipo. L'andamento delle due tendenze è coincidente, nonostante si registrino degli sbalzi giornalieri -del dato simulato- più accentuati rispetto a quelli monitorati.

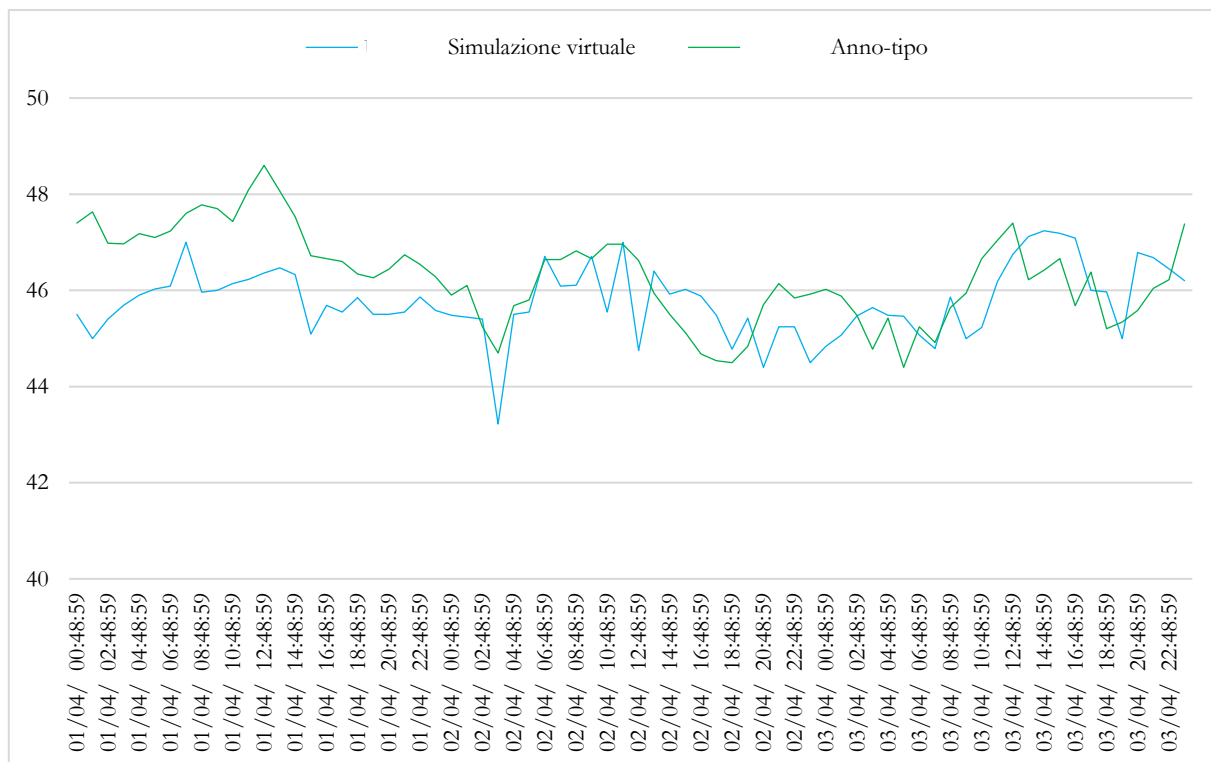


Grafico 24_Validatione temperatura: estrapolazione di tre giorni

Periodo monitoraggio: 1 Aprile – 3 Aprile.

Ambiente monitorato: Sala 33, Reggia di Venaria Reale, Torino, Italia.

Impianti: Impianti di climatizzazione attivi.

Parametri misurati: Umidità relativa.

Errori di misurazione: -

Valori registrati: Range UR: 43,1% – 51,29%.

Considerazioni: Un ulteriore zoom sul dato dell'umidità relativa, concentrato in questo caso su soli tre giorni -includendo la data del 2/04 poiché dal grafico precedente rivelava la differenza massima tra dato dell'anno-tipo e dato simulato-, mostra nuovamente una discreta coincidenza della tendenza dei dati. Si sottolinea che il dato simulato si discosta dal dato dell'anno-tipo fino a un delta massimo pari circa al 6%.

Si conferma che anche i valori simulati dell'umidità relativa sono stati validati: a questo punto si può procedere con la costruzione virtuale di scenari alternativi a quello reale, modificando una o più variabili che definiscono il modello.

3.7. Scenario virtuale – HVAC off (*Virtual Building 2*)

Il *Virtual Building 2*, presentato di seguito, ipotizza una specifica modifica alla gestione attuale degli impianti HVAC all'interno della sala 33 di Venaria Reale: è stato simulato il microclima *indoor* di questa sala supponendo lo spegnimento di tali impianti per un intero anno.

3.7.1. Simulazione termodinamica

La simulazione termodinamica del *Virtual Building 2* ha restituito i seguenti risultati per Temperatura e Umidità Relativa:

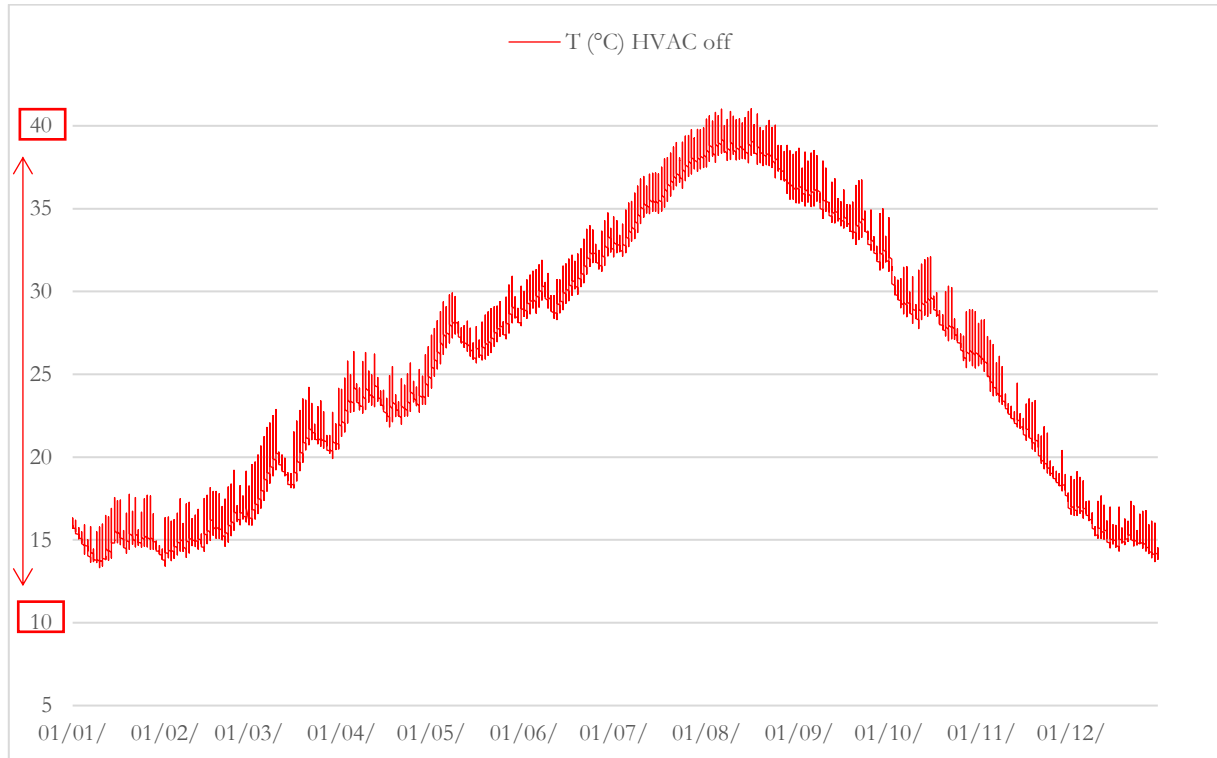


Grafico 25_ *Virtual Building 2*: temperatura - HVAC OFF

Periodo monitoraggio: 1 Gennaio – 31 Dicembre.

Ambiente monitorato: Sala 33, Reggia di Venaria Reale, Torino, Italia.

Impianti: Impianti di climatizzazione non attivi.

Parametri misurati: Temperatura dell'aria *indoor*.

Errori di misurazione: -

Valori registrati: *Range T*: 13°C – 40°C.

Considerazioni: La simulazione virtuale restituisce una serie di dati, da cui è possibile creare il presente grafico in Excel. Il grafico evidenzia interi periodi in cui si registrano valori della temperatura dell'aria *indoor* inferiori ai 20°C: da gennaio fino a metà marzo e dagli ultimi dieci giorni di novembre fino a fine dicembre. In questo periodo il dato della temperatura si aggira attorno ai 15°C circa: lontano dagli standard suggeriti per la conservazione del Patrimonio ed altrettanto distanti dagli standard di *comfort* termico a cui siamo abituati ad oggi. Nonostante ciò, considerando che le condizioni interne sono state simulate ipotizzando l'assenza del sistema di riscaldamento durante l'inverno, il risultato

ottenuto durante il periodo invernale mostra una discreta efficienza dell'involucro nel trattenere calore. Da metà giugno sino ad ottobre le temperature *indoor* superano i 30°C. Anche in questo periodo dell'anno, dunque, le condizioni microclimatiche *indoor* risultano al di fuori degli standard consigliati dalla normativa per la conservazione dei beni conservati nella sala 33, così come appaiono inadatte anche per quanto concerne il *comfort* termico delle persone. Infine, sono stati calcolati gli sbalzi termici giornalieri, che risultano contenuti: variano da un minimo di 1°C ad un massimo di 2,6°C circa, sia nel periodo estivo sia in quello invernale.

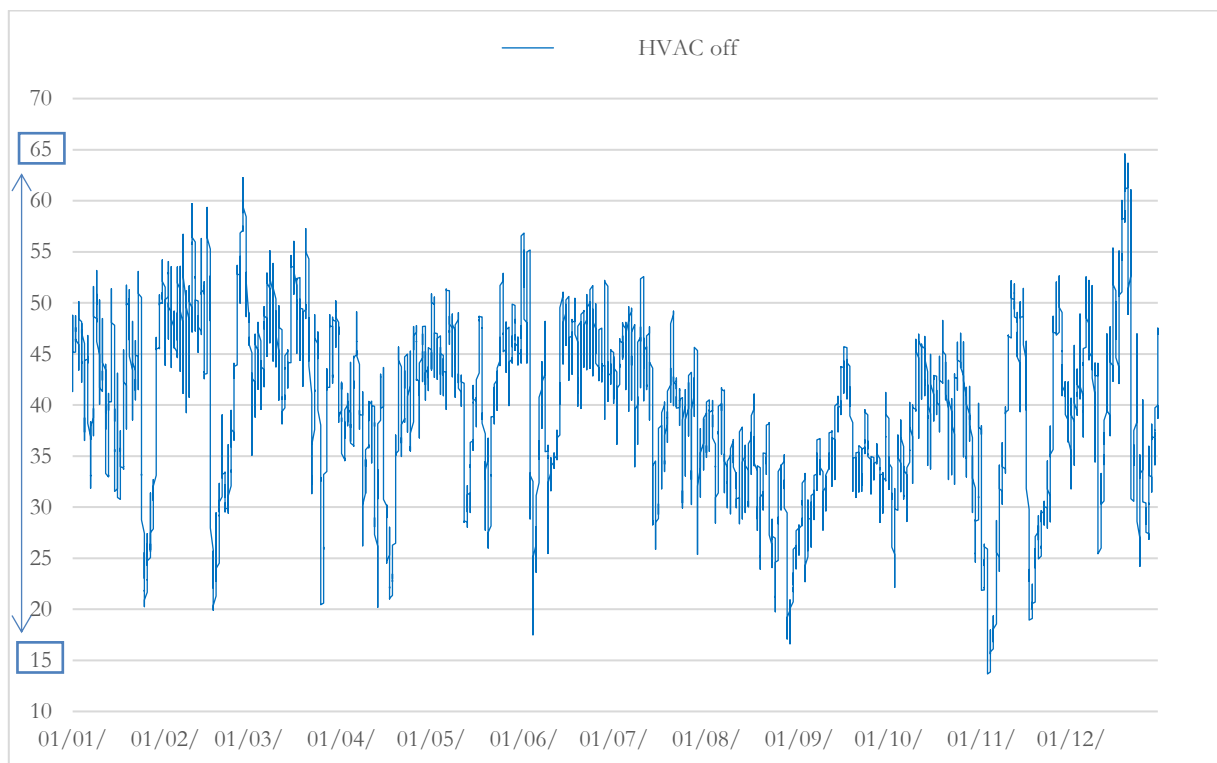


Grafico 26_ *Virtual Building 2*: umidità relativa - HVAC OFF

Periodo monitoraggio: 1 Gennaio – 31 Dicembre.

Ambiente monitorato: Sala 33, Reggia di Venaria Reale, Torino, Italia.

Impianti: Impianti di climatizzazione non attivi.

Parametri misurati: Temperatura dell'aria *indoor*.

Errori di misurazione: -

Valori registrati: *Range T*: 20°C – 65°C.

Considerazioni: L'umidità relativa simulata riporta dei picchi massimi di UR fino a valori pari al 65% circa e picchi minimi inferiori al 20%. Da gennaio fino alla fine di marzo la maggior parte dei valori registrati oscilla tra il 35% e il 55%; da aprile fino a fine luglio, invece, il *range* va da 25% a 50% circa; da agosto fino ai primi di ottobre si registra un calo

dell'umidità relativa, con valori che oscillano tra il 20% e il 40%; successivamente, fino alla fine del mese di dicembre, il *range* si allarga progressivamente fino a superare il 60% nelle giornate del 20 e 21 dicembre. La simulazione virtuale rivela dunque che senza impianti di condizionamento e ventilazione dell'aria le caratteristiche architettonico-costruttive della Reggia garantirebbero all'interno della sala 33, su un periodo pari ad un anno, delle condizioni di umidità relativa perlopiù comprese tra il 35% e il 55%; il periodo durante il quale i beni conservati risulterebbero maggiormente a rischio è quello compreso tra agosto e ottobre, in cui si riportano valori tipici di un ambiente secco: tra il 20% e il 40% di umidità relativa.

3.7.2. Discussione dei risultati

La simulazione termodinamica del *Virtual Building 2* ha permesso di verificare che se gli impianti fossero inattivi l'edificio non garantirebbe, durante un intero anno -in particolare nei periodi estivi-, condizioni microclimatiche in linea con gli standard previsti dal MIBAC e dalla UNI 10829:1999 per la conservazione delle opere attualmente custodite nella sala 33. Inoltre, i parametri microclimatici *indoor* risultanti dalla simulazione, lasciano presupporre che ne risentirebbe anche il *comfort* termico dei visitatori¹⁶⁰.

Questi risultati sono la conseguenza delle scelte architettoniche adottate in fase di restauro: con il progetto di restauro della Reggia di Venaria Reale avviato nel 2001, si è deciso di affidare sin da subito la funzione di controllo del microclima ai sistemi di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria, non più alle caratteristiche formali e costruttive dell'edificio.

3.8. Confronto dei risultati: simulazioni dei *Virtual Building 1 - 2*

Le simulazioni del *Virtual Building 1* -che riporta i dati microclimatici della sala 33 allo stato attuale- e del *Virtual Building 2* -scenario in cui si ipotizza l'inattivazione degli impianti di climatizzazione-, hanno permesso di mettere a confronto i risultati emersi da analisi mirate su: *comfort* termico (PMV e PPD) e distribuzione della temperatura dell'aria all'interno della sala 33, nei due differenti scenari.

Tali analisi sono state svolte utilizzando ancora una volta il *software* di simulazione dinamica IES.VE, accedendo alla sezione "*Microflo CFD*¹⁶¹". Il programma restituisce informazioni tramite dati, immagini e video, in merito alla velocità dei fluidi, alla temperatura, alla pressione, al presunto *comfort* dei visitatori ecc., all'interno di un ambiente o di più ambienti virtuali collegati tra loro.

Le simulazioni CFD sono state effettuate, sia per il *Virtual Building 1* sia per il *Virtual Building 2*, in una giornata particolarmente fredda (30 dicembre) e in una giornata particolarmente calda (3 agosto). Inoltre, le simulazioni sono state eseguite durante l'orario di apertura della Reggia al pubblico, compreso tra le

¹⁶⁰ Ipotesi confermata ai paragrafi 3.8.2. e 3.8.3.

¹⁶¹ *Computational Fluid Dynamics*. Traduzione: Fluidodinamica Computazionale

9.00 e le 18.00. In questo modo ha avuto senso valutare anche i valori di PMV e PPD, che ci permettono di verificare il *comfort* dei visitatori.

Gli *output* delle simulazioni restituiscono informazioni riguardo ai seguenti parametri:

- temperature dell'aria;
- PMV;
- PPD.

Per procedere con le simulazioni relative al *comfort*, sono state definite alcune specifiche in merito al vestiario e alla tipologia di attività svolta dagli utenti in fase di visita: sia per il periodo estivo sia per quello invernale si considera un livello di attività molto leggero, pari a $69,8 \text{ W/m}^2$ ¹⁶². Al periodo invernale è stato associato un abbigliamento pesante indossato dai visitatori, mentre al periodo estivo un abbigliamento leggero.

Le immagini che seguono riportano i risultati dei parametri anticipati, generate sull'asse x, all'interno della sala 33, ad un'altezza di circa 1m dal pavimento. Sono stati inoltre realizzati diversi video che studiano l'andamento dei medesimi parametri sull'asse x,y,z.

3.8.1. Temperatura dell'aria

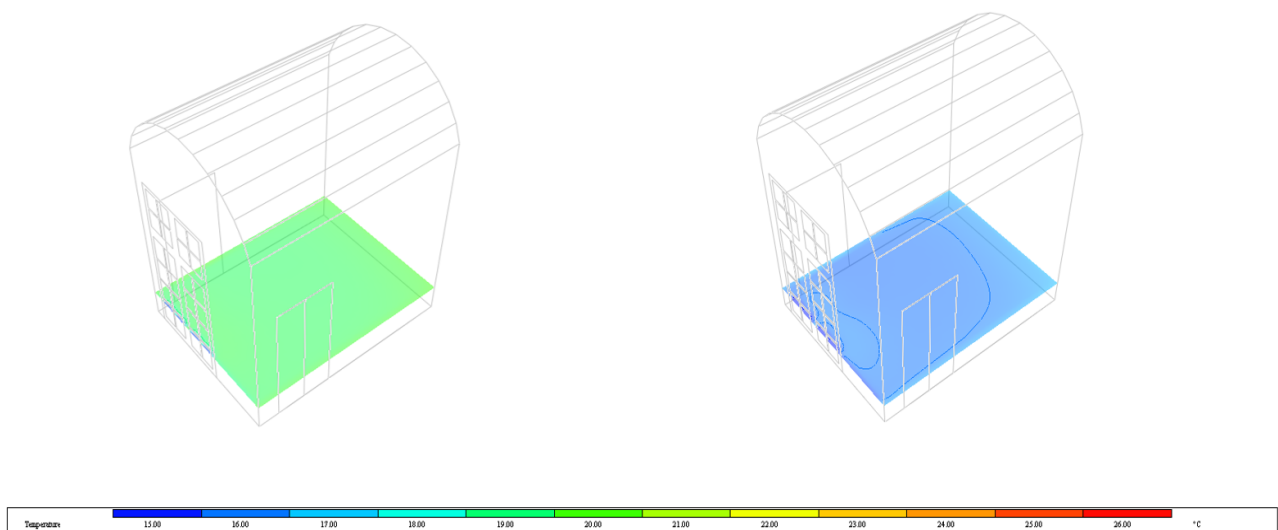


Figura 28_Temperatura dell'aria *indoor* – giornata invernale: *Virtual Building 1* (a sinistra), *Virtual Building 2* (a destra)¹⁶³

¹⁶² Bioritmo metabolico di una persona che svolge un'attività.

¹⁶³ Registro delle immagini. p.268.

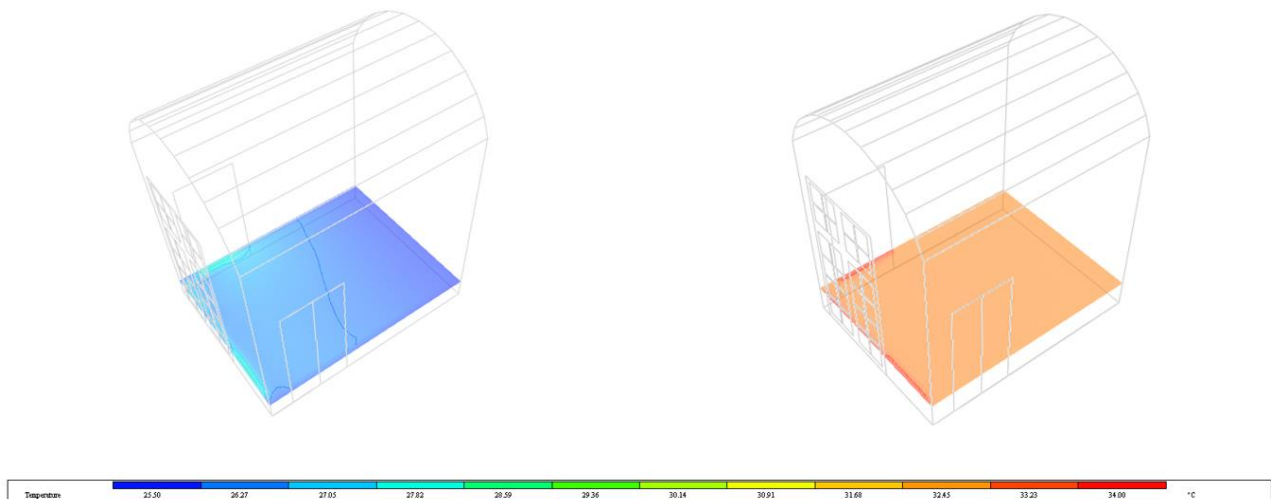


Figura 29_Temperatura dell'aria *indoor* – giornata estiva: *Virtual Building 1* (a sinistra), *Virtual Building 2* (a destra)¹⁶⁴

Durante la giornata invernale considerata (30 dicembre) le simulazioni riportano temperature interne attorno ai 20 °C per il *Virtual Building 1*; dai risultati ottenuti dal *Virtual Building 2* emerge che nella medesima giornata, in assenza di sistemi HVAC, l'edificio garantirebbe temperature tra i e tra i 16 °C e i 17 °C. La giornata estiva simulata (3 agosto) registra temperature interne attorno ai 27 °C per il *Virtual Building 1* e tra i 32 °C e i 33 °C per il *Virtual Building 2*.

3.8.2. PMV

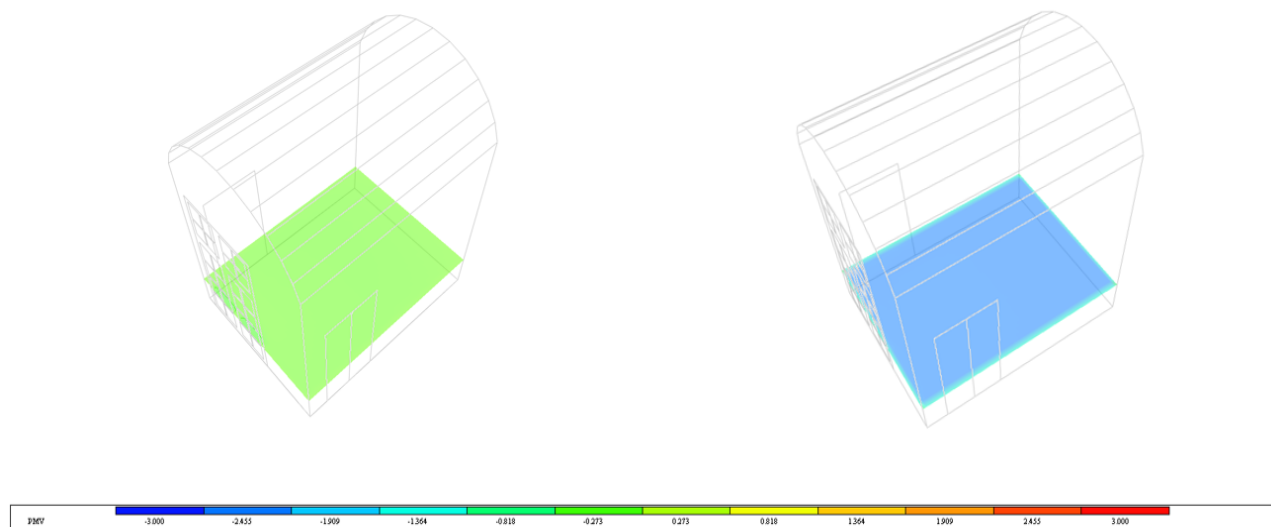


Figura 30_PMV – giornata invernale: *Virtual Building 1* (a sinistra), *Virtual Building 2* (a destra)¹⁶⁵

¹⁶⁴ Registro delle immagini. p.268.

¹⁶⁵ Ibidem.

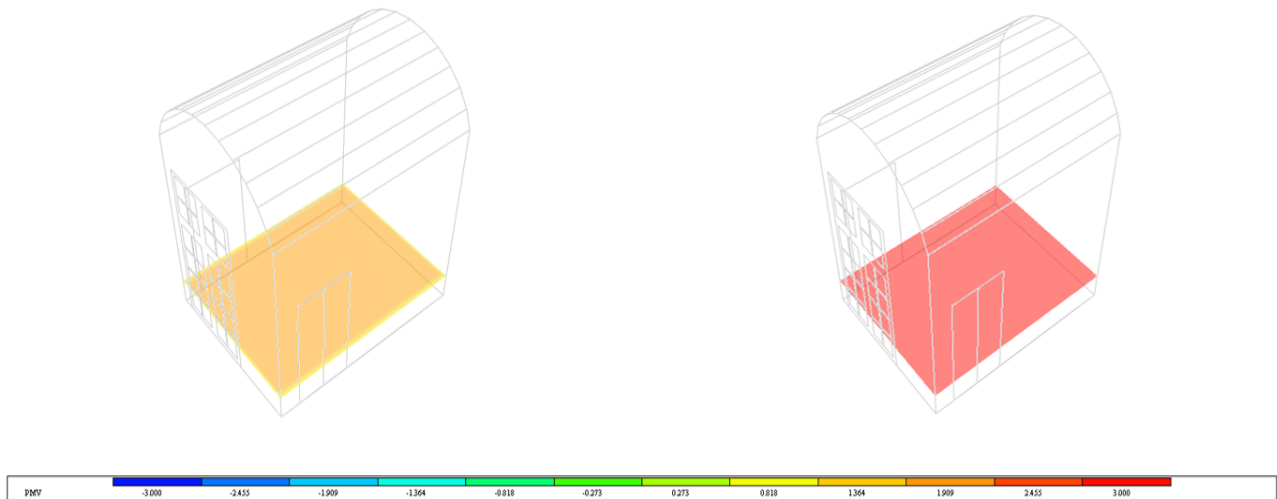


Figura 31_PMV – giornata estiva: *Virtual Building 1* (a sinistra), *Virtual Building 2* (a destra)¹⁶⁶

Si ricorda¹⁶⁷ che un PMV pari a -3 indica un ambiente percepito dagli occupanti come molto freddo; +3 corrisponde ad una percezione di caldo eccessivo; infine, i valori compresi tra -0,5 e +0,5 sono invece indicatori di *comfort* termico ottimale. Il valore medio di sensazione termica (PMV) emerso dalle simulazioni soprastanti risulta essere migliore nel *Virtual Building 1*, nella giornata invernale ed in quella estiva considerate. In inverno il PMV registrato per il *Virtual Building 1* riporta un indice *comfort* termico ottimale, compreso tra -0,273 e +0,273; mentre la simulazione del *Virtual Building 2* restituisce una sensazione termica più sfavorevole: PMV pari a -1,909. In estate il *Virtual Building 1* registra un ambiente percepito come leggermente caldo (PMV= 1,264 circa); il *Virtual Building 2* riporta anche in questo caso una condizione di maggiore *discomfort* rispetto al *Virtual Building 1*: PMV= 2,455, che corrisponde a una sensazione termica di caldo eccessivo da parte di visitatori.

Questi risultati risultano essere coerenti con i dati emersi dalle simulazioni relative al parametro della temperatura e con l'indice PPD, che indica la percentuale di *discomfort* percepito dagli occupanti.

¹⁶⁶ Registro delle immagini. p.268.

¹⁶⁷ Cfr. paragrafo 1.7.2.

3.8.3. PPD

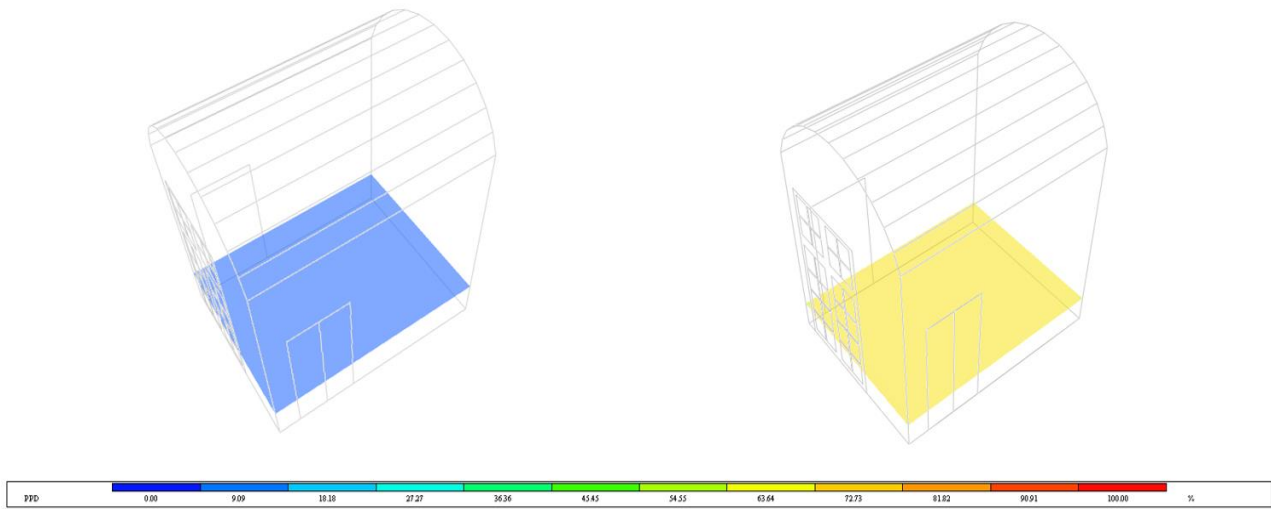


Figura 32_PPD – giornata invernale: *Virtual Building 1* (a sinistra), *Virtual Building 2* (a destra)¹⁶⁸

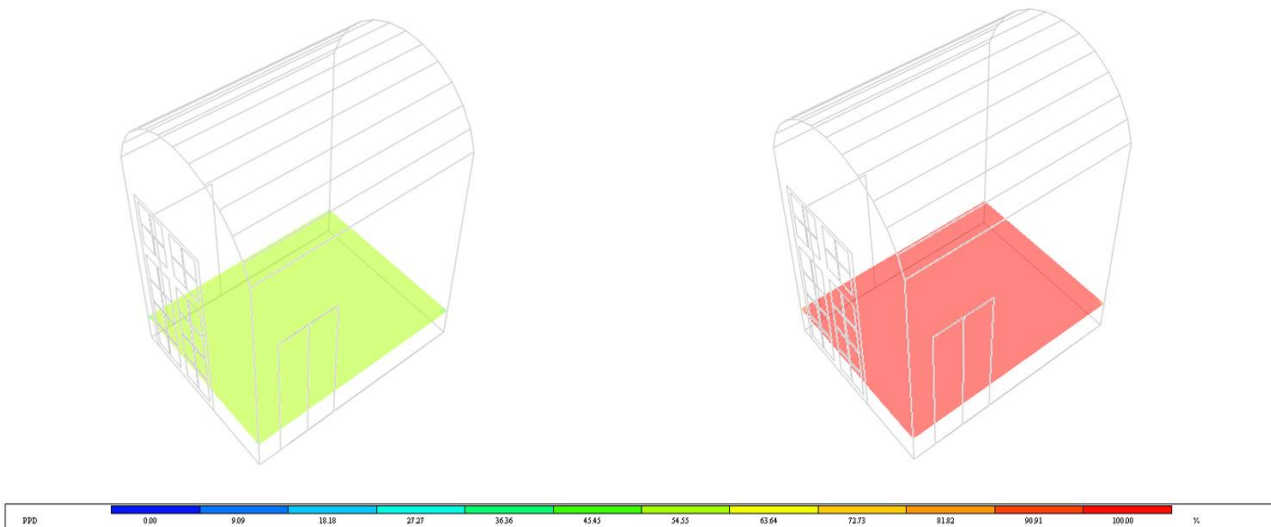


Figura 33_PPD – giornata estiva: *Virtual Building 1* (a sinistra), *Virtual Building 2* (a destra)¹⁶⁹

Per il *Virtual Building 1* si prevede una percentuale di soggetti termicamente insoddisfatti minima durante la giornata invernale (tra il 9% e il 18% circa), ma superiore in estate: temperature *indoor* pari a circa 27°C restituiscono un PPD del 54,55%. In inverno per il *Virtual Building 2* il valore di insoddisfatti si aggira attorno al 64% e tale percentuale aumenta nel periodo estivo, raggiungendo un livello previsto di insoddisfazione pari al 90%.

3.8.4. Discussione dei risultati

Dal confronto delle temperature simulate nei due scenari considerati (reale -con impianti HVAC attivi- e ipotetico -con impianti HVAC inattivi-) emerge che le temperature garantite dai sistemi HVAC permettono di rispettare i *range* suggeriti dalla normativa di riferimento per la conservazione dei beni

¹⁶⁸ Registro delle immagini. p.268.

¹⁶⁹ Ibidem.

custoditi nella sala 33; mentre, in assenza di impianti di condizionamento e ventilazione dell'aria, l'edificio potrebbe garantire:

- temperature *indoor* invernali discrete, ma comunque inadatte per la conservazione delle opere presenti nella sala 33;
- temperature *indoor* estive eccessivamente elevate per la conservazione delle opere conservate nella sala 33.

Per ciò che concerne il *comfort* dei visitatori, le simulazioni hanno permesso di verificare le supposizioni avanzate in merito in fase di analisi dei dati -monitorati e simulati¹⁷⁰: le condizioni microclimatiche *indoor* determinate dagli impianti HVAC consentono di garantire un buon livello di *comfort* termico ai visitatori; mentre in caso di spegnimento o malfunzionamento di tali impianti, il *comfort* dei visitatori verrebbe a mancare quasi totalmente.

3.9. Ipotesi di scenari futuri – *Climate Change* (*Virtual Building 3 e 4*)

In merito alla possibilità di simulare scenari futuri tramite lo strumento della simulazione virtuale, è stato ipotizzato un cambiamento climatico con conseguente innalzamento della temperatura esterna di 1,5°C in un ipotetico futuro 2100. Sono stati valutati gli effetti di questo cambiamento climatico sull'umidità relativa e sulla temperatura dell'aria *indoor*: sono state verificate le relative variazioni conseguenti al cambiamento climatico, con impianti attivi (*Virtual Building 3*) e con impianti inattivi (*Virtual Building 4*), confrontando i dati emersi dalle simulazioni appena citate con quelli delle condizioni attuali (*Virtual Building 1*).

3.9.1. Confronto dei risultati: simulazioni dei *Virtual Building 1-3-4*

Risulta che, se gli impianti di condizionamento sono attivi, non si hanno importanti variazioni del microclima *indoor*. Infatti, la differenza media tra le temperature *indoor* del *Virtual Building 1 e 3*, calcolate su un anno, è pari a 0,28°C, con picchi di 0,8°C: considerando gli impianti attivi, se ci fosse un aumento della temperatura esterna pari a 1,5°C, potremmo giusto sopporre una riduzione dei costi di riscaldamento (vedi Grafico 27 e Tabella 13).

¹⁷⁰ Supposizioni espresse ai paragrafi 3.4.2. e 3.7.2.

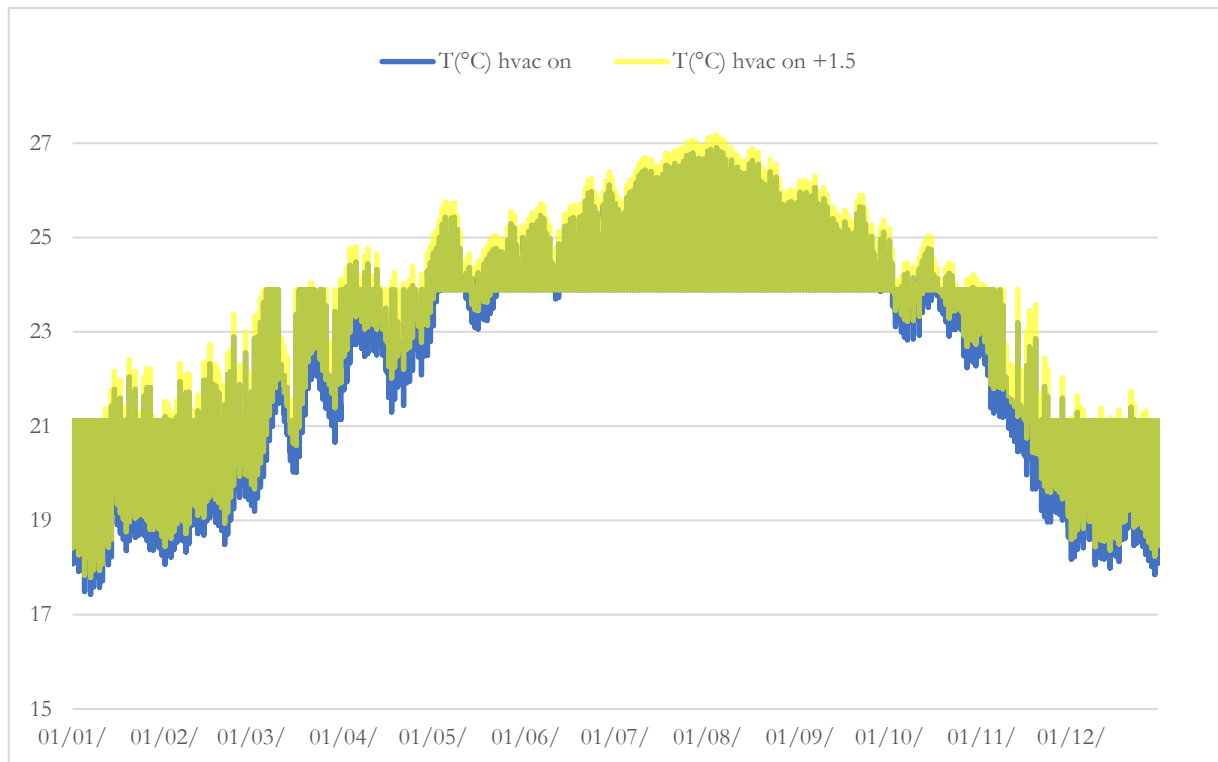


Grafico 27_Temperatura: confronto tra *Virtual Building 1* e *Virtual Building 3* (HVAC ON)

Al contrario, considerando gli impianti di condizionamento inattivi (*Virtual Building 4*), otteniamo una differenza media annua della temperatura *indoor* tra *Virtual Building 1* e 4, pari a 1,45°C, con un picco minimo di 0,69°C e massimo di 1,58°C (vedi Grafico 28 e Tabella 13).

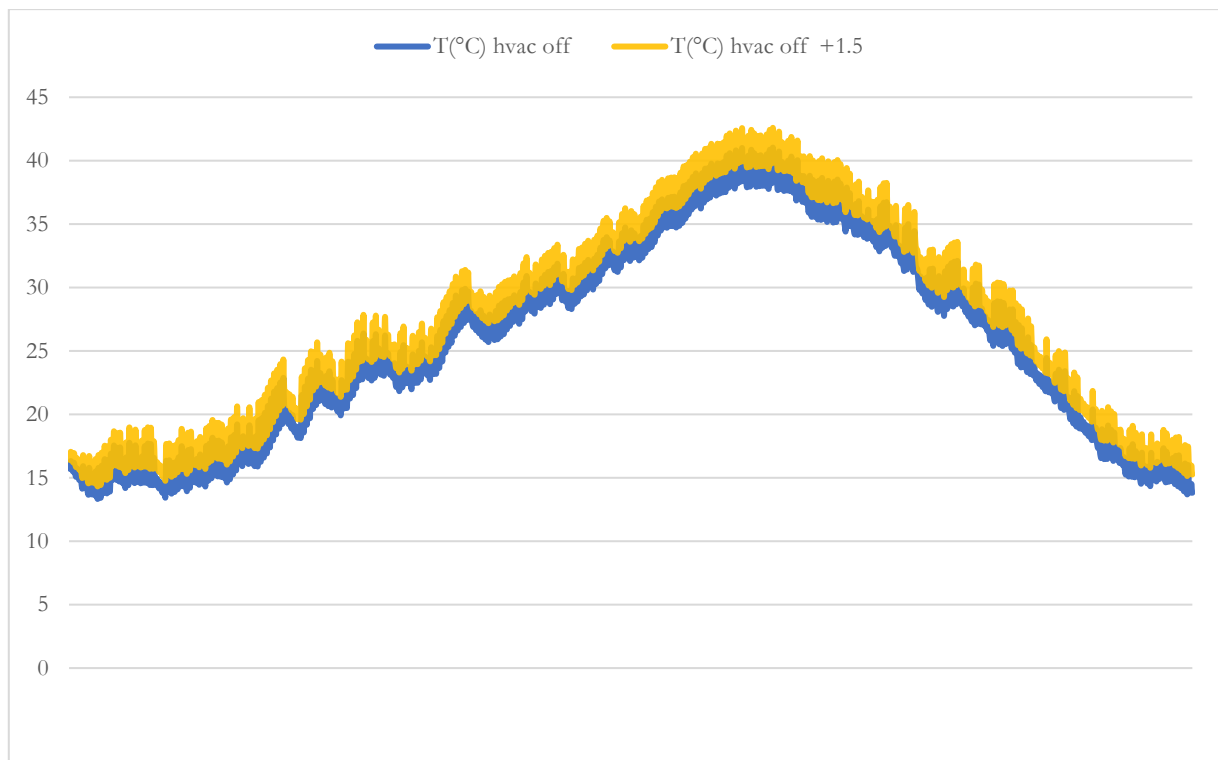


Grafico 28_Temperatura: confronto tra *Virtual Building 1* e *Virtual Building 4* (HVAC OFF)

Come riportato dalla Tabella 13, il massimo *gap* tra l'umidità relativa registrata per il *Virtual Building 1* e quella simulate per gli ipotetici scenari del 2100 (*Virtual Building 3* e 4), si ottiene quando l'impianto HVAC è attivo (*Virtual Building 3*). Se consideriamo gli impianti HVAC inattivi (*Virtual Building 4*), otteniamo invece la discrepanza maggiore del parametro della temperatura.

Tabella 13. Sala 33 - Venaria Reale: T e UR a confronto: *Virtual Building 1-Virtual Building 3 (HVAC ON)*; *Virtual Building 1-Virtual Building 4 (HVAC OFF)*

	T: cfr. <i>Virtual Building 1 – 3 (HVAC ON)</i>	UR: cfr. <i>Virtual Building 1 – 3 (HVAC ON)</i>	T: cfr. <i>Virtual Building 1 – 3 (HVAC OFF)</i>	UR: cfr. <i>Virtual Building 1 – 3 (HVAC OFF)</i>
Min.	0.00	0.00	0.69	0.00
Max	0.80	5.72	1.58	1.83
Media	0.28	2.60	1.45	0.26

3.9.2. Discussione dei risultati

Questi risultati, come quelli ottenuti dal *Virtual Building 2*, devono essere considerati come un campanello d'allarme: senza l'attivazione degli impianti (che può essere dovuta anche a causa di un malfunzionamento temporaneo degli stessi), l'effetto del cambiamento climatico sul microclima *indoor* della sala studiata, potrebbe mettere a rischio la conservazione dei beni e dell'edificio.

3.10. Conclusioni

In riferimento ai 5 punti delle finalità, riportati al paragrafo 3.1.1., si può affermare che:

1. la metodologia applicata ha permesso di: conoscere le evoluzioni che hanno coinvolto l'edificio da un punto di vista d'uso, architettonico e impiantistico; analizzare i parametri microclimatici rilevati della campagna di monitoraggio *indoor*, verificando la loro coincidenza con gli standard suggeriti per la conservazione dei beni contenuti nella sala indagata (sala 33); simulare scenari alternativi a quello corrente, per valutare le conseguenze che modifiche gestionali (nella gestione degli impianti HVAC) e climatiche, comporterebbero sul microclima *indoor*;
2. la porzione di architettura in esame, per le sue caratteristiche costruttive, in assenza di impianti di climatizzazione non sarebbe in grado di garantire condizioni ottimali per la conservazione delle collezioni ad oggi presenti nella sala 33, né di assicurare il *comfort* termico a lavoratori e visitatori durante un intero anno solare¹⁷¹.

I mesi che risulterebbero più critici -sia per la conservazione sia per il *comfort*- vanno da giugno a fine ottobre: le temperature interne supererebbero i 35°C. Tra agosto e ottobre, inoltre, nemmeno

¹⁷¹ Al paragrafo 1.9. sono già state presentate le possibili conseguenze legate allo spegnimento, volontario o involontario (malfunzionamento), degli impianti in edifici per i quali la conservazione preventiva e il *comfort* dipendono esclusivamente dai sistemi HVAC.

- il parametro dell'umidità relativa risulterebbe favorevole: la simulazione¹⁷² ha riportato valori di umidità relativa tipici di un ambiente secco: tra il 20 % e il 40 %. Infine, durante i mesi invernali la temperatura non scenderebbe al di sotto dei 13,4 °C, ma non supererebbe i 17°C circa: temperature a causa delle quali, in termini di *comfort* termico, corrisponderebbe una percentuale di soggetti termicamente insoddisfatti pari al 2/3 dei visitatori;
3. Il ruolo degli impianti HVAC, introdotti nelle sale adibite al percorso di visita all'interno della Reggia di Venaria Reale in seguito al progetto di restauro (2001-2007), dimostra essere quello di garantire un equilibrio tra fruizione e conservazione: permettono di mantenere parametri microclimatici di T e UR adeguati sia al *comfort* dei visitatori, sia alla conservazione dei beni ospitati;
 4. Le simulazioni di ipotetici scenari futuri¹⁷³, messi a confronto con le condizioni microclimatiche *indoor* attuali, hanno permesso di presentare un esempio pratico di come la simulazione virtuale rappresenti uno strumento in grado di verificare preventivamente le conseguenze di modifiche non solo gestionali (es. punto 2. -spegnimento degli impianti-) ma anche di quelle variabili naturali, che non dipendono direttamente dall'intervento dell'uomo, tra cui il clima *outdoor*, e che incidono sul microclima *indoor* e di conseguenza sulla conservazione del Patrimonio;
 5. gli interventi di restauro che hanno coinvolto la Reggia, non ricadono nella logica del restauro conservativo, bensì in quella del recupero, della valorizzazione e della riqualificazione: ci troviamo di fronte ad un quasi completo rifacimento di un edificio storico, con l'introduzione di nuovi materiali e impianti contemporanei, laddove essi risultavano obsoleti o totalmente assenti. Inoltre, l'impossibilità di fornire documentazione dettagliata in merito ai materiali costruttivi che compongono la Reggia, in seguito ad un recente progetto di restauro di un edificio di rilevante importanza, evidenzia un disinteresse da parte dei tecnici che sono intervenuti nel restauro, nei confronti delle caratteristiche formali e materiali dell'edificio. Risulta evidente che in fase di restauro si è deciso di dissociare queste ultime dalle prestazioni microclimatiche dell'edificio, garantite unicamente dai sistemi HVAC. Tale logica è in contrasto con i criteri degli architetti premoderni, così come con quelli di Juvarra, Castellamonte, Garove e gli altri architetti che hanno progettato la Reggia. Chi ci assicura che continuare ad intervenire basandosi su queste logiche che prediligono l'uso smodato degli impianti di condizionamento e ventilazione dell'aria non ci porterà al collasso? [12]¹⁷⁴.

¹⁷² Cfr. *Virtual Building 2*.

¹⁷³ Cfr. *Virtual Building 3 e 4*

¹⁷⁴ Si allude al fatto che, come Diamond [12] racconta la scomparsa di molti popoli, spesso dovuta all'esaurimento di risorse naturali, l'odierno spreco delle risorse energetiche naturali, potrebbe portare il mondo moderno al collasso.

Riferimenti

- [1] C. Roggero, M. Turetta, A. Vanelli, *Le residenze sabaude*, Allemandi, Torino, 2018.
- [2] G. Sgarzini, *Residenze sabaude. Corona di delizie*, Ist. Poligrafico dello Stato, 2008
- [3] G. Gritella, *Juvarra l'architettura*, Franco Cosimo Panini, Modena, 1992.
- [4] D. Severo, *Filippo Juvarra*, Zanichelli, Milano, 1996.
- [5] A. Bonet Correa, B. Blasco Esquivas, G. Cantone, *Filippo Juvarra e l'architettura europea*, Electa, Napoli, 1998.
- [6] L. Rovere, V. Viale, *Filippo Juvarra*, Oberdan Zucchi, Milano, 1937.
- [7] F. Pernice, *La Venaria Reale. Ombre e luci*, Celid, Torino, 2013.
- [8] MIBAC, Ref.B) MIBAC, Ministerial Decree, Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei, 10th May 2001, (2001).
- [9] UNI – Ente Nazionale Italiano di Unificazione (1999) UNI 10829:1999 Beni di interesse storico e artistico - Condizioni ambientali di conservazione - Misurazione ed analisi.
- [10] K. Fabbri, A. Bonora, Two new indices for preventive conservation of the cultural Heritage: Predicted Risk of Damage and Heritage Microclimate Risk., *Journal of Cultural Heritage*. 47 (2021) 208-217. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.09.006>.
- [11] ASHRAE. Guideline 14, Measurement of Energy and Demand Savings. Technical report, American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, Georgia, (2014).
- [12] J. Diamond, *Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed*, Viking Press, New York, 2004.

3.11. Caso-studio II: Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca

Dal 08/04/2019 al 08/07/2019 la ricerca di dottorato è stata proseguita all'estero: sono stati trascorsi 3 mesi a Valladolid, Spagna, presso la Fundación Santa María la Real del patrimonio histórico, con la quale è stato possibile collaborare ad uno dei casi-studio facenti parte del progetto europeo "HeritageCARE", al quale la fondazione ha partecipato insieme ad altri enti: spagnoli, francesi e portoghesi. Il progetto, attivato nel 2016 e coordinato dall'Università do Minho di Braga, Portogallo, includeva sessanta casi-studio, uno dei quali è la Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca.

Il fine di questo progetto europeo è stato quello di generare una strategia congiunta, volta alla conservazione preventiva del patrimonio culturale del sudest europeo. Nel corso di 3 anni (2016-2019) un *team* multidisciplinare, composto da diversi enti e centri di ricerca, ha lavorato per definire una metodologia basata sulle buone pratiche per la conservazione degli edifici storici. Inoltre, con HeritageCARE si desiderava arrivare anche ai cittadini -non solo agli specialisti del settore del restauro e della conservazione-, nello specifico si auspicava ad una presa di coscienza da parte dei medesimi in merito ai benefici sociali ed economici associati alla conservazione preventiva degli edifici storici.

Uno dei principali risultati prodotti a conclusione di questo progetto europeo, è stata la pubblicazione di un manuale: "*Guidelines for Good Practices on Preventive Conservation*"¹⁷⁵. Questa guida è rivolta principalmente a proprietari e gestori di edifici storici, situati nel sudest europeo ed è strutturata come un prontuario generale per la conservazione preventiva del patrimonio immobile, con valenza storica e culturale, arricchito da raccomandazioni ed esempi pratici in merito a problemi comunemente riscontrabili nell'ambito della conservazione preventiva. Il fine ultimo di questo manuale è quello di proporre buone pratiche per garantire la conservazione del patrimonio storico artistico e culturale del sudest europeo.

Le analisi svolte in collaborazione con la Fondazione Santa María La Real, i cui esiti verranno presentati in questa tesi, riguardano il caso studio della Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca (BUSAL).

3.11.1. Finalità della ricerca

Il presente studio è stato volto a:

1. applicare una metodologia¹⁷⁶ in linea con il campo di ricerca del *Historic Indoor Microclimate*: metodologia già adottata per il caso-studio I della presente ricerca: si vuole applicare la medesima metodologia a edifici storici differenti (per data di realizzazione; caratteristiche costruttive; presenza/assenza di impianti HVAC; ...) per verificare che essa sia efficace e replicabile per qualsiasi tipologia di edificio;
2. verificare se i parametri microclimatici che caratterizzano attualmente la BUSAL siano adeguati alla conservazione del patrimonio ivi custodito;
3. verificare quali analogie microclimatiche, architettonico-progettuali e gestionali accomunano la Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca e la Biblioteca Malatestiana, a Cesena, Italia, e in cosa esse si differenzino, per comprendere se la realizzazione di entrambe le Biblioteche

¹⁷⁵ Reperibile al seguente link: http://heritagecare.eu/wp-content/uploads/2019/10/HeritageCare-Guidelines-for-Good-Practices-EN_compressed.pdf (ultima visita 12/08/2020).

¹⁷⁶ Descritta al Capitolo II.

sia stata guidata da precise logiche costruttive e finalità comuni, valutando quali esse siano e se siano state raggiunte.

3.12. Conoscenza storico-architettonica

La nascita delle università nel medioevo fu il frutto del risveglio intellettuale del XII secolo. Si individuano anche altre motivazioni, tutte determinanti per il fenomeno universitario, tra le quali la fine del mondo feudale e l'espandersi della vita urbana, la formazione delle istituzioni municipali, le intensificazioni degli scambi culturali e commerciali, la nascita del capitalismo finanziario, della borghesia, le tensioni tra stato pontificio e impero.

Pertanto, l'Università di Salamanca nasce condizionata da realtà geopolitiche, ecclesiastiche e culturali concrete. Il regno "Leones" (León, Asturia, Galizia, e nord del portogallo) rimase pressoché isolato finché i pellegrinaggi alla cattedrale di Santiago de Compostela non lo riscattarono dal suo letargo. I pellegrini non solo apportarono religiosità, ma anche nuove culture, correnti di pensiero, tradizioni e stili architettonici. Come conseguenza a questo fenomeno nacquero le scuole cattedrali, dove insegnavano maestri principalmente francesi. Con l'unione del regno di Castilla y Leon nella seconda metà del XIII secolo Salamanca divenne il centro universitario per eccellenza in tutta Castilla e, una volta ottenuta l'unione nazionale con i re cattolici, di tutta Spagna.

La città di Salamanca è stata dichiarata patrimonio dell'umanità dall'UNESCO nel 1988. La sua Università è una tra le più antiche al mondo; seguì il modello dell'Università di Bologna e si dedicò principalmente al diritto, dando meno importanza agli studi teologici e filosofici. La documentazione per determinare l'anno della sua fondazione è scarsa: alcuni storici sostengono che fu fondata nel 1218, altri, più prudenti, dicono sia stata fondata dal Re Alfonso IX (1188-1230) senza precisare l'anno. Nel 1254, venne riconosciuta come Università nella Magna Carta di Alfonso X. Quest'ultimo designò il ruolo di "estacionario": proprietario di una "stazione" di libri, pagato dall'Università per conservare le copie delle opere per la consultazione. A partire da questa data l'Università di Salamanca venne dotata di una biblioteca universitaria operativa. Ciononostante, per la realizzazione della Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca bisognerà attendere sino al XVI secolo.

Oggi la biblioteca conta 906.000 volumi, tra i quali manoscritti di elevato valore, come il Tohà e i mappamondi, che Torres Villaroel acquistò in Francia e li chiamò "libri rotondi", purché fossero ammessi dalla biblioteca. Tra i volumi conservati troviamo anche 2.774 manoscritti, 483 incunaboli e circa 62.000 volumi risalenti al XVI e XVIII secolo. Tra queste opere rientrano: opere religiose, come la piccola Bibbia Vulgata del XIII secolo, su pergamena; opere di diritto, come la copia del XV secolo del *Infortiatum cum glossa* di Francesco d'Accurso; opere di storia e geografia, quali, ad esempio, gli incunaboli del *Fasciculus Temporum*; opere di letteratura, come una copia del Don Quijote de la Mancha di Cervantes e, ancora, opere di carattere tecnico e scientifico; etc.

L'edificio -*Escuelas Mayores*- in cui si trova la Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, risale al 1415 e venne realizzato per ordine del Cardinale Pedro. La sua costruzione fu finalizzata nel 1433. La direzione dei lavori venne affidata ad un falegname, Alonso Rodriguez e al Maestro Jeronimo, a cui succedette il figlio, anche lui Maestro Jeronimo. Al primo piano di questo edificio risiede la Biblioteca, raggiungibile tramite uno scalone cinquecentesco, il cui programma iconografico simboleggia l'ascesa alla virtù e alla salvezza: la cosiddetta "escalera del conocimiento" (Figura 34). In essa possiamo distinguere le

decorazioni simboliche¹⁷⁷ riportate sulle tre rampe: il primo tratto rappresenta la gioventù, il secondo la maturità ed il terzo, nonché l'ultimo, rappresenta la vecchiaia.



Figura 34_Escalera del conocimiento¹⁷⁸

La realizzazione della Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, anche conosciuta come “*Biblioteca Antigua*” risale all’inizio del XVI secolo (1509). Gli architetti che lavorarono alla sua costruzione furono: Juan de Badajoz, Juan de Ruesga, Pedro de Larrea, Juan de Alava e Juan Gil. Inoltre, è stato documentato che non si trattò di una riforma di un piano preesistente ma diversamente utilizzato, bensì di una costruzione ex-novo e dunque un’espansione dell’edificio.

Alcune documentazioni riportano la richiesta da parte degli architetti che le volte fossero in mattoni, le pareti in muratura e le finestre, le porte e gli archi in pietra. La sala della Biblioteca ha una forma rettangolare; vi sono sette finestre, la cui apertura è manuale e alle quali è possibile accedere dal corpo superiore della libreria, che occupa l’intero perimetro della sala; vi sono due porte, una di fronte all’altra, sui lati più lunghi della biblioteca: una, in vetro, permette l’accesso alla Biblioteca dal claustro e dall’altra è possibile accedere alla sala degli incunaboli¹⁷⁹.

¹⁷⁷ Il simbolismo di queste decorazioni venne svelato nel 1984 da Luis Cortés, in “*Ad summum caeli. Programa alegórico humanista de escalera de la universidad*” [1].

¹⁷⁸ Registro delle immagini. p.268.

¹⁷⁹ Per approfondimenti vedi: [2]

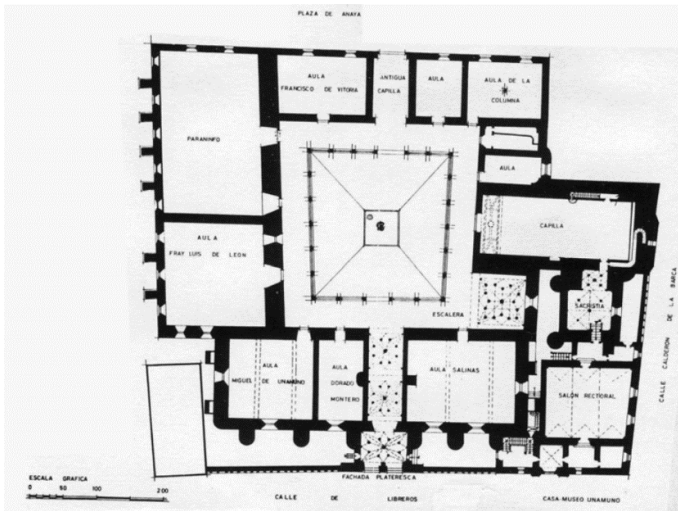


Figura 35_ *las Escuelas Mayores*: piano terra– planimetria di Ildefonso Gago¹⁸⁰

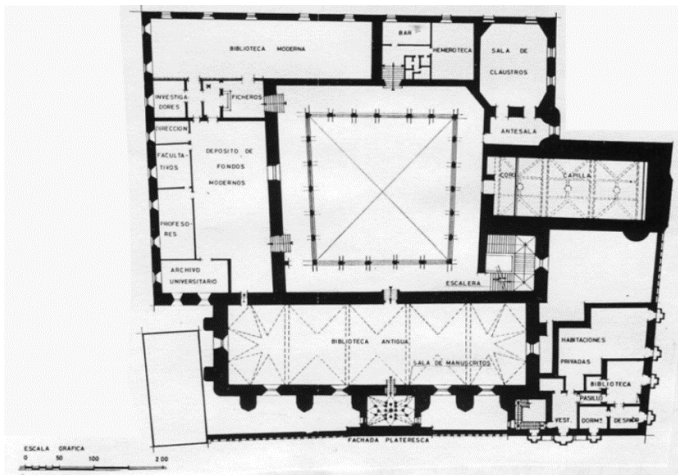


Figura 36_ *las Escuelas Mayores*: primo piano – planimetria di Ildefonso Gago¹⁸¹

All'interno dell'edificio dell'Università, oltre alla “Biblioteca Antica”, è presente una zona più moderna, realizzata alla fine del XIX secolo e dedicata principalmente ad uffici amministrativi; come deposito e sala studio. Negli anni Cinquanta del ventesimo secolo, la Biblioteca antica e i locali annessi, costituivano l'unico servizio bibliotecario dell'Università di Salamanca. In quanto Biblioteca Universitaria, essa ricevette la maggior parte delle collezioni esistenti dal Collegio Reale della Compagnia di Gesù di Salamanca e dai collegi maggiori e minori della città, che si sommarono ai fondi storici appartenenti all'Università e a fondi moderni di studio, che essendo in gran parte anteriori al 1958, sono considerati attualmente parte del patrimonio storico spagnolo.

Nel XIX secolo la Biblioteca divenne anche Biblioteca provinciale di Salamanca, mentre dal 1995 la sua funzione principale è la custodia delle collezioni; è visitabile in gruppi guidati, ma non è possibile studiare né consultare libri all'interno di questo spazio. Inoltre, dal momento che vi vengono conservate opere antiche e di inestimabile valore, ad oggi non è facile ottenere volumi in prestito da questa Biblioteca. Vengono fatti occasionalmente prestiti ad altre Biblioteche o musei, per ragioni espositive. Infine, nel 2006 la Biblioteca Antica ha acquisito la denominazione di “Biblioteca Generale Storica”.

¹⁸⁰ Registro delle immagini. p.268.

¹⁸¹ Ibidem.



Figura 37_Biblioteca Antica– J. Laurent e Cía. Collezione Ruiz Vernacci VN-09428_p¹⁸²



Figura 38_Biblioteca Antica¹⁸³

Parlando con i responsabili della gestione e conservazione della Biblioteca, è emerso che vi è uno spazio tra le pareti e le scaffalature in legno (Figura 39), il quale favorisce la conservazione dei beni (principalmente libri, ma anche arredi lignei), salvaguardandoli in parte dall'umidità, che risulterebbe maggiore se vi fosse un contatto diretto con le pareti, ma facilitando al tempo stesso la presenza di diversi insetti. Tali spazi, infatti, sono caratterizzati da: oscurità, umidità e silenzio. Per queste ragioni vi vengono fatti periodicamente una serie di trattamenti anti-xilofagi.



Figura 39_Discostamento delle scaffalature in legno dalle pareti della Biblioteca¹⁸⁴

¹⁸² Registro delle immagini. p.268.

¹⁸³ Registro delle immagini. p.269.

¹⁸⁴ Ibidem.

3.12.1. Modifiche d'uso e interventi architettonici

Per quanto riguarda le modifiche d'uso, la Biblioteca è sempre stata utilizzata come tale. Ad oggi, come in passato, non è possibile studiare qui, non vi sono infatti tavoli adibiti allo studio o alla consultazione. La sala è aperta per delle visite guidate, formate da gruppi per un massimo di 20-25 persone, per un totale di massimo 100 persone al giorno, circa. Alcuni giorni l'affluenza è tale che vengono organizzati fino a 4 gruppi di visita, altri giorni invece si ha un'affluenza ridotta, riconducibile a solo uno o due gruppi nell'arco dell'intera giornata.

Nel 2008 si realizzarono alcuni lavori all'interno della sala della Biblioteca per l'adeguamento alle norme antincendio, ma l'unica che può essere considerata una vera e propria modifica architettonica risale al XVIII secolo, quando il soffitto a volta del piano della Biblioteca venne abbassato di circa quattro metri, in seguito alla rottura delle volte originali (cedettero nel 1666). Questa modifica venne diretta dagli architetti Garcia Martinez e José Isidro.



Figura 40_ BUSAL: soffitto a volta ¹⁸⁵

In corrispondenza alla parte centrale della facciata ovest della Biblioteca, avanza un corpo, che, al primo piano, contiene il vestibolo e al piano della Biblioteca contiene la sala degli incunaboli. La facciata di questa sala viene chiamata la “*Fachada Rica*” (Figura 41): facciata plateresca del XVI secolo, costituita da tre corpi sovrapposti, separati dai fregi corrispondenti¹⁸⁶, che caratterizza l'edificio de *las Escuelas Mayores*.

¹⁸⁵ Registro delle immagini. p. 269.

¹⁸⁶ Il primo corpo, dal basso, raffigura la monarchia spagnola: i Re Cattolici, responsabili della costruzione della facciata. Al centro di questo corpo si nota infatti un medaglione con i Re Cattolici e una scritta in greco, che riporta: “i Re all'Università e l'Università ai Re”. Nel resto di questa prima sezione vengono rappresentate decorazioni vegetali, animali e antropomorfe. Il secondo corpo, come il primo, è diviso anch'esso in cinque spazi: quello centrale raffigura lo stemma di Carlos I; a sinistra l'aquila imperiale bicefalà; a destra l'aquila di San Giovanni. Nei medaglioni laterali incontriamo la prima immagine che ha causato controversia tra gli studiosi: sulla sinistra potrebbe essere raffigurato Carlos I, ma c'è chi sostiene che sia Hercules; la figura sulla destra viene interpretata come Isabella d'Aviz, o come Ebe, Dea della gioventù, figlia di Zeus e di Era. Anche per le figure sovrastanti a ciascun medaglione, all'interno delle conchiglie, sono state date delle interpretazioni differenti: a sinistra abbiamo Giasone e Medea, mentre sulla destra Scipione e Annibale, da alcuni anche riconosciuto come Alessandro Magno. La terza sezione presenta diversi problemi di interpretazione iconografica: al centro troviamo un sommo pontefice, seduto e circondato da cardinali ed altri personaggi. Questo è stato interpretato come papa Martino V; ma anche come papa Benedetto XIII; da altri ancora papa Alessandro IV. Le figure presenti sulla sinistra vengono interpretate da certuni come Eva, circondata da Caino, Abele e un angelo; da altri come Venere, Marte, Bacco e Priapo. Nemmeno l'interpretazione dell'iconografia sulla destra risulta essere unanime: interpretata da alcuni come Hercules, accanto a Giunone e Jupiter, o Teseo e Fedra; da altri ancora come Adamo con due figlie. (Per approfondimenti vedi: <http://www.fachadausal.es/index.php>. Ultima visita: 16/08/2020).

Lo stile plateresco -anche detto plataresco, poiché rimanda a la “*plata*”, dal momento che ricorda il lavoro minuzioso degli argentieri- caratterizza gran parte degli edifici e dei monumenti della città di Salamanca. Altro comune denominatore delle architetture presenti a Salamanca, è la pietra arenaria proveniente dalla cava di Villamayor, poco distante dalla città (a 6 km circa). Questa pietra, utilizzata anche nell’edificio de *las Escuelas Mayores*, tende ad indurirsi nel tempo, ma al principio è tenera e particolarmente adatta ad essere lavorata minuziosamente, come se fosse un oggetto di oreficeria. Inoltre, quando colpita dai raggi del sole, tende ad apparire con riflessi dorati, particolarmente suggestivi.

Dal patio di fronte alla facciata, dove si erge la statua dell’accademico e rettore Fray Luis de Leon, è possibile osservare con attenzione l’iconografia che caratterizza questa architettura. Uno dei simboli più ricercati dai turisti è quello di una rana, raffigurata sopra ad un teschio. Originariamente essa rappresentava un simbolo negativo: la lussuria, da interpretarsi come pericolo a cui gli studenti erano costantemente esposti, associato alla morte. L’attuale leggenda popolare narra invece che chi individuerà la rana riuscirà a laurearsi, o a sposarsi, o tornerà a Salamanca, entro un anno. L’esistenza di questa interpretazione più recente è chiaramente guidata da fini legati al turismo.



Figura 41_ *Fachada Rica*¹⁸⁷

La *Fachada Rica* venne restaurata dalla Fondazione Santa María la Real del patrimonio histórico nel 2012. La porta è blindata e i manoscritti sono conservati in dei ripiani che furono decorati dal pittore Martin de Cervera nel 1614 (Figura 42, 43, 44).

La sala degli incunaboli non è aperta al pubblico, mentre gli orari di apertura della Biblioteca vanno dalle 9:00 – 21:00, dal lunedì al venerdì, con affluenza controllata. Inoltre, le finestre vengono tenute continuamente chiuse e all’interno di entrambe le sale non vi sono impianti di condizionamento per il controllo dei parametri microclimatici. Questo sottolinea l’importanza di un monitoraggio costante di tali ambienti, che permetta di accorgersi per tempo di eventuali condizioni anomale e di rischio per le opere ivi custodite.

¹⁸⁷ Registro delle immagini. p. 269.



Figura 42_Sala degli incunaboli ¹⁸⁸



Figura 43_Sala degli incunaboli ¹⁸⁹

¹⁸⁸ Registro delle immagini, p. 269.

¹⁸⁹ Ibidem.



Figura 44_Sala degli incunaboli ¹⁹⁰

3.12.2. I beni conservati nella BUSAL e i rispettivi standard per la conservazione

I beni conservati all'interno della Biblioteca Generale Storica di Salamanca sono costituiti dal patrimonio librario e dall'arredo ligneo che caratterizza la sala (scaffali, tavoli e sedie). Le informazioni in merito alle condizioni conservative del patrimonio librario e ligneo non sono state valutate autonomamente, ma sono state fornite dal personale addetto alla manutenzione della Biblioteca, che le ha definite attualmente buone.

Per la conservazione di tali beni, gli standard suggeriti dal MIBAC [3] e dalla UNI 10829:1999 [4] riportano i seguenti *range* di UR e T:

Tabella 14.

Materiale	Range UR (%)	Range T (°C)
Legno	50-60	19-24
Documenti archivistici su carta o pergamena, papiri, manoscritti, volumi a stampa	50-60	13-18
Rilegature di libri con pelle o pergamena	45-55	19-24

Si specifica che, da quanto emerso dalle indagini storico-architettoniche effettuate per questa ricerca, l'approccio adottato nei confronti della BUSAL nel corso degli anni, è stato sicuramente di carattere conservativo: non sono stati introdotti impianti di condizionamento e ventilazione dell'aria; l'arredo e il patrimonio librario non sono stati sostituiti; l'unico intervento effettuato -l'abbassamento del soffitto a volta- può essere classificato nell'ambito del restauro conservativo. Questo approccio ha permesso di

¹⁹⁰ Registro delle immagini. p.269.

non alterare le condizioni della Biblioteca, dal punto di vista estetico, architettonico, d'uso ed anche microclimatico: verosimilmente il microclima che caratterizza ad oggi questa sala potrebbe essere il medesimo che la caratterizzava nel 1509. Questo è un aspetto importante che va tenuto in conto per procedere con la valutazione dei dati del monitoraggio microclimatico della BUSAL, soprattutto in riferimento a quanto riportato dalla norma EN 15757:2010¹⁹¹ [5].

3.13. Campagna di monitoraggio microclimatico

I dati del monitoraggio microclimatico della BUSAL, svolto nel corso del progetto europeo HeritageCARE ed effettuato da un *team* della Fondazione *Santa Maria la Real*, ai quali è stato possibile avere accesso, si riferisce ad un periodo di circa un anno, compreso tra il 18/07/2018 e il 28/06/2019. Le sonde sono state posizionate all'interno della Biblioteca, a diverse altezze¹⁹² e con differenti sensori, come riporta la Figura 45.

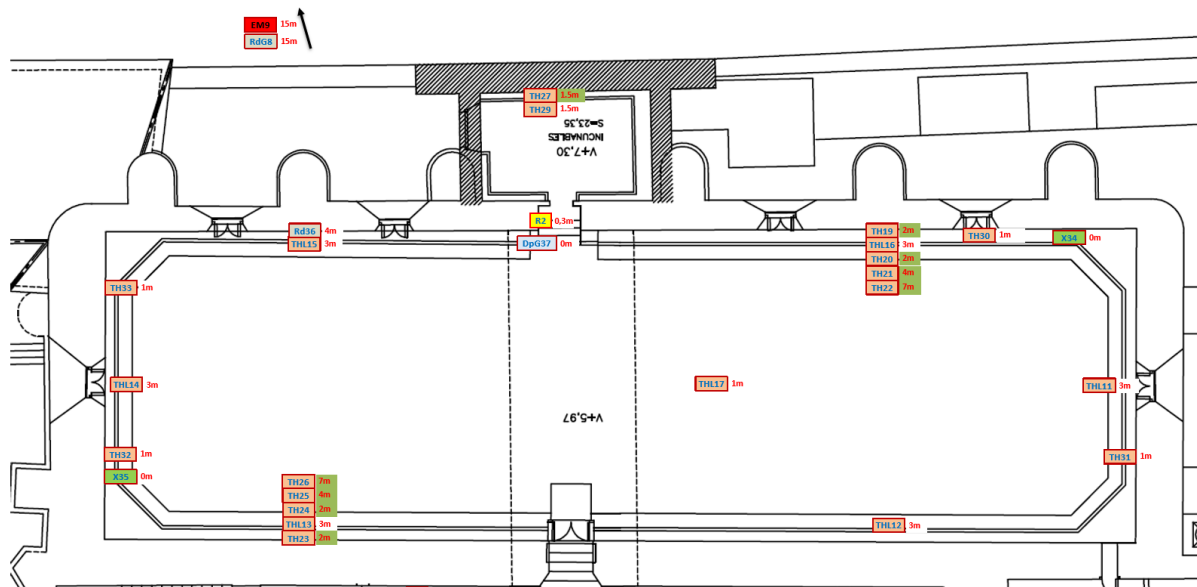


Figura 45_Disposizione delle sonde all'interno della Biblioteca e stazione meteorologica *outdoor*¹⁹³

Le sonde con la sigla “TH” rilevano la temperatura dell’aria e l’umidità relativa; quelle riportate con la “X” sono sonde che monitorano la presenza di xilofagi; “Dp” è un sensore che calcola il numero di visitatori che accedono alla sala della Biblioteca; “G” è una sonda che rileva la quantità di CO²; il nodo “R” è un ripetitore, che permette al *Wi-Fi* di raggiungere ogni zona della sala analizzata.

Inoltre, all’esterno dell’edificio, a 15m dalla facciata, vi è una stazione meteo, che calcola: la radiazione solare; la temperatura dell’aria; l’umidità relativa; la quantità e la durata della pioggia; la direzione e velocità del vento; la pressione barometrica; la quantità e la durata della grandine.

Infine, facendo ancora riferimento alla Figura 45, è possibile verificare a che altezza sono state posizionate le sonde. Le altezze evidenziate in verde indicano sonde collocate all’estremità di un’asta, distante dalla parete di almeno 1 metro (es. Figura 46); le altezze non evidenziate indicano invece che le sonde sono

¹⁹¹ Cfr. paragrafo 1.1.3 e 1.4.

¹⁹² Le sonde sono state posizionate a diverse altezze per poter verificare se vi è stratificazione dell’aria: fenomeno che può rappresentare un problema per la conservazione, indagato al paragrafo 3.14.2. della presente ricerca.

¹⁹³ Registro delle immagini. p. 269.

state semplicemente appoggiate su una superficie (es. Figura 47). Le sonde 19 e 23, nonostante siano evidenziate in verde, sono le uniche in realtà collocate all'interno degli scaffali, insieme ai libri (es. Figura 48).



Figura 46_Sonda all'estremità dell'asta¹⁹⁴



Figura 47_Sonda su superficie¹⁹⁵



Figura 48_Sonda all'interno degli scaffali¹⁹⁶

¹⁹⁴ Registro delle immagini, p. 269.

¹⁹⁵ Ibidem.

¹⁹⁶ Ibidem.

3.13.1. Errori e semplificazioni adottate

Nel corso dell'intero periodo della campagna di monitoraggio, effettuata dalla Fondazione *Santa María la Real*, sono state individuate alcune lacune nella misurazione dei dati¹⁹⁷ legate a problemi tecnici (es. malfunzionamento della rete *Wi-Fi*).

3.13.2. Il sistema di monitoraggio MHS (*Monitoring Heritage System*)

Ad oggi, per il monitoraggio microclimatico, la Fondazione *Santa María la Real* utilizza un sistema progettato da Ingegneri e Architetti che lavorano internamente alla fondazione: il sistema MHS (*Monitoring Heritage System*). Le sonde possono includere sensori per T, UR, CO₂, LUX e velocità dell'aria. Inoltre, è possibile accedere ai dati registrati da tali sensori da remoto ed essi sono customizzabili.

Le specifiche tecniche dei sensori che rilevano UR e T – ossia i parametri che più ci interessano per la presente ricerca – sono le seguenti:

Tabella 15. Sistema MHS – specifiche tecniche¹⁹⁸

Series	Version	Typ. Humidity Accuracy %RH	Typ. Temperature °C	Supply Voltage Range V	Interface	Package Size (L x W x H) mm
SHT20	Low-Cost	±3	±0.3	2.1 to 3.6	I ² C digital, PWM, SDM	3 x 3 x 1.1
SHT21	Standard	±2	±0.3	2.1 to 3.6	I ² C digital, PWM, SDM	3 x 3 x 1.1
SHT25	High-End	±1.8	±0.2	2.1 to 3.6	I ² C digital, PWM, SDM	3 x 3 x 1.1

Per procedere con la ricerca, è stato possibile accedere da remoto alla piattaforma MHS, per scaricare i dati rilevati dalle sonde presenti all'interno della Biblioteca e quelli registrati dalla stazione meteorologica installata fuori dall'edificio, dotata di sensori di: temperatura dell'aria, umidità relativa, rilevamento della pioggia, neve e grandine, illuminamento, pressione barometrica, radiazione solare e CO₂.

I sensori di ciascuna sonda hanno rilevato un dato ogni ora e sono stati attivati all'interno della Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca dal 18/07/2018. Le analisi riportate in questa tesi hanno considerato i dati di temperatura dell'aria e umidità relativa *indoor* e i dati climatici *outdoor* registrati dal 18/07/2018 fino al 28/06/2019.

L'interfaccia della piattaforma a cui si fa riferimento è riportata di seguito (Figura 49): selezionando l'edificio di proprio interesse, si accede ai dati monitorati e ad alcuni grafici basici. Il colore a lato del nome dell'edificio indica quali siano le condizioni di conservazione *indoor* del medesimo. Inoltre, è possibile impostare degli *alert* tali per cui, se alcuni dei parametri monitorati risultassero al di fuori dei *range* predefiniti, verrebbe inviato un *sms* o un'*e-mail* di avviso, in tempo reale.

¹⁹⁷ Specificate in ciascuna scheda grafica commentata al paragrafo 3.14. -dedicato all'analisi e all'interpretazione dei dati-.

¹⁹⁸ Cfr. <https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/humidity-sensors/humidity-temperature-sensor-sht2x-digital-i2c-accurate/> (ultima visita: 11/10/2020).

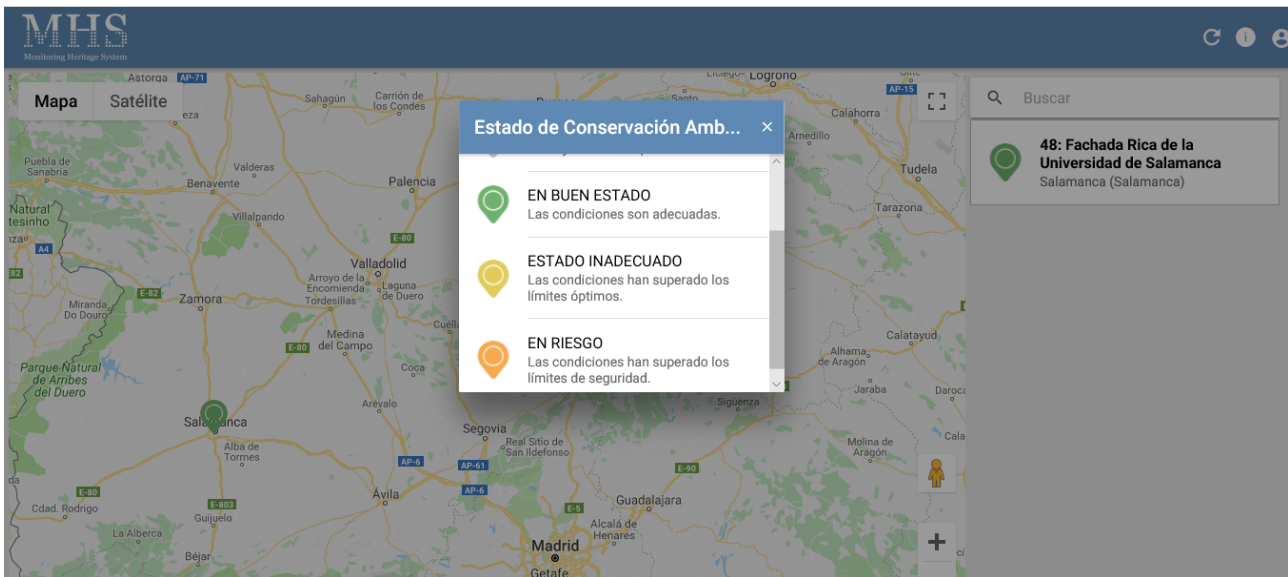


Figura 49_ Interfaccia piattaforma MHS¹⁹⁹

3.14. Analisi dei dati monitorati

I parametri microclimatici registrati dalle sonde durante il periodo di monitoraggio *indoor* considerato - dal 18/07/2018 al 28/06/2019-, sono stati utilizzati per uno *step* importante della ricerca: l'analisi e l'interpretazione dei dati. In questa fase sono stati realizzati dei grafici, tramite Excel, che hanno permesso di valutare le condizioni microclimatiche *indoor* attuali in cui vengono custoditi i beni all'interno della Biblioteca.

Come fatto per il caso studio di Venaria Reale, si riportano di seguito alcune schede grafiche commentate.

Si è deciso di analizzare l'andamento dei dati rilevati dalle sonde *indoor* dividendo l'intero periodo di monitoraggio in quattro periodi più brevi: il periodo estivo (18/07/2018 – 22/09/2018); autunnale (22/09/2018 – 21/12/2018); invernale (21/12/2018 – 20/03/2019); primaverile (22/03/2019 – 28/06/2019).

¹⁹⁹ Registro delle immagini. p. 269.

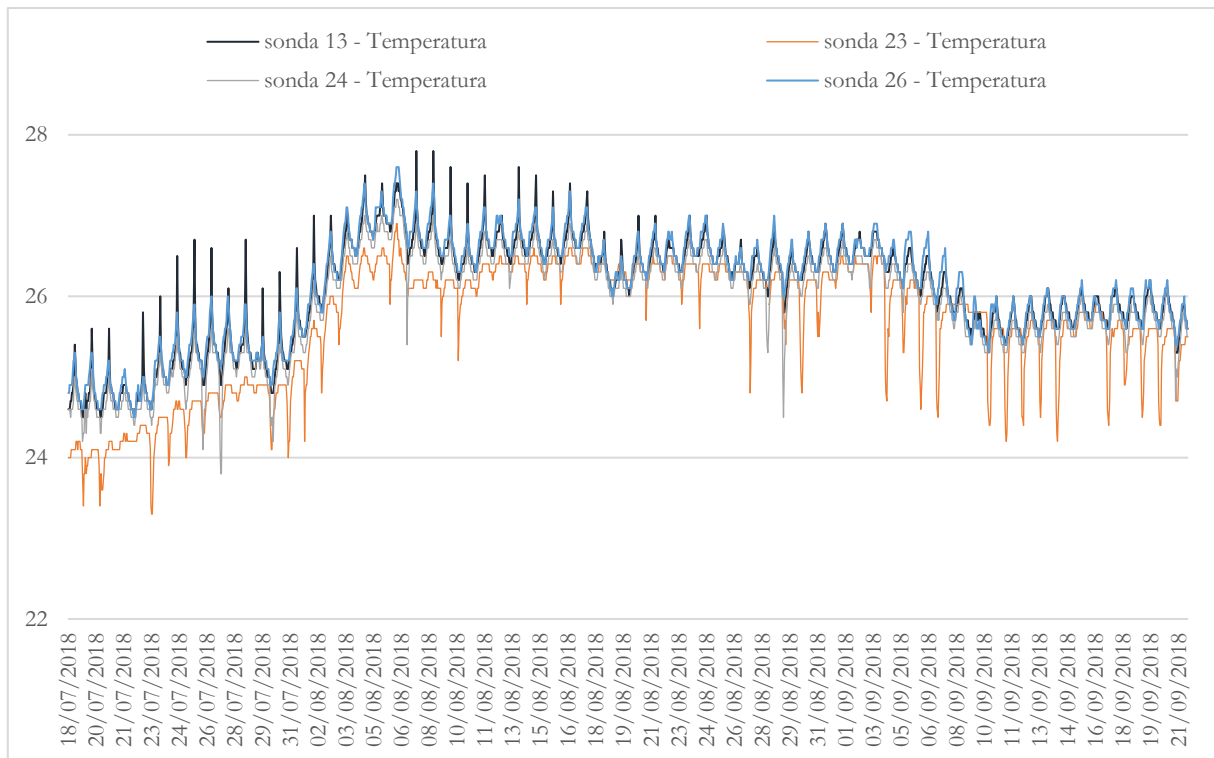


Grafico 29_T trend, lato opposto alla facciata (ovest) 18/07/'18 – 22/09/'18

Periodo monitoraggio: 18 Luglio 2018 – 22 Settembre 2018.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, lato opposto alla facciata.

Impianti: Impianti HVAC assenti.

Parametri misurati: Temperatura.

Errori di misurazione: Mancata rilevazione dei dati: il 16/08/'18 ore 22:00, sonda 13; il 18/08/'18 ore 9:00, sonda 23; il 5/10/'18 ore 23:00, sonda 26. Nessun dato rilevato durante l'intero periodo: sonda 25.

Valori registrati: Range T: 24 °C – 27,5 °C.

Considerazioni: L'andamento della temperatura dell'aria, registrato dalle sonde collocate sul lato opposto della facciata, all'interno della biblioteca, riporta la medesima tendenza per le sonde 13, 24 e 26, nonostante esse siano situate a diverse altezze²⁰⁰. L'unica sonda il cui trend discosta maggiormente da quello registrato dalle altre sonde, appena elencate, è la sonda 23, posta all'interno di uno scaffale e collocata a 2m dal pavimento, il cui range è compreso tra i 24 °C e i 26,5 °C circa. Questa sonda registra temperature leggermente più basse durante tutto il periodo estivo analizzato ed i picchi registrati sono, al contrario dei valori rilevati per le sonde 13, 24 e 26, negativi, mentre le altre sonde

²⁰⁰ Il paragrafo 3.14.2. riporta lo studio della stratificazione dell'aria.

registrano picchi giornalieri prevalentemente positivi. Tali picchi²⁰¹ giornalieri risultano maggiori, circa 1 °C, per le temperature registrate dalla sonda 13 da luglio a metà agosto, dopodiché diminuiscono sensibilmente. La sonda 23 ha rilevato picchi di temperatura dell'aria piuttosto costanti durante l'intero periodo estivo analizzato: circa 1 °C.

Le temperature non salgono mai al di sopra dei 27,8 °C: considerando che ci troviamo all'interno di un ambiente privo di impianti di condizionamento e ventilazione dell'aria, nei mesi più caldi dell'anno, questo è un ottimo risultato, che deriva da una corretta progettazione dell'edificio, inclusa la scelta dei materiali costruttivi.

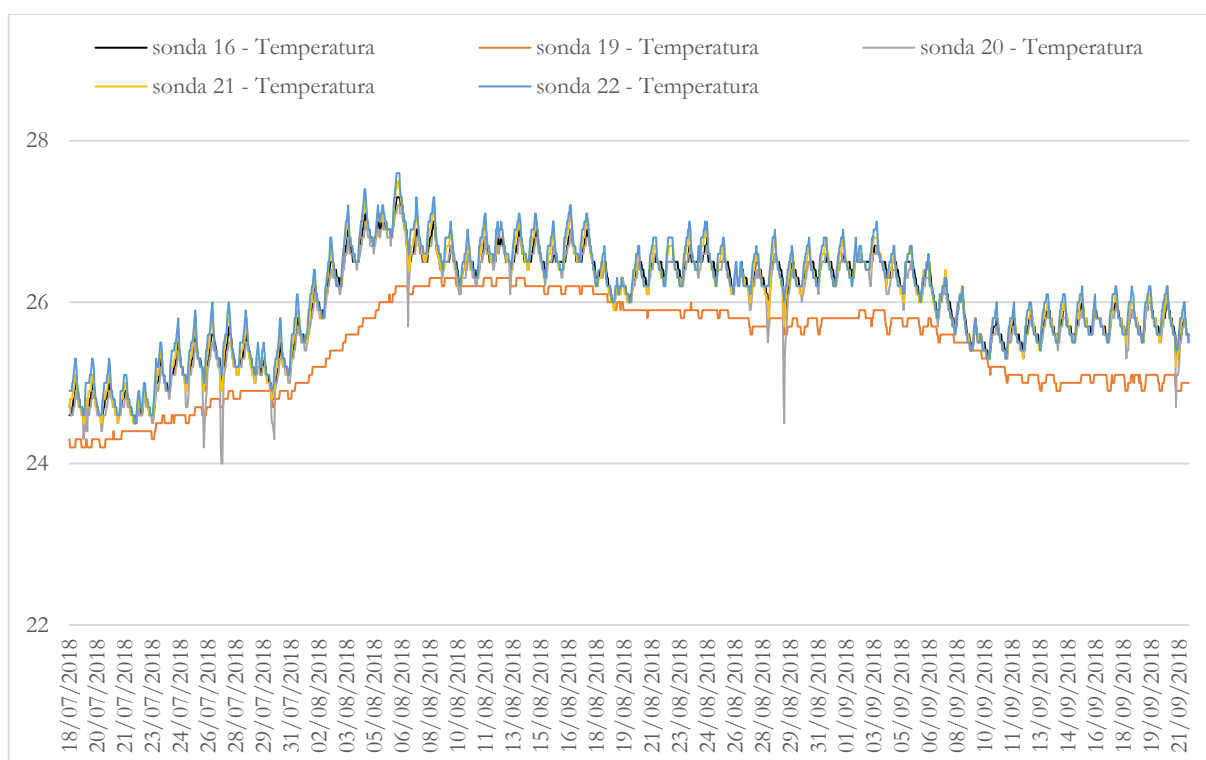


Grafico 30_T trend, lato facciata (est) 18/07/'18 – 22/09/'18

- Periodo monitoraggio: 18 Luglio 2018 – 22 Settembre 2018.
- Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, lato facciata.
- Impianti: Impianti HVAC assenti.
- Parametri misurati: Temperatura.
- Errori di misurazione: Mancata rilevazione dei dati: il 22/07/'18 ore 15:00, sonda 19; il 02/08/'18 ore 1:00, sonda 20; il 02/08/'18 ore 8:00, sonda 20; dal 8/08/'18 ore 13:00 al 9/08/'18 ore 2:00, sonda 20; il 27/10/'18 ore

²⁰¹ Le oscillazioni giornaliere di T e UR sono trattate al paragrafo 3.14.4.

12:00, sonda 21; l'8/11/'18 ore 3:00, sonda 22; il 22/11/'18 ore 11:00, sonda 20.

Valori registrati: Range T: 24 °C – 27,6 °C.

Considerazioni: L'andamento della temperatura dell'aria, registrato tra il 18 luglio e il 22 settembre 2018 dalle sonde collocate all'interno della sala della Biblioteca, sul lato della facciata, riporta la stessa tendenza per le sonde 16, 20, 21 e 22; mentre la sonda 19 -situata ad un'altezza pari a 2m dal pavimento come la sonda 20, ma non collocata sull'estremità di un'asta, a circa 1m di distanza dalla parete, bensì all'interno di uno scaffale dal lato est dell'edificio- riporta un *trend* della temperatura che segue quello restituito dai dati delle altre sonde, ma con valori inferiori. Rispetto ai dati della sonda 23, all'interno di uno scaffale, ma sul lato opposto alla facciata -vista nel grafico precedente-, la sonda 19 registra valori inferiori da metà agosto al 22 settembre e picchi giornalieri estremamente contenuti.

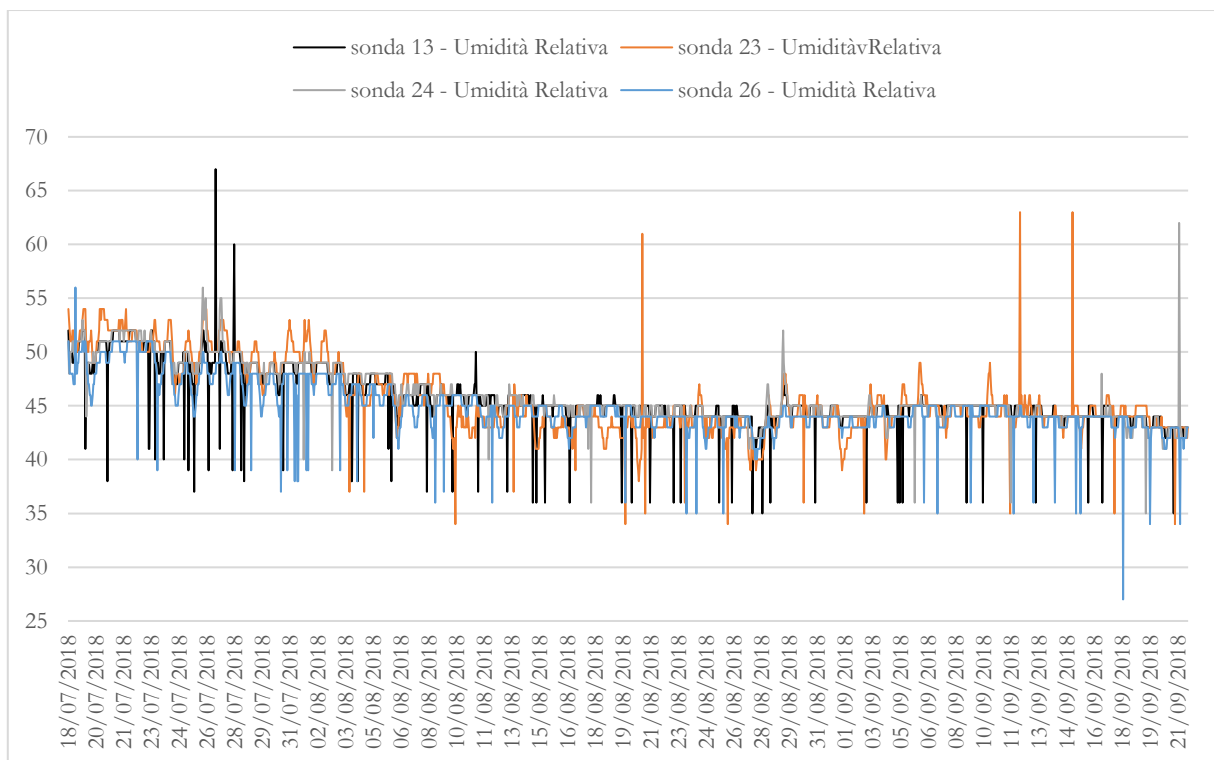


Grafico 31_UR *trend*, lato opposto alla facciata (ovest) 18/07/'18 – 22/09/'18

Periodo monitoraggio: 18 Luglio 2018 – 22 Settembre 2018.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, lato opposto alla facciata.

Impianti: Impianti HVAC assenti.

Parametri misurati: Umidità relativa.

Errori di misurazione: Mancata rilevazione dei dati: il 16/08/'18 ore 22:00, sonda 13; il 18/08/'18 ore 9:00, sonda 23.

Valori registrati: *Range UR*: la maggior parte dei dati riporta valori compresi in un *range* tra il 42 % – 52 % e numerosi picchi negativi registrati durante l'intero periodo, che raggiungono valori inferiori al 40%. Raramente sono stati registrati picchi superiori al 55 %.

Considerazioni: La tendenza dell'umidità relativa, riportata dalle sonde collocate sul lato opposto della facciata, all'interno della Biblioteca, è piuttosto equivalente. Anche in questo caso i dati che si discostano maggiormente dalla tendenza media sono quelli registrati dalla sonda 23, il cui andamento è leggermente più irregolare rispetto a quello rilevato dalle altre sonde.

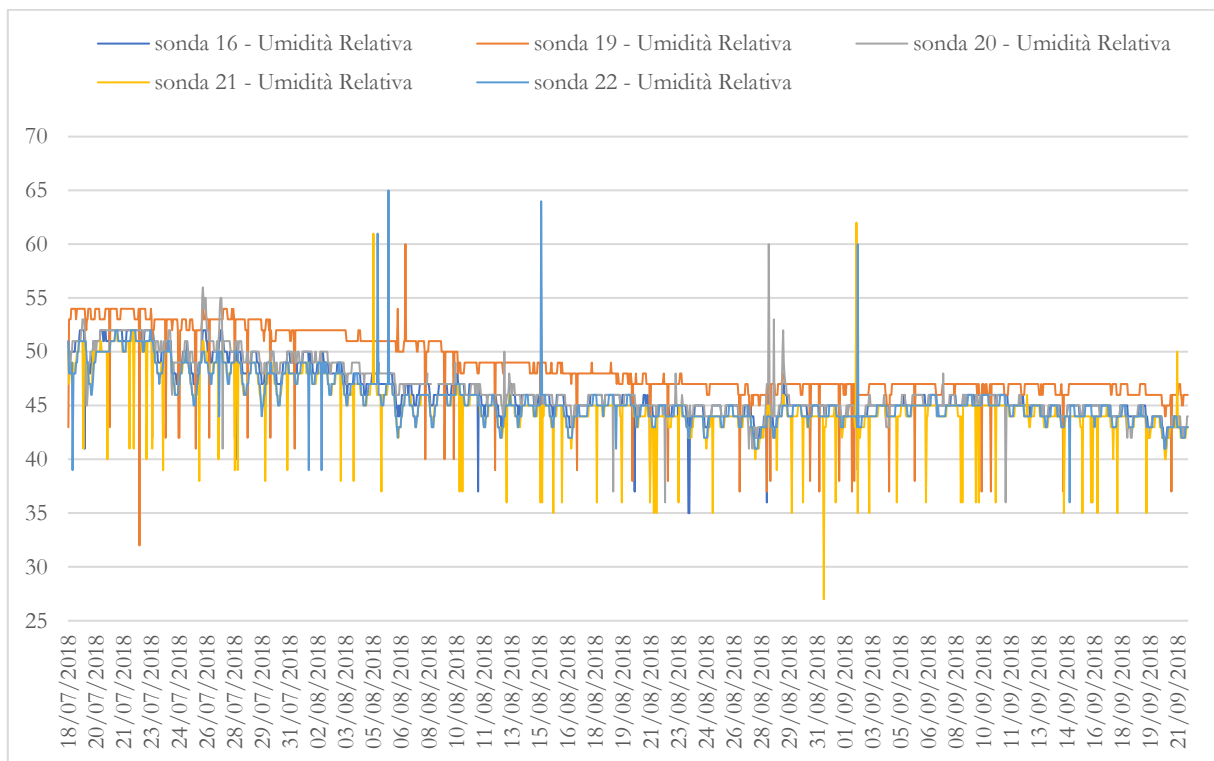


Grafico 32_UR trend, lato facciata (est) 18/07/'18 – 22/09/'18

Periodo monitoraggio: 18 Luglio 2018 – 22 Settembre 2018.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, lato facciata.

Impianti: Impianti HVAC assenti.

Parametri misurati: Umidità relativa.

Errori di misurazione: Mancata rilevazione dei dati: il 08/08/'18 dalle ore 13:00 alle ore 02:00, sonda 20.

Valori registrati: *Range* UR: 42 % 52 %. Vi sono picchi giornalieri superiori al 55 % - raramente- ed inferiori al 40 %. La sonda 19 registra un *range* superiore: tra il 44 % e il 54 %

Considerazioni: La tendenza del dato dell'umidità relativa, riportata dalle sonde collocate sul lato est dell'edificio all'interno della Biblioteca, è piuttosto equivalente. Anche in questo caso, come per i valori della temperatura, i dati di umidità relativa che si discostano maggiormente dai valori medi riportati dalle sonde 16, 20, 22, sono quelli registrati dalla sonda 19, che risultano in questo caso superiori rispetto agli altri (fino a +4 %, senza considerare le differenze legate ai picchi).

Confrontando i dati delle sonde sopraelencate -ad esclusione della sonda 19-, con quelli rilevati dalle sonde *indoor* lungo il lato opposto alla facciata, si nota che la tendenza è coincidente, i valori registrati rientrano nel medesimo *range* (42 % - 52 %).

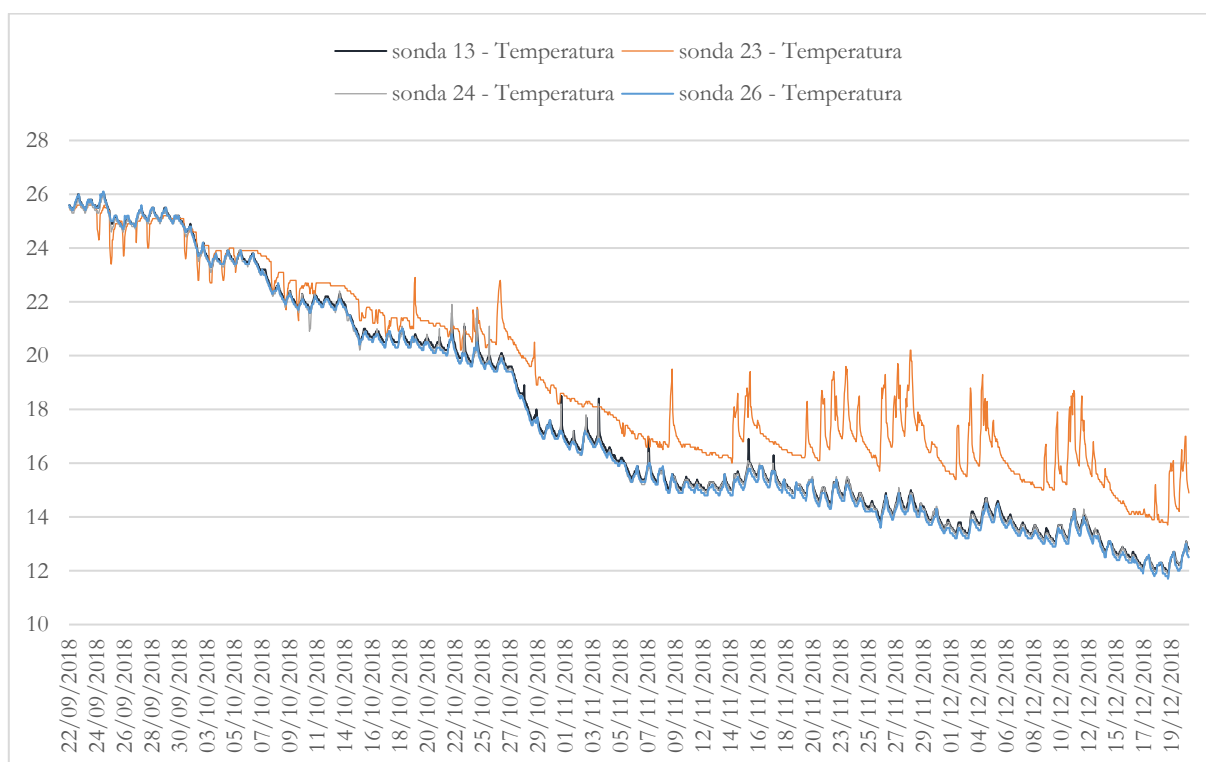


Grafico 33_ T trend, lato opposto alla facciata (ovest) 22/09/'18 – 21/12/'18

Periodo monitoraggio: 22 Settembre 2018 – 21 Dicembre 2018.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, lato opposto alla facciata.

Impianti: Impianti HVAC assenti.

Parametri misurati: Temperatura.

Errori di misurazione: -

Valori registrati: *Range* T: 12 °C – 26 °C.

Considerazioni: Come notato anche nei grafici precedenti, l'unica sonda che riporta una tendenza differente rispetto alle altre, anche in questo caso risulta essere la sonda 23: i valori della temperatura dell'aria rilevati da questa sonda restituiscono sbalzi giornalieri maggiori rispetto ai valori registrati dal resto delle sonde, inoltre, tali valori, riportati dalla sonda 23, seguono il *trend* del resto delle sonde, ma con valori maggiori, a partire dal mese di ottobre, fino alla fine del periodo autunnale individuato.

Durante questi mesi le temperature *indoor* non scendono al di sotto degli 11,7 °C: sottolineando ancora una volta l'assenza di sistemi di condizionamento e ventilazione dell'aria, notiamo come l'edificio si dimostri discretamente efficiente dal punto di vista termico.

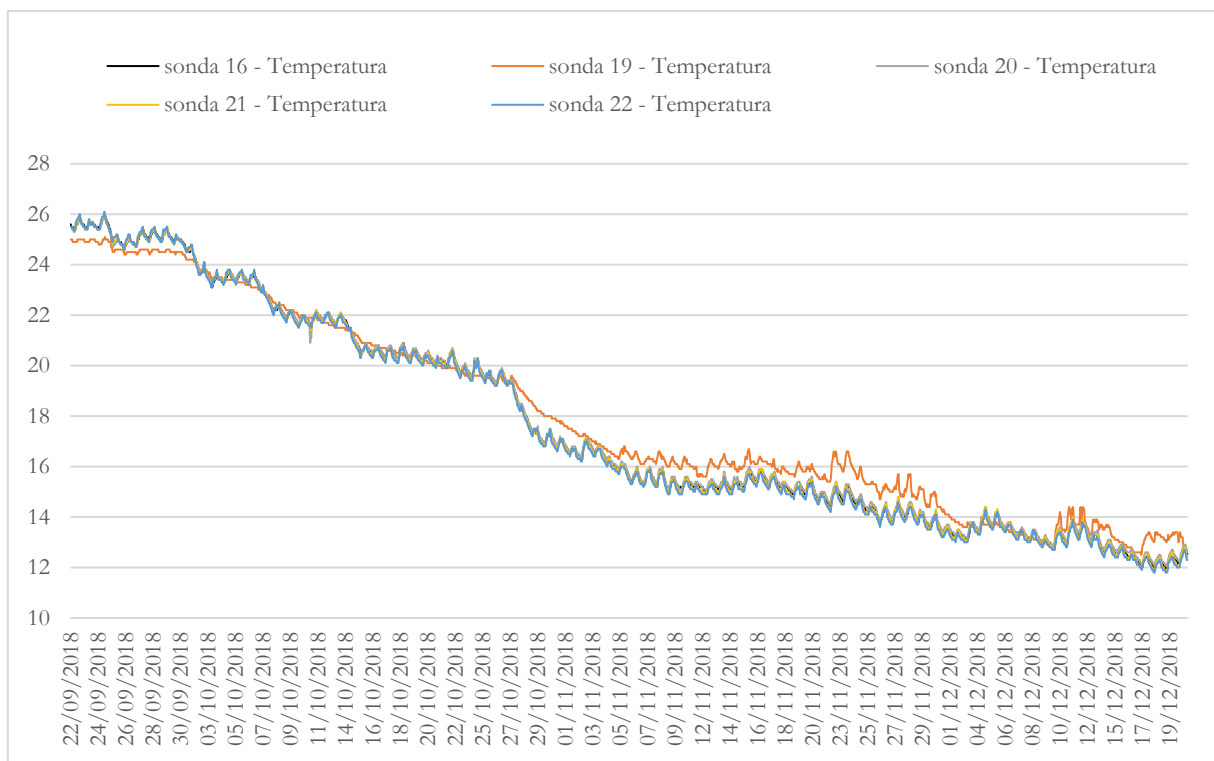


Grafico 34_ T trend, lato facciata (est) 22/09/'18 – 21/12/'18

Periodo monitoraggio: 22 Settembre 2018 – 21 Dicembre 2018.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica Univesitaria di Salamanca, lato facciata.

Impianti: Impianti HVAC assenti.

Parametri misurati: Temperatura.

Errori di misurazione: -

Valori registrati: *Range* T: 12 °C – 26 °C.

Considerazioni: La temperatura giornaliera dell'aria risulta essere piuttosto costante, i picchi sono contenuti e, anche in questo caso, la sonda 19 si distingue dalle altre, registrando valori che rientrano nel *range* condiviso dalle altre sonde dal 22 settembre fino a fine ottobre; dopodiché si ha un'inversione di tendenza: i dati registrati dalla sonda 19 da fine ottobre al 21 dicembre superano quelli rilevati dalle altre sonde di circa 1 °C.

Gli sbalzi giornalieri registrati dalla sonda all'interno di uno scaffale dal lato della *Fachada Rica*, risultano essere più contenuti rispetto a quelli registrati sul lato opposto dalla sonda 23.

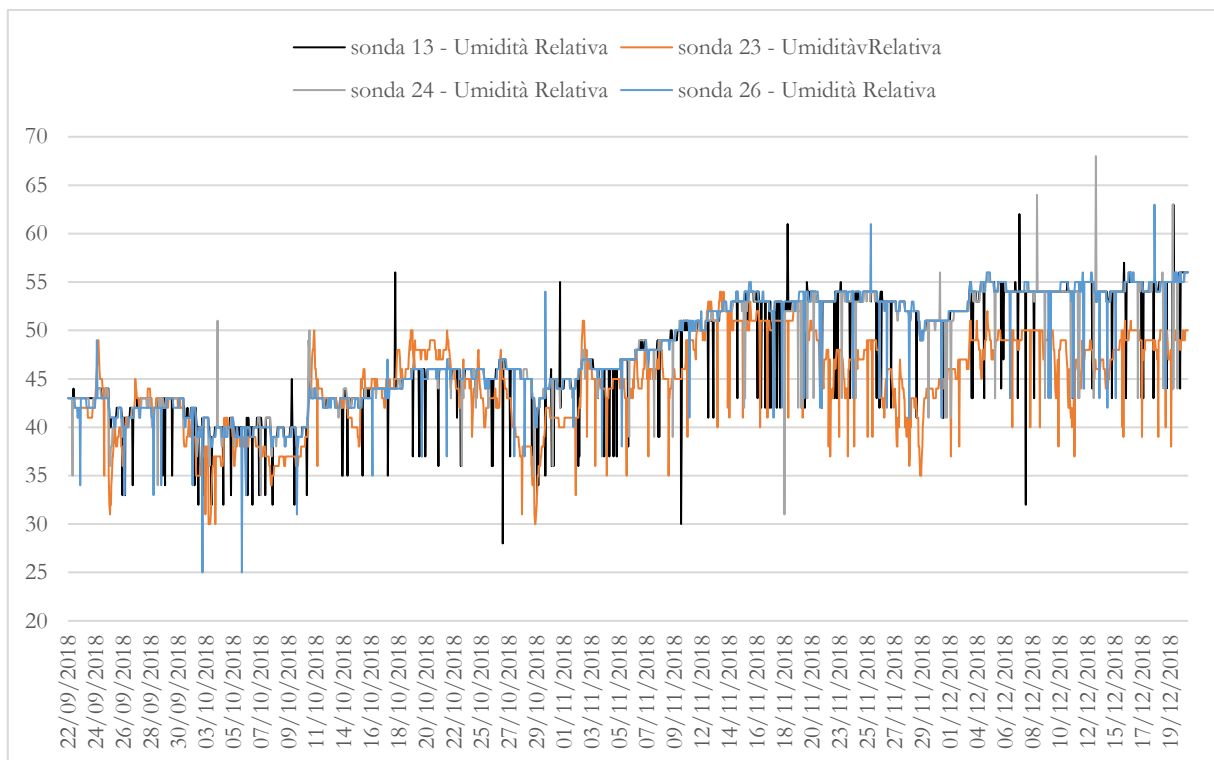


Grafico 35_ UR trend, lato opposto alla facciata (ovest) 22/09/'18 – 21/12/'18

Periodo monitoraggio: 22 Settembre 2018 – 21 Dicembre 2018.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, lato opposto alla facciata.

Impianti: Impianti HVAC assenti.

Parametri misurati: Umidità relativa.

Errori di misurazione: -

Valori registrati: *Range* UR: 40 % e il 56 %, senza considerare i picchi giornalieri, che raggiungono anche valori inferiori al 35 % e -raramente- superiori al 60

%. La sonda 23 si discosta da questo *range*, registrando valori inferiori: otteniamo un *range* compreso tra il 35 % e il 53 %.

Considerazioni:

La sonda 23 registra valori mediamente inferiori rispetto a quelli riportati dalle sonde 13, 24, 26; in particolare da metà novembre fino a fine dicembre l'umidità relativa rilevata da quest'ultima sonda, risulta essere mediamente inferiore rispetto alle altre tendenze: si registrano valori tra il 40 – 50% -senza considerare i picchi-, anziché valori tra il 50% – 55 %, come registrano le altre sonde. Inoltre, i valori registrati dalla sonda 23 risultano essere leggermente al di sotto di quelli riportati dalle altre sonde, in particolare durante le giornate che vanno dal 2 al 7 ottobre, ma va considerato che questa sonda è collocata a 2m di altezza, in uno degli scaffali dove sono collocati vari libri. Anche la sonda 24 si trova a 2m d'altezza dal pavimento, ma all'estremità di un'asta, distante di 1m dalla parete, la quale riporta, invece, valori in linea con quelli restituiti anche dalle altre sonde.

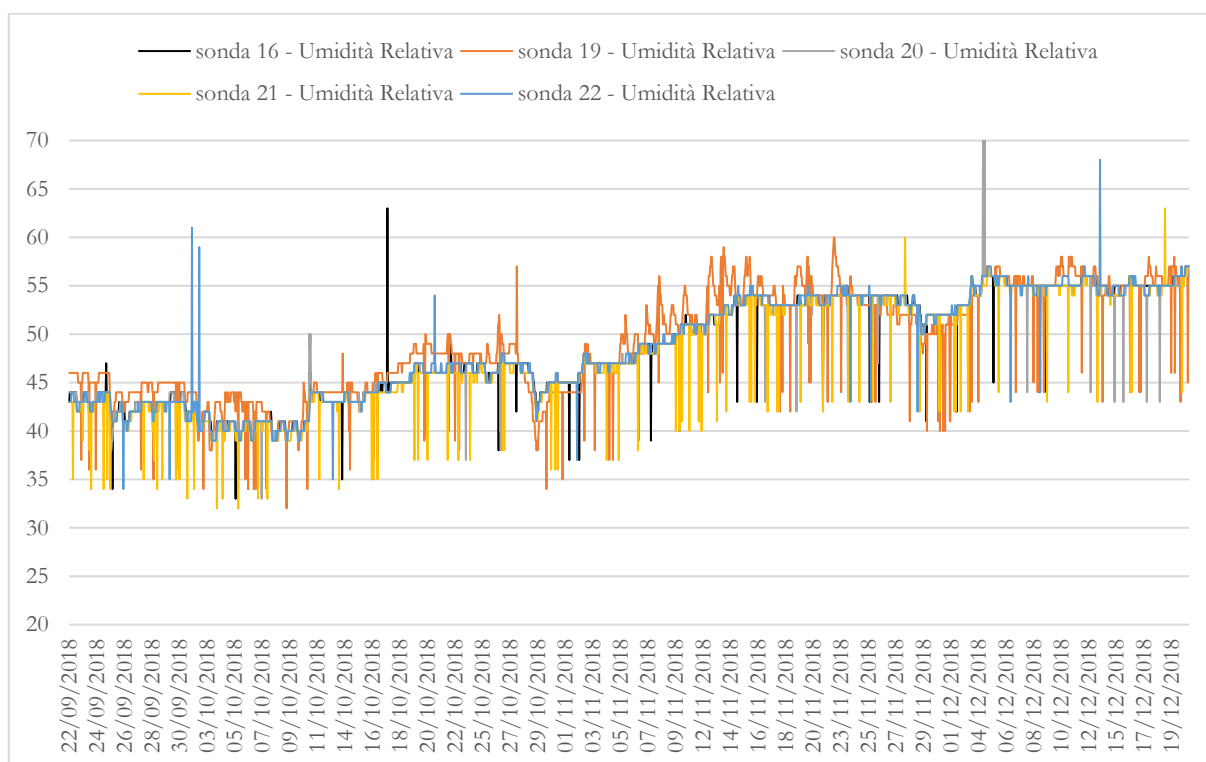


Grafico 36_ UR trend, lato facciata (est) 22/09/'18 – 21/12/'18

Periodo monitoraggio: 22 Settembre 2018 – 21 Dicembre 2018.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, lato facciata.

Impianti: Assenti.

Parametri misurati: Umidità relativa.

Errori di misurazione: -

Valori registrati:

Range UR: 40 % e il 56 %, senza considerare i picchi giornalieri, che raggiungono anche valori inferiori al 40 % e superiori al 6 % (raramente). Tra il 12 e il 23 novembre la sonda 19 supera questo range registrando valori di UR vicini al 60%.

Considerazioni:

Il *range* e la tendenza registrato dalle sonde 16, 20, 21 e 22 corrispondono ai valori restituiti dalle sonde 13, 24 e 26. La sonda 19 riporta valori più vicini a quelli registrati dalle sonde sopraelencate, rispetto a quelli rilevati dalla sonda 23, nonostante anche i dati della sonda 19 risultino più alti rispetto a quelli registrati dalle altre sonde dal 22 settembre al 22 novembre, per poi risultare leggermente inferiori al dato delle altre sonde tra fine novembre e inizio dicembre; successivamente i valori sono piuttosto coincidenti.

La sonda 19 registra anche in questo caso meno oscillazioni giornaliere rispetto alla sonda 23 e non rileva il calo di umidità relativa che è stato invece rilevato dalla sonda 23, collocata sul lato opposto della sala, a partire dal 18 novembre circa.

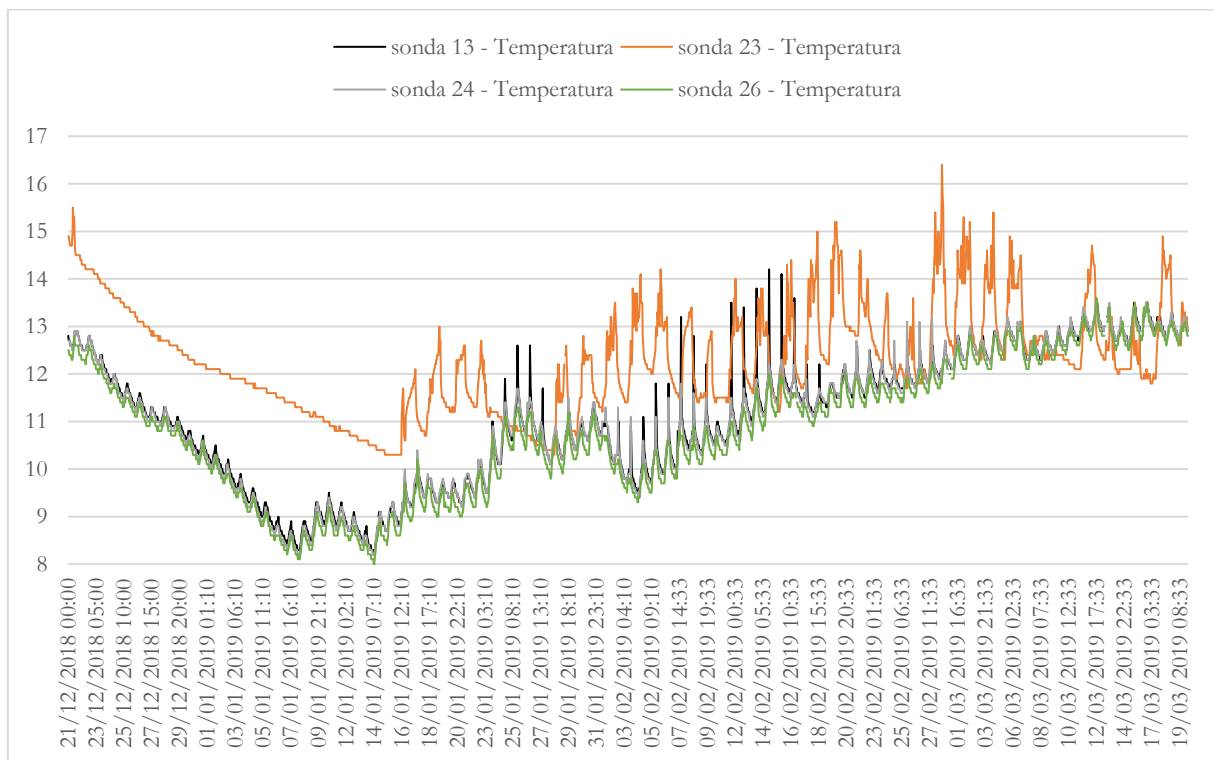


Grafico 37_ T trend, lato opposto facciata (ovest) 21/12/2018 – 20/03/2019

Periodo monitoraggio:

21 Dicembre 2018 – 20 Marzo 2019.

Ambiente monitorato:

Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, lato opposto alla facciata.

Impianti:

Impianti HVAC assenti.

- Parametri misurati: Temperatura.
- Errori di misurazione: Mancata rilevazione dei dati per tutte le sonde in più periodi: dal 2/04/'19 ore 19:00 al 3/04/'19 ore 8:00; dal 5/04/'19 ore 13:00 al 6/04/'19 ore 15:00; dal 7/04/'19 ore 5:00 al 8/04/'19 ore 4:00. *Gap* isolato: il 12/06/'19 ore 8:00, sonda 24.
- Valori registrati: *Range* T: 8 °C – 13,5 °C. La sonda 23 rileva un *range* tra i 10 °C e i 15 °C.
- Considerazioni: Durante il periodo invernale monitorato, le temperature registrate dalle sonde 13, 24 e 26, non scendono mai al di sotto degli 8 °C e le oscillazioni giornaliere sono contenute e costanti. Da fine gennaio a fine febbraio si hanno picchi maggiori -rispetto a quanto riportato dalla sonda 26- rilevati dalle sonde 13 e 24, rispettivamente collocate ad altezze pari a 3m e 2m; la sonda 26 (collocata a 7m d'altezza) riporta sbalzi e picchi della temperatura dell'aria giornalieri più contenuti, costanti durante l'intero periodo.
- I dati rilevati dal 21/12/2019 fino al 14/01/2019 dalla sonda 23, non si considerano validi: risultano essere troppo differenti rispetto al resto dei dati monitorati da questa sonda durante l'intero periodo di monitoraggio. Da metà gennaio, fino al 20/03/2019, le temperature restituite dalla sonda 23, seguono, ancora una volta, una tendenza che non coincide con quella delle altre sonde e si registrano valori fino a +3 °C rispetto a quelli registrati dalle sonde 13, 24, e 26.

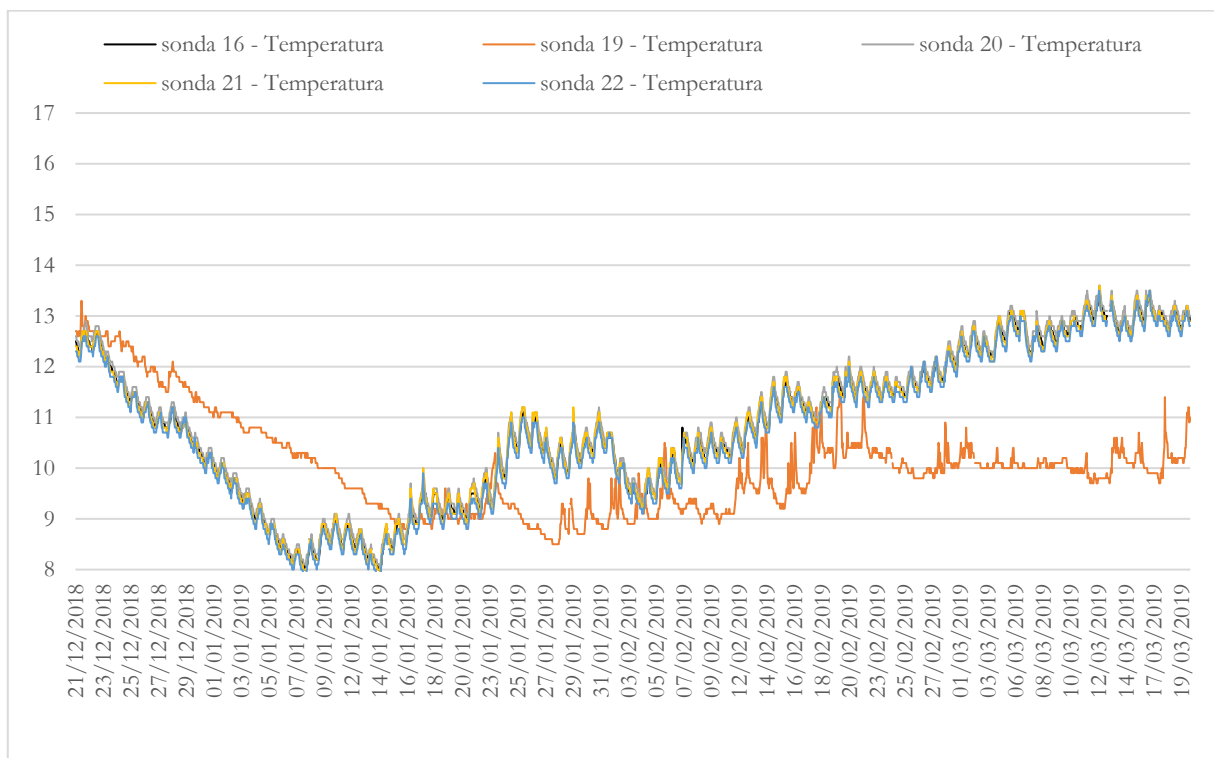


Grafico 38_ T trend, lato facciata (est) 21/12/'18 – 20/03/'19

Periodo monitoraggio: 21 Dicembre 2018 – 20 Marzo 2019.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, lato opposto alla facciata.

Impianti: Impianti HVAC assenti.

Parametri misurati: Temperatura.

Errori di misurazione: Mancata rilevazione dei dati per tutte le sonde in più periodi: dal 29/01/'19 ore 10:00 alle ore 16:00; dal 22/02/'19 ore 8:00 al 23/02/03; dal 01/02/'19 ore 12:00 al 2/02/'19 ore 13:00, sonda 19.

Valori registrati: *Range* T: 8 °C – 13,5 °C.

Considerazioni: Le considerazioni fatte per le sonde 13, 24 e 26 nel grafico precedente sono replicabili per le sonde 16, 20, 21, 22 del presente grafico.

I valori registrati dalla sonda 19 invece non sono assimilabili a quelli rilevati dalla sonda 23: la tendenza è la stessa ma i valori della sonda 19 sono molto inferiori.

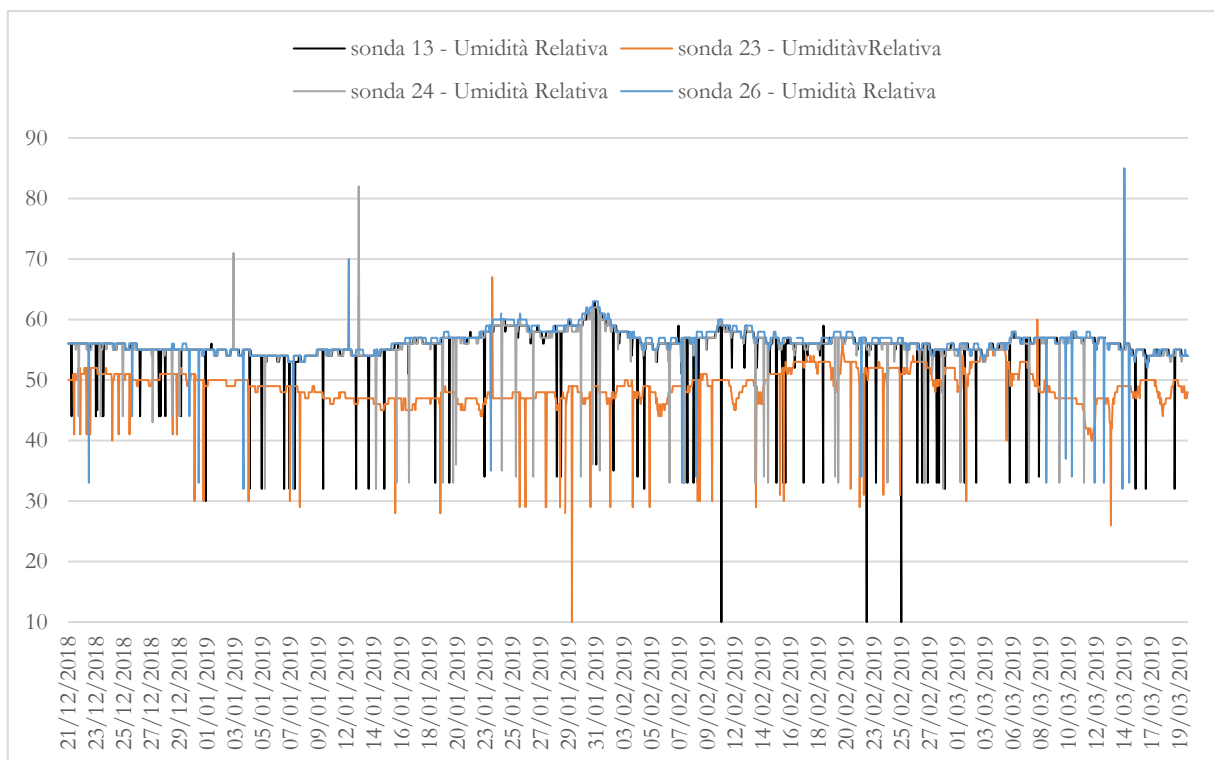


Grafico 39_UR trend, lato opposto facciata (ovest) 21/12/2018 – 20/03/2019

Periodo monitoraggio: 21 Dicembre 2018 – 20 Marzo 2019.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, lato opposto alla facciata.

Impianti: Impianti HVAC assenti.

Parametri misurati: Umidità relativa.

Errori di misurazione: Mancata rilevazione dei dati per tutte le sonde in più periodi: dal 2/04/'19 ore 19:00 al 3/04/'19 ore 8:00; dal 5/04/'19 ore 13:00 al 6/04/'19 ore 15:00; dal 7/04/'19 ore 5:00 al 8/04/'19 ore 4:00. *Gap* isolato: il 12/06/'19 ore 8:00, sonda 24.

Valori registrati: *Range* UR: 55 % - 63 % senza considerare i picchi giornalieri. La sonda 23 registra un *range* compreso tra il 45 % e il 55 %.

Considerazioni: Le sonde hanno rilevato valori di umidità relativa estremamente costanti: condizione ideale per la conservazione preventiva di un edificio e dei beni conservati in esso.

La sonda 23 restituisce valori di umidità relativa stabili ma inferiori rispetto a quelli registrati dal resto delle sonde presenti all'interno della Biblioteca, lungo il lato opposto alla *Fachada Rica*.

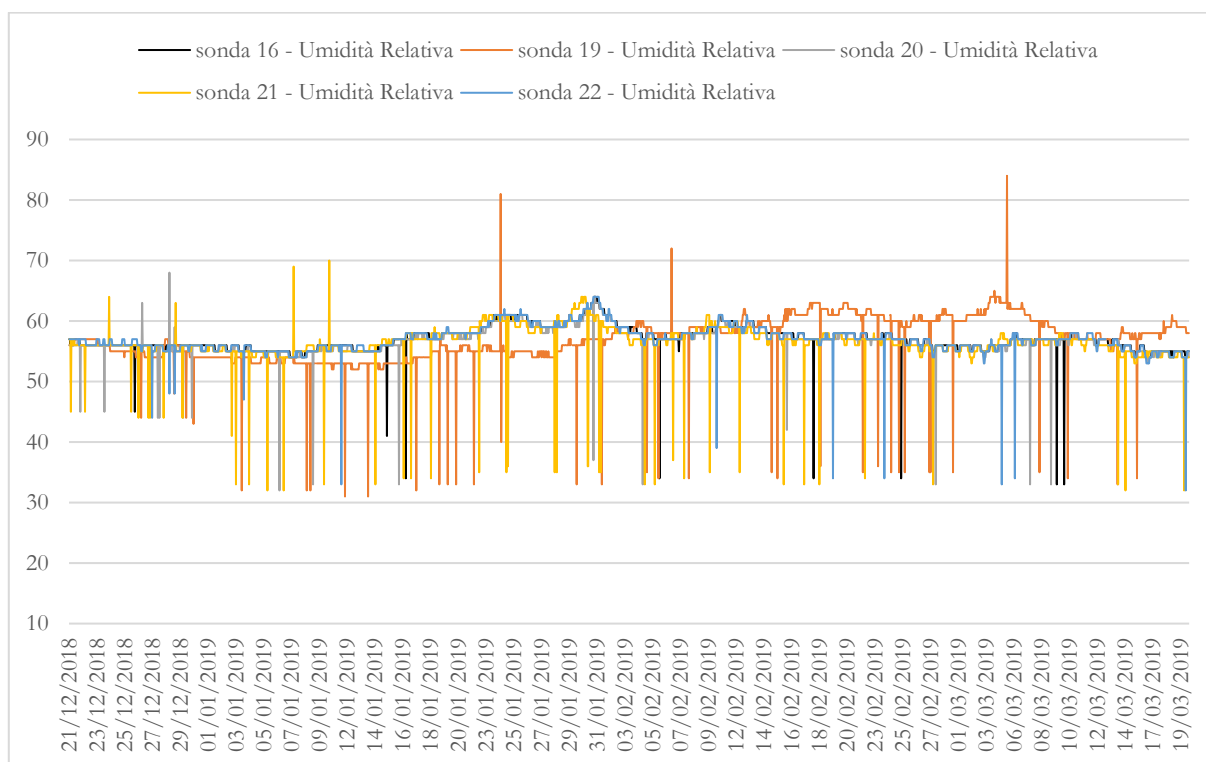


Grafico 40_ UR trend, lato facciata (est) 21/12/'18 – 20/03/'19

Periodo monitoraggio: 21 Dicembre 2018 – 20 Marzo 2019.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, lato opposto alla facciata.

Impianti: Impianti HVAC assenti.

Parametri misurati: Umidità relativa.

Errori di misurazione: -

Valori registrati: Range UR: 55 % - 63 % senza considerare i picchi giornalieri.

Considerazioni: Confrontando questo grafico con quello precedente, si nota che, nonostante le sonde all'interno degli scaffali (19 e 23) rilevino una tendenza dell'umidità relativa *indoor* non corrispondente tra loro, ciò non incide sul dato di UR monitorato dal resto delle sonde, all'interno della biblioteca: anche in questo caso, le sonde 16, 21 e 22 restituiscono dei dati di umidità relativa che rispecchiano -per valori e tendenza- quelli rilevati dalle sonde 13, 24 e 26 posizionate dal lato opposto.

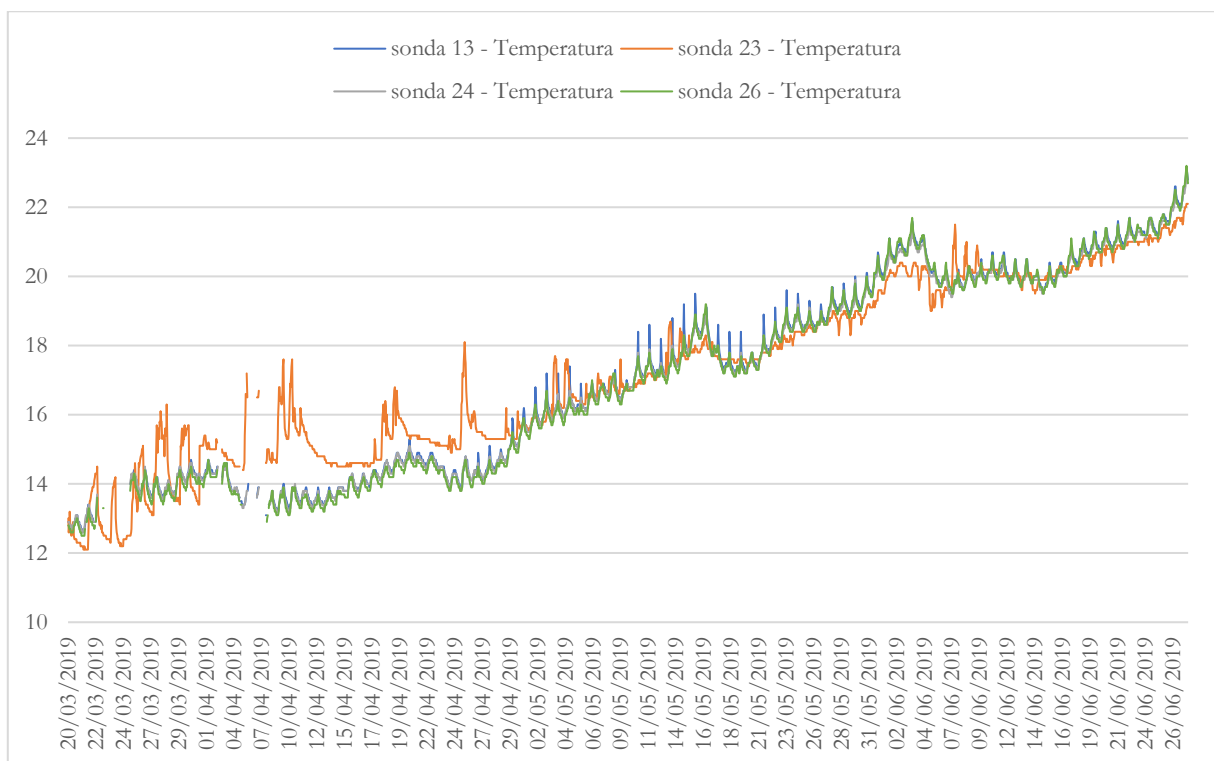


Grafico 41_T trend, lato opposto facciata (ovest) 20/03/2019 – 28/06/2019

Periodo monitoraggio: 20 Marzo 2019 – 28 Giugno 2019.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, lato opposto alla facciata.

Impianti: Impianti HVAC assenti.

Parametri misurati: Temperatura.

Errori di misurazione: Mancata rilevazione dei dati per tutte le sonde in più periodi: dal 2/04/'19 ore 19:00 al 3/04/'19 ore 8:00; dal 5/04/'19 ore 13:00 al 6/04/'19 ore 15:00; dal 7/04/'19 ore 5:00 al 8/04/'19 ore 4:00. Gap isolati: il 7/06/'19 ore 8:00, sonda 13; il 12/06/'19 ore 8:00, sonda 24.

Valori registrati: *Range* T: 12 °C – 23 °C.

Considerazioni: Anche durante il periodo individuato come invernale, le sonde collocate all'interno della biblioteca, vicino all'istituto dal lato opposto rispetto alla facciata, rilevano temperature adeguate alla conservazione dei beni ivi custoditi²⁰². La sonda 23 segue l'andamento del resto delle sonde tra maggio e fine giugno. Questa sonda rileva temperature e sbalzi giornalieri maggiori durante gli ultimi giorni di marzo e l'intero mese di aprile; dopodiché i valori registrati da questa sonda sono piuttosto coincidenti con quelli rilevati dalle altre durante maggio e dal 6 al 18 giugno; risultano invece inferiori durante i primi e gli ultimi giorni del mese di giugno.

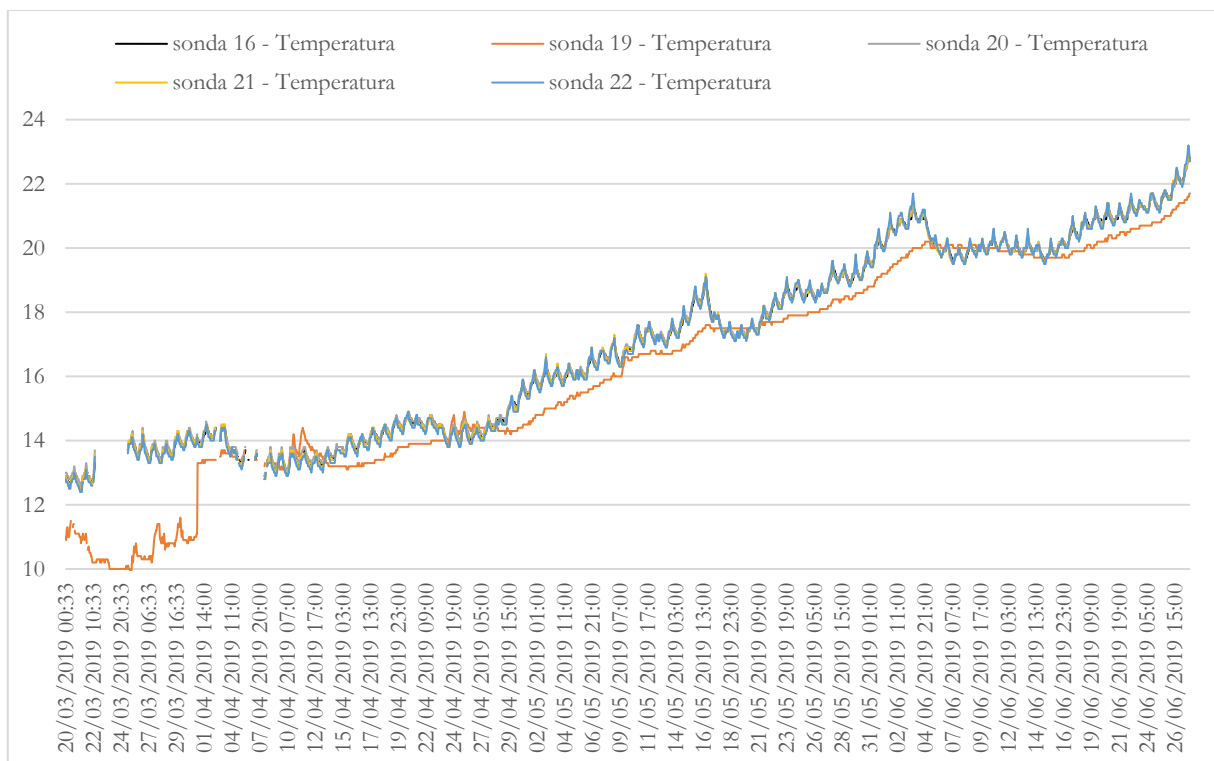


Grafico 42_ T trend, lato facciata (est) 20/03/'19 – 28/06/'19

Periodo monitoraggio: 20 Marzo 2019 – 28 Giugno 2019.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, lato opposto alla facciata.

Impianti: Impianti HVAC assenti.

Parametri misurati: Temperatura.

Errori di misurazione: Mancata rilevazione dei dati per tutte le sonde in più periodi: dal 22/03/'19 ore 15:00 al 25/03/'19 ore 13:00, sonde 16,20,21,22; dal

²⁰² Tenendo conto degli standard riportati al paragrafo 3.12.2.

2/04/'19 ore 19:00 al 3/04/'19 ore 8:00; dal 5/04/'19 ore 13:00 al 6/04/'19 ore 15:00; dal 7/04/'19 ore 5:00 al 8/04/'19 ore 4:00, sonde 16,20,21,22,19.

Valori registrati: *Range* T: 12 °C – 23 °C.

Considerazioni: La condizione emersa in alcuni dei grafici precedenti si ripresenta anche in questo periodo di monitoraggio: i dati delle sonde collocate sul lato della facciata principale dell'edificio de *Las Escuelas Mayores*, corrispondono in quanto a valori e tendenza ai dati registrati dalle sonde collocate sul lato opposto; il dato della temperatura registrato dalle sonde all'interno degli scaffali (19 e 23), non è invece coincidente: la sonda 19 registra valori inferiori di circa 1 °C rispetto a quelli rilevati dalla sonda 23.

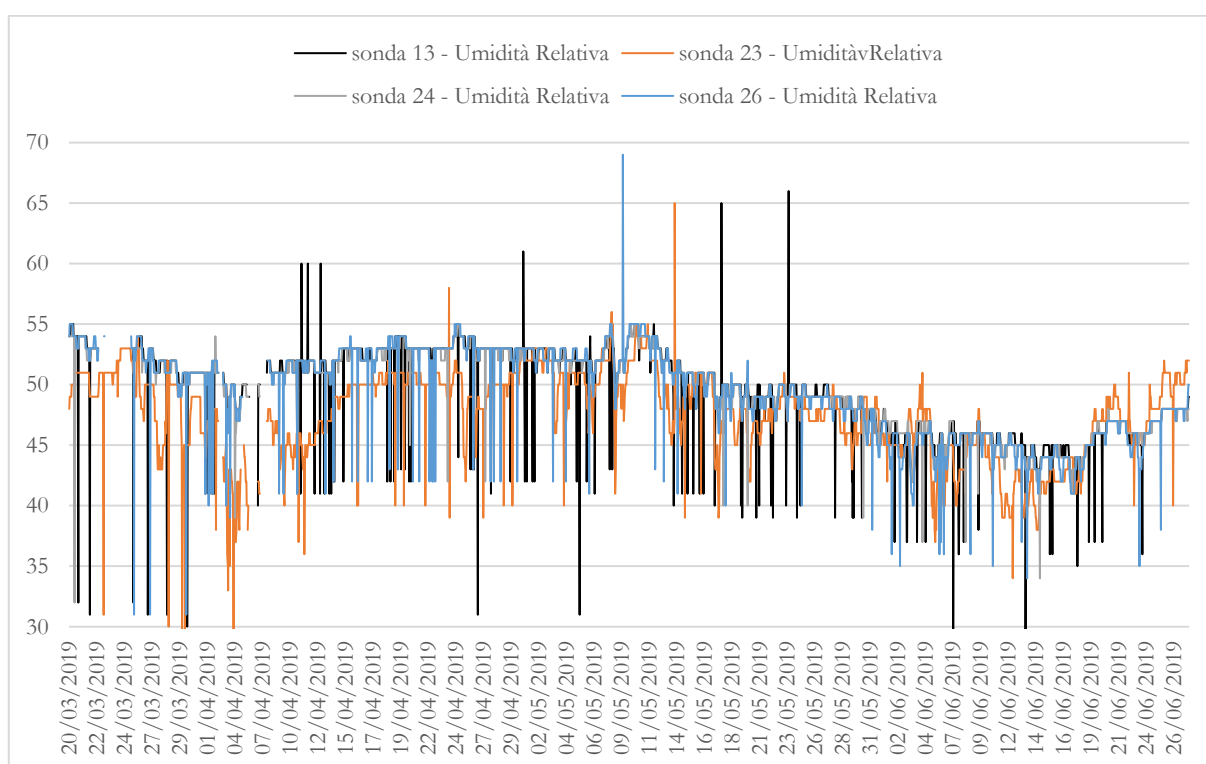


Grafico 43_UR trend lato opposto facciata (ovest) 20/03/2019 – 28/06/2019

Periodo monitoraggio: 20 Marzo 2019 – 28 Giugno 2019.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, lato opposto alla facciata.

Impianti: Impianti HVAC Assenti.

Parametri misurati: Umidità relativa.

Errori di misurazione: Mancata rilevazione dei dati per tutte le sonde in più periodi: dal 2/04/'19 ore 19:00 al 3/04/'19 ore 8:00; dal 5/04/'19 ore 13:00 al

6/04/'19 ore 15:00; dal 7/04/'19 ore 5:00 al 8/04/'19 ore 4:00. Gap isolati: il 7/06/'19 ore 8:00, sonda 13; il 12/06/'19 ore 8:00, sonda 24.

Valori registrati: Range UR: 41 % – 55 %. Sonda 23: range compreso tra il 40 % e il 55 % circa.

Considerazioni: Come rilevato per il periodo compreso tra il 21/12/2018 e il 20/03/2019, anche durante il periodo primaverile, i valori di umidità relativa sono estremamente stabili; quelli registrati dalla sonda 23 risultano leggermente meno stabili e con valori inferiori rispetto a quelli mediamente restituiti dalle altre sonde.

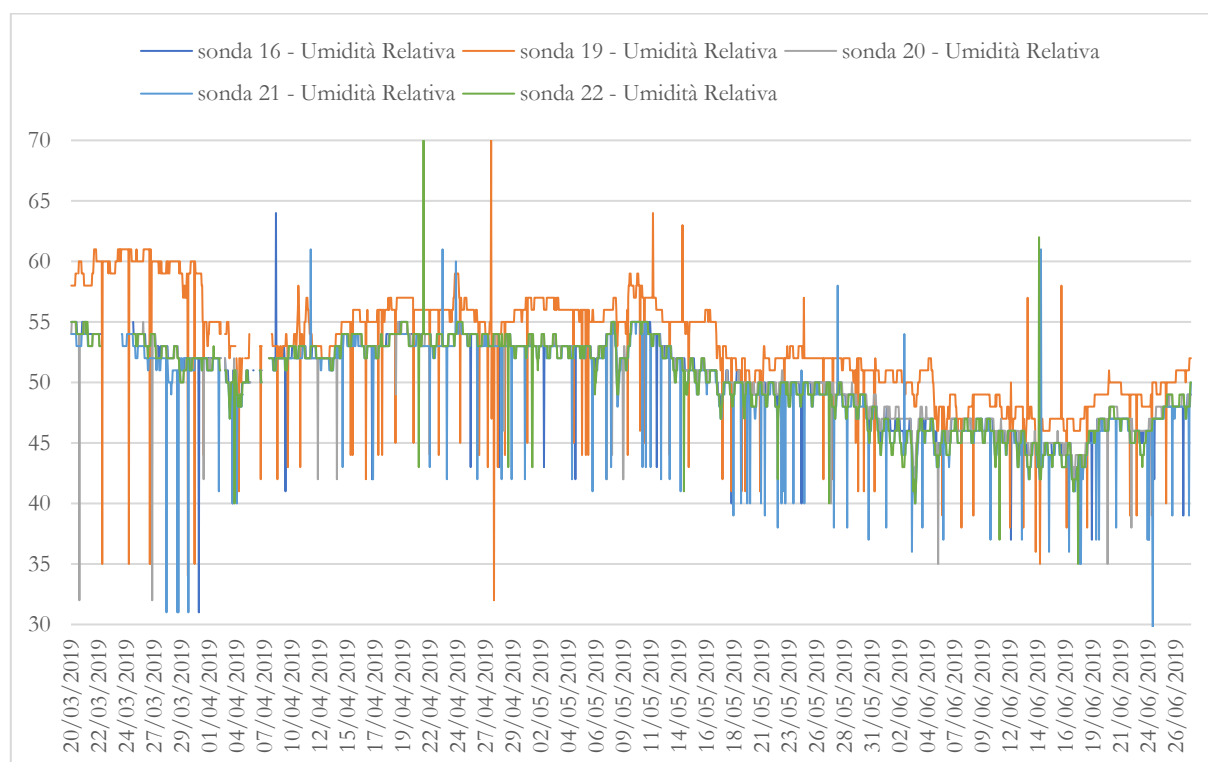


Grafico 44_ UR trend, lato facciata (est) 20/03/'19 – 28/06/'19

Periodo monitoraggio: 20 Marzo 2019 – 28 Giugno 2019.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, lato opposto alla facciata.

Impianti: Impianti HVAC Assenti.

Parametri misurati: Umidità relativa.

Errori di misurazione: Mancata rilevazione dei dati per tutte le sonde in più periodi: dal 22/03/'19 ore 15:00 al 25/03/'19 ore 13:00, sonde 16,20,21,22; dal 2/04/'19 ore 19:00 al 3/04/'19 ore 8:00; dal 5/04/'19 ore 13:00 al 6/04/'19 ore 15:00; dal 7/04/'19 ore 5:00 al 8/04/'19 ore 4:00, sonde 16,20,21,22,19.

Valori registrati: *Range UR*: 41 % – 55 %. Sonda 23: *range* compreso tra il 40 % e il 55 % circa.

Considerazioni: Anche qui, confrontando i dati delle sonde collocate da entrambi i lati della BUSAL (ad est la sonda 19, 16, 20, 21 e 22 e ad ovest la sonda 23, 13, 24 e 26), i dati dell'umidità relativa presentano forte correlazione, ad esclusione di quelli registrati dalle sonde 19 e 23.

3.14.1. Discussione dei risultati

Tra i risultati emersi, uno si ripresenta costantemente: la differenza dei valori rilevati dalle sonde 19 e 23, collocate all'interno degli scaffali della BUSAL, insieme al patrimonio librario; rispetto a quelli rilevati dal resto delle sonde. Tale differenza è dovuta proprio alla collocazione delle stesse sonde 19 e 23: queste rilevano il microclima dell'immediato intorno dell'oggetto (i libri), non quello che caratterizza la sala (la biblioteca); i valori registrati dalle sonde posizionate accanto ai libri, nelle scansie, non possono considerarsi rappresentativi dell'intera sala, perché le condizioni locali sono troppo specifiche e non omogenee²⁰³. Il resto delle sonde, sia quelle collocate dal lato est della sala sia quelle situate ad ovest, ha registrato dati coerenti tra loro, in termini di *trend* e di valori, per l'intero periodo di monitoraggio.

Lo studio dei dati monitorati, suddiviso per periodi stagionali, ha rivelato valori di umidità relativa e di temperatura dell'aria mediamente in linea con i *range* suggeriti dal MIBAC e dalla UNI 10829:1999 per la conservazione di: manufatti artistici di carta; documenti archivistici su carta, o pergamena; manoscritti; volumi a stampa; disegni su supporto cartaceo; legature di libri con pelle o pergamena; legno. Ciononostante, come già specificato in questa tesi²⁰⁴, una volta appurato che i beni conservati nella BUSAL sono i medesimi sin dalla data della sua costruzione, così come il microclima storico²⁰⁵ che la caratterizza, i parametri microclimatici più adeguati alla conservazione di questi stessi beni, sono quelli ai quali essi si sono acclimatati dal 1509 ad oggi, che possono anche discostarsi dai *range* suggeriti dalle normative. Ciò che potrebbe esporre tale patrimonio a rischio di degrado sono invece eventuali oscillazioni giornaliere: osservando i grafici riportati al paragrafo precedente, tali oscillazioni di T e UR sembrano contenute, il che influirebbe positivamente sulla conservazione dei beni e dell'edificio stesso. Per confermare questa ipotesi, al paragrafo 3.14.4. sono state calcolate le oscillazioni giornaliere registrate dalle sonde durante l'intero periodo di monitoraggio.

3.14.2. Studio della stratificazione dell'aria

Come accennato al paragrafo 3.13., il fenomeno della stratificazione dell'aria può dimostrarsi pericoloso per la conservazione preventiva del patrimonio; specialmente in uno spazio come la BUSAL, caratterizzato dalla presenza di librerie con scaffali che occupano gran parte della sala, facendo sì che vi siano beni conservati sia negli scaffali situati a pochi centimetri dal pavimento, sia in quelli collocati a 7m d'altezza circa. Per verificare se il patrimonio custodito alle diverse altezze all'interno della Biblioteca fosse conservato nelle medesime condizioni microclimatiche di T e UR, è stata studiata la stratificazione

²⁰³ Come noto, la carta assorbe e rilascia umidità, alterando dunque i parametri microclimatici nelle sue immediate vicinanze.

²⁰⁴ Cfr. EN 15757:2010 e paragrafi 1.4. e 3.12.2.

²⁰⁵ Cfr. EN 15757:2010 e paragrafo 1.1.3.

dell'aria. Essa può dipendere dalla differenza tra la temperatura dell'aria generata dagli impianti di riscaldamento e quella ambientale: più è grande questa differenza, maggiore sarà la forza ascensionale che porta l'aria calda verso l'alto. Ciononostante, l'aria si stratifica anche in assenza di impianti di condizionamento: è noto che l'aria calda tenda a salire verso l'alto. L'aria si suddivide quindi in strati che possono avere valori di T più o meno omogenei a diverse altezze da terra. Di conseguenza, dato il rapporto inversamente proporzionale tra T e UR, al variare dei valori di T varieranno anche quelli di UR. Dunque, per questa ricerca sono state calcolate le differenze medie, massime e minime tra i valori di T e UR registrati dalla sonda 16 (h. 3m), 19 (h. 2m, in uno scaffale), 20 (h. 2m), 21 (h. 4m), 22 (7m), collocate all'interno della Biblioteca, lungo il lato della *Fachada Rica* (est); dalle sonde 13 (h. 3m), 23 (h. 2m, in uno scaffale), 24 (h. 2m), 26 (h. 7m), situate sul lato opposto della facciata (ovest), all'interno della Biblioteca.

Si riportano di seguito i risultati emersi:

Tabella 16. Stratificazione dell'aria – temperatura, lato est

ΔT (°C)	22 (7m) -19 (2m, libreria)	22 (7m) -20 (2m)	22 (7m) -16 (3m)	22 (7m) -21 (4m)
Differenza media	0,84 °C	0,17 °C	0,07 °C	0,11 °C
Differenza max	4,10 °C	1,50 °C	0,40 °C	0,70 °C
Differenza min	0,00 °C	0,00 °C	0,00 °C	0,00 °C

Riportando l'intero periodo di monitoraggio in un unico grafico, si presentano due grafici esplicativi della tabella soprastante:

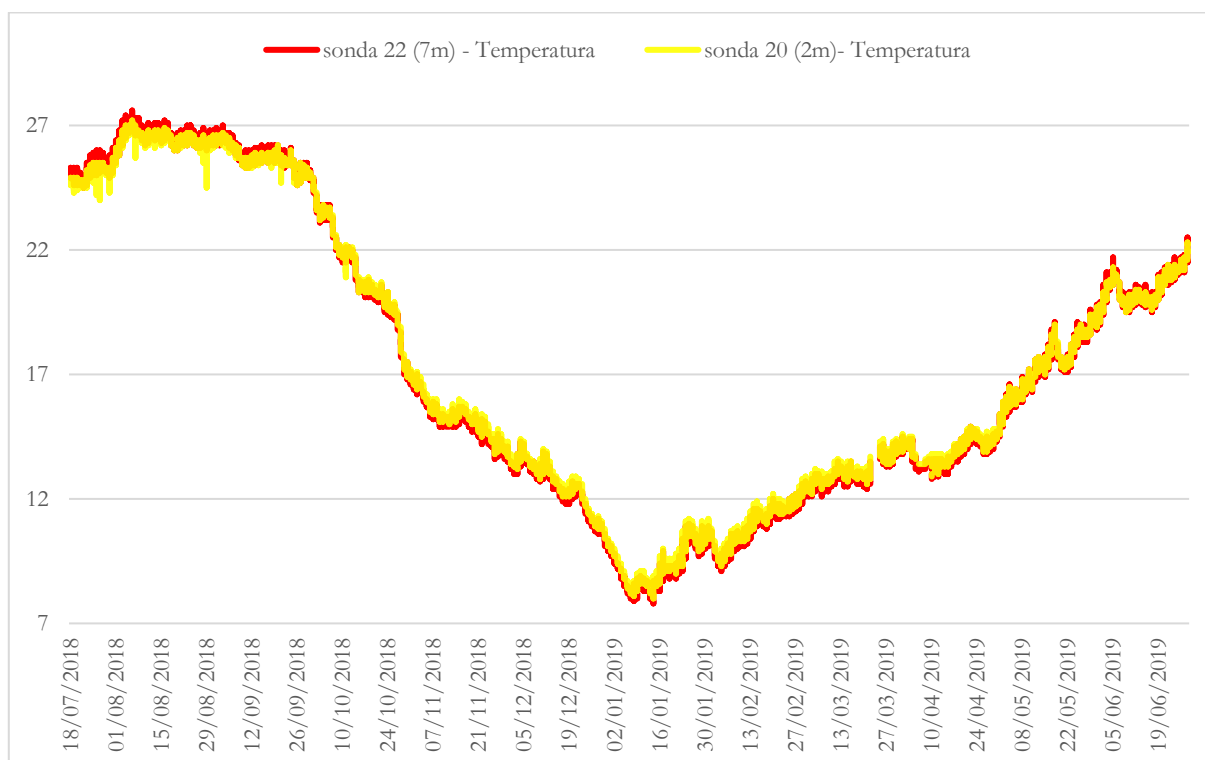


Grafico 45_Sonda 22, sonda 20: temperatura - valori a confronto.



Grafico 46_Sonda 22, sonda 19: temperatura - valori a confronto. libreria

Si è deciso di riportare il Grafico 45, che mette a confronto la tendenza della sonda collocata nel punto più alto (sonda 22, 7m) e quella della sonda collocata nel punto più basso (sonda 20, 2m), perché ci si aspettava una differenza, dovuta all'effetto della stratificazione dell'aria, più evidente. In realtà tutte le sonde (20,16,21), ad esclusione della 23 -situata in uno degli scaffali della libreria, a 2m di altezza-, seguono la medesima tendenza, con valori che differiscono mediamente rispettivamente 0,17°C, 0,07°C e 0,11°C da quelli registrati dalla sonda 22. La stratificazione della temperatura dell'aria risulta essere omogenea.

Le differenze massime di temperatura sono state rilevate: il 15/03/2019 alle ore 18:33 (sonda 22 – sonda 19); il 29/08/2019 alle ore 8:00 (sonda 22 – sonda 20); il 28/08/2019 alle ore 4:10 (sonda 22 – sonda 21); il 7/02/2019 alle ore 11:33 (sonda 22 – sonda 16).

Lo stesso è stato fatto per il dato dell'umidità relativa:

Tabella 17. Stratificazione dell'aria – umidità relativa, lato est

Δ UR (%)	22 (7m) - 19 (2m, scaffale)	22 (7m) -20 (2m)	22 (7m) -16 (3m)	22 (7m) -21 (4m)
Lato facciata				
Differenza media	2,84 %	0,58 %	0,75 %	0,49 %
Differenza max	26 %	24 %	27 %	24 %
Differenza min	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %

Le differenze massime registrate per UR sono dovute ad alcuni picchi isolati, come si può notare dai due grafici sottostanti (Grafico 47 e 48) e corrispondono alle seguenti date e ore: 17/01/2019 alle ore 14:10 (sonda 22 – sonda 19); 16/01/2019 alle ore 5:10 (sonda 22 – sonda 20); 31/01/2019 alle ore 5:10 (sonda 22 – sonda 16); 16/01/2019 alle ore 18:10 (sonda 22 – sonda 21).

Mediamente le differenze di umidità relativa tra le sonde collocate a 2m, 3m e 4m con la sonda collocata più in alto (7m, sonda 22) si aggirano attorno allo 0,60%; ad esclusione della differenza tra l'umidità

relativa registrata dalla sonda 22 e quella registrata dalla sonda 19 (Grafico 48), la cui differenza media è pari al 2,84%.

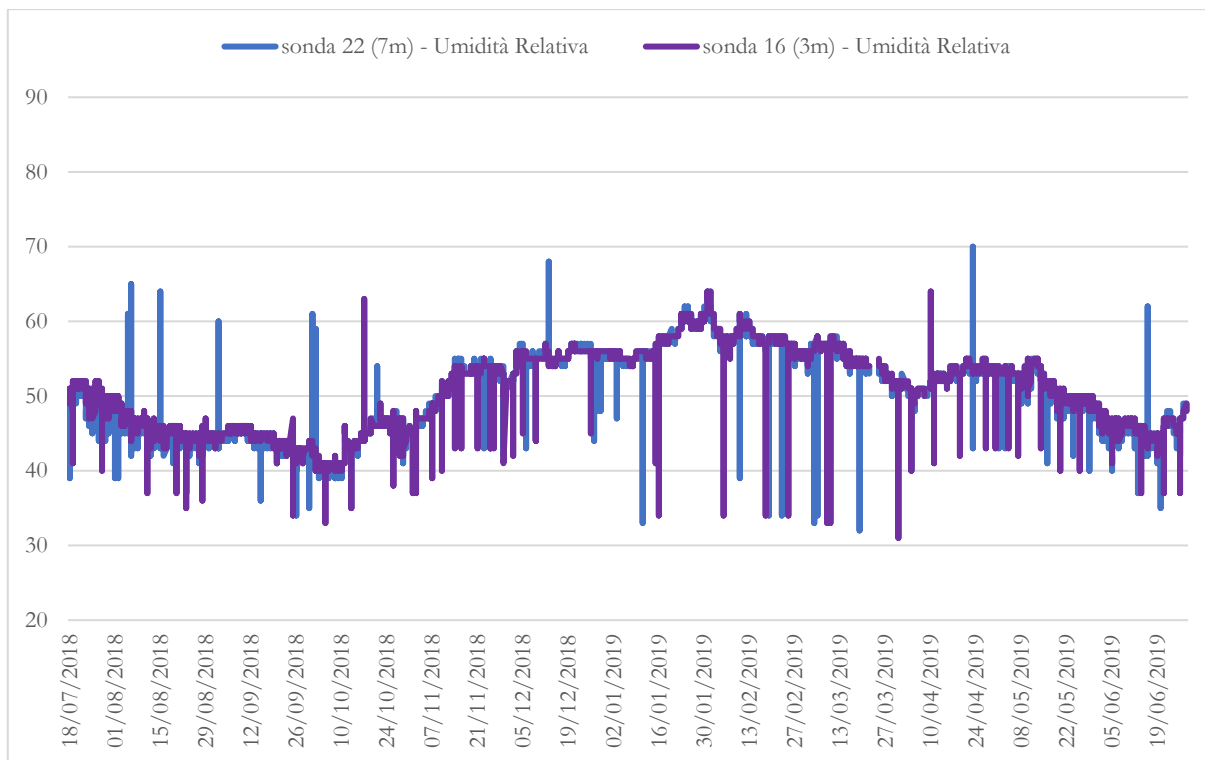


Grafico 47_Sonda 22, sonda 16: umidità relativa - valori a confronto.

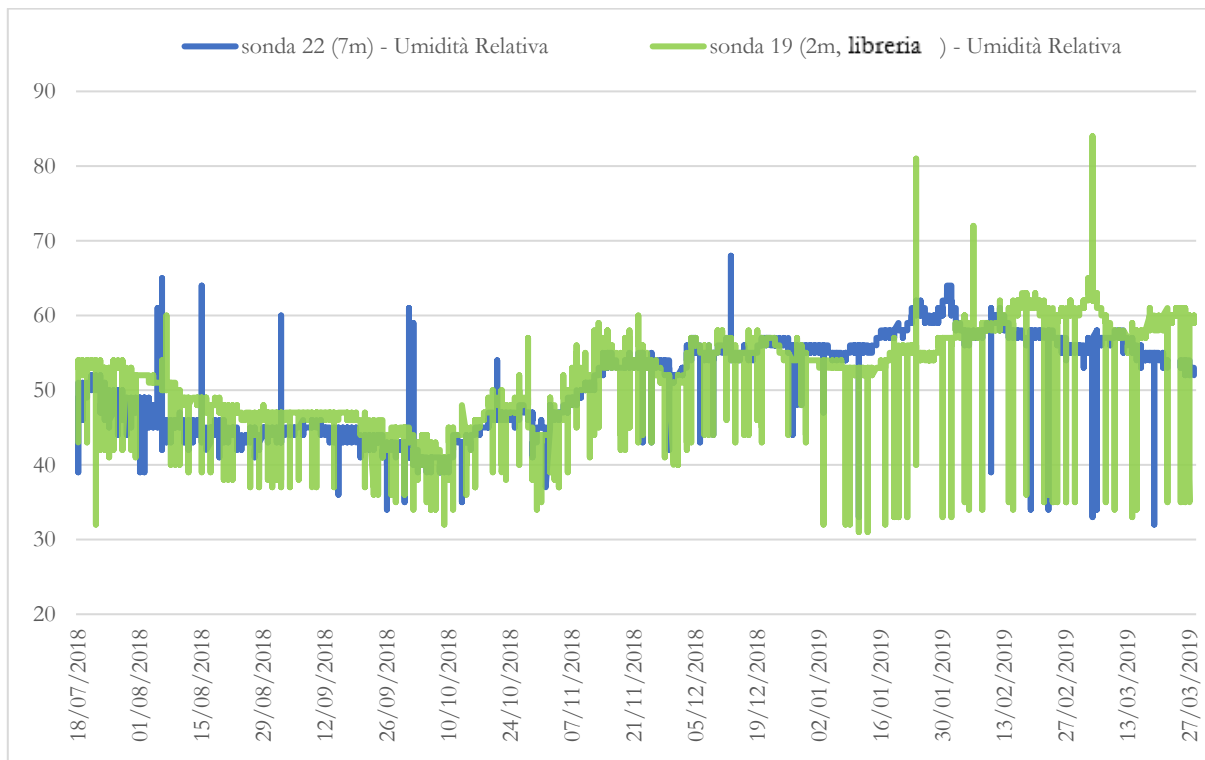


Grafico 48_Sonda 22, sonda 19: umidità relativa - valori a confronto.

Studiando i dati rilevati dalle sonde collocate lungo il lato opposto alla *Fachada Rica*, all'interno della Biblioteca, le differenze maggiori tra i valori della temperatura dell'aria si registrano tra la sonda 23 e la sonda 26 durante il periodo invernale, in cui la sonda 23 registra temperature fino a +5,4 °C rispetto ai

valori registrati dalla sonda 26 (Tabella 18, Grafico 50), in data 28/11/2018 alle ore 16:00. La sonda 26, collocata a 7m d'altezza, ha un andamento fortemente coincidente con le altre sonde: 24 e 13, poste rispettivamente a 2m e 3m di altezza rispetto al pavimento della Biblioteca (Tabella 18, Grafico 49): la differenza media tra la sonda 26 e le sonde 24 è rispettivamente pari a 0,15 °C e 0,15 °C. Il 29/08/2018 alle ore 8:00 si registra la differenza massima tra la sonda 26 e la sonda 24, pari a 1,50 °C; mentre in data 7/02/2019, alle ore 17:33, si registra una differenza di 2,50 °C tra la temperatura dell'aria registrata dalla sonda 26 e il dato registrato dalla sonda 13.

Tabella 18. Stratificazione dell'aria – temperatura, lato ovest

ΔT (°C)	26 (7m) - 23 (2m, scaffale)	26 (7m) - 24 (2m)	26 (7m) - 13 (3m)
Lato opposto alla facciata			
Differenza media	1,08 °C	0,15 °C	0,14 °C
Differenza max	5,40 °C	1,50 °C	2,50 °C
Differenza min	0,00 °C	0,00 °C	0,00 °C

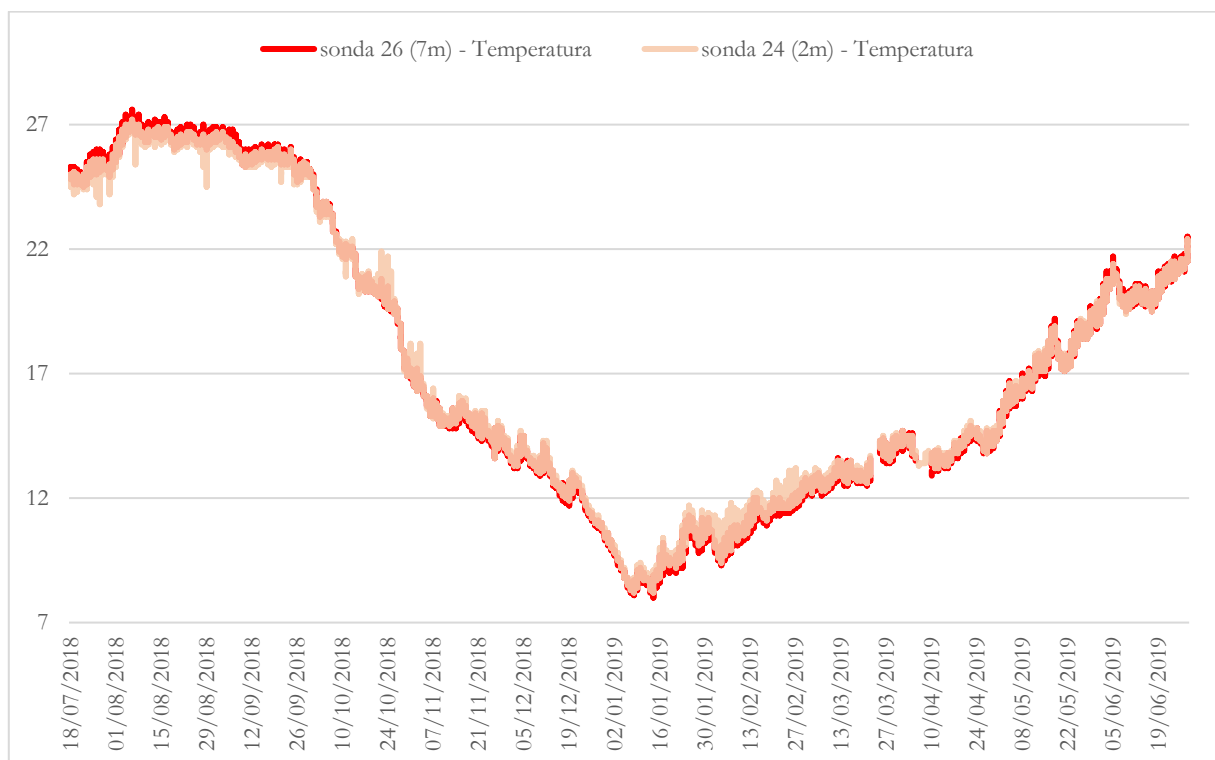


Grafico 49_Sonda 26, sonda 24: temperatura - valori a confronto.

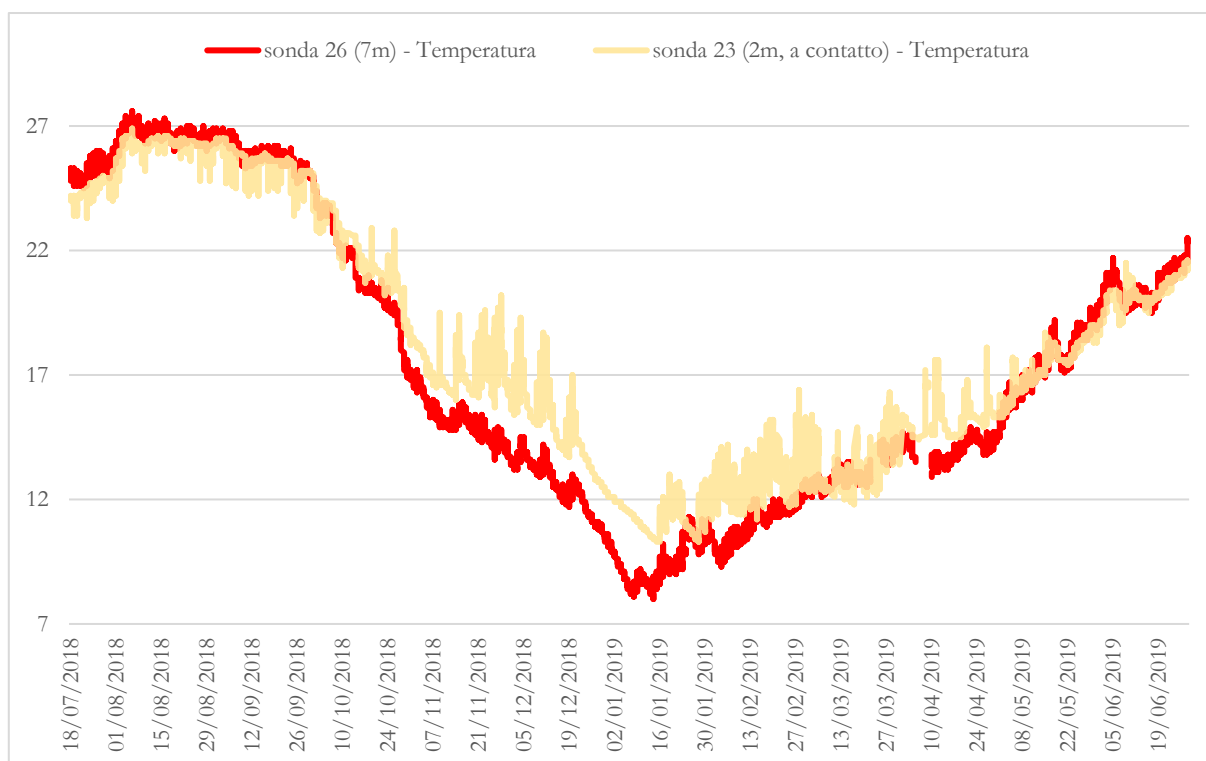


Grafico 50_Sonda 26, sonda 23: temperatura - valori a confronto.

Mediamente le differenze tra i valori di umidità relativa registrati delle sonde collocate a 2m e 3m e quelli della sonda posizionata a 7m, sono contenute (rispettivamente 0,89 % e 1,06 %); la differenza media tra i dati rilevati dalla sonda 26 e la sonda 23 è invece superiore: 4,60 %. I valori riportati nella Tabella 19 come “differenza massima” sono dovuti principalmente ai picchi giornalieri, non sempre coincidenti tra le diverse sonde. Le differenze massime sono state registrate nelle seguenti giornate: 31/01/2019 alle ore 12:10 (sonda 26 – sonda 23); 13/01/2019 alle ore 2:10 (sonda 26- sonda 24); 31/02/2019, alle ore 23:10 (sonda 26 – sonda 13).

Tabella 19. Stratificazione dell'aria – umidità relativa, lato ovest

Δ UR (%)	26 (7m) - 23 (2m, scaffale)	26 (7m) - 24 (2m)	26 (7m) - 13 (3m)
Lato opposto alla facciata			
Differenza media	4,60 %	0,89 %	1,06 %
Differenza max	33 %	27 %	27 %
Differenza min	0,00 %	0,00 %	0,00 %

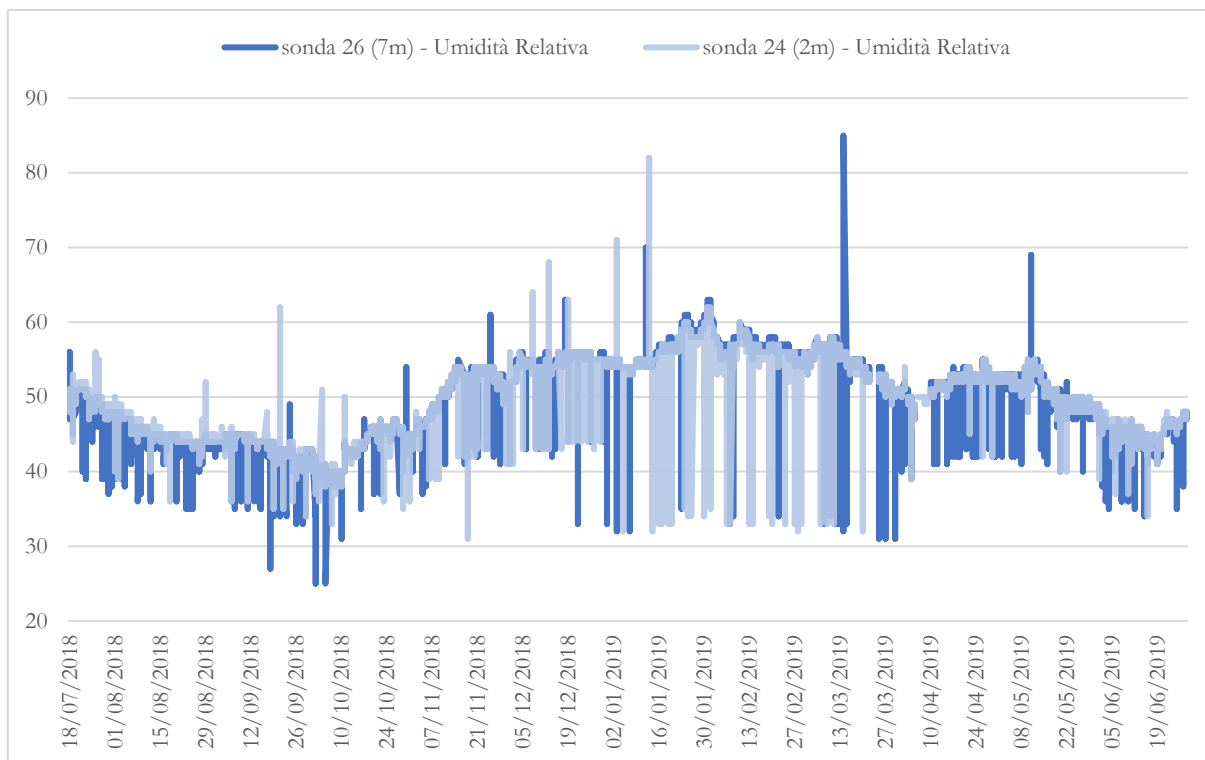


Grafico 51_Sonda 26, sonda 24: umidità relativa - valori a confronto

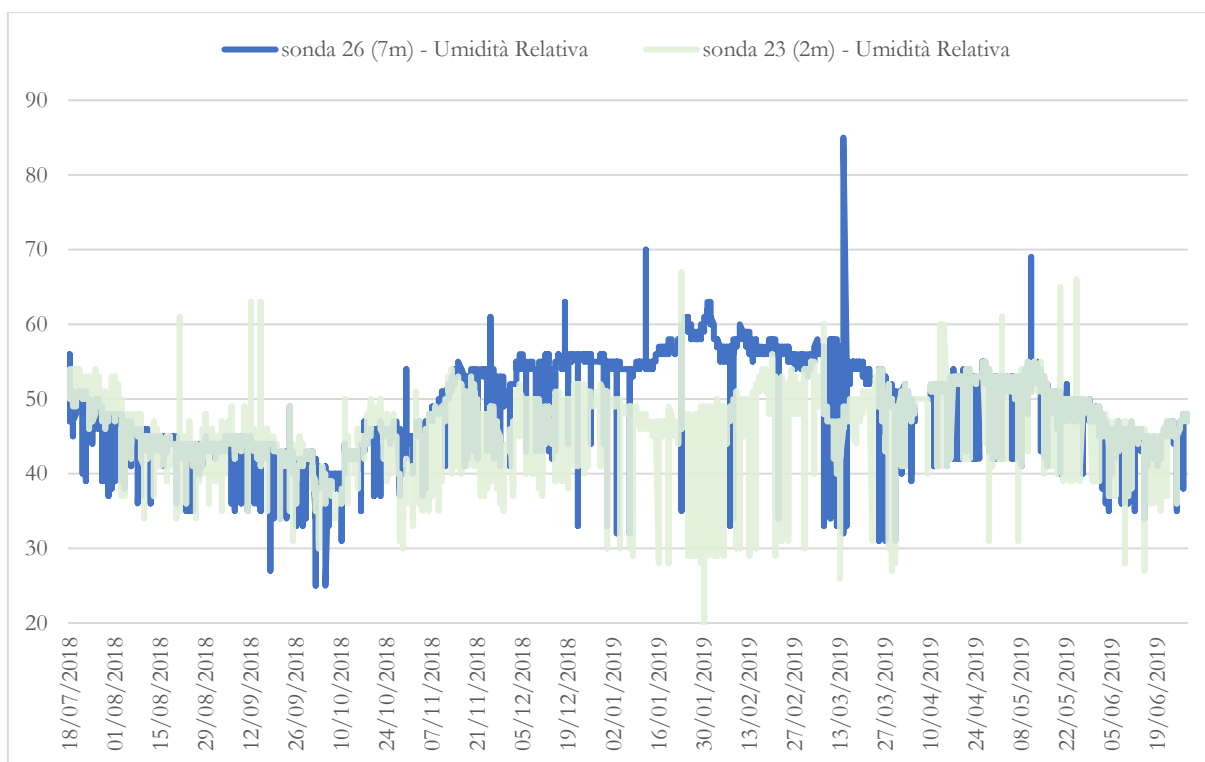


Grafico 52_Sonda 26, sonda 24: umidità relativa - valori a confronto

3.14.2.1. Discussione dei risultati

Come si evince dai grafici e dalle tabelle del precedente paragrafo, le uniche differenze consistenti in termini di stratificazione dell'aria, si rilevano mettendo a confronto le sonde che sono negli scaffali (sonda

19 e sonda 23) con l'andamento delle altre, collocate invece sull'estremità di un'asta orizzontale lunga 1 metro. Quindi, stando a questi risultati e a quanto già emerso al paragrafo 3.14., si è deciso di non considerare più, da qui in poi, i dati rilevati dalle sonde 19 e 23²⁰⁶. Il confronto dei valori di T e UR del resto delle sonde non evidenzia grandi discrepanze, nonostante esse siano collocate alle diverse altezze già specificate: la stratificazione dell'aria all'interno della BUSAL risulta omogenea. Dunque, tutti i beni conservati all'interno della Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca sono esposti ai medesimi parametri microclimatici di T e UR. Probabilmente l'assenza dei sistemi HVAC incide su questo risultato.

3.14.3. Calcolo dell'anno-tipo

Una volta appurato che la tendenza ed i valori rilevati delle sonde ambientali è fortemente coincidente, è stato calcolato l'anno-tipo: ottenuto facendo la media per ogni dato (uno ogni ora) registrato dalle sonde: 13, 16, 20, 21, 22, 24, 26. Da questo calcolo, per le ragioni già esplicitate, sono stati esclusi i rilevamenti delle sonde 19 e 23.

Questo ha permesso di valutare le condizioni microclimatiche che mediamente caratterizzano la Biblioteca nei mesi di cui disponiamo del monitoraggio ed è stato utilizzato successivamente per la validazione del modello virtuale, al paragrafo 3.16.

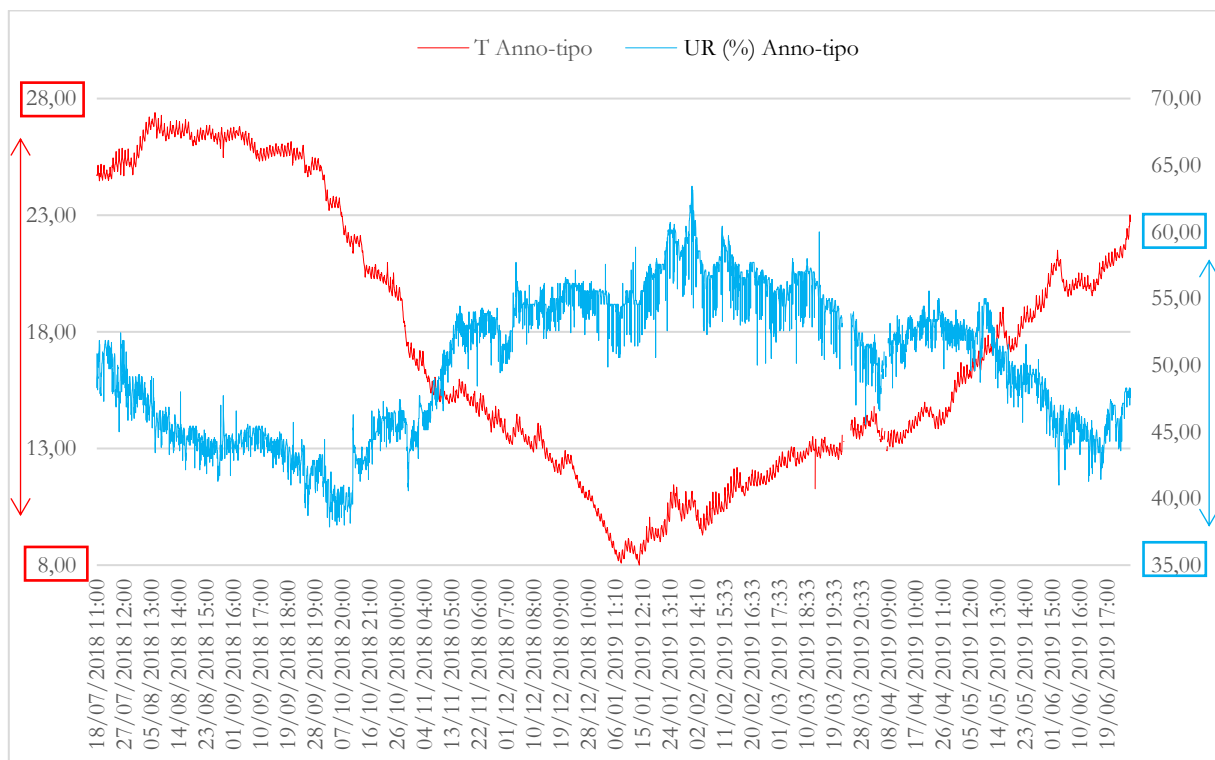


Gráfico 53_Analisi della tendenza: temperatura dell'aria e umidità relativa *indoor*.

Periodo monitoraggio: 18 Luglio 2018 – 28 Giugno 2019.

²⁰⁶ Non se ne tiene conto per la definizione delle successive valutazioni in merito al microclima *indoor* della Biblioteca.

Ambiente monitorato:	Biblioteca Generale Storica Univesitaria di Salamanca.
Impianti:	Impianti HVAC assenti.
Parametri misurati:	Temperatura dell'aria e umidità relativa.
Errori di misurazione:	Mancata rilevazione dei dati: per T dal 21/03/'19, ore 20:33, al 25/03/'19, ore 22:33 e dal 4/04/'19, ore 14:00, al 8/04/'19, ore 05:00; per UR dal 21/03/'19, ore 12:33, al 17/03/'19, ore 22:33 e dal 5/04/'19, ore 4:00, al 10/04/'19, ore 10:00
Valori registrati:	Range T: 8 °C – 27,14 °C; UR: 37,86 % - 62,86 %
Considerazioni:	L'andamento della temperatura dell'aria riporta valori inferiori ai 15 °C durante i mesi compresi tra novembre e aprile; nel mese di agosto si registrano temperature <i>indoor</i> leggermente superiori ai 27 °C.

Si registrano valori di umidità relativa inferiori al 40 % unicamente da fine settembre e metà ottobre e valori superiori al 55 % tra gennaio e marzo, ma comunque inferiori al 60 %, tranne qualche picco isolato. Durante gli altri di monitoraggio, si registra un'umidità relativa con percentuali comprese tra il 40 % e il 55 % circa; per la maggior parte dei mesi dell'anno -da novembre a fine maggio- l'umidità relativa si mantiene costante tra il 50 % - 57% circa.

Le oscillazioni giornaliere di entrambi i parametri analizzati sono esplicitate nel prossimo paragrafo, ma dal presente grafico è già evidente che le oscillazioni siano più contenute per il parametro della temperatura e maggiori per l'umidità relativa.

Di seguito si riportano i grafici commentati relativi ai profili di distribuzione di frequenza e frequenza cumulata, calcolati tramite i dati dell'anno-tipo, per i parametri di T e UR. Anche in questo caso, il periodo di monitoraggio è stato suddiviso nei quattro periodi già individuati nel paragrafo 3.14.: estivo (18/07/2018 – 22/09/2018); autunnale (22/09/2018 – 21/12/2018); invernale (21/12/2018 – 20/03/2019); primaverile (22/03/2019 – 28/06/2019).

I grafici riportano la percentuale di frequenza con cui viene rilevato uno specifico valore (di T o UR) e quante volte si registra un livello di umidità relativa o di temperatura dell'aria inferiore ad una determinata percentuale.

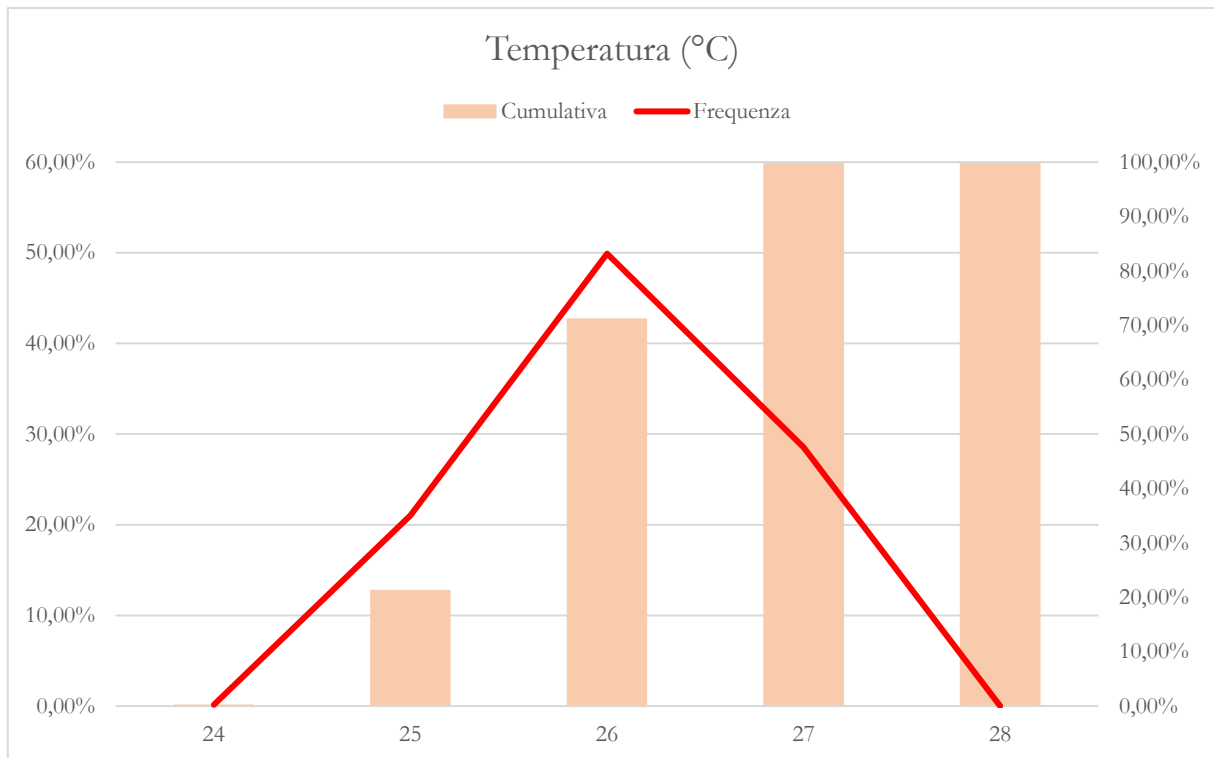


Grafico 54_Temperatura: profili di distribuzione di frequenza e frequenza cumulativa 18/07/2018 – 22/09/2018

Periodo monitoraggio: 18 Luglio 2018 – 22 Settembre 2018.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica Univesitaria di Salamanca.

Impianti: Impianti HVAC assenti.

Parametri misurati: Temperatura dell'aria.

Errori di misurazione: -

Valori registrati: Maggioranza di valori registrati: 26 °C (frequenza: 50 %).

Considerazioni: Si registrano valori della temperatura *indoor* compresi tra un minimo pari a 14 °C, ad un massimo pari ai 27 °C - 28 °C circa. Quasi il 100 % dei dati, registrati nel periodo individuato come estivo, risulta essere inferiore ai 27 °C. Solo il 20 % dei dati rilevati è inferiore ai 25 °C. Le temperature registrate con maggiore frequenza si aggirano attorno ai 26 °C: temperature superiori rispetto a quanto suggerito dagli standard di riferimento già citati, ma che hanno caratterizzato la Biblioteca da oltre cinquecento anni e dunque alle quali i beni si sono acclimatati.

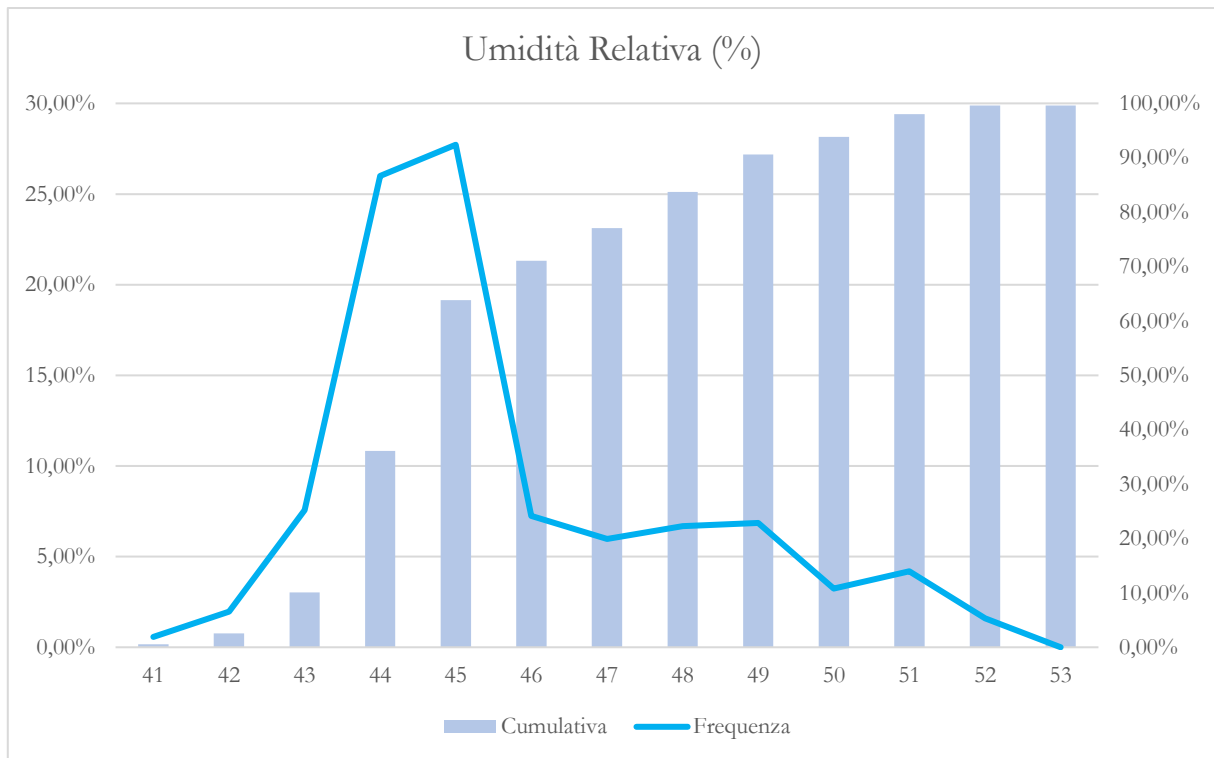


Grafico 55_Umidità Relativa: profili di distribuzione di frequenza e frequenza cumulativa 18/07/2018 – 22/09/2018

Periodo monitoraggio: 18 Luglio 2018 – 22 Settembre 2018.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica Univesitaria di Salamanca.

Impianti: Impianti HVAC assenti.

Parametri misurati: Umidità Relativa.

Errori di misurazione: -

Valori registrati: Maggioranza di valori registrati: 44 % - 45 % (frequenza: 26 %, 27, 72 %).

Considerazioni: In questo caso si registrano valori di umidità relativa compresi con maggiore frequenza tra il 44 % e il 45 %; i valori di umidità relativa compresi tra il 46 % e il 49 % vengono registrati con frequenza pari al 7 % circa. Inoltre, il 94 % dei valori di UR registrati nel periodo di monitoraggio estivo, sono inferiori al 50 % e solo il 10 % dei dati sono inferiori al 43 %.

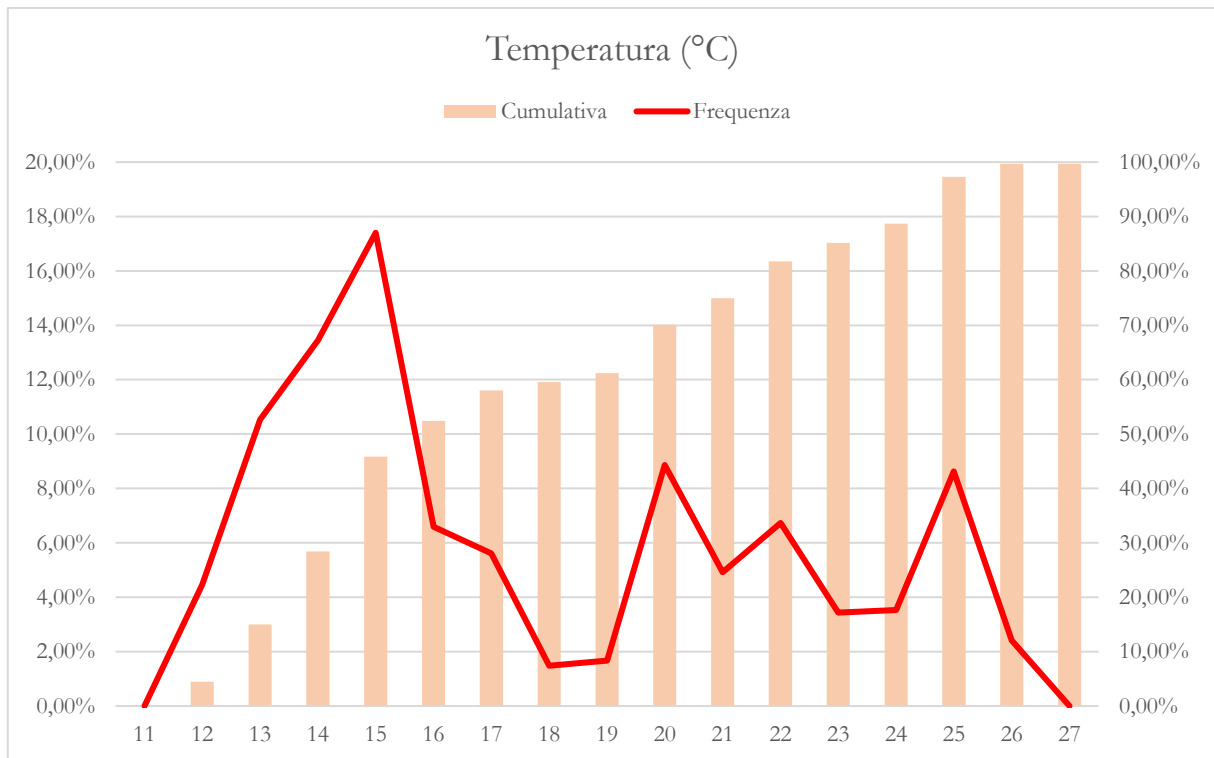


Grafico 56_Temperatura: profili di distribuzione di frequenza e frequenza cumulativa 22/09/2018 – 21/12/2018

Periodo monitoraggio: 2 Settembre 2018 – 21 Dicembre 2018.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica Univesitaria di Salamanca.

Impianti: Impianti HVAC assenti.

Parametri misurati: Temperatura dell'aria.

Errori di misurazione: -

Valori registrati: Maggioranza di valori registrati: tra i 13 °C (frequenza: 10,53 %) e i 15 °C (frequenza: 17,40 %); 20 °C (frequenza: 8,86 %); 25 °C (frequenza: 8,83 %).

Considerazioni: Rispetto ai due grafici precedenti, il presente grafico risulta più altalenante: la frequenza dei valori rilevati non si concentra in un *range* circoscritto ma comprende più valori.

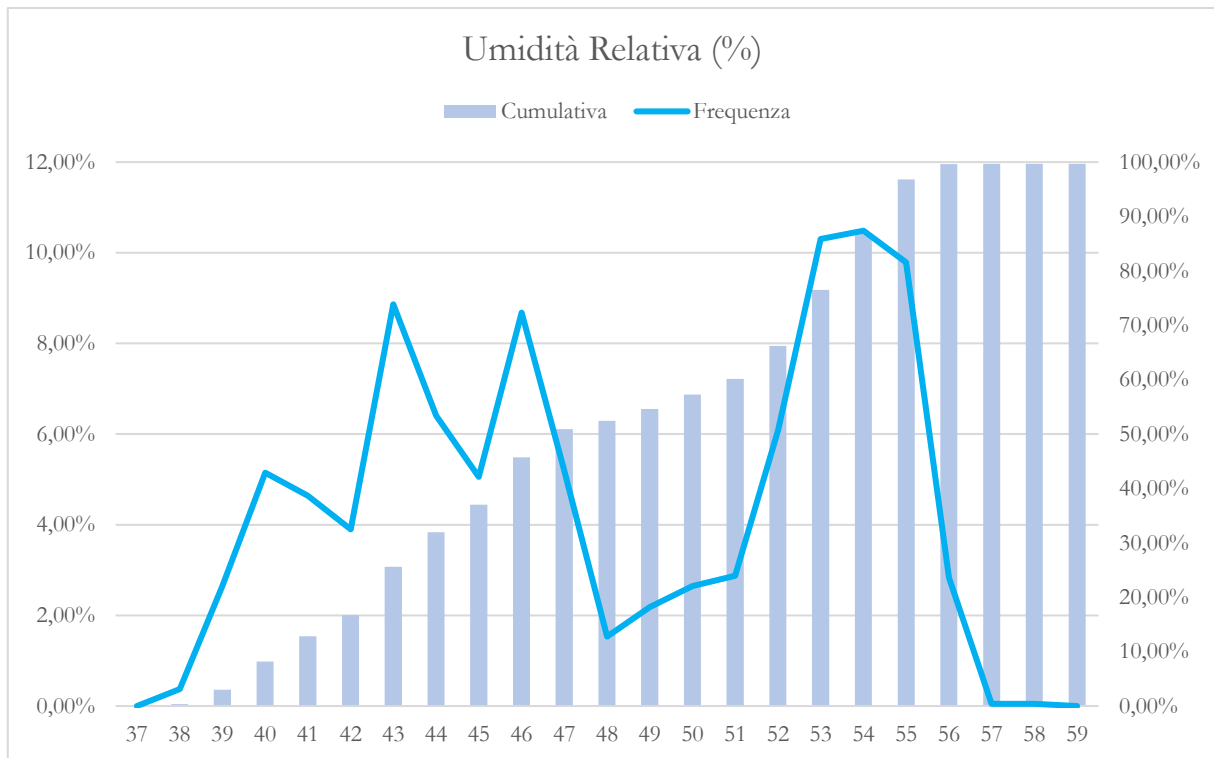


Grafico 57_Umidità Relativa: profili di distribuzione di frequenza e frequenza cumulativa 22/09/2018 – 21/12/2018

Periodo monitoraggio: 22 Settembre 2018 – 21 Dicembre 2018.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica Univesitaria di Salamanca.

Impianti: Impianti HVAC assenti.

Parametri misurati: umidità relativa.

Errori di misurazione: -

Valori registrati: Maggioranza di valori registrati: tra il 53 % e il 55 %, con una frequenza pari al 10 % circa; tra il 43 % e il 44 %, con una frequenza pari al 9 % circa; 46 % (frequenza: 8,68 %).

Considerazioni: Il grafico riporta un andamento, come detto anche per l'immagine precedente, meno costante rispetto ai dati rilevati durante il periodo estivo del monitoraggio microclimatico *indoor*.

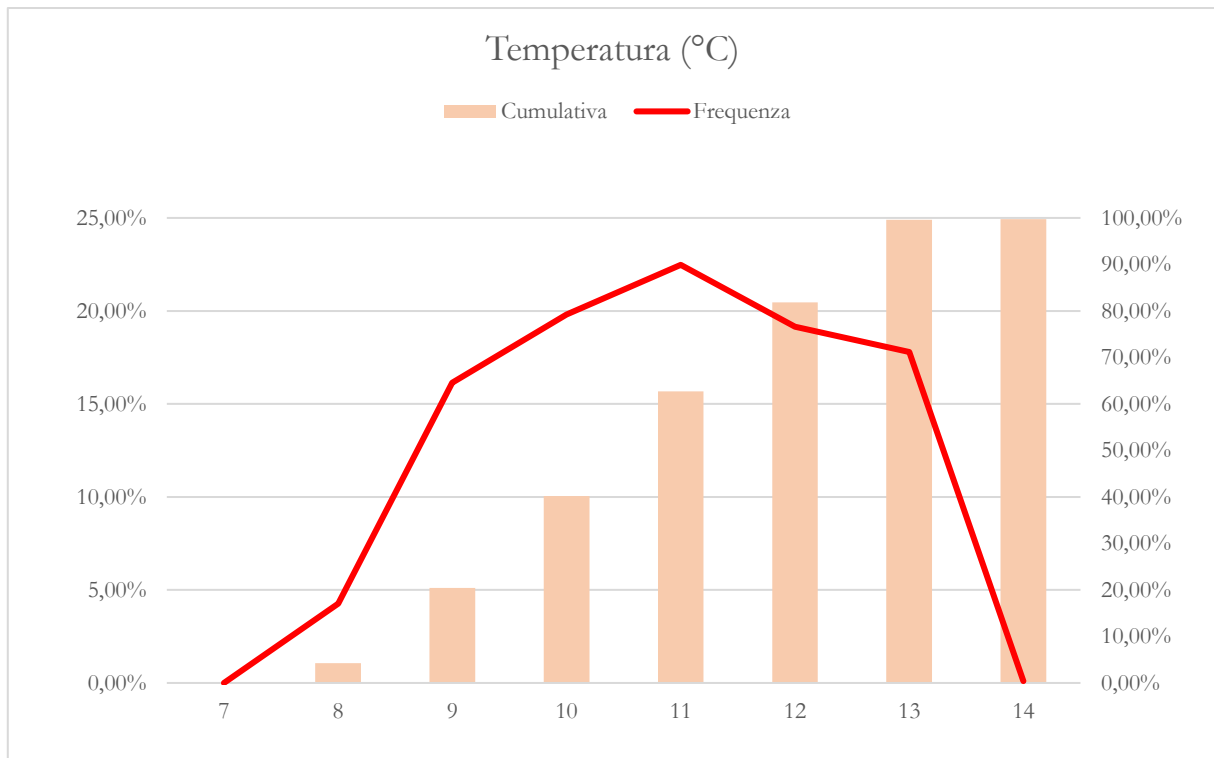


Grafico 58_Temperatura: profili di distribuzione di frequenza e frequenza cumulativa 21/12/2018 – 20/03/2019

Periodo monitoraggio: 21 Dicembre 2018 – 20 Marzo 2019.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica Univesitaria di Salamanca.

Impianti: Impianti HVAC assenti.

Parametri misurati: Temperatura dell'aria.

Errori di misurazione: -

Valori registrati: Si registrano valori tra i 9 °C e i 13 °C, con frequenza altamente uniforme, attorno al 19 % - 20 %.

Considerazioni: I dati della temperatura dell'aria *indoor*, registrati nel periodo invernale, confermano che l'edificio de *Las Escuelas Mayores* presenta delle caratteristiche architettoniche capaci di mantenere le temperature all'interno della Biblioteca, al di sopra degli 8 °C – 9 °C, in assenza di impianti di riscaldamento.

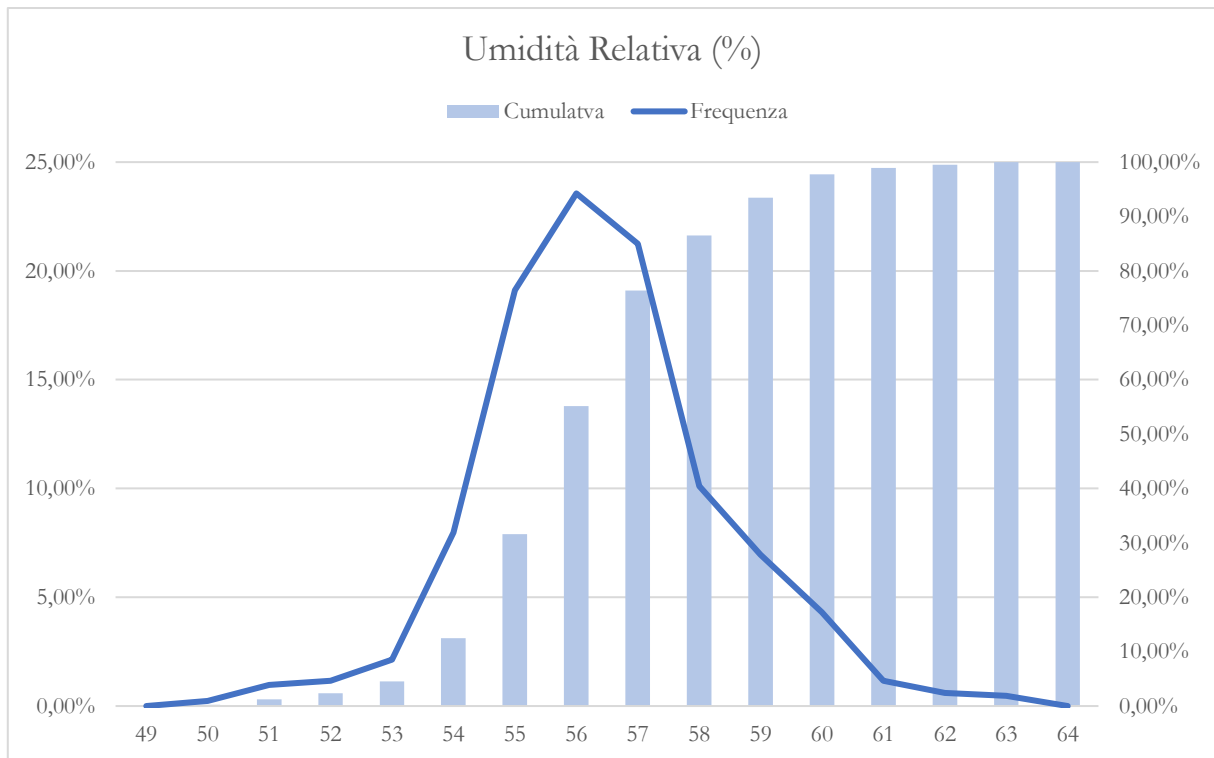


Grafico 59_Umidità Relativa: profili di distribuzione di frequenza e frequenza cumulativa 21/12/2018 – 20/03/2019

Periodo monitoraggio: 21 Dicembre 2018 – 20 Marzo 2019.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica Univesitaria di Salamanca.

Impianti: Impianti HVAC assenti.

Parametri misurati: Umidità relativa.

Errori di misurazione: -

Valori registrati: Maggioranza di valori registrati: tra il 55 % e il 57 % con frequenza pari al 20 % circa.

Considerazioni: Il *range* dei valori di umidità relativa *indoor* registrati è estremamente circoscritto: tra il 55 % e il 57 %. Il resto dei dati raggiunge raramente valori vicino al 60 % (frequenza: 4,31 %). Questa condizione di stabilità del parametro analizzato è ideale per la conservazione di materiali organici (come carta e legno).

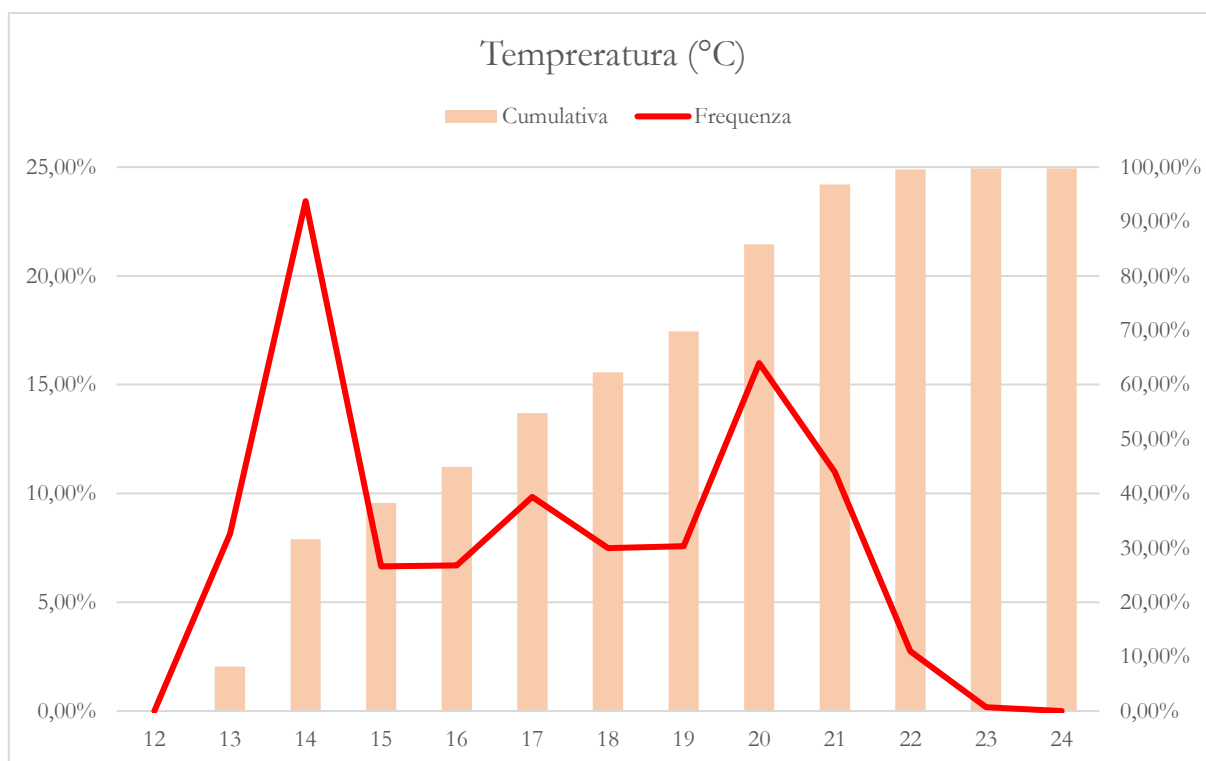


Grafico 60_Temperatura: profili di distribuzione di frequenza e frequenza cumulativa 20/03/2019 – 28/06/2019

Periodo monitoraggio: 20 Marzo 2018 – 28 Giugno 2019.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica Univesitaria di Salamanca.

Impianti: Impianti HVAC assenti.

Parametri misurati: Temperatura dell'aria.

Errori di misurazione: -

Valori registrati: Maggioranza di valori registrati: 14 °C (frequenza: 23,44 %); 20 °C (frequenza: 15,99 %); 17 °C (frequenza: 9,84 %).

Considerazioni: Durante il periodo primaverile sono stati registrati valori tra i 13 °C e i 21°C; i valori rilevati con maggiore frequenza si aggirano principalmente attorno ai 14 °C; i valori compresi tra i 15 °C e i 19 °C sono stati rilevati con una frequenza del 7 % circa, con un picco di frequenza che coinvolge i valori attorno al 17 °C pari al 10 % circa. Infine, si registrano valori di temperatura vicini ai 20 °C con il 16 % di frequenza.

Quasi la totalità dei dati rientra nei valori riportati nella UNI10829: 1999, che suggerisce valori di temperatura tra i 13 °C ai 18 °C per documenti archivistici su carta o pergamena, papiri, manoscritti, volumi a stampa, collezioni filateliche.

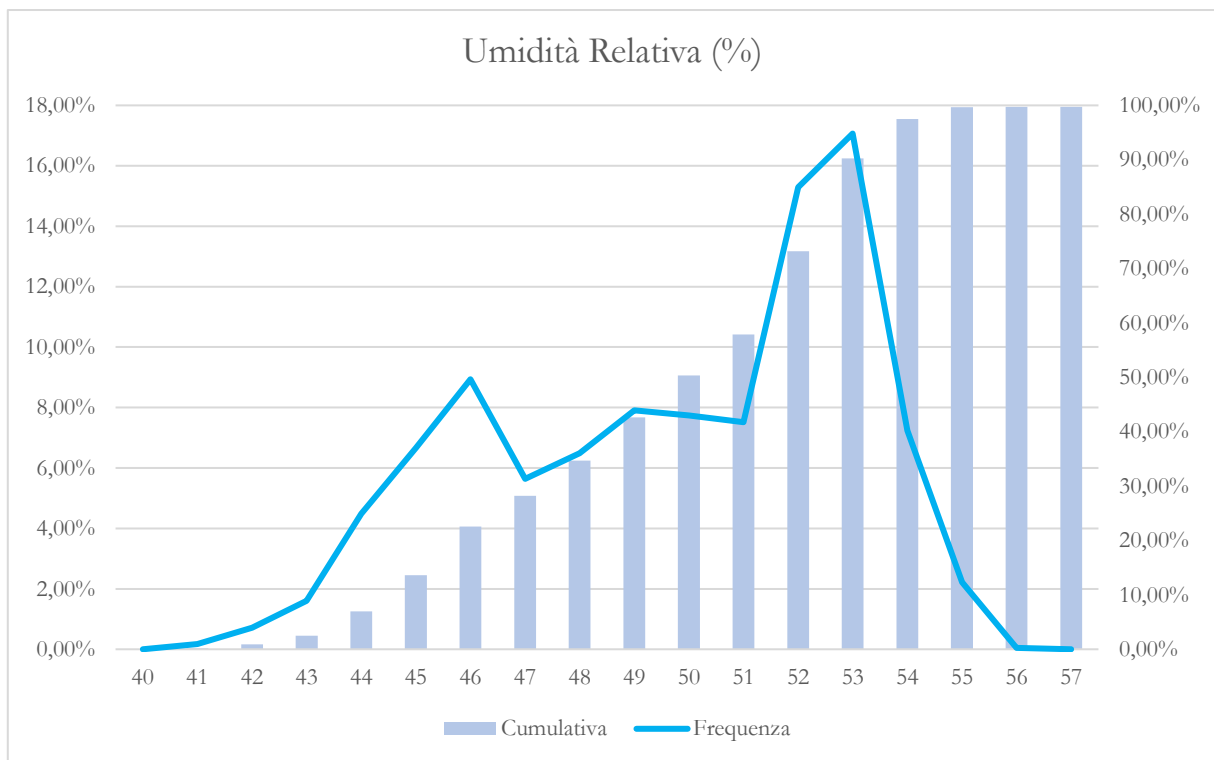


Grafico 61_Umidità Relativa: profili di distribuzione di frequenza e frequenza cumulativa 20/03/2019 – 28/06/2019

Periodo monitoraggio: 20 Marzo 2018 – 28 Giugno 2019.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica Univesitaria di Salamanca.

Impianti: Impianti HVAC assenti.

Parametri misurati: umidità relativa.

Errori di misurazione: -

Valori registrati: Maggioranza di valori registrati: 52 % (frequenza: 15,29 %); 53 % (frequenza: 17,07 %). Il resto dei valori, compresi tra il 43 % e il 52 % è stato rilevato con una frequenza piuttosto costante (circa del 7 %), ad eccezione dei valori di umidità relativa pari al 46 % circa, che sono stati registrati con una frequenza superiore, pari a quasi il 9 %.

Considerazioni: Il grafico sottolinea che la grande maggioranza dei dati rilevati riporta valori compresi tra il 52 % e il 53 %; il resto dei dati risulta raramente inferiore al 45 % (solo il 13,64 del 100% dei dati) e superiore al 55 % (solo lo 0,31 % del 100 dei dati). Anche in questo caso, i valori di UR sembrano piuttosto stabili -ipotesi verificata al paragrafo che segue-.

3.14.4. Analisi delle oscillazioni giornaliere

All'interno della UNI 10829:1999, vengono riportati non solo i *range* suggeriti per la conservazione di specifiche categorie di materiali, ma anche *range* di riferimento in merito all'oscillazione giornaliera dei parametri microclimatici, ovvero quei valori limite tra i quali i parametri come la temperatura dell'aria e

L'umidità relativa possono oscillare senza esporre i materiali ad un rischio di danno, causato dagli sbalzi microclimatici. Per la temperatura dell'aria la normativa considera accettabili oscillazioni giornaliere pari ad un massimo di $-1,5\text{ °C}$ e $+01,5\text{ °C}$; mentre per l'umidità relativa il *range* di oscillazione massimo suggerito è pari a -6% e $+6\%$.

Dividendo il periodo per il quale si dispone del monitoraggio microclimatico *indoor* della BUSAL nei seguenti 4 periodi più circoscritti: 18/07/2018 – 22/09/2018; 22/09/2018 – 21/12/2018; 21/12/2018 – 20/03/2019; 22/03/2019 – 28/06/2019, sono state calcolate le oscillazioni medie, massime e minime giornaliere, per T e UR.

Tabella 20. Calcolo delle oscillazioni

Periodo	Osc. media	Osc. media	Osc. max	Osc. max	Osc. min	Osc. min
	T	UR	T	UR	T	UR
18/07/'18 - 22/09/'18	0,14 °C	0,74 %	0,67	4,14	0,00	0,00
22/09/'18 - 21/12/'18	0,25 °C	0,92 %	1,30	5,71	0,00	0,00
21/12/'18 - 20/03/'19	0,21 °C	0,92 %	1,93	8,14	0,00	0,00
20/03/'19 - 28/06/'19	0,23 °C	0,90 %	1,17	6,71	0,00	0,00

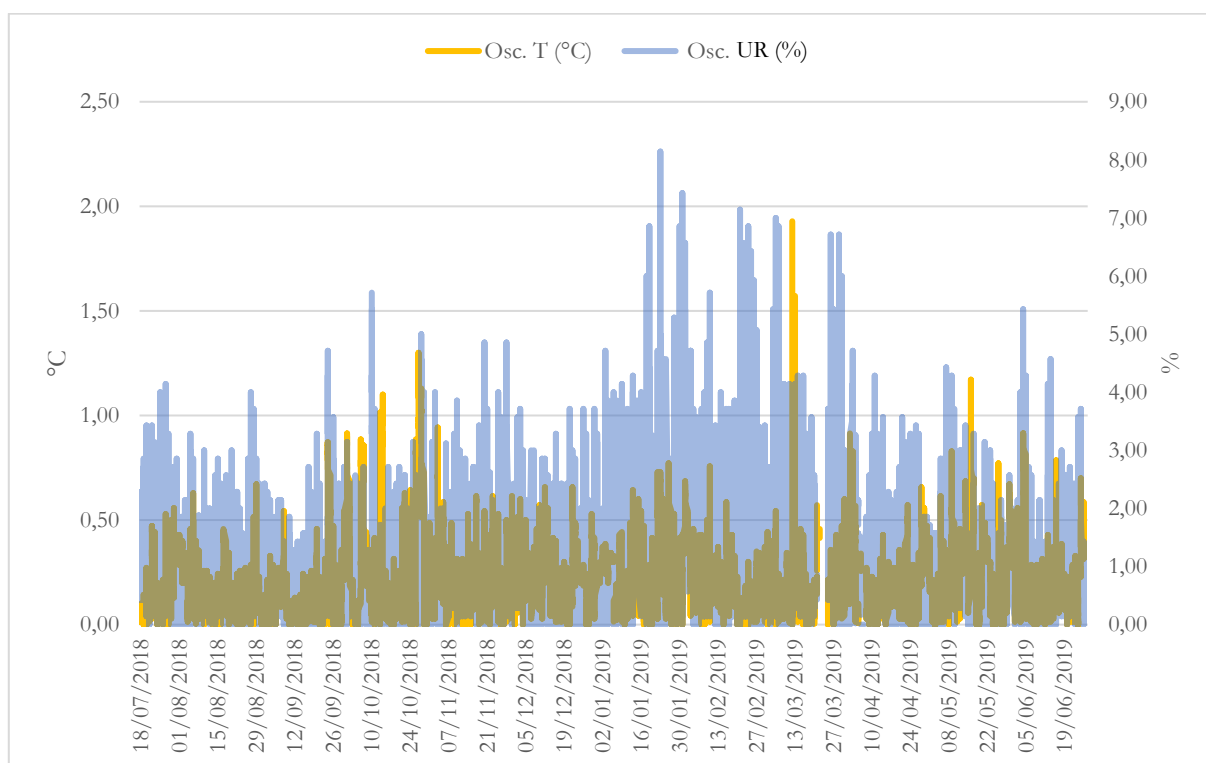


Grafico 62_BUSAL: oscillazioni medie T e UR

Come mostrano la Tabella 20 e il Grafico 62, le oscillazioni massime rilevate risultano leggermente superiori rispetto al *range* della UNI 10829:1999 per il parametro T, nel periodo compreso tra il 21/12/2018 e il 20/03/2019, e superiori -fino a +2,14 %- per UR, durante il medesimo periodo. Durante il periodo compreso tra il 20/03/2019 e il 28/03/2019, UR riporta un'oscillazione massima contenuta: pari a +0,71%. Infine, considerando l'andamento medio delle oscillazioni giornaliere di T e UR, si può

affermare che esse rientrino nei limiti indicati dalla normativa, dunque, i materiali custoditi nella Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, non sono esposti a rischio microclimatico legato agli sbalzi giornalieri di temperatura e di umidità relativa *indoor*.

3.14.5. Confronto tra dati climatici *outdoor* e dati microclimatici *indoor*

I dati climatici *outdoor* utilizzati per la presente ricerca sono stati registrati da una stazione metereologica di proprietà della Fundación Santa María la Real, collocata di fronte all'edificio de *la Escuelas Mayores*, a 15m dalla facciata.

Mettendo a confronto i valori microclimatici *indoor* dell'anno-tipo con i dati climatici *outdoor*²⁰⁷, si nota come la tendenza di temperatura e umidità relativa dell'aria all'interno della Biblioteca tenda a seguire il *trend* del dato esterno, ma come comunque esso non alteri la discreta linearità dell'andamento di entrambi i parametri (es. Grafico 63, 64). Tenendo sempre in conto che la Biblioteca è tutt'oggi priva di impianti di condizionamento e ventilazione dell'aria, l'andamento piuttosto costante di T e UR è indice di un'architettura efficiente dal punto di vista della conservazione preventiva del patrimonio librario e degli arredi lignei presenti all'interno della stessa.

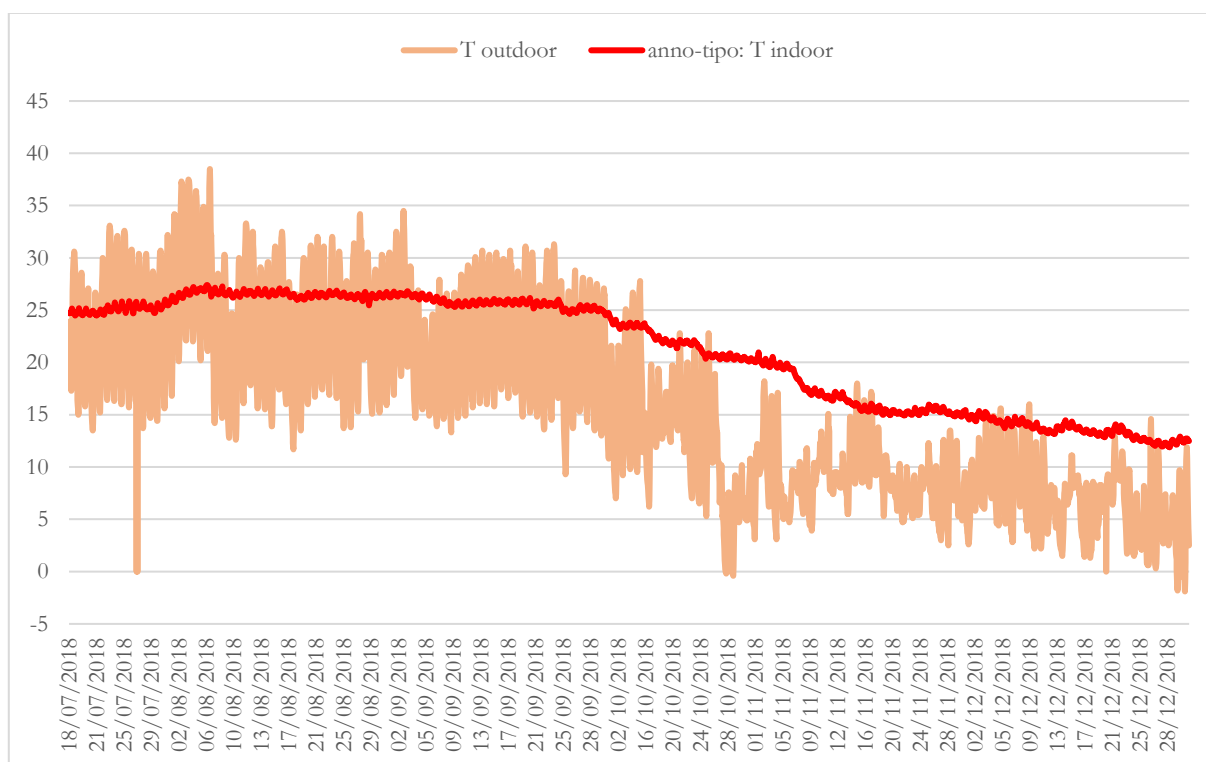


Grafico 63_BUSAL: tendenza T *outdoor-indoor* 18/07/2018 – 31/12/2018

²⁰⁷ Si specifica che sia i dati del clima *outdoor* sia quelli utilizzati per definire l'anno-tipo, sono stati rilevati un dato per ora.

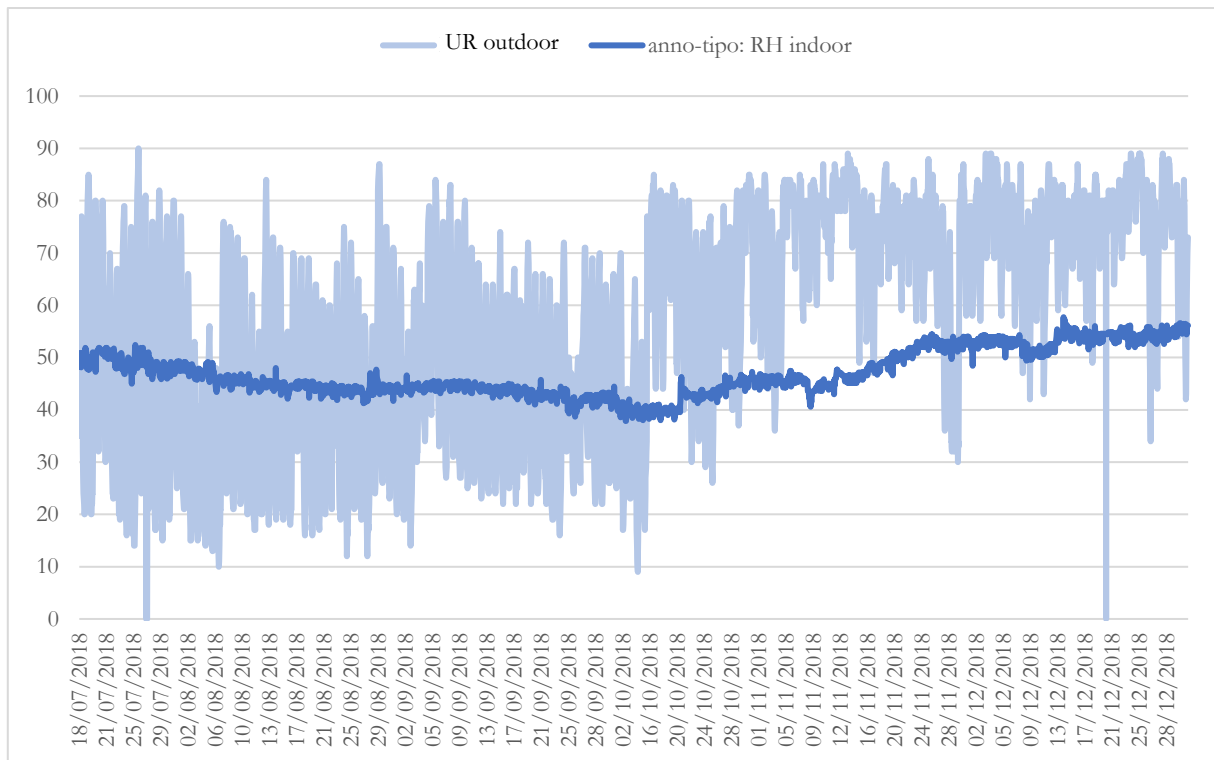


Grafico 64_BUSAL: tendenza UR *outdoor-indoor* 18/07/2018 – 31/12/2018

3.14.6. Sonda 17: valori anomali

La sonda 17 è situata all'interno di una teca in vetro, circa al centro della sala della Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca. Per questa sonda si dispone dei dati di T e UR dal 18/07/2018 al 6/06/2019, si considera però un *gap* (31/12/2018 – 1/04/2019) poiché i dati misurati durante questo periodo non sono attendibili. I dati di questa sonda sono stati calcolati separatamente dal resto dei dati rilevati dalle altre sonde, per due ragioni: 1. la sua collocazione (in una teca); 2. sono state notate due atipicità nei valori registrati.

La prima atipicità riscontrata riguarda l'umidità relativa rilevata dalla sonda 17, i cui valori sono eccezionalmente stabili, nonostante non vi siano impianti attivi per il suo controllo. Si riporta l'intero periodo di monitoraggio suddiviso in tre periodi più brevi: 18/07/2018 – 22/09/2018; 1/10/2018 – 31/12/2018; 1/04/2019 – 6/06/2019 (Grafico 65, 66, 67), per mostrare nella maniera più leggibile possibile, la stabilità di questo parametro, al quale la tendenza della temperatura *indoor* è correlata, nonostante l'andamento di quest'ultima non sia altrettanto stabile.

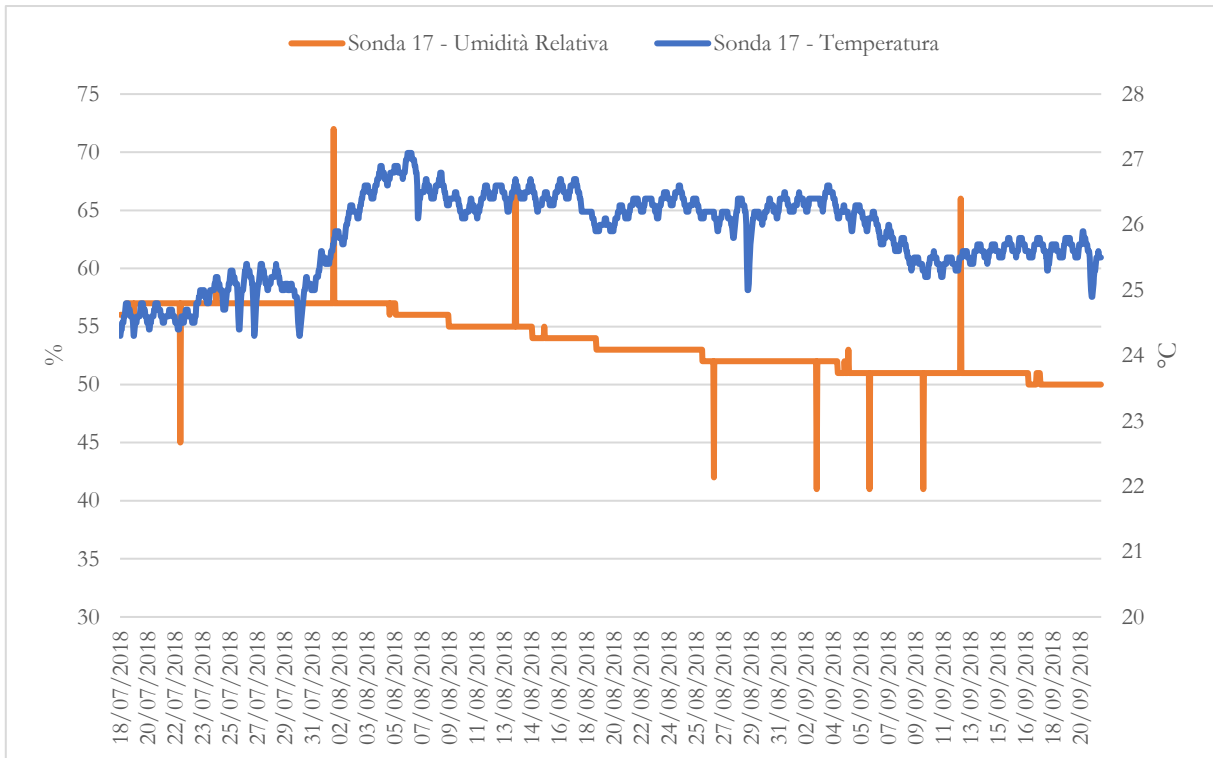


Grafico 65_Sonda 17 - tendenza T e UR: 18/07/2018 – 22/09/2018

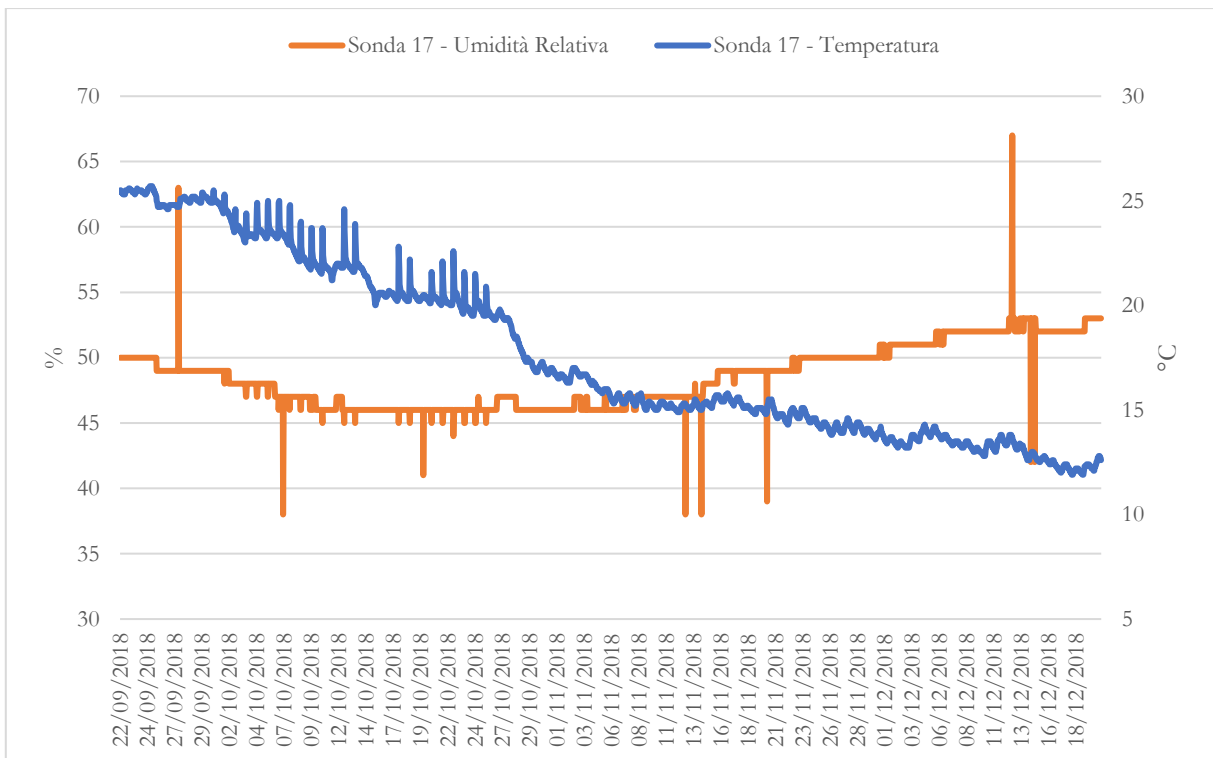


Grafico 66_Sonda 17 - tendenza T e UR: 01/10/2018 – 31/12/2018

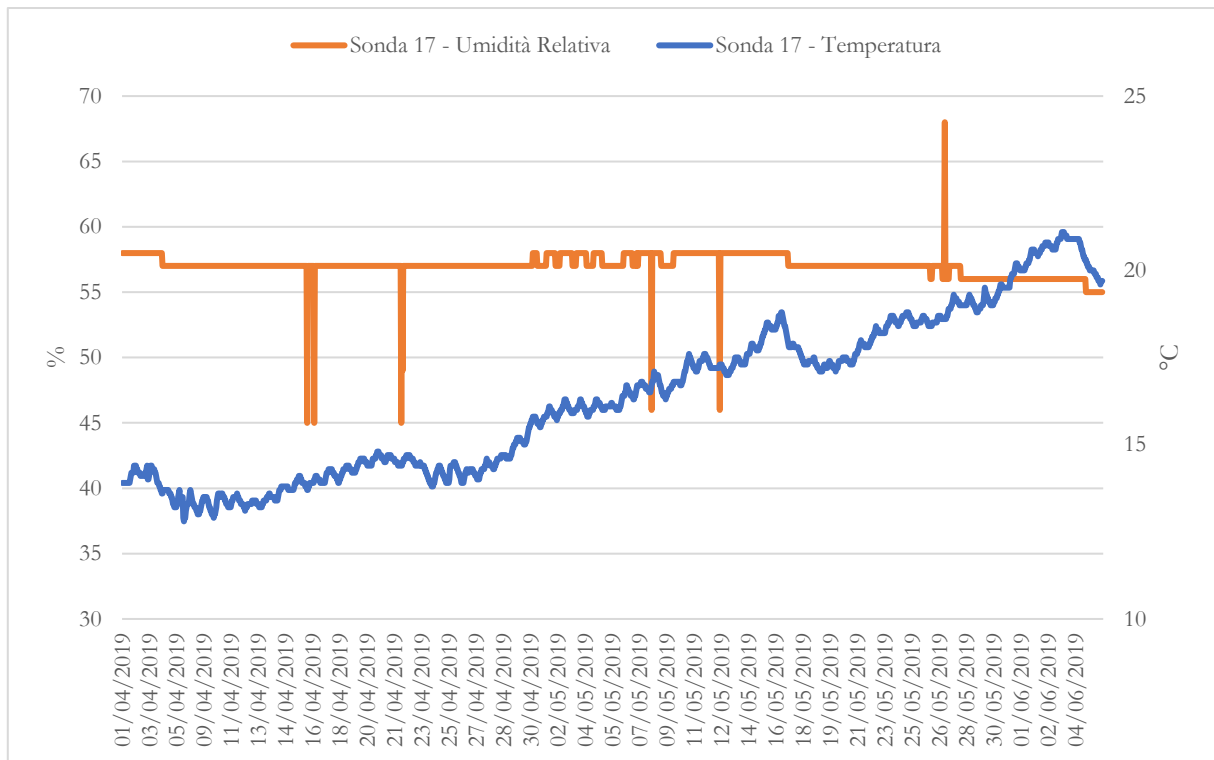


Grafico 67_ Sonda 17 - tendenza T e UR: 01/04/2019 – 06/06/2019

Come si può notare dai due grafici seguenti (Grafico 68 e 69), la temperatura *outdoor*, in questo caso, sembra non influire quasi minimamente sul parametro dell'umidità relativa *indoor* registrata dalla sonda 17.

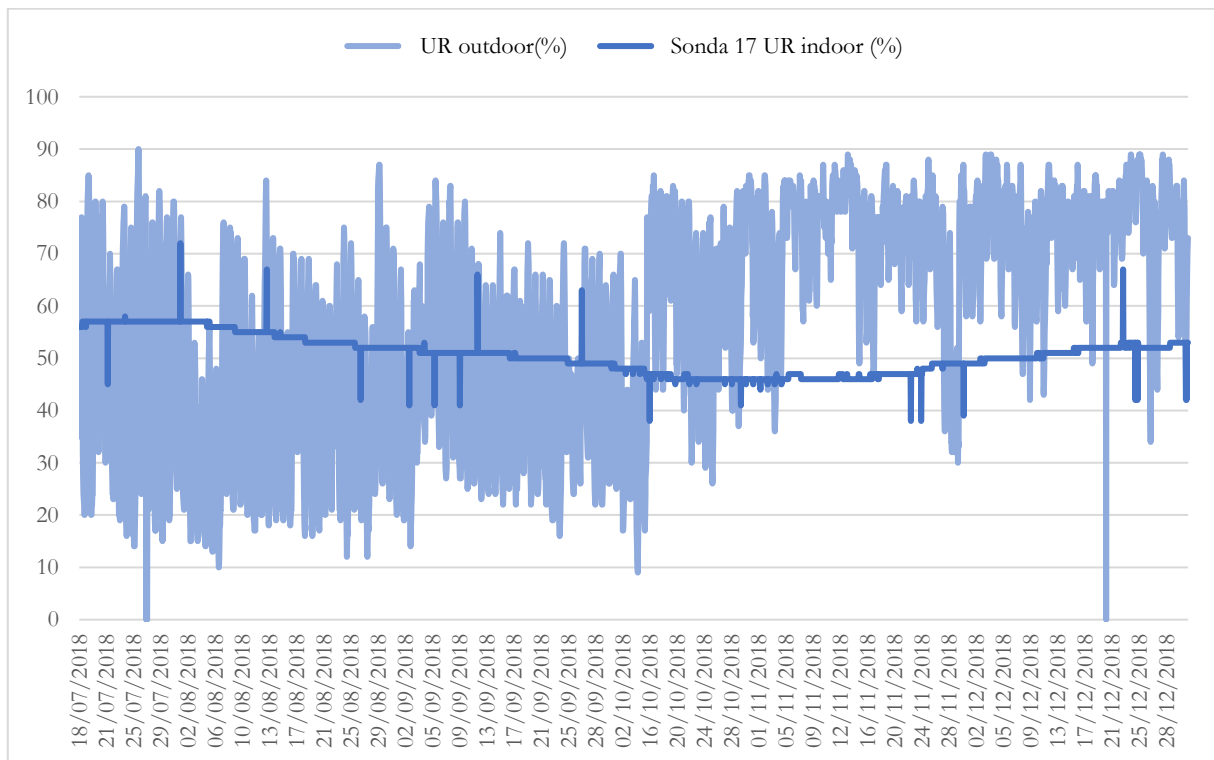


Grafico 68_Sonda 17 e stazione metereologica - tendenza UR *outdoor-indoor* 18/07/2018 – 31/12/2018

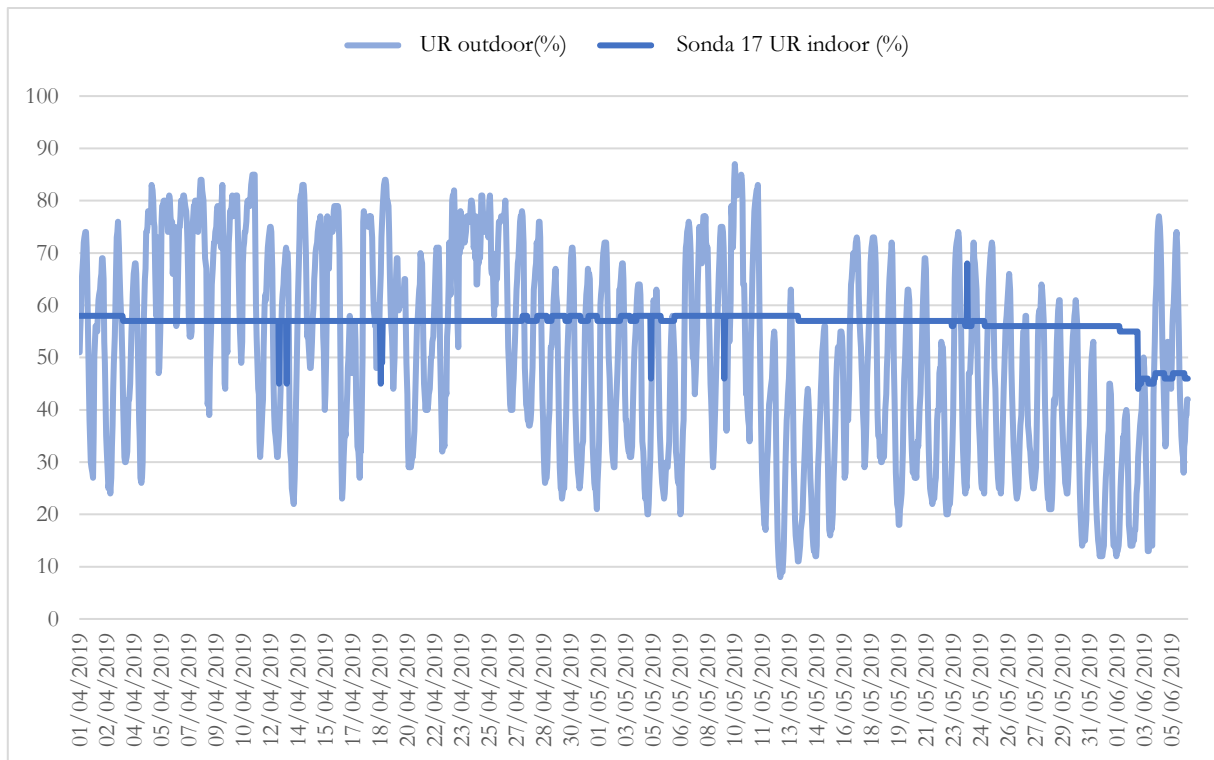


Grafico 69_ Sonda 17 e stazione metereologica - tendenza UR *outdoor-indoor* 01/04/2019 – 06/06/2019

È stato verificato che la stabilità dei dati descritti è dovuta alla presenza di gel di silice all'interno della teca nella quale si trova la sonda 17 (Figura 50). La scelta di sfruttare le proprietà di questa sostanza (SiO_2) essiccatrice, mira a preservare le condizioni conservative dei beni all'interno della teca, composti quasi esclusivamente da carta. Come noto, il gel di silice permette di prevenire la muffa ed assorbe l'umidità, salvaguardando gli oggetti di natura cartacea. Esso non è sufficiente a sostituire l'effetto di un deumidificatore, ma è efficace nei piccoli spazi, preferibilmente chiusi, come appunto vetrinette e teche.



Figura 50_Teca BUSAL: in rosso a sinistra sale di silice; in rosso a destra sonda 17²⁰⁸

²⁰⁸ Registro delle immagini. p. 269.

Seconda atipicità riscontrata nei dati registrati dalla sonda 17, riguarda i picchi di umidità relativa *indoor*: si è voluto verificare se essi potessero dipendere da specifici eventi atmosferici *outdoor*, quali, ad esempio, la pioggia (Grafico 70).

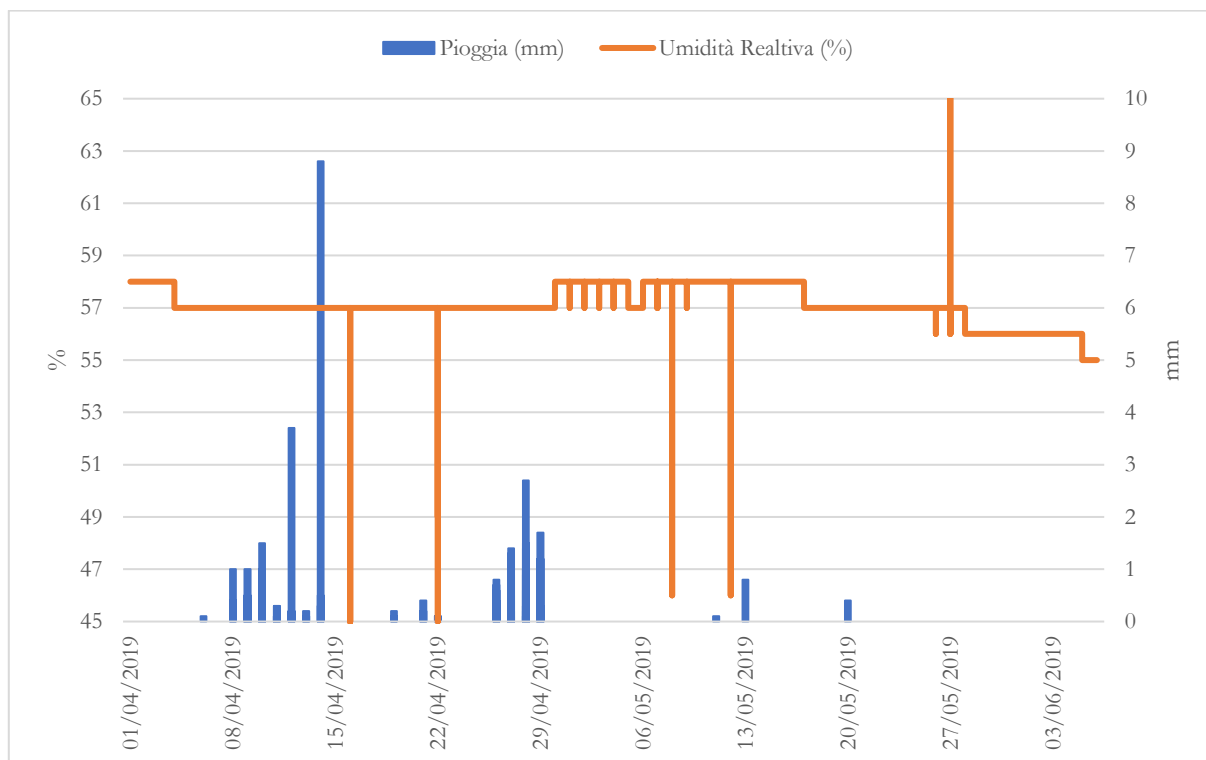


Grafico 70_ Sonda 17 e stazione metereologica – umidità relativa - pioggia 01/04/2019 – 06/06/2019

Come è chiaro dal Grafico 70, non vi è correlazione tra quantità di pioggia e picchi di UR, positivi e negativi. Alcuni picchi sono probabilmente dovuti ad errori di rilevazione; per altri, rilevati nel corso del mese di ottobre, è stato invece possibile individuare una causa slegata dai problemi tecnici, bensì dovuta all'illuminazione naturale.

Infatti, studiando anche la tendenza del dato della temperatura dell'aria, registrato dalla sonda 17, si è notato che durante il mese di ottobre 2018 questa sonda ha registrato dei picchi di temperatura più elevati rispetto a quelli misurati dalle altre sonde: il Grafico 71 presenta il confronto tra i valori della temperatura registrati dalla sonda 17 e quelli dell'anno-tipo²⁰⁹.

²⁰⁹ I dati registrati dalla sonda 17 tra il 31/12/2018 e l'1/04/2019 non sono stati riportati poiché non validi.

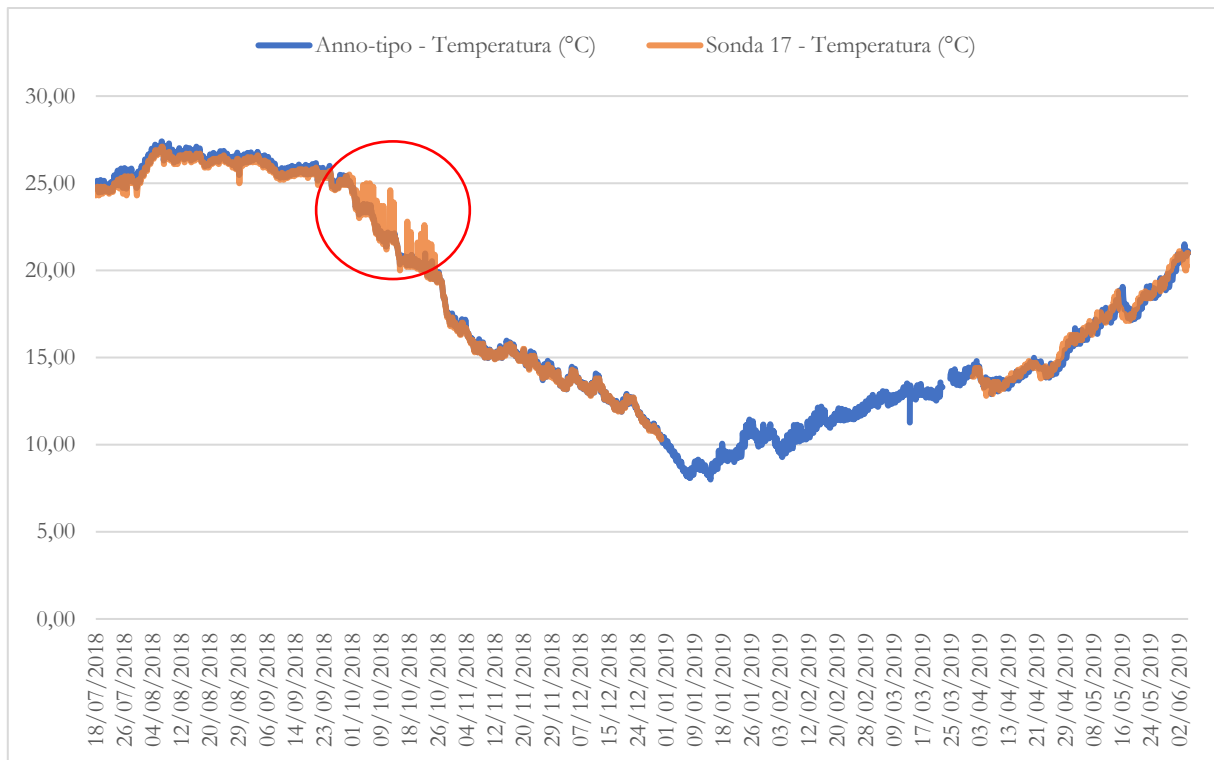


Grafico 71_ Sonda 17 e Anno-tipo – temperatura: 18/07/2018 – 06/06/2019

In corrispondenza al medesimo periodo -dall'1 al 30 ottobre- sono stati messi a confronto i dati di: T, UR, LUX della sonda 17 (Figura 51). Riportando i valori su uno stesso grafico, si nota come quasi ogni giorno, vi sia un aumento della temperatura ed un conseguente abbassamento di UR, dovuto a dei picchi di illuminamento.

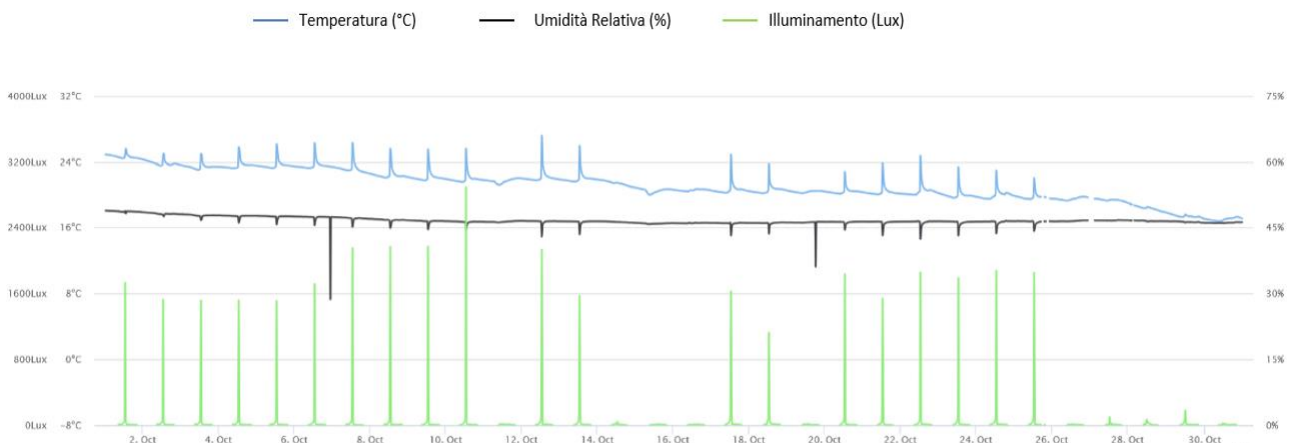


Figura 51_Sonda 17: tendenza di T, UR, LUX - 1-31 Ottobre 2018²¹⁰

Questo accade perché i vetri che costituiscono le aperture della Biblioteca, sono tanto privi di filtri (es. tende), quanto di proprietà schermanti, pertanto l'illuminazione naturale porta con sé anche calore solare diretto. Si specifica che i dati del sensore che misura i Lux sono disponibili solo per il mese di ottobre 2018.

²¹⁰ Registro delle immagini. p. 269.

Essendo la sonda 17 collocata all'interno di una teca, dove il materiale che vi si conserva è principalmente cartaceo, questo surriscaldamento giornaliero può metterne a rischio la conservazione.

3.15. Costruzione del modello virtuale dello stato di fatto

Per la realizzazione del modello virtuale della Biblioteca Generale Storica, sono state utilizzate le planimetrie, un prospetto e una sezione dell'edificio²¹¹ elaborate nel 2005 dall'architetto Alberto Garcia Gil, architetto urbanista del comune di Segovia, Spagna. Grazie a questo materiale, reso disponibile dalla Fondazione Santa María la Real, si è potuto procedere con l'importazione delle piante sul *software* SketchUp, per costruire la base del modello dell'edificio (Figura 52).

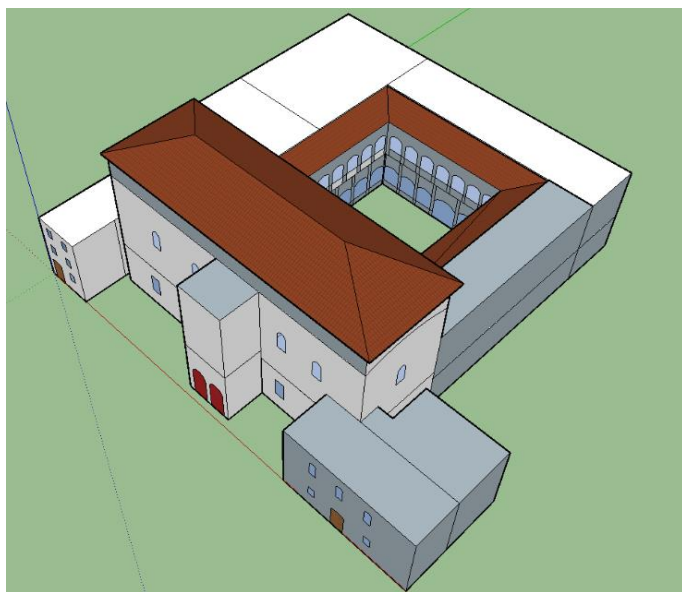


Figura 52_BUSAL: base del modello in SketchUp²¹²

Il modello è stato dunque realizzato parzialmente su SketchUp (Figura 53) e poi completato in IES.VE, seguendo i procedimenti descritti al capitolo II. La sala della Biblioteca è selezionata in rosso alla Figura 54. Su IES.VE è stata terminata la realizzazione dell'intero edificio e di due edifici adiacenti (in rosa), per ottenere una simulazione virtuale delle condizioni microclimatiche *indoor* della sala studiata, più realistica possibile.

²¹¹ Vedi apparati IV, V, VI.

²¹² Registro delle immagini. p. 269.

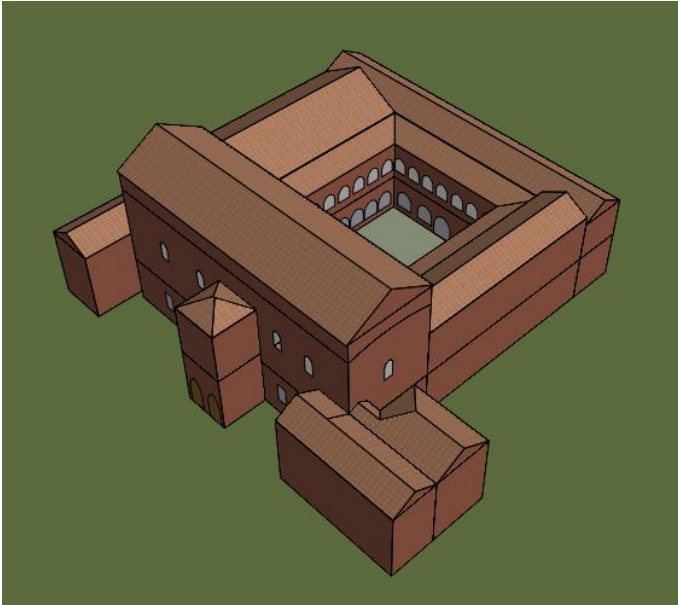


Figura 53_BUSAL: Modello in IES.VE²¹³

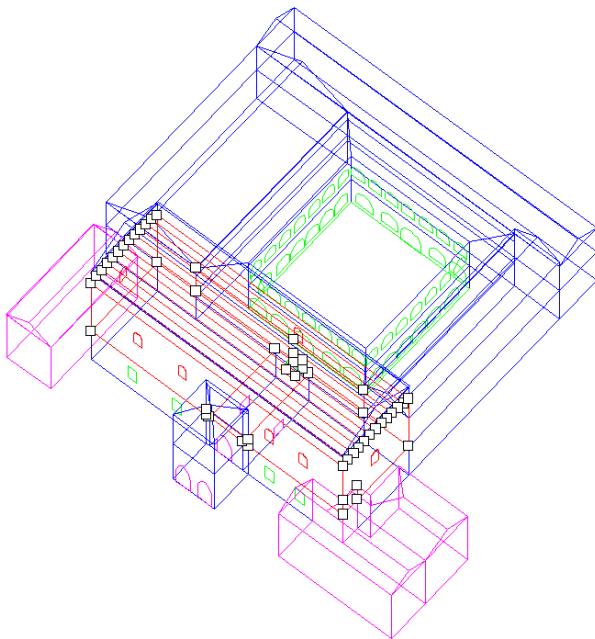


Figura 54_BUSAL: Modello in IES.VE²¹⁴

Tra le località disponibili su IES.VE, con relative informazioni climatiche, non vi è Salamanca, nonostante le informazioni geografiche siano disponibili. Per questo motivo è stato scaricato dal sito <https://energyplus.net/weather> un file in formato *epw*, con i dati climatici di un intero anno a Salamanca. Non sempre i file disponibili su *energyplus* forniscono i dati corrispondenti ad un anno recente: in questo caso il file più recente risale al 1989. Si è deciso quindi di creare un nuovo file, utilizzando i dati climatici *outdoor* registrati dalla stazione meteo, situata di fronte all'edificio della Biblioteca. Tale file è stato caricato sulla libreria di IES.VE.

²¹³ Registro delle immagini. p. 269.

²¹⁴ Ibidem.

Inoltre, come nel caso di Venaria Reale, l'opzione scelta per definire la destinazione d'uso della Biblioteca è “*library, museum or gallery*”: ci troviamo all'interno di una Biblioteca, utilizzata come sala espositiva ed aperta ai visitatori.

Infine, si specifica che per la definizione stratigrafica delle partizioni interne della Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca sono stati aggiunti 20cm di legno (immagine 68), perché gli scaffali in legno lungo l'intero perimetro all'interno della biblioteca, influiscono sui parametri microclimatici *indoor*: il legno favorisce l'isolamento termico e assorbe facilmente l'umidità.

Tabella 21. BUSAL: partizioni interne

Material	Thickness mm	Conductivity W/(m·K)	Density kg/m ³	Specific Heat Capacity J/(kg·K)	Resistance m ² K/W	Vapour Resistivity GN·s/(kg·m)	Category
[BRO1] BRICKWORK (OUTER LEAF)	450.0	0.8400	1700.0	800.0	0.5357	58.000	Brick & Blockwork
[SST] SANDSTONE	800.0	1.8300	2200.0	712.0	0.4372	262.000	Sands, Stones and Soils
[BRO1] BRICKWORK (OUTER LEAF)	450.0	0.8400	1700.0	800.0	0.5357	58.000	Brick & Blockwork
[USWD0000] WOOD - HF-B7	200.0	0.1210	593.0	837.0	1.6529	200.000	Timber

3.16. Validazione del modello virtuale

Il modello virtuale elaborato riproduce le condizioni microclimatiche *indoor* attuali della Biblioteca Generale Storica di Salamanca. Per validare il modello è stata effettuata una simulazione termodinamica sul *software* IES.VE ed i dati di Temperatura e Umidità Relativa ottenuti, sono stati confrontati con quelli dell'anno-tipo.

Il modello risulta validato: i dati simulati rispettano quanto riportato dalla *Guideline* 14 ASHRAE [6] per validazione calibrazione *software*.

La correlazione tra i dati della temperatura dell'aria simulati e quelli dell'anno-tipo sono riportati nella Tabella 22.

Tabella 22. Validazione parametri ASHRAE - Temperatura

MBE (%)	4,44%	Validato se <10%
CV (RMSE) (%)	13%	Validato se <30%
PEARSON	0,98	Validato se: >0,7 (forte correlazione); 0,3-0,7 (correlazione); <0,3 (debole correlazione)
R ²	0,97	Validato se >0,5

Il grafico ottenuto mettendo sull'asse x i dati misurati (anno-tipo) e sull'asse y i dati simulati è il seguente (Grafico 72), su cui si riporta in rosso la retta di taratura R^2 .

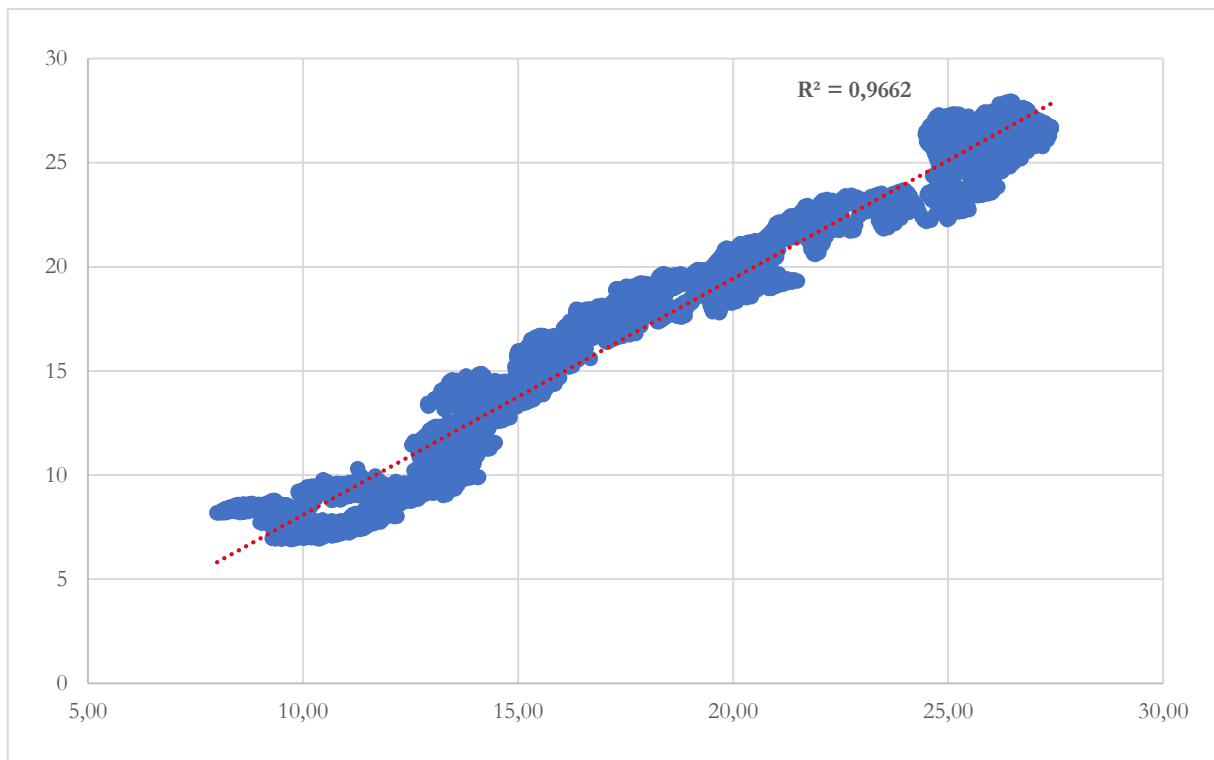


Grafico 72_BUSAL: validazione temperatura - parametro R^2

Si riportano di seguito alcuni esempi grafico della validazione della temperatura dell'aria all'interno della BUSAL (Grafico 73, 74, 75): la validazione di un periodo pari a un mese; un periodo di una settimana e uno pari a due giorni, scelti con criterio casuale.

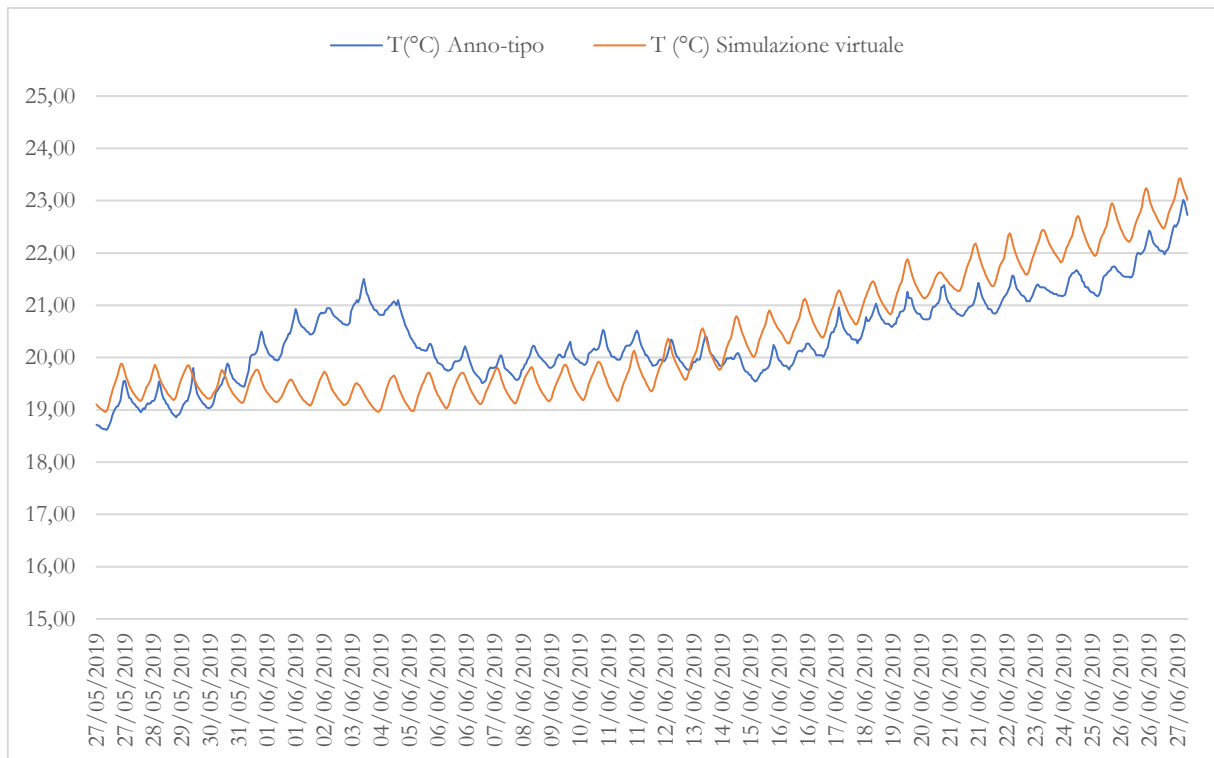


Grafico 73_Validazione temperatura: estrapolazione del mese di Maggio – Giugno

Periodo monitoraggio: 27 Maggio – 27 Giugno.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica Univesitaria di Salamanca.

Impianti: Impianti HVAC assenti.

Parametri misurati: Temperatura.

Errori di misurazione: -

Valori registrati: Range T: 18,60 °C – 23,50 °C.

Considerazioni: Osservando il confronto tra i dati monitorati e quelli simulati della temperatura dell'aria *indoor*, per un periodo pari ad un mese, si nota che la tendenza delle due serie è coincidente, ad esclusione delle giornate comprese tra l'1/06 e il 5/06: giornate durante le quali i valori simulati risultano inferiori rispetto al dato reale. Tale differenza può essere dovuta ad una diversa gestione della sala della Biblioteca da parte del personale in quelle specifiche date, o da un calcolo errato da parte della simulazione, che potrebbe non aver tenuto correttamente conto dell'incidenza del calore *outdoor* sul dato *indoor*.

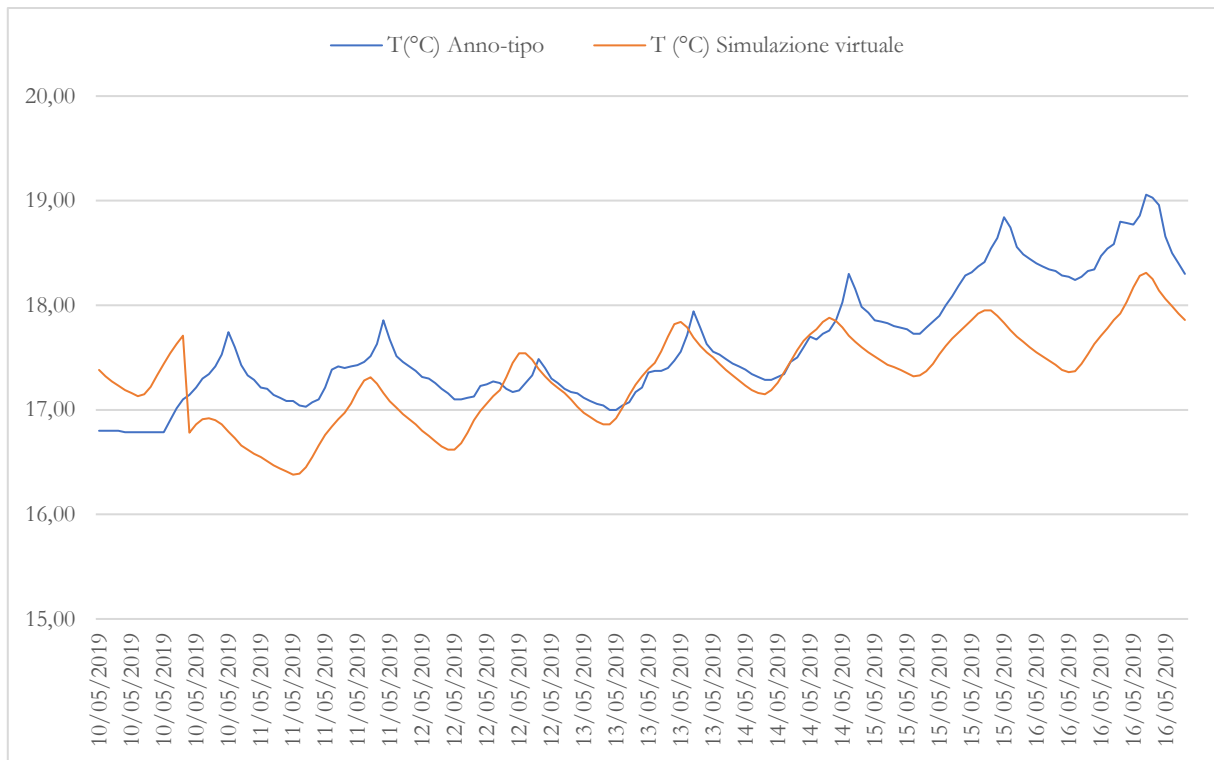


Grafico 74_Validazione temperatura: estrapolazione del mese di Maggio

Periodo monitoraggio: 10 Maggio – 16 Maggio.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica Univesitaria di Salamanca.

Impianti: Impianti HVAC assenti.

Parametri misurati: Temperatura.

Errori di misurazione: -

Valori registrati: Range T: 16,40 °C – 17,90 °C.

Considerazioni: Nei sette giorni riportati e messi a confronto nel presente grafico, il *trend* delle due serie di dati risulta coincidere, così come i picchi massimi giornalieri rilevati dal dato monitorato con quelli registrati da quello misurato.

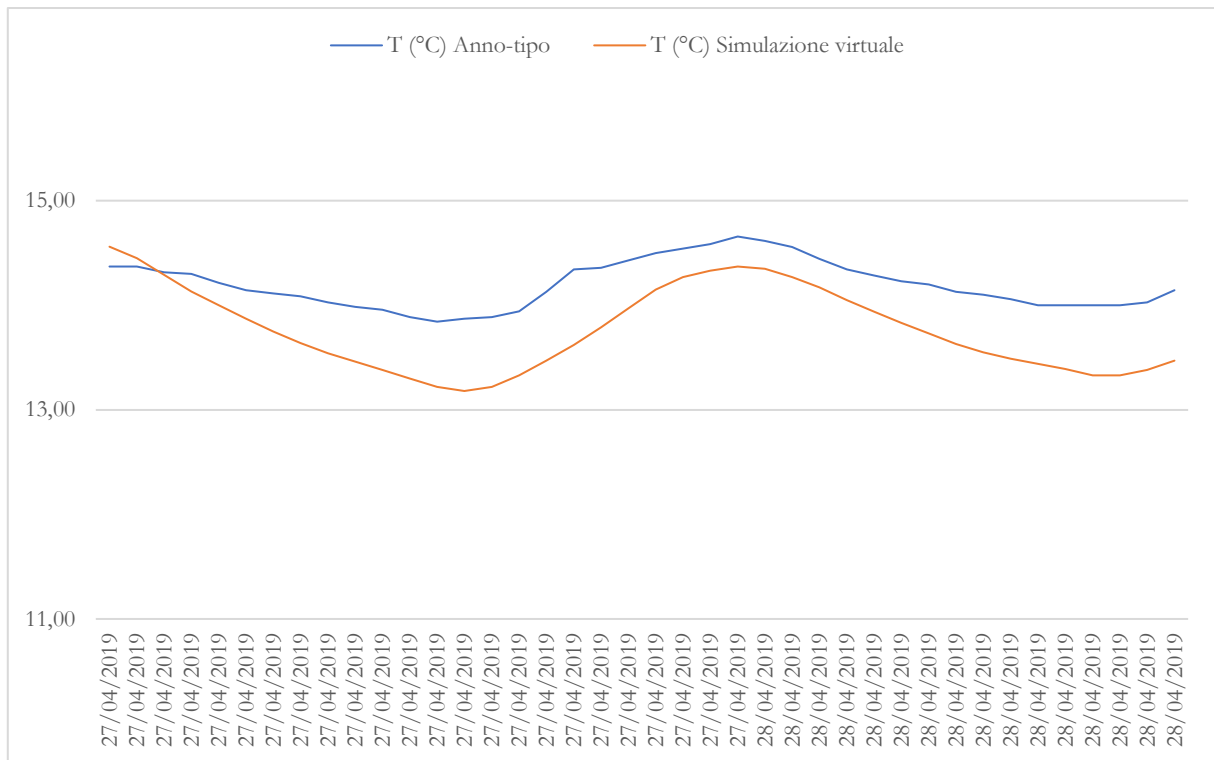


Grafico 75_Validatione temperatura: estrapolazione del mese di Aprile

Periodo monitoraggio: 27 Aprile – 28 Aprile.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica Univesitaria di Salamanca.

Impianti: Impianti di climatizzazione assenti.

Parametri misurati: Temperatura dell'aria *indoor*.

Errori di misurazione: -

Valori registrati: Range T: 13,18 °C – 14,66 °C.

Considerazioni: In queste due giornate, estratte con criterio casuale dal mese di aprile, si nota come la tendenza dei valori della temperatura dell'aria simulati con IES.VE sia coincidente a quella dei dati dell'anno-tipo. Il dato simulato registra valori leggermente inferiori rispetto a quelli dell'anno-tipo.

Il modello si conferma termicamente validato.

I valori ottenuti dalla comparazione tra: i dati di umidità relativa dell'anno-tipo ed i dati di umidità relativa simulati su un anno con IES.VE, rientrano nei parametri della *Guideline* 14 ASHRAE (Tabella 23).

Tabella 23. Validazione parametri ASHRAE - Temperatura

MBE (%)	0,27%	Validato se <10%
---------	-------	------------------

CV (RMSE) (%)	15%	Validato se <30%
PEARSON	0,71	Validato se: >0,7 (forte correlazione); 0,3-0,7 (correlazione); <0,3 (debole correlazione)
R ²	0,50	Validato se >0,5

Il Grafico 76 riporta: sull'asse x i dati misurati (anno-tipo) e sull'asse y i dati simulati. In rosso si riporta la retta di taratura R².

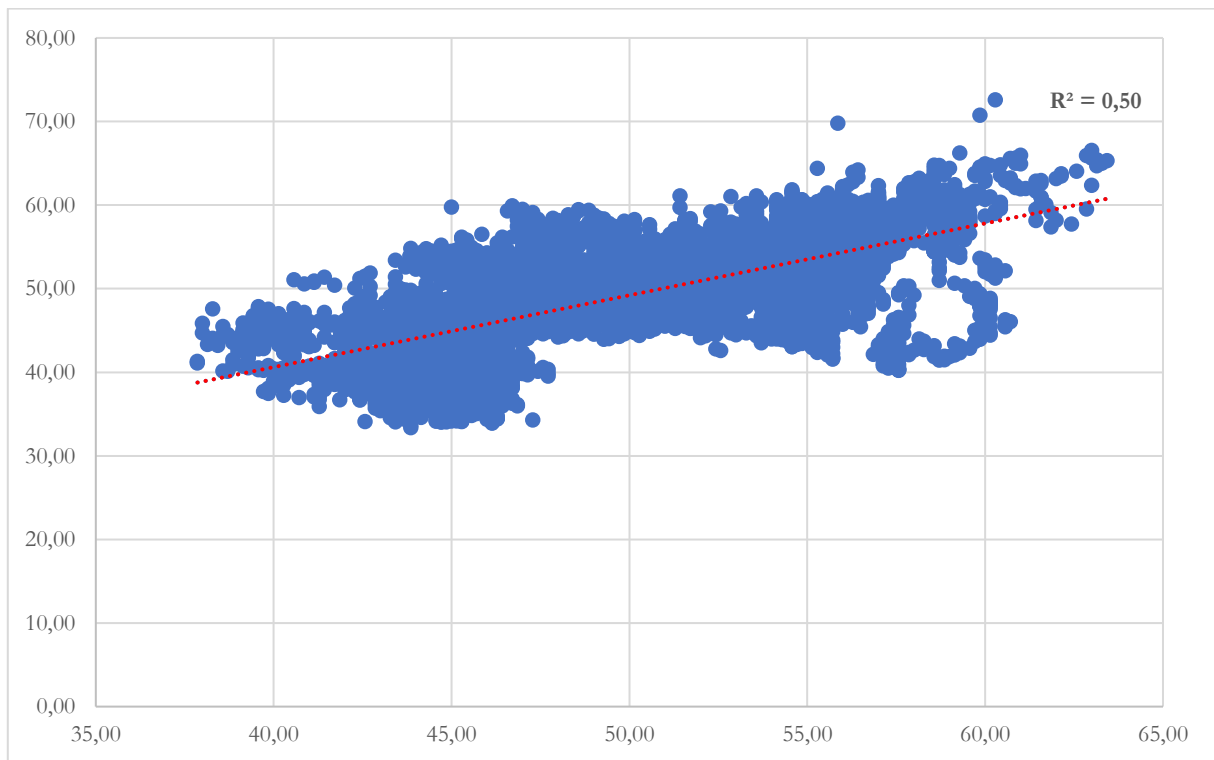


Grafico 76_BUSAL: validazione umidità relativa - parametro R²

Il modello risulta validato anche per quanto riguarda il parametro dell'umidità relativa.

Il grafico seguente riporta il *trend* dell'umidità relativa dell'anno-tipo e dei dati simulati per un periodo di un mese (Grafico 77).

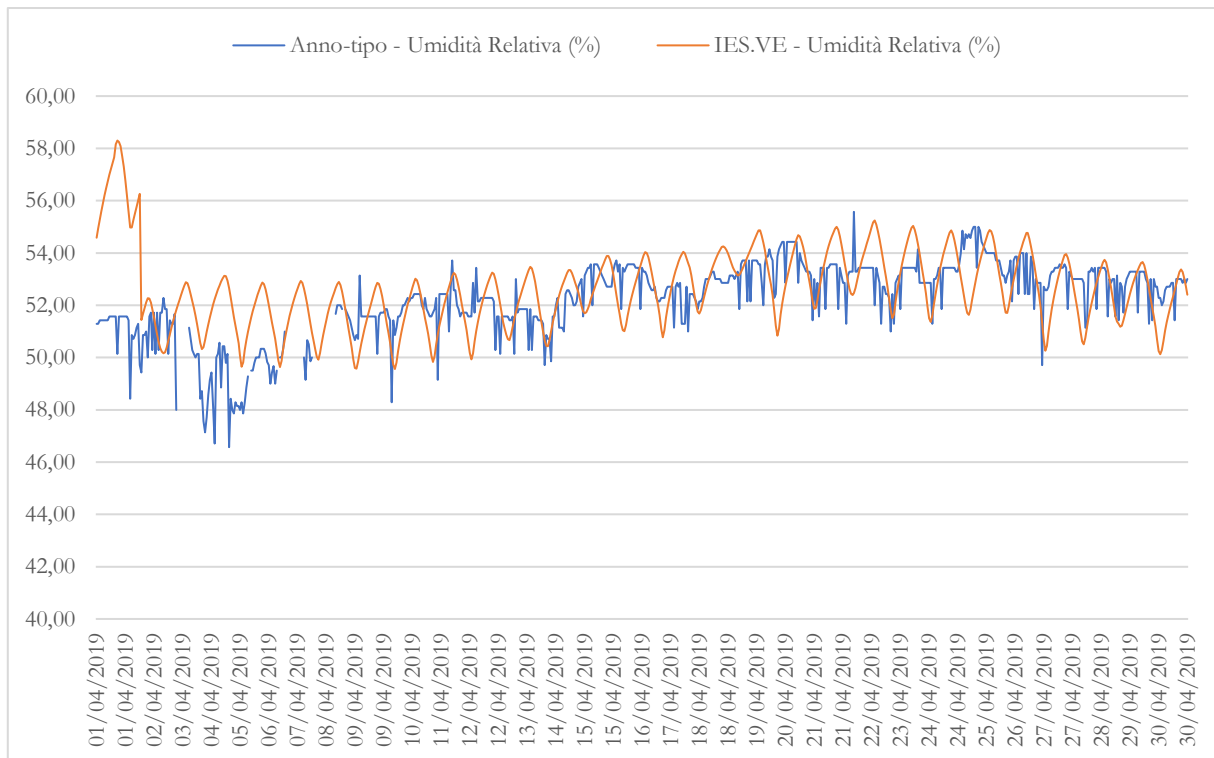


Grafico 77_Validazione umidità relativa: estrapolazione del mese di Aprile

Periodo monitoraggio: 1 Aprile – 30 Aprile.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica Univesitaria di Salamanca.

Impianti: Impianti HVAC assenti.

Parametri misurati: Umidità Relativa.

Errori di misurazione: -

Valori registrati: Range UR: 41,7 % – 45,34 %.

Considerazioni: Il grafico riporta il confronto tra un mese di dati estrapolati dall'anno-tipo e un mese estrapolato dalla simulazione virtuale. Durante il primo periodo (1/04 - 8/04) si registrano numerosi *gap*, derivanti da problemi tecnici del monitoraggio; successivamente si nota che le serie di dati seguono la stessa tendenza, nonostante il dato monitorato registri più sbalzi giornalieri rispetto al dato simulato. Generalmente, il *software* IES.VE riporta un margine di errore più elevato nella simulazione del parametro di UR, rispetto all'errore che si può avere mediamente con la simulazione di T.

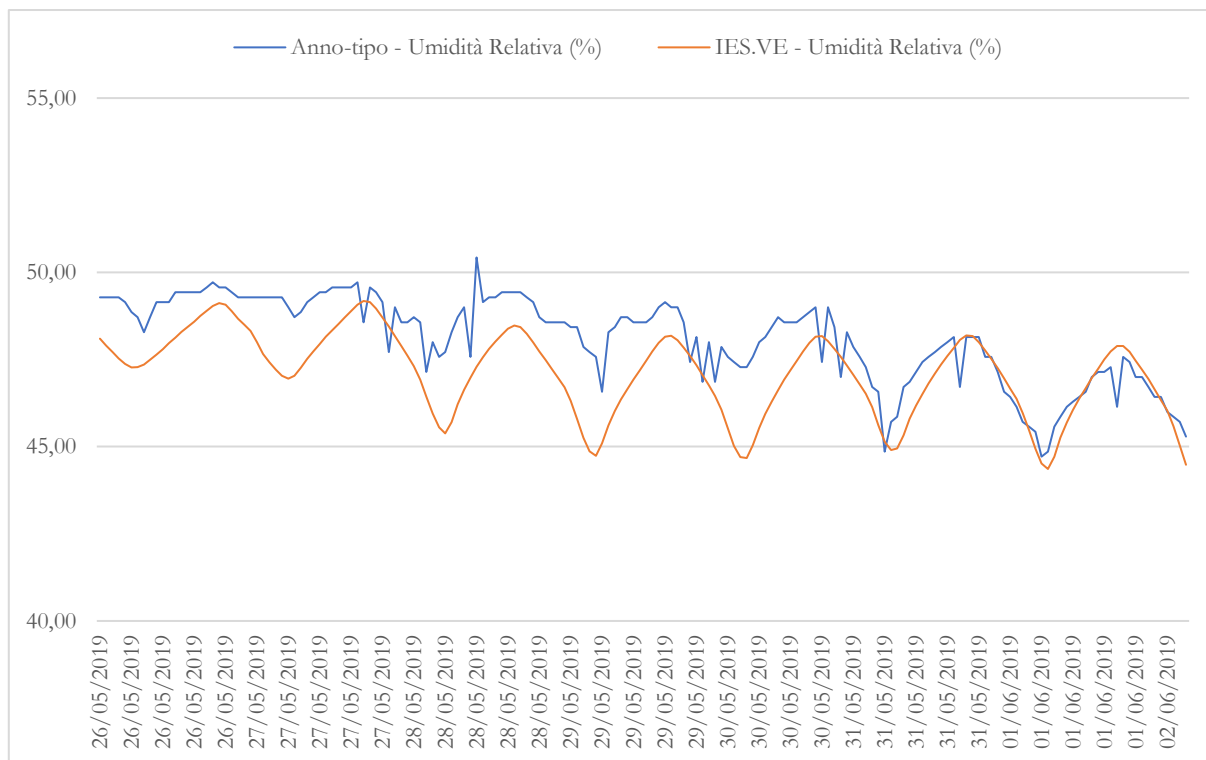


Grafico 78_ Validazione umidità relativa: estrapolazione del mese di Maggio - Giugno

Periodo monitoraggio: 26 Maggio – 02 Giugno.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica Univesitaria di Salamanca.

Impianti: Impianti HVAC assenti.

Parametri misurati: Umidità Relativa.

Errori di misurazione: -

Valori registrati: Range UR: 45 % – 50 %.

Considerazioni: Il grafico riporta i dati dell'umidità relativa della sala della biblioteca, relativi a una settimana estrapolata dall'anno-tipo e dalla simulazione virtuale. L'andamento delle due tendenze è coincidente, nonostante si registrino alcuni sbalzi giornalieri -del dato dell'anno-tipo- non rilevati dalla simulazione tramite IES.VE.

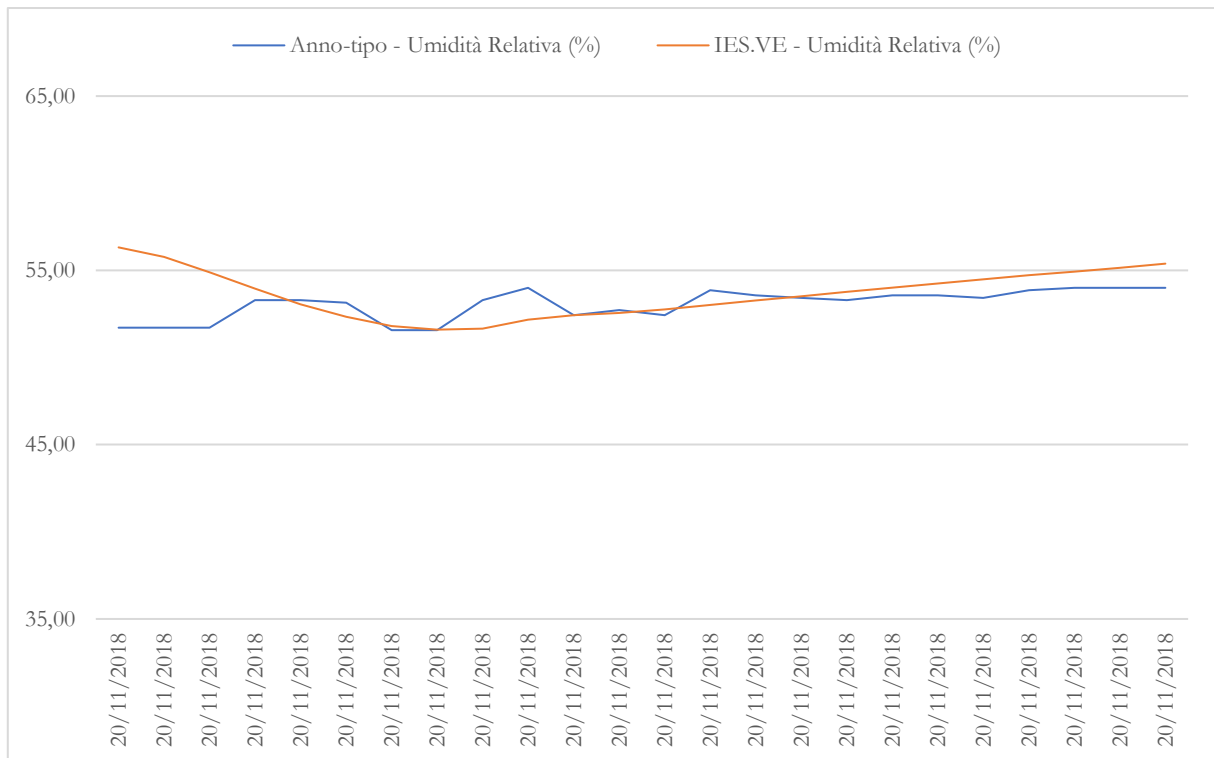


Grafico 79_ Validazione umidià relatiua: estrapolazione del mese di Novembre

Periodo monitoraggio: 20 Novembre – 21 Novembre.

Ambiente monitorato: Biblioteca Generale Storica Univesitaria di Salamanca.

Impianti: Impianti HVAC assenti.

Parametri misurati: Umidià Relatiua.

Errori di misurazione: -

Valori registrati: Range UR: 41,7 % – 45,34 %.

Considerazioni: Un ultimo zoom su una giornata, selezionata con criterio casuale dal mese di novembre, mostra una discrepanza contenuta tra dato simulato e dato dell'anno-tipo.

Il modello virtuale si conferma validato, sia per il parametro della temperatura, sia per quello dell'umidià relatiua: è dunque possibile procedere con la simulazione virtuale.

3.17. Simulazione dell'andamento *indoor* della luce naturale

Grazie al modello virtuale dell'intero edificio, è possibile studiare e prevedere l'andamento della luce naturale all'interno della BUSAL. Si tratta di una specifica funzione del software IES.VE, comune alla maggior parte dei software di simulazione dinamica e utile per l'analisi di edifici che espongono e custodiscono beni di valore storico, artistico e culturale.

Infatti, una volta caricato e validato il modello virtuale sul *software*, IES.VE ci permette di selezionare una giornata dell'anno -presente, passata o futura-; un periodo di tempo compreso nell'arco delle 24 ore del giorno stabilito e verificare quello che è stato, o sarebbe in futuro, l'andamento della luce naturale, che filtra attraverso le superfici vetrate, all'interno di un ambiente. È dunque possibile riprodurre un video, o delle immagini, che riportano l'andamento della luce naturale all'interno della stanza, in un dato giorno, negli orari desiderati, potendo stabilire se visualizzare tale andamento ogni 1,2,3,5,10,15,20,30, o 60 minuti (es. Figura 55).

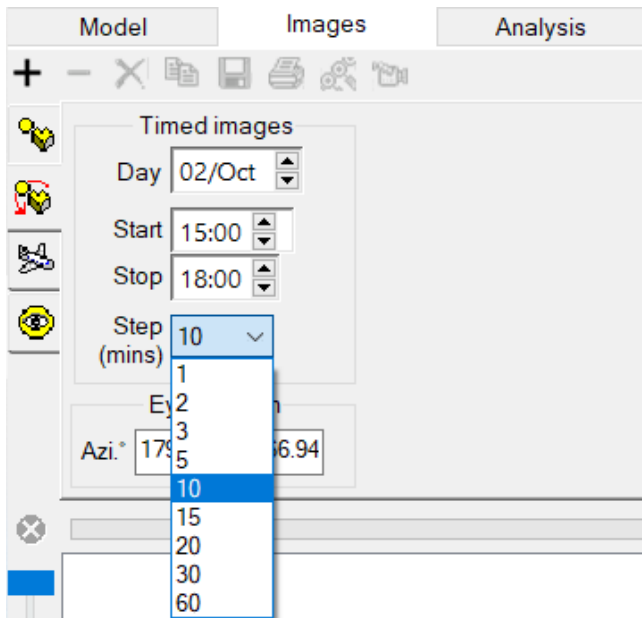


Figura 55_ IES.VE: impostazioni restituzione video²¹⁵

Nel caso della Biblioteca di Salamanca, si è deciso di verificare come si sia spostata la luce naturale all'interno della sala, durante la giornata del 8/10/2018 -che rappresenta una giornata tipo del mese di ottobre-: si vuole verificare se la simulazione virtuale è in grado di restituire un risultato, relativo all'irraggiamento solare, coincidente con la realtà²¹⁶.

Le immagini seguenti corrispondono agli orari: 16:30, 16:40, 16:50, 17:00.

²¹⁵ Registro delle immagini. p. 269.

²¹⁶ Emersa dall'analisi dei dati della sonda 17, al 3.14.6.: surriscaldamento per circa un'ora della teca in cui è collocata la sonda 17, per quasi tutto il mese di ottobre 2018, dovuto all'irraggiamento solare.

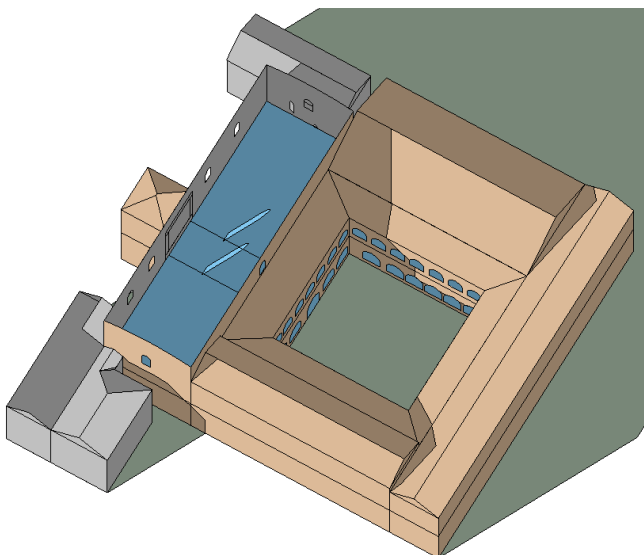


Figura 56_ IES.VE: luce naturale - 8/10, ore 16:30

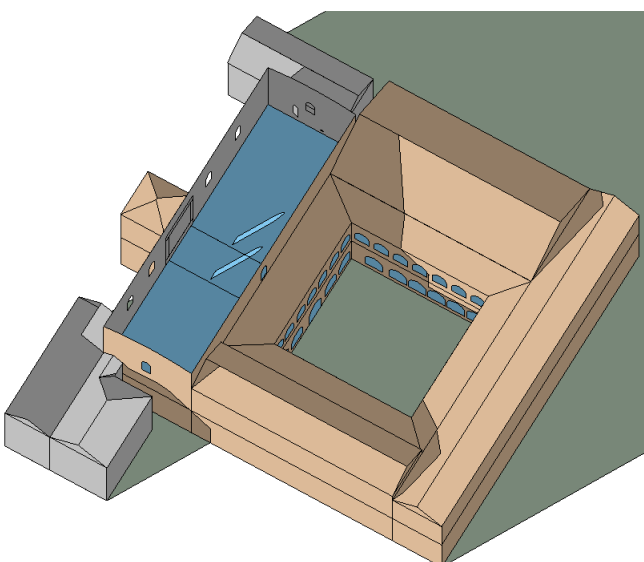


Figura 57_ IES.VE: luce naturale - 8/10, ore 16:40²¹⁷

²¹⁷ Registro delle immagini. p. 269.

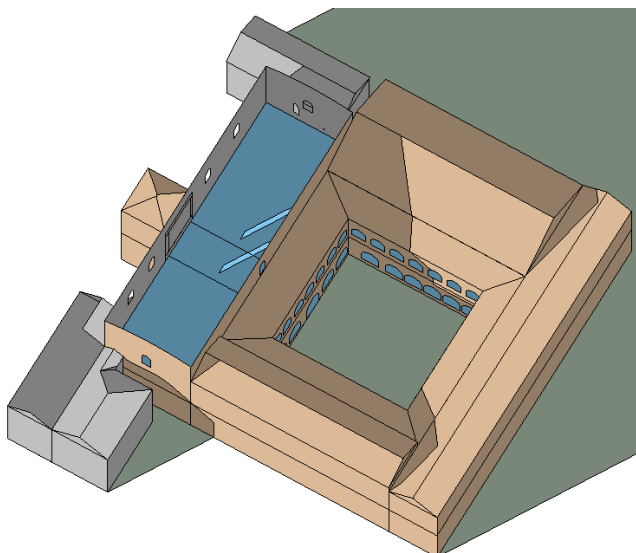


Figura 58_IES.VE: luce naturale - 8/10, ore 16:50²¹⁸

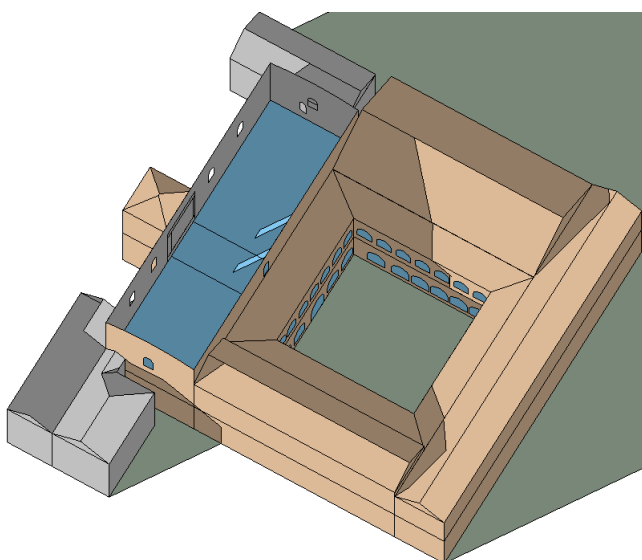


Figura 59_IES.VE: luce naturale - 8/10, ore 17:00²¹⁹

Durante la giornata riprodotta dalla simulazione virtuale, si nota come, per l'intero periodo simulato (16:30 – 17:00), i raggi del sole si posino nell'area occupata dalla teca che contiene la sonda 17. Questa simulazione risulta coincidere con quanto rilevato dalle sonde *in situ*. Grazie a simulazioni come questa è possibile organizzare la collocazione delle opere all'interno di qualsiasi tipologia di edificio, con il fine di garantirne la conservazione preventiva, tenendo conto di molteplici fattori, tra i quali anche l'irraggiamento solare.

²¹⁸ Registro delle immagini. p. 269.

²¹⁹ Ibidem.

3.18. Conclusioni parziali

Alla luce dei risultati emersi da queste prime analisi, in riferimento ai primi 2 punti²²⁰ delle finalità, riportati al paragrafo 3.11.1., si può affermare che:

1. la metodologia adottata risulta efficace e replicabile anche per lo studio di questa tipologia di edificio: si conferma che ogni fase della metodologia proposta ci permette di ottenere informazioni utili; in questo specifico caso, le informazioni più rilevanti emergono non tanto dalle simulazioni, quanto più dalle analisi dei dati della campagna di monitoraggio, che hanno permesso di individuare la presenza di un fattore specifico (la radiazione solare) che espone parte del patrimonio conservato all'interno della Biblioteca a rischio di degrado. La fase di analisi dei dati ha dimostrato la sua efficacia in termini di conservazione preventiva, permettendo di intervenire per tempo per avviare uno specifico meccanismo, prima che i beni riportassero visibili segni di danno;
2. i parametri microclimatici *indoor* della BUSAL risultano adeguati alla conservazione della quasi totalità del patrimonio ivi custodito (tenendo conto della EN 15757: 2010 [5]; della UNI 10829: 1999 [4] e degli standard riportati dal MIBAC [3]), ma è stato individuato un fattore esterno che espone una piccola parte del patrimonio a rischio di danno. Gli aspetti che risultano favorevoli alla conservazione del patrimonio librario e ligneo presente in sala sono i seguenti:
 - a. le indagini storiche hanno permesso di verificare che oggi la Biblioteca presenta verosimilmente le medesime caratteristiche microclimatiche *indoor* sin dalla data della sua costruzione: l'approccio adottato nei confronti della BUSAL fino ad oggi è stato di carattere conservativo, la destinazione d'uso della sala non è mutata, così come la gestione dei visitatori, gli arredi, il patrimonio librario, le caratteristiche architettoniche e non sono stati introdotti sistemi HVAC. Dunque, i beni custoditi nella Biblioteca si sono acclimatati al microclima caratteristico di questo ambiente dal 1509 ad oggi (cfr. EN 15757:2010);
 - b. l'analisi dei dati della campagna di monitoraggio ha evidenziato un andamento piuttosto costante dei parametri microclimatici *indoor*, caratterizzato da oscillazioni giornaliere di T e UR che rientrano nei limiti individuati dalla UNI 10829:1999, entro i quali le oscillazioni non espongono i beni a rischio di degrado;
 - c. la gestione degli accessi (limitati) e l'assenza di impianti HVAC all'interno della Biblioteca, permette di contenere la concentrazione degli inquinanti (es. CO₂) e le fluttuazioni di T e UR (che potrebbero essere altrimenti determinate da fattori quali i visitatori ed eventuali malfunzionamenti degli impianti): il microclima risulta essere quasi esclusivamente condizionato dal *trend* clima *outdoor*, che comunque non incide fortemente sull'*indoor*.

Invece, per quanto riguarda i beni esposti a rischio di danno, è stato riscontrato che, durante il mese di ottobre, circa ogni giorno, per quasi un'ora, i beni conservati all'interno di una teca collocata in una zona centrale della Biblioteca, subiscono forti oscillazioni di T e UR, dovute all'effetto dell'irraggiamento solare, che filtra tramite due aperture esposte ad ovest. I beni conservati in questa teca sono originali e prevalentemente cartacei, dunque molto sensibili a sbalzi repentini di T e UR. Fino ad oggi né il personale addetto alla manutenzione, né gli addetti al monitoraggio gestito all'interno del progetto europeo HeritageCARE, avevano individuato questa condizione, tanto banale quanto rischiosa in termini di conservazione preventiva. Grazie a questo

²²⁰ Le conclusioni relative al punto 3 sono al paragrafo 3.19.1.

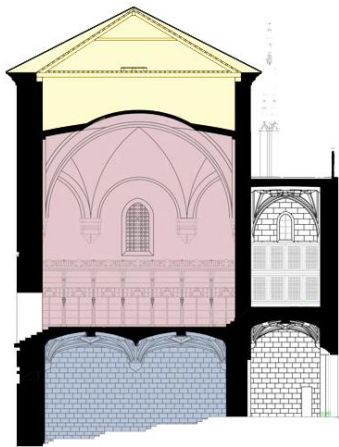
contribuito la direttrice della Biblioteca -Margarita Becedas González-, in accordo con il resto dei responsabili e la Fondazione *Santa María la Real*, hanno dovuto valutare come intervenire: l'idea iniziale era quella di sostituire i vetri delle aperture con vetri in grado di proteggere maggiormente l'*indoor* dalla radiazione ultravioletta. La decisione finale è stata invece quella di selezionare tra gli oggetti contenuti all'interno della teca in esame, quali fossero i più sensibili alla luce, e spostarli: soluzione sicuramente più economica della prima ipotesi, ma anche più rischiosa, perché il resto delle teche che contengono ora parte di quegli stessi materiali ed altri oggetti -anch'essi sensibili agli effetti dell'illuminamento- non sono ad oggi monitorate. Dunque, si ritiene che le decisioni prese in merito ai beni conservati nella teca identificata "a rischio", siano state tempestive ed economiche, ma che lascino tutt'oggi tali beni esposti ad un margine di rischio microclimatico, perché, come detto, gli oggetti rimossi dalla teca in questione sono stati scelti in base a quali tra essi fossero più sensibili alla luce, mentre andrebbe considerato non solo l'effetto dell'illuminamento, ma anche quello dell'aumento della temperatura e della conseguente diminuzione repentina dell'umidità relativa. Pertanto, si suggerisce di verificare tramite la simulazione virtuale quali altre teche siano esposte al medesimo rischio, durante l'intero anno, e di monitorarle costantemente con sonde termoigrometriche associate ad *alert*, in grado di inviare una notifica (e-mail o sms) ai manutentori quando i parametri rilevati dalle sonde risultano fuori dai *range* del microclima storico²²¹, caratteristico della Biblioteca. Questo permetterebbe di individuare per tempo qualsiasi condizione anomala in termini di parametri microclimatici e potenzialmente rischiosa per la conservazione preventiva del patrimonio.

3.19. Aspetti architettonici e microclima: Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca e Biblioteca Malatestiana a confronto

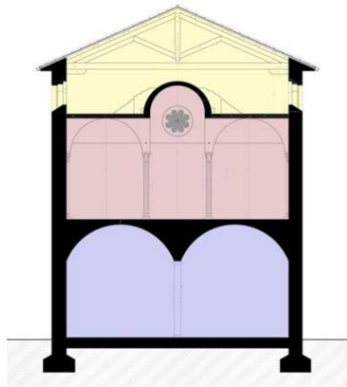
Osservando la sezione architettonica della Biblioteca Generale dell'Università di Salamanca (1), si nota che essa rimanda a quella di altre biblioteche, realizzate in Italia nello stesso periodo -a cavallo tra il XV e il XVI secolo-, tra cui: la Biblioteca Malatestiana, a Cesena (2), realizzata tra il 1447 e il 1452; la Biblioteca dell'Abbazia di Monte Oliveto Maggiore (3), la cui costruzione risale agli anni 1515-1516; la Biblioteca Agostiniana, a Milano (4), che appartiene al complesso del Convento di Santa Maria Incoronata e fu realizzata tra il 1480 e il 1490; la Biblioteca di San Marco, a Firenze (5), costruita tra il 1437 e il 1444.

Si riportano di seguito le immagini delle rispettive sezioni:

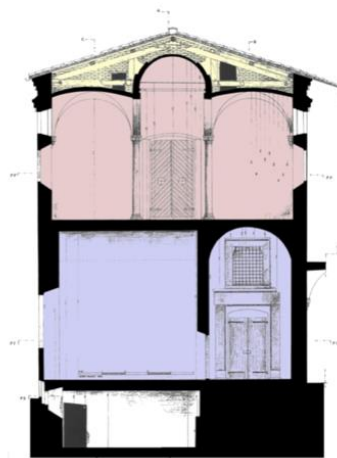
²²¹ EN 15757:2010.



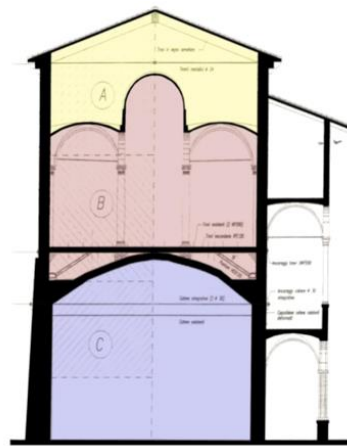
(1)



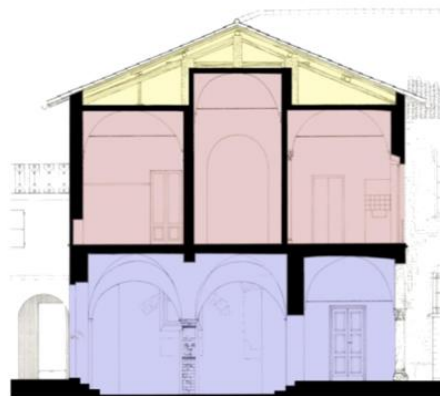
(2)



(3)



(4)



(5)

Figura 60_sezioni architettoniche: BUSAL (1), Biblioteca Malatestiana (2), Biblioteca di San Marco (3), Biblioteca dell'Abbazia di Monte Oliveto Maggiore (4), Biblioteca Agostiniana (5)²²²

In questa ricerca si è deciso di restringere l'analisi mettendo a confronto la Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca con la Biblioteca Malatestiana, poiché queste due Biblioteche sono accomunate da altri aspetti interessanti, oltre alle sezioni architettoniche degli edifici che le ospitano: entrambe le biblioteche non hanno subito modifiche architettoniche, né l'introduzione di impianti capaci

²²² Registro delle immagini. p. 269.

di controllare il microclima, e conservano addirittura le medesime opere e gli arredi originali (manoscritti e plutei da un lato, patrimonio librario e gli scaffali in legno dall'altro) che vi sono stati introdotti dalla data della loro realizzazione.

La Malatestiana, prima biblioteca civica in Italia e in Europa, realizzata da Matteo Nuti per volere di Novello Malatesta -signore di Cesena-, rappresenta infatti un *unicum architettonico* ed è stata inserita nel registro delle *Mémoires du Monde* dall'UNESCO nel 2005, dove si legge che tale biblioteca è "*Reconnue universellement comme unique bibliothèque du Quattrocento encore intacte, comme l'édifice, les ameublements et le patrimoine libraise, elle constitue un complexe monumental et bibliographique d'une importance exceptionnelle*"²²³. La Biblioteca Malatestiana occupa il primo piano del complesso che la accoglie ed è composta da tre navate, separate da 10 file di colonne bianche, realizzate con una pietra locale; la copertura delle navate laterali, la cui altezza massima raggiunge i 4,10m, è a crociera, mentre quella centrale è a botte. La superficie di questa sala è di circa 400m². La navata centrale raggiunge un'altezza massima pari a 6,30m. Lungo le due navate laterali vi sono 22 finestre per ciascun lato, due per campata, per un totale di 44 finestre, che rendono la sala molto luminosa, insieme al rosone situato in fondo alla navata principale e sotto al quale si trova la pietra tombale di Novello Malatesta. I colori, riportati alla luce durante i restauri del 1920, richiamano quelli dello stemma della famiglia Malatesta: bianco (come le colonne); rosso (come il pavimento in cotto); verde (come l'intonaco). I materiali utilizzati per la realizzazione delle Biblioteca Malatestiana e presenti ancora oggi, sono: laterizio e intonaco per i muri esterni; laterizio per le partizioni interne; la copertura è composta da tegole e laterizio; il pavimento è stato realizzato in cotto e massetto in calcestruzzo; infine, le volte sono in laterizio. La permanenza di colori e materiali originali indica che il microclima *indoor* di questo ambiente presenta certamente caratteristiche favorevoli alla conservazione.

La Biblioteca Generale Storica di Salamanca occupa una superficie pari a circa 518m², al primo piano dell'edificio de *las Escuelas Mayores*; la sala presenta 7 aperture, di cui 4 Ovest, 1 Est, 1 Nord-Est, 1 Sud-Ovest. L'altezza massima raggiunge i 13,27m. La Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca è così composta: i muri esterni sono realizzati con la pietra arenaria della cava di Villamayor; per le partizioni interne è stata utilizzata una muratura a sacco; le volte sono in laterizio e legno; il pavimento è in legno; la copertura è realizzata con tegole e laterizio. Per quanto riguarda le conclusioni in merito alla correlazione tra microclima e conservazione in questa Biblioteca si può fare riferimento al paragrafo precedente: 3.18.

Di seguito si riportano le piante dei piani in cui sono collocate le due biblioteche e le piante con le singole Biblioteche²²⁴.

²²³<http://www.unesco.org/new/fr/communication-and-information/flagship-project-activities/memory-of-the-world/register/full-list-of-registered-heritage/registered-heritage-page-8/the-malatesta-novello-library/#c187210> (ultima visita 23/09/2020).

Traduzione: Riconosciuta universalmente come unica biblioteca del Quattrocento rimasta come allora: l'edificio stesso, gli arredi ed il patrimonio librario, essa costituisce un complesso monumentale e bibliografico di eccezionale importanza.

²²⁴ Gli apparati IV e VII presentano il materiale da cui le seguenti immagini sono state estrapolate.

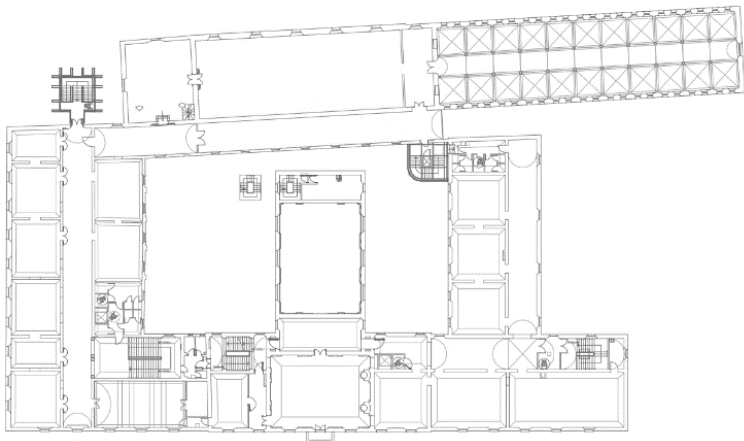


Figura 61_Pianta del piano della Biblioteca Malatestiana²²⁵

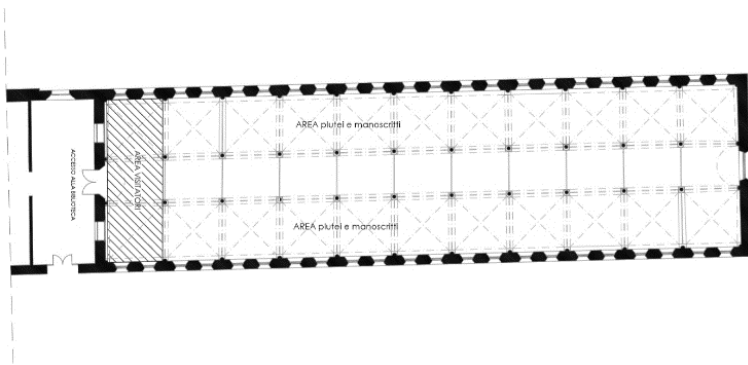


Figura 62_Biblioteca Malatestiana²²⁶

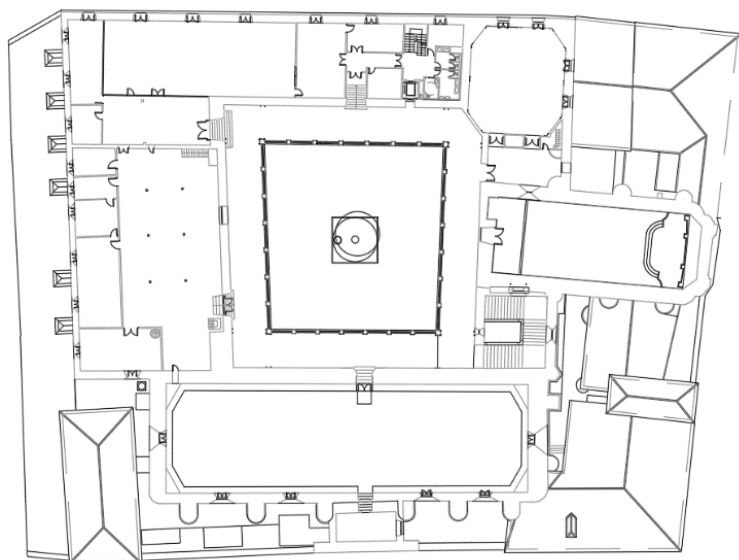


Figura 63_Pianta del piano della BUSAL²²⁷

²²⁵ Registro delle immagini. p. 269.

²²⁶ Ibidem.

²²⁷ Ibidem.

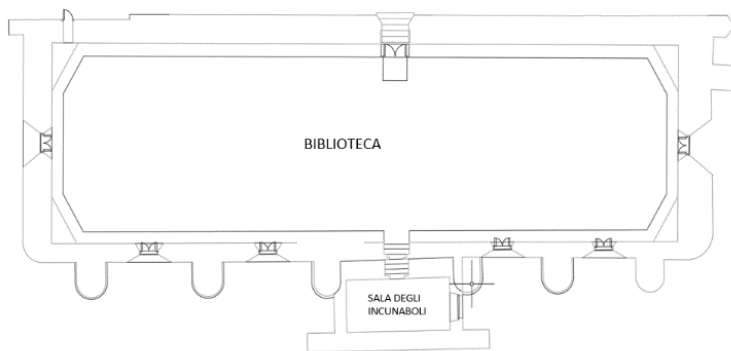


Figura 64_BUSAL²²⁸

I beni conservati all'interno della Biblioteca Generale Storica di Salamanca sono già stati elencati nella presente ricerca; mentre nel caso della Biblioteca Malatestiana si tratta di 343 manoscritti, 48 volumi e 58 plutei in legno di larice (scelto probabilmente poiché difficilmente infiammabile). Il repertorio librario di questa biblioteca è fissato ai plutei con delle catene in ferro (Figura 65). Dal XVIII secolo al 1950 sono state effettuate sei campagne di restauro, per mano di professionisti, per un totale di 285 codici e 25 manoscritti restaurati. L'ultima campagna di restauro è stata effettuata tra il 1970 ed il 1980, con particolare attenzione alle rilegature. Alla luce di queste ultime campagne è emerso come il microclima abbia avuto effetti favorevoli, tanto che raramente carta ed inchiostro risultano danneggiati; l'ammaloramento dei volumi non è dovuto a cause legate al microclima: la maggior parte dei danni dipende infatti da azioni meccaniche causate dai lettori e non da fattori microclimatici, come possono essere sbalzi di temperatura o umidità relativa *indoor*.



Figura 65_Plutei e manoscritti, Biblioteca Malatestiana²²⁹

In entrambe le biblioteche è permesso l'accesso ai visitatori, ma unicamente in gruppi rispettivamente di un massimo di 20 e 25 persone e solo se accompagnati dal personale, per una durata massima che varia tra i 15 e i 20 minuti. Nella Biblioteca Malatestiana, inoltre, l'area in cui possono sostare i visitatori è circoscritta (Figura 62): si limita alla zona che precede la prima fila dei plutei; mentre all'interno della Biblioteca di Salamanca il pubblico può spostarsi liberamente all'interno della sala, ad esclusione dei soppalchi che permettono l'accesso ai settori più alti delle librerie, le quali occupano l'intero perimetro della Biblioteca. Diversamente dal caso della Biblioteca Generale storica dell'Università di Salamanca, in cui le 7 finestre presenti non vengono mai aperte, il personale della Biblioteca Malatestiana decide - basandosi su regole non scritte, bensì su esperienza e buon senso- quando, se e per quanto tempo aprire

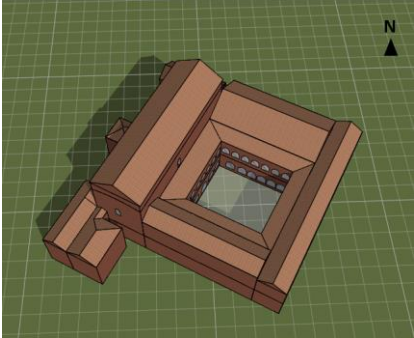
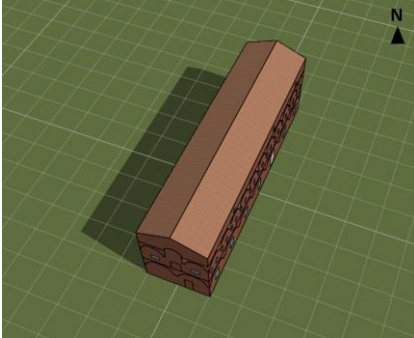
²²⁸ Registro delle immagini. p. 269.

²²⁹ Ibidem.

e chiudere le 44 aperture, che permettono alla sala di avere un ottimo illuminamento e un ricambio d'aria naturale. Le finestre vengono aperte più comunemente durante la mattina, tutto l'anno. Il ricambio d'aria, nella Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, avviene probabilmente per infiltrazione tramite la porta di ingresso in vetro, che collega il claustro alla Biblioteca. In entrambe le biblioteche, l'elemento inquinante principale è rappresentato dalla presenza dei visitatori.

La tabella sottostante riassume le principali caratteristiche architettoniche, geometriche e gestionali delle due Biblioteche.

Tabella 24. Confronto tra BUSAL e Biblioteca Malatestiana

	Biblioteca Generale storica dell'Università di Salamanca	Biblioteca Malatestiana
Località	Salamanca, Spagna	Cesena, Italia
Latitudine	40° 58' 7 N	44° 8' 20 N
Longitudine	-5° 39' 49 O	12° 14' 35 E
Orientamento	 <p>Figura 66_modello virtuale BUSAL²³⁰</p>	 <p>Figura 67_modello virtuale Biblioteca Malatestiana²³¹</p>
Aperture	<p>4 Ovest, 1 Est, 1 Nord-Est, 1 Sud-Ovest</p> <p>Vetro singolo 6 mm</p> <p>3,20m x 1,52m</p> <p>11m da terra</p>	<p>22 Ovest, 22 Est, 2 Sud-Ovest, 1 rosone Nord-Est</p> <p>Vetro singolo 6mm</p> <p>0,60m x 1,21m</p> <p>3,40m da terra le aperture laterali; 4,40m da terra il rosone</p>
Muri esterni	Spessore medio= 1,7m	Spessore medio= 0,7m
Partizioni interne	Spessore medio= 1,10m	Spessore medio= 0,6m
Impianti HVAC	Assenti	Assenti
Gestione porte e finestre	Sempre chiuse	Regolarmente gestite dal personale

²³⁰ Registro delle immagini. p. 269.

²³¹ Ibidem.

Accesso	Gruppi di massimo 25 persone per una durata di 15/20 minuti; mediamente 100 persone al giorno; solo se accompagnate da una guida; i visitatori possono girare liberamente per la Biblioteca, ma non salire sulle scale in legno accedendo agli scaffali più alti delle librerie.	Gruppi di massimo 20 persone per una durata di 15/20 minuti; mediamente 47 persone al giorno; solo se accompagnate da una guida; i visitatori possono occupare solo l'area vicino alla prima fila di plutei, non oltre (Figura 62).
Possibilità di consultazione in loco	No	Sì
Prestiti	Circa 10 all'anno, principalmente per esposizioni. Per periodi di 30 giorni, con richiesta rinnovabile.	Raramente
Piani superiori alla Biblioteca	1	1
Piano inferiori alla Biblioteca	1	1
Muri perimetrali	4	3
Clima outdoor	https://it.weatherspark.com/y/34543/Condizioni-meteorologiche-medie-a-Salamanca-Spagna-tutto-l'anno	https://it.weatherspark.com/y/72380/Condizioni-meteorologiche-medie-a-Cesena-Italia-tutto-l'anno

Il dato per il quale queste Biblioteche risultano differire maggiormente è una delle condizioni a contorno: l'umidità *outdoor*. Il clima di Salamanca risulta infatti essere più secco durante tutto l'anno, rispetto a quello di Cesena.

Inoltre, come si evince dai risultati emersi da uno studio microclimatico svolto dall'Arch. K. Fabbri e l'Arch. Prof. M. Pretelli nel 2013 [7], i parametri di temperatura dell'aria e umidità relativa, all'interno della Biblioteca Malatestiana, sono leggermente influenzati dal clima esterno, così come accade anche per la BUSAL (cfr. paragrafo 3.14.5.), ciononostante la tendenza di entrambi i parametri risulta essere costante. Si riportano di seguito due esempi elaborati da M. Pretelli e K. Fabbri, esplicativi di quanto appena affermato.

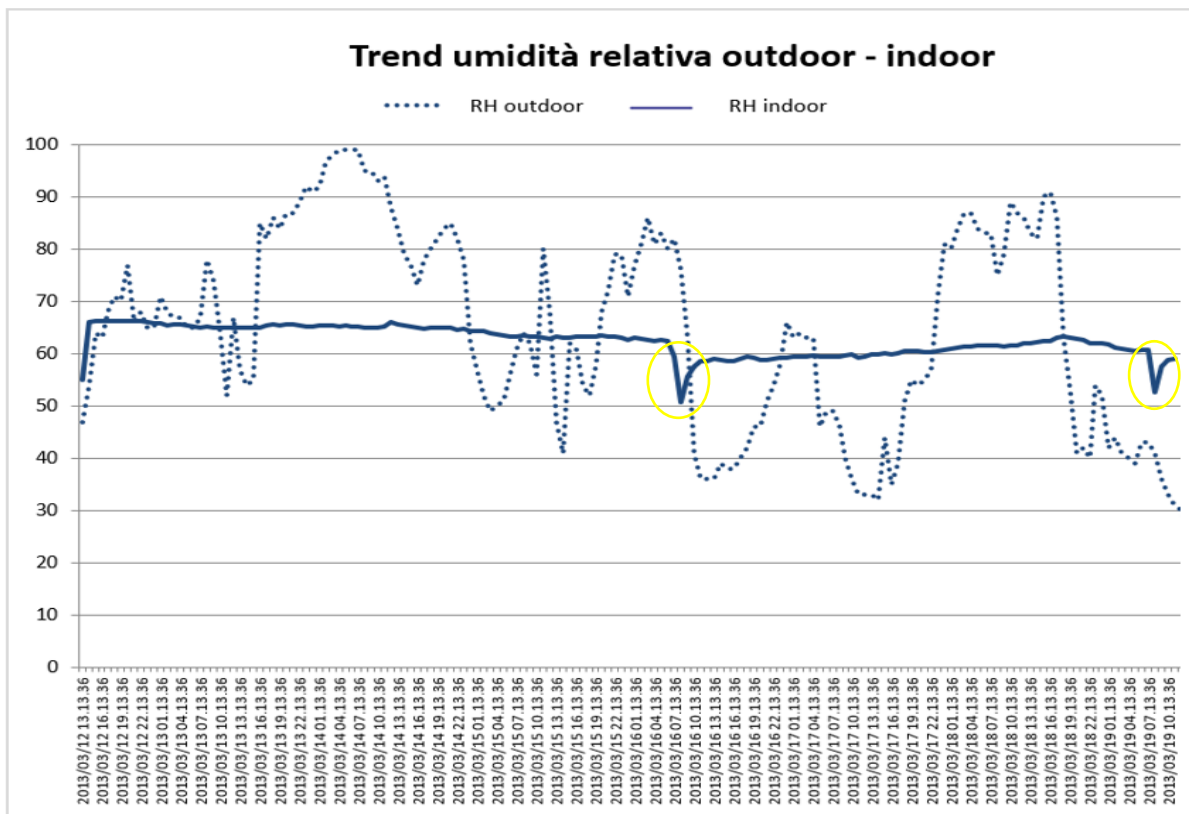


Figura 68_Biblioteca Malatestiana: tendenza UT *outdoor-indoor* - 03/12/2013 – 19/12/2013²³²

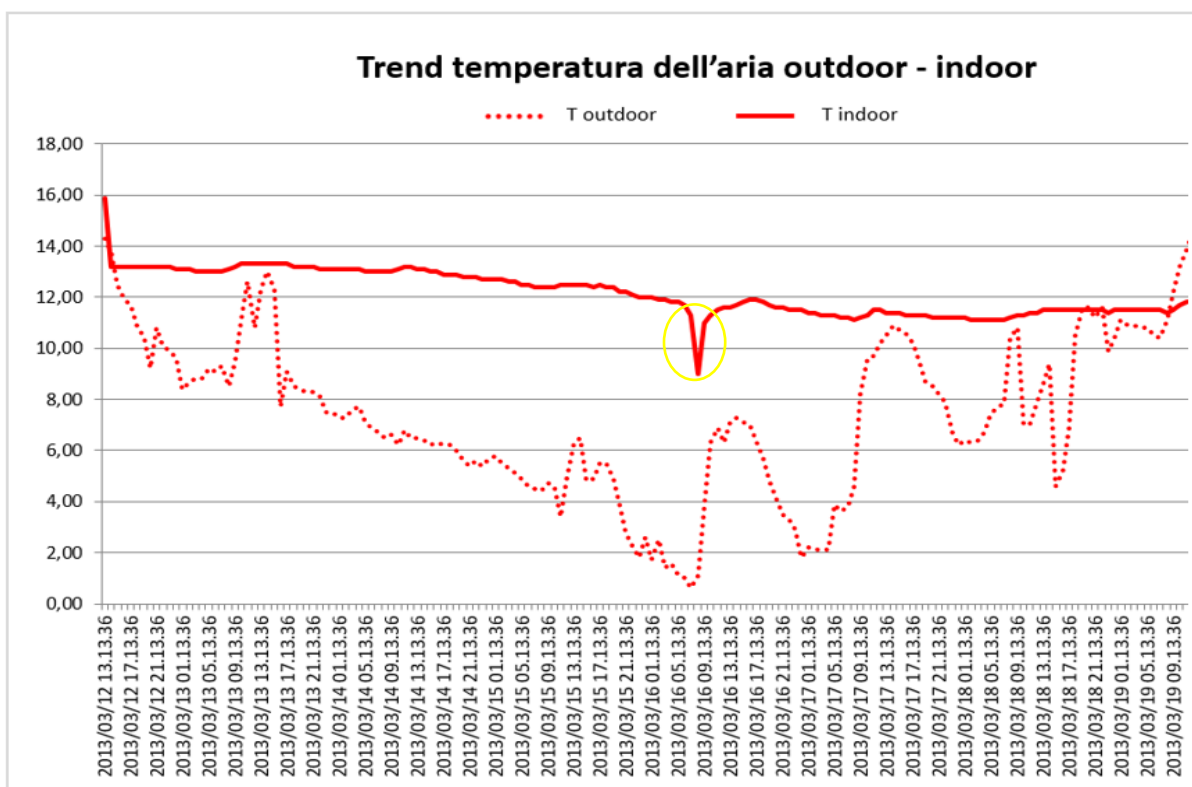


Figura 69_ Biblioteca Malatestiana: tendenza T *outdoor-indoor* - 03/12/2013 – 19/12/2013²³³

²³² Registro delle immagini. p. 269.

²³³ Ibidem.

In entrambi i grafici (Figura 68, 69) si nota come, analogamente a quanto riportato per la BUSAL, l'alzarsi e l'abbassarsi rispettivamente della temperatura e dell'umidità relativa *outdoor*, non incida fortemente sull'andamento costante dei corrispondenti parametri *indoor*. Si evidenzia inoltre la presenza di alcuni picchi negativi, per entrambi i parametri di T e UR, dovuti probabilmente all'apertura delle finestre²³⁴.

Il confronto tra la Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca e la Biblioteca Malatestiana è un'ottima occasione per comprendere il funzionamento di due edifici storici, in assenza di sistemi di condizionamento e ventilazione dell'aria, entrambi in grado di garantire adeguate condizioni microclimatiche *indoor* per la conservazione degli specifici beni che essi custodiscono. Ne emerge uno schema comune e rigoroso dal punto di vista della progettazione degli spazi che caratterizza entrambi gli edifici che ospitano le Biblioteche: osservando la configurazione di questi ultimi (Figura 70, 71), si nota come in entrambi i casi vi siano tre livelli, il primo -che nella Malatestiana è occupato dal museo archeologico e nella BUSAL da alcune aule visitabili- è a contatto con il suolo ed isola il piano delle Biblioteche da scambi termici con il terreno, evitando così problematiche legate a variazioni di temperatura del suolo e fenomeni correlati alla presenza di acqua nel terreno (es. possibilità di allagamento; umidità e tutti i problemi che ne conseguono); il piano soprastante a quello delle Biblioteche, che possiamo definire "attico" -in entrambi i casi non in uso-, riduce l'effetto della radiazione solare diretta, che si avrebbe su entrambe le Biblioteche, in assenza di questo spazio. La presenza dell'attico è infatti particolarmente rilevante: esso è la ragione principale per cui non si registrano numerosi picchi giornalieri della temperatura dell'aria *indoor*.

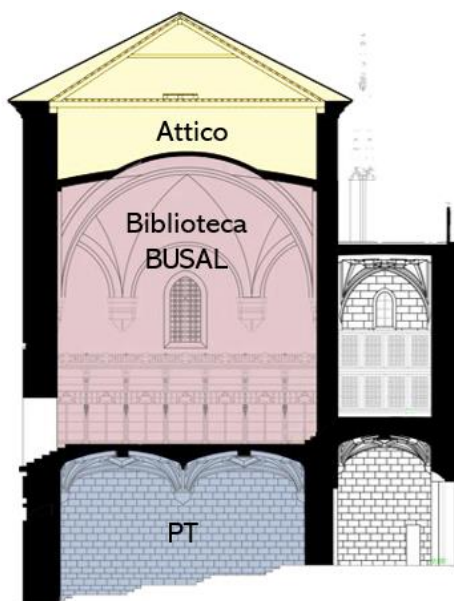


Figura 70_Sezione architettonica: BUSAL²³⁵
236

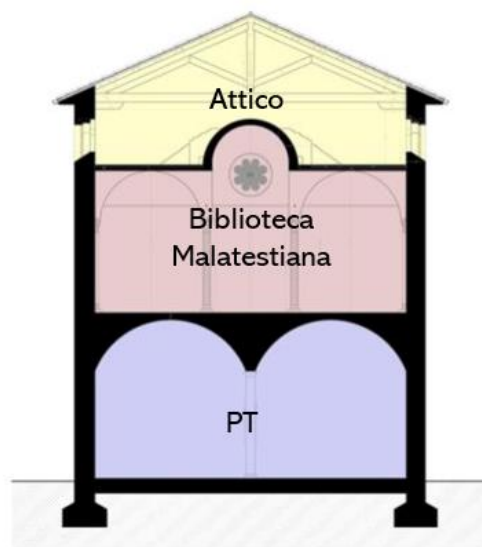


Figura 71_Sezione architettonica: Biblioteca Malatestiana

Un elemento legato alla progettazione per il quale invece le due Biblioteche si differenziano, concerne le aperture: nella Biblioteca Malatestiana esse sono state realizzate più in basso (3,40m da terra per le 44 aperture laterali; 4,40m da terra per il rosone situato in fondo alla navata principale) rispetto a quelle

²³⁴ Dati commentati dagli autori in [7].

²³⁵ Registro delle immagini. p. 269.

²³⁶ Ibidem.

presenti all'interno della Biblioteca di Salamanca (11m da terra). Nel caso della BUSAL questa scelta progettuale ha avuto una ricaduta negativa in termini di condizioni microclimatiche *indoor* per una parte del patrimonio ivi custodito²³⁷.

3.19.1. Conclusioni

In riferimento al punto 3, esplicitato nelle finalità del presente caso-studio, si può affermare quanto segue:

3. Grazie al confronto tra la BUSAL e la Biblioteca Malatestiana, è stato possibile verificare quali caratteristiche architettoniche e gestionali accomunino le due Biblioteche, in cosa esse differiscano e in che modo questi aspetti incidano sul microclima di entrambe le sale. Le analogie individuate sono le seguenti: sezione architettonica degli edifici; destinazione d'uso; data di costruzione; assenza di impianti HVAC; gestione degli accessi; presenza invariata di arredi e patrimonio librario. L'insieme di quanto appena elencato si concretizza in dei risvolti microclimatici *indoor* ottimali per la conservazione dei beni ivi custoditi: l'andamento dei parametri microclimatici *indoor* risulta costante in entrambe le Biblioteche ed è presumibilmente il medesimo dalla data della loro costruzione, ad esclusione di variazioni dovute ai cambiamenti climatici *outdoor*. La comparazione delle due Biblioteche permette inoltre di comprendere il ruolo della progettazione sul microclima *indoor*: nei casi analizzati si tratta di un ruolo strategico, che mira ad ottenere uno specifico microclima interno, capace di garantire la conservazione dei beni custoditi in esso, con bassi costi accessori (assenza di spese per riscaldamento/raffrescamento, deumidificazione e ventilazione). Dallo studio di entrambi gli edifici emerge infatti una stretta correlazione tra le scelte formali dell'architettura, la distribuzione degli spazi, la scelta dei materiali e delle caratteristiche strutturali, e come tali caratteristiche fossero anche strettamente finalizzate all'ottenimento di specifici parametri microclimatici. Questi ultimi erano dettati a loro volta dalla destinazione d'uso a cui le fabbriche erano destinate: come qualsiasi edificio dell'epoca, le architetture che ospitano le due Biblioteche indagate sono state progettate valutando quali fossero le scelte più convenienti e performanti per ottenere condizioni microclimatiche *indoor* adatte all'uso che se ne sarebbe fatto, idealmente "per sempre", senza poter contare su impianti tecnologici. Tutt'oggi i costi sostenuti dalla Biblioteca Malatestiana e dalla Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, per garantire un microclima adeguato alla conservazione dei beni ivi custoditi, sono ancora bassi: costituiti principalmente dalle spese per il personale che si occupa del monitoraggio e della manutenzione di questi spazi. Ne emerge che le architetture possono garantire, semplicemente in forza dello schema costruttivo, prestazioni ottimali per la conservazione del patrimonio. Allo stesso modo, è evidente che ogni scelta definita in fase di progettazione può rivelarsi tanto favorevole quanto sfavorevole in termini di microclima *indoor*, come dimostra la scelta della collocazione delle aperture nella Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, che differisce, in questo caso, dalle scelte progettuali stabilite per Biblioteca Malatestiana e che ci costringe oggi ad intervenire per rimediare ad una decisione definita in fase progettuale, che mette a rischio la conservazione di alcune opere.

²³⁷ Cfr. paragrafo 3.14.6.

Riferimenti

- [1] L. Cortés, Ad summum caeli Programa alegórico humanista de escalera de la universidad, 1994.
- [2] J. Cuesta Bustillo, La Universidad de Salamanca: Ochocientos años, 2018.
- [3] MIBACT, Ref.B) MIBACT, Ministerial Decree, Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei, 10th May 2001, (2001).
- [4] UNI – Ente Nazionale Italiano di Unificazione (1999) UNI 10829:1999 Beni di interesse storico e artistico - Condizioni ambientali di conservazione - Misurazione ed analisi.
- [5] CEN – European Committee for Standardization, EN 15757:2010, Conservation of Cultural Property. Specifications for temperature and relative humidity to limit climate-induced mechanical damage in organic hygroscopic materials, (2010).
- [6] ASHRAE. Guideline 14, Measurement of Energy and Demand Savings. Technical report, American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, Georgia, (2014).
- [7] M. Pretelli, K. Fabbri, Historic Indoor Microclimate of the Heritage Buildings - A Guideline for Professionals who care for Heritage Buildings, Springer International Publishing, Gewerbestrasse, 2018. <http://www.springer.com/it/book/9783319603414>.

3.20. Caso studio III: Cattedrale di Santiago de Compostela – il Portico della Gloria

Dall'8/07/2019 la ricerca di dottorato è stata proseguita presso l'Università Politecnica di Madrid, per un periodo conclusosi in data 8/11/2019. Durante questi mesi è stato possibile collaborare con l'Architetto Soledad García Morales, Direttrice del dipartimento di costruzione e tecnologia architettonica del Politecnico di Madrid, attualmente impegnata nel restauro degli interni della Cattedrale di Santiago de Compostela e nello studio del microclima *indoor* del Portico della Gloria, narcece della Cattedrale.

3.20.1. Finalità della ricerca

Le finalità perseguite per questo caso-studio sono state le seguenti:

1. applicare la metodologia d'indagine proposta nella presente ricerca ad una nuova tipologia di edificio e di ambiente, per verificare che essa sia replicabile ed efficace anche per questo caso-studio;
2. verificare le variazioni microclimatiche causate dall'accesso dei visitatori all'interno del Portico della Gloria ed il loro possibile impatto sulla conservazione delle pietre policrome che caratterizzano il narcece;
3. valutare se le due Unità di Trattamento Aria (UTA), rimaste attive durante l'intero periodo di monitoraggio all'interno del Portico della Gloria, hanno avuto un ruolo favorevole o sfavorevole per la conservazione preventiva delle sculture policrome che lo caratterizzano;
4. simulare virtualmente due scenari futuri per verificare che variazioni microclimatiche si avranno, con e senza attivazione delle UTA, una volta rimossi i pannelli in legno che attualmente separano il Portico della Gloria dal resto della Cattedrale (intervento realmente previsto dalla Fondazione Cattedrale entro il 25 luglio 2021, Anno Santo).

3.21. Conoscenza storico-architettonica

La realizzazione della Cattedrale di Santiago de Compostela ebbe inizio nel IX secolo, quando Re Alfonso II fece erigere una piccola chiesa dedicata a San Giacomo, nel luogo in cui venne ritrovato il sepolcro contenente le spoglie dell'Apostolo Giacomo, da parte del vescovo Teodomiro di Iria Flavia, nel IX secolo²³⁸. Nel 1075 ebbe inizio una nuova costruzione, sotto la direzione arcivescovile dapprima di Diego de Peláez e successivamente dell'arcivescovo Diego Gelmírez²³⁹. La Cattedrale è stata costruita in conci di pietra granitica con copertura in lastre del medesimo materiale; presenta una pianta a croce latina, braccio longitudinale e transetto a tre navate, separate da pilastri cruciformi. La navata centrale ha una volta a botte se archi doppi e triforio a quarto di botte, le navate laterali presentano invece una volta a crociera. Vi sono inoltre matronei che percorrono tutto il perimetro della Cattedrale e cappelle laterali di epoca romanica. Come riportato nella Figura 72, sono diversi gli stili che caratterizzano questa architettura romanica, ad esempio: la facciata das Praterías è in stile romanico; il chiostro è stato realizzato

²³⁸ Gli scavi archeologici presso la tomba, effettuati prima tra il 1878-1879 e successivamente tra il 1946-1959, hanno confermato la veridicità di tale scoperta: già il 1° novembre 1884 Papa Leone XIII, con la bolla "*Deus omnipotens*" dichiarò l'autenticità delle reliquie conservate a Santiago de Compostela.

²³⁹ Per approfondimenti vedi: [5] [6] [7].

in stile rinascimentale; la cappella maggiore, gli organi, la chiusura della testata, la Porta Santa²⁴⁰ e la facciata dell'Obradoiro²⁴¹ sono in stile Barocco; mentre la facciata dell'Azabachería è neoclassica.

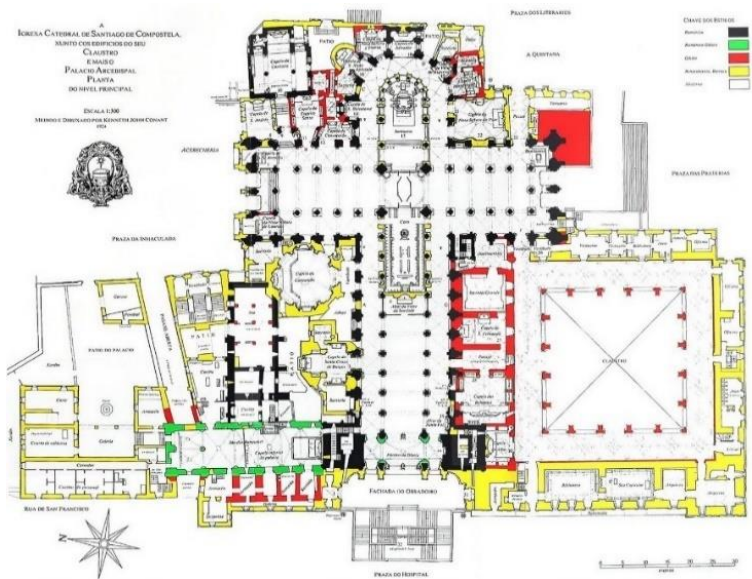


Figura 72_Santiago de Compostela: stili architettonici²⁴²

Nel 1140 la Cattedrale appariva ormai conclusa, ad esclusione del Portico della Gloria: realizzato tra il 1168-1188 dal Maestro Mateo per volere di re Ferdinando II di León, come confermato dal ritrovamento di un documento che ne certifica il pagamento del vitalizio. Il portico della Gloria, collocato tra le navate della Cattedrale ed il portale barocco dell'Obradoiro, è un nartece composto da tre campate voltate a crociera, caratterizzato dalla presenza di tre portali scolpiti in pietra, superati i quali si può accedere alle navate della Cattedrale. Il portale centrale è il più grande dei tre e sulla colonna che lo divide al centro vi è la statua dell'apostolo Giacomo (Figura 73). L'arco centrale rappresenta la Gloria -destino finale dei giusti- sormontata da un Cristo risorto. L'arco sinistro ritrae il popolo ebraico nel Limbo, in attesa dell'arrivo di Cristo e quello destro rappresenta il giudizio universale, a cui tutti gli uomini dovranno sottoporsi. Il Maestro Mateo ha rappresentato tutto ciò seguendo uno schema riconoscibile (Figura 74): la colonna centrale che suddivide il portale al centro divide anche l'umanità prima di Cristo -a sinistra- dall'umanità dopo Cristo -a destra-; le linee orizzontali suddividono le fasi della vita dell'uomo nel loro percorso di conoscenza del Mistero: dal dramma dell'esistenza alla vita eterna.

²⁴⁰ Detta anche la "Porta del Perdono", realizzata 1611 e aperta solo negli Anni Santi (coincidenti con la festa di San Giacomo -25 luglio-, celebrata con cadenza regolare ogni 6, 5, 6 e 11 anni): i pellegrini effettuano l'accesso alla Cattedrale da questa Porta (vi si accede da una delle piazze più grandi di Santiago de Compostela: Praza de la Quintana) ed escono dal Portico della Gloria. La Porta Santa venne aperta per la prima volta nel 1666.

²⁴¹ Dichiarata monumento storico-artistico nel 1986.

²⁴² Registro delle immagini. p. 269.



Figura 73_Portico della Gloria²⁴³

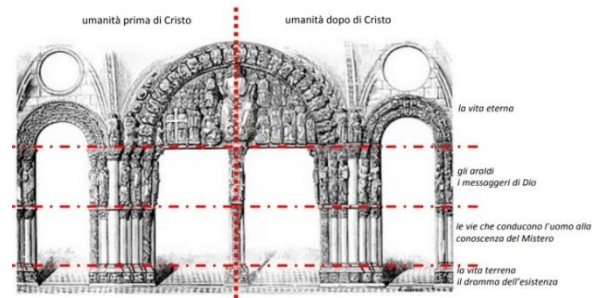


Figura 74_Portico della Gloria: schema di lettura²⁴⁴

Nel Portico della Gloria ritroviamo infatti un capolavoro della scultura tardoromanica europea, ispirato all'Apocalisse di San Giovanni e dedicato alla storia della salvezza dell'umanità (per approfondimenti vedi:[1] [2] [3] [4]).

3.21.1. Modifiche d'uso e interventi architettonici

Per quanto riguarda la destinazione d'uso, la Cattedrale di Santiago de Compostela è da sempre luogo di culto e meta di migliaia di pellegrini l'anno²⁴⁵. Per ciò che concerne invece gli interventi di tipo architettonico-strutturale e di restauro, dal 1944 ad oggi sono stati effettuati diversi interventi, come la sostituzione della pavimentazione dell'intera Cattedrale (la pavimentazione odierna è visibile a Figura 73, quella originale a Figura 75), seguita dagli architetti Luis Menendez Pidal e Juan Gonzales Cebrian; interventi di consolidamento, che hanno riguardato ad esempio le torri campanarie; la rimozione del coro; ecc.²⁴⁶

Tra il 1946 e il 1960 proseguirono le indagini archeologiche all'interno della Cattedrale (Figura 76), dirette dall'allora commissario di zona e archeologo Manuel Chamoso Lama, in collaborazione con l'architetto Pons Sorolla. Sono stati ritrovati diversi reperti, come alcuni resti delle chiese fatte realizzare da Alfonso II e III; frammenti della muraglia di Cresconio; resti del sepolcro del vescovo Teodomiro di Iria Flavia. Quest'ultimo, scoperto il 19 settembre del 1955, ha ricevuto maggiore ripercussione mediatica, per il fatto che durante il suo pontificato nel IX secolo, venne scoperta la tomba apostolica di San Giacomo. La rilevanza di queste scoperte fu tale che venne creato un piano per la conversione di questi reperti in aree visitabili: nacque così il museo sotterraneo. Inoltre, nel 1956 l'archeologo Manuel Chamoso Lama suggerì alcune linee guida per la gestione delle visite, in modo da evitare gruppi di visitatori troppo numerosi e assicurando la conservazione futura dell'intera Cattedrale e di ciò che essa conserva.

²⁴³ Registro immagini. p. 269.

²⁴⁴ Ibidem.

²⁴⁵ Nel 2019 sono stati registrati 347578 pellegrini recatesi alla Cattedrale di Santiago de Compostela. Fonte: <https://www.camminosantiagodecompostela.it/cammino-di-santiago-dati-e-statistiche-di-tutto-il-2019/#:~:text=Sono%20da%20poco%20uscite%2C%20come,sono%20stati%20in%20totale%20347.578>. Ultima visita: 5/10/2020.

²⁴⁶ Per approfondimenti vedi: [5]



Figura 75_Pavimentazione originale della Cattedrale²⁴⁷



Figura 76_Navata centrale: scavi archeologici (1946)²⁴⁸

Infine, tra il 2008 e il 2018 sono stati effettuati dei lavori di restauro nella zona del Portico della Gloria, mentre i lavori di restauro nell'intera Cattedrale (es. Figura 77), incluse le coperture (accessibili e a gradoni: Figura 78), non sono ancora conclusi, ma si concluderanno entro il 2021 (Anno Santo).

²⁴⁷ Registro delle immagini. p. 269.

²⁴⁸ Ibidem.



Figura 77_Pulitura delle colonne²⁴⁹

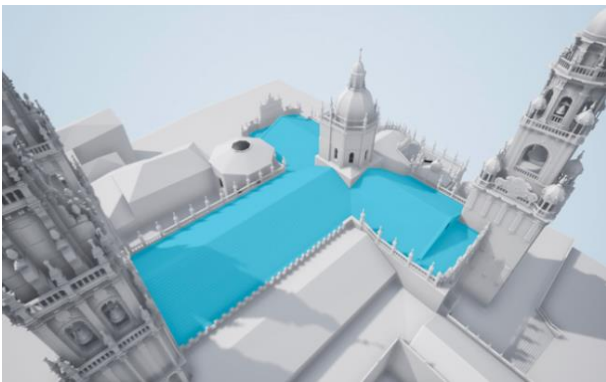


Figura 78_Restauro delle coperture²⁵⁰

3.21.1.1. Restauro del Portico della Gloria (2009-2018)

Il recente restauro del Portico della Gloria svoltosi tra il 2008 e il 2018 è stato reso possibile grazie all'intervento della fondazione Barrié, con la collaborazione della Fondazione Cattedrale, del ministero della Cultura e della Giunta di Galizia. Tale restauro si rese necessario per via dei danni arrecati alla pietra che costituisce le arcate del nartece e alle policromie che lo caratterizzano, causati dall'umidità; dalla bassa ventilazione e da problemi di condensa. La prima fase del processo di restauro è stata costituita dagli studi diagnostici: monitoraggio ambientale e strutturale; studi di biodeterioramento; indagini sulle policromie e sull'umidità. Il problema principale si rivelarono essere le infiltrazioni d'acqua dall'esterno della Cattedrale e fenomeni di condensa. I punti individuati come "critici", poiché favorivano le infiltrazioni, furono: la parte superiore della torre della Cattedrale e alcune zone della facciata dell'Obradoiro. Gli interventi di restauro si focalizzarono dunque su due aspetti principali: 1. prevenire le infiltrazioni; 2. recuperare le policromie originali del nartece, ormai coperte da strati di sporcizia e polvere. La proposta d'intervento venne validata da un comitato scientifico internazionale e approvata dall'istituto del patrimonio culturale spagnolo e dalla Giunta Regionale di Galizia. Nel 2015 venne completato il montaggio dei ponteggi per accedere ai rilievi del Portico e poco dopo venne confermata l'esistenza di 3

²⁴⁹ Registro delle immagini. p. 269.

²⁵⁰ Registro delle immagini. p. 270.

strati di policromie ad olio, che hanno modificato l'immagine del Portico della Gloria nel corso degli anni: il nartece ha subito numerose variazioni cromatiche nel corso degli anni, seguendo gli stili e le tecniche di ogni epoca: dalle decorazioni medioevali del Maestro Mateo, con prevalenza di lapislazzuli, che ritroviamo principalmente nelle vesti degli angeli; i colori più accesi risalenti al XVI e XVII secolo, che caratterizzano le tuniche dei profeti; i segni del XVIII secolo si notano invece nei ritocchi nella decorazione di visi, piedi e mani dei vari personaggi (Figura 79, 80). Il recente intervento ha permesso di stabilizzare le condizioni della pietra e della policromia, arrestando il rischio imminente di perdita definitiva e permettendo di garantire la conservazione di questa opera medievale per le generazioni future²⁵¹.



Figura 79_ Portico della Gloria, dettagli²⁵²



Figura 80_ Portico della Gloria, dettagli²⁵³

Ad oggi il Portico della Gloria si presenta separato dal resto della Cattedrale da alcuni pannelli divisorii in legno (Figura 81), in modo tale da evitare che le polveri sollevate dai restauri -in corso all'interno della cattedrale, ma conclusi in questa specifica area- vi si possano depositare. Inoltre, all'interno de nartece sono attualmente attive due Unità di Trattamento Aria, per controllare il microclima *indoor* di questo spazio di 1300m³ circa.

²⁵¹ Per approfondimenti vedi: [http://www.ansamed.info/ansamed/it/notizie/stati/spagna/2018/07/03/spagna-portico-della-gloria-ritrova-lo-splendore-medievale_8c0b1b8f-f6d1-4896-9389-1918680f85ab.html#:~:text=Nella%20Cattedrale%20di%20Santiago%20ultimo%20il%20restauro%20durato%2010%20anni&text=\(ANSAmed\)%20%2D%20MADRID%2C%203,un%20restauro%20durato%20dieci%20anni;https://fundacionbarrie.org/programa-catedral; https://www.artribune.com/dal-mondo/2018/07/restauro-cattedrale-santiago-compostela/](http://www.ansamed.info/ansamed/it/notizie/stati/spagna/2018/07/03/spagna-portico-della-gloria-ritrova-lo-splendore-medievale_8c0b1b8f-f6d1-4896-9389-1918680f85ab.html#:~:text=Nella%20Cattedrale%20di%20Santiago%20ultimo%20il%20restauro%20durato%2010%20anni&text=(ANSAmed)%20%2D%20MADRID%2C%203,un%20restauro%20durato%20dieci%20anni;https://fundacionbarrie.org/programa-catedral; https://www.artribune.com/dal-mondo/2018/07/restauro-cattedrale-santiago-compostela/). Ultima visita: 16/10/2020.

²⁵² Registro delle immagini. p. 270.

²⁵³ Ibidem.

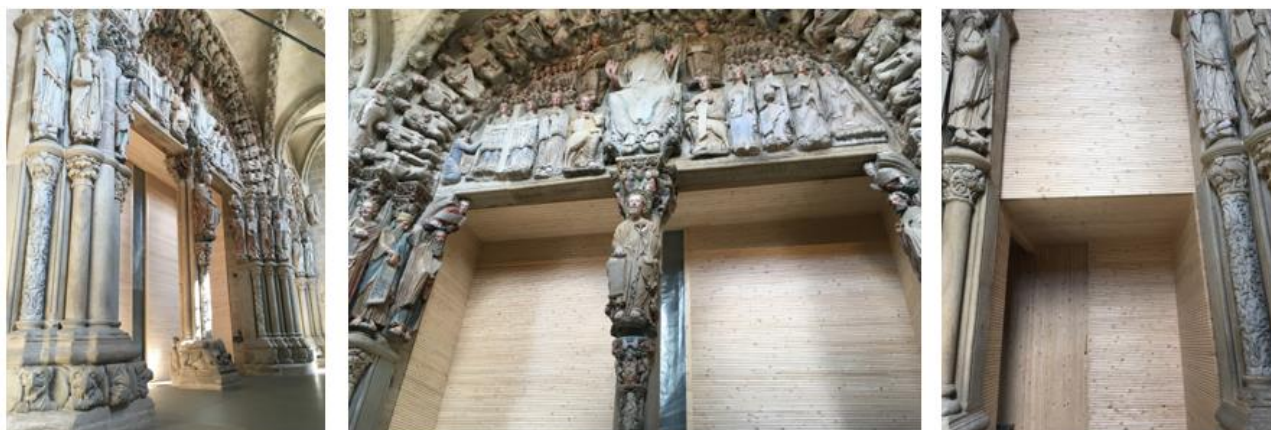


Figura 81_Pannelli divisori: Portico della Gloria, Cattedrale di Santiago de Compostela²⁵⁴

Si specifica infine che da luglio 2019 il Portico è accessibile al pubblico: possono accedere a quest'area gruppi di massimo 25 persone, accompagnate da una guida, dal lunedì alla domenica, dalle ore 9:00 alle 20:00; sono consentite visite di circa 15 minuti, alle quali segue una pausa di altri 15 minuti prima dell'accesso del gruppo successivo.

3.21.2. I beni conservati nel Portico della Gloria e i rispettivi standard per la conservazione

Il patrimonio custodito all'interno del Portico della Gloria è costituito dalle sculture policrome in pietra, per le quali gli standard suggeriti dal MIBAC [8] e dalla UNI 10829:1999 [9] sono riportati nella tabella seguente:

Tabella 25.

Materiale	Range UR (%)	Range T (°C)
Pietra	45-65	≤30
Sculture policrome	45-65	19-24

3.22. Campagna di monitoraggio microclimatico

L'Architetto Soledad García Morales ha reso disponibili per la presente ricerca i dati del monitoraggio microclimatico rilevati all'interno del Portico della Gloria a partire dal 25 febbraio 2019, fino al 26 ottobre 2019. Fornendo così 8 mesi di monitoraggio continuativi, che sono stati utilizzati per procedere con lo studio del microclima *indoor* del nartece della Cattedrale di Santiago de Compostela: il Portico della Gloria.

I dati sono stati raccolti direttamente dall'architetto García Morales, che si reca mensilmente in Cattedrale, con fine di sopralluogo e per scaricare circa 4800 dati per ogni sonda posizionata all'interno del Portico della Gloria e nel resto della Cattedrale (Figura 82, 83, 84). Attualmente, nel Portico, ve ne sono 11 attive. Queste sonde hanno un attacco USB, registrano ogni 15 minuti i parametri temperatura e umidità relativa e non vi è la possibilità di accesso da remoto per impossibilità di collegarsi ad una rete Wi-Fi: l'unica rete Wi-Fi presente in Cattedrale è ad uso esclusivo della sicurezza.

²⁵⁴ Registro delle immagini. p. 270.



Figura 82_Sonda²⁵⁵



Figura 83_Posizionamento di una sonda nel Portico della Gloria²⁵⁷



Figura 84_Scaricamento dei dati²⁵⁶

3.22.1. Errori e semplificazioni adottate

I dati presentano raramente errori o *gap* di rilevazione. Per alcune analisi (es. validazione del modello virtuale), sono stati semplificati i dati: considerando un dato all'ora, anziché un dato ogni 15 minuti, per poterli confrontare con i risultati emersi dalle simulazioni.

3.23. Analisi dei dati monitorati

I parametri microclimatici registrati dalle sonde durante il periodo di monitoraggio *indoor* considerato, sono stati utilizzati innanzitutto per procedere con l'analisi e l'interpretazione dei dati, grazie all'elaborazione di alcuni grafici tramite il software Excel. È stato così possibile valutare le condizioni microclimatiche che caratterizzano attualmente il Portico della Gloria, nelle condizioni attuali: con la presenza di due unità di trattamento d'aria attive (Figura 85, a sinistra); separato dal resto della cattedrale tramite pannelli in legno; aperto ai visitatori (gruppi composti da 25 persone al massimo); con il portale dell'Obradoiro continuamente chiuso, con il fine di contenere le infiltrazioni d'aria e di umidità dall'esterno (Figura 85, a destra).

²⁵⁵ Registro delle immagini. p. 270.

²⁵⁶ Ibidem.

²⁵⁷ Ibidem.



Figura 85_Portico della Gloria: a sinistra una delle due UTA presenti, a destra il Portale dell'Obradoiro ²⁵⁸

Si è deciso di approfondire l'andamento dei dati rilevati dalle sonde *indoor* dividendo l'intero periodo di monitoraggio in quattro periodi più brevi: il periodo invernale (25/02/2019 – 20/03/2019); primaverile (20/03/2019 – 21/06/2019); estivo (21/06/2019 – 22/09/2019); autunnale (22/09/2019 – 26/10/2019).

Di seguito si riportano i grafici commentati relativi ai *trend* di temperatura e umidità relativa ed ai profili di distribuzione di frequenza e frequenza cumulativa, riferiti ai medesimi parametri. La sonda della quale si considerano i dati è collocata circa al centro del portico.

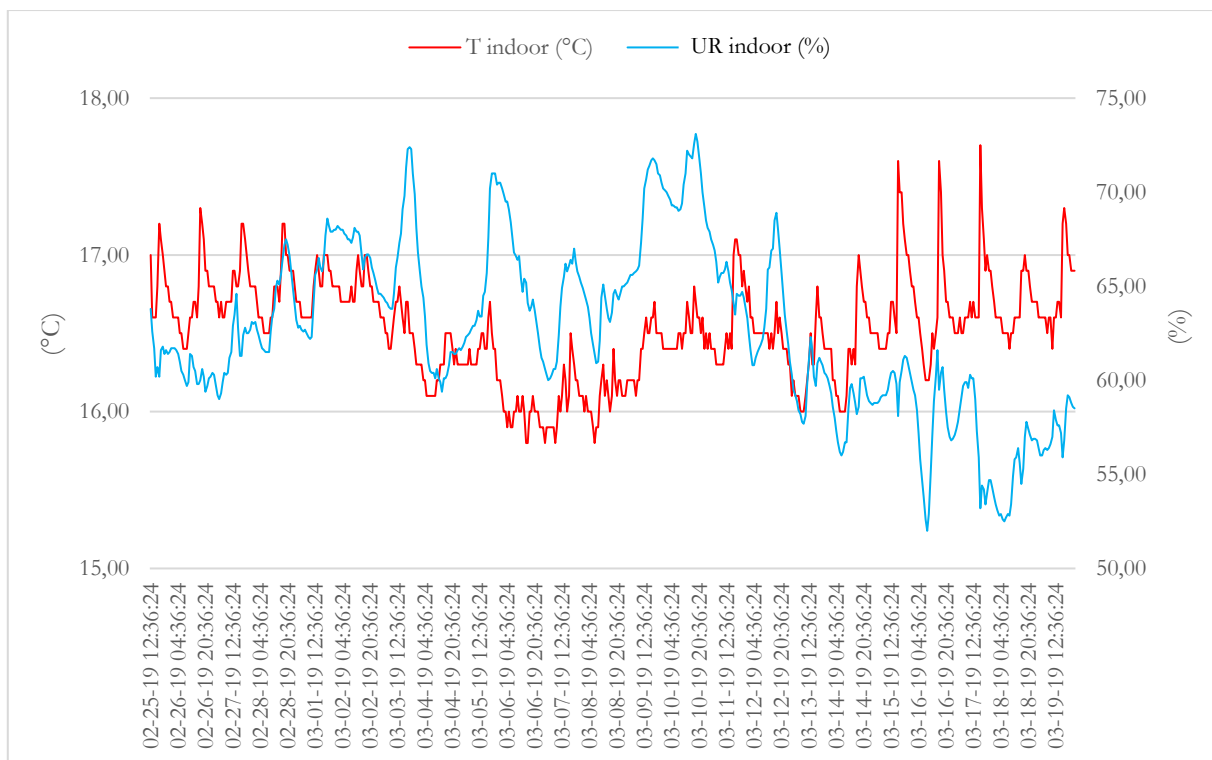


Grafico 80_ Analisi della tendenza: temperatura dell'aria e umidità relativa *indoor* 25/02/2019 – 20/03/2019

²⁵⁸ Registro delle immagini, p. 270.

Periodo monitoraggio: 25 Febbraio 2019 – 20 Marzo 2019.
 Ambiente monitorato: Portico della Gloria, Cattedrale di Santiago de Compostela.
 Impianti: Due unità di trattamento aria attive.
 Parametri misurati: Temperatura e umidità relativa.
 Errori di misurazione: -
 Valori registrati: *Range* T: 15,80 °C – 17,70 °C; UR : 52 % - 73,10 %
 Considerazioni: L'andamento della temperatura dell'aria, registrato all'interno del Portico della Gloria, registra valori compresi prevalentemente tra i 16 °C e i 17 °C, ad esclusione di 3 picchi isolati durante le giornate del 15, 16 e 17 marzo, durante le quali circa allo stesso orario si registrano valori massimi di T pari a 17,70 °C circa. Durante l'intero periodo invernale analizzato si ha un'oscillazione giornaliera della temperatura di circa 1°C.
 L'umidità relativa, nel medesimo periodo di monitoraggio, risulta compresa tra il 60% e il 70% fino a metà marzo, in cui si registra un calo di UR: è stato rilevato un *range* compreso tra 52% e 62%. Si nota inoltre che l'andamento di UR è piuttosto irregolare, in particolar modo tra il 3 e il 13 marzo. L'umidità ha rappresentato infatti da sempre una delle principali problematiche per il Portico della Gloria. Ragione per cui anche nei prossimi paragrafi si proverà ad analizzare il comportamento che caratterizza questo parametro e quali fattori incidono ad oggi su di esso.

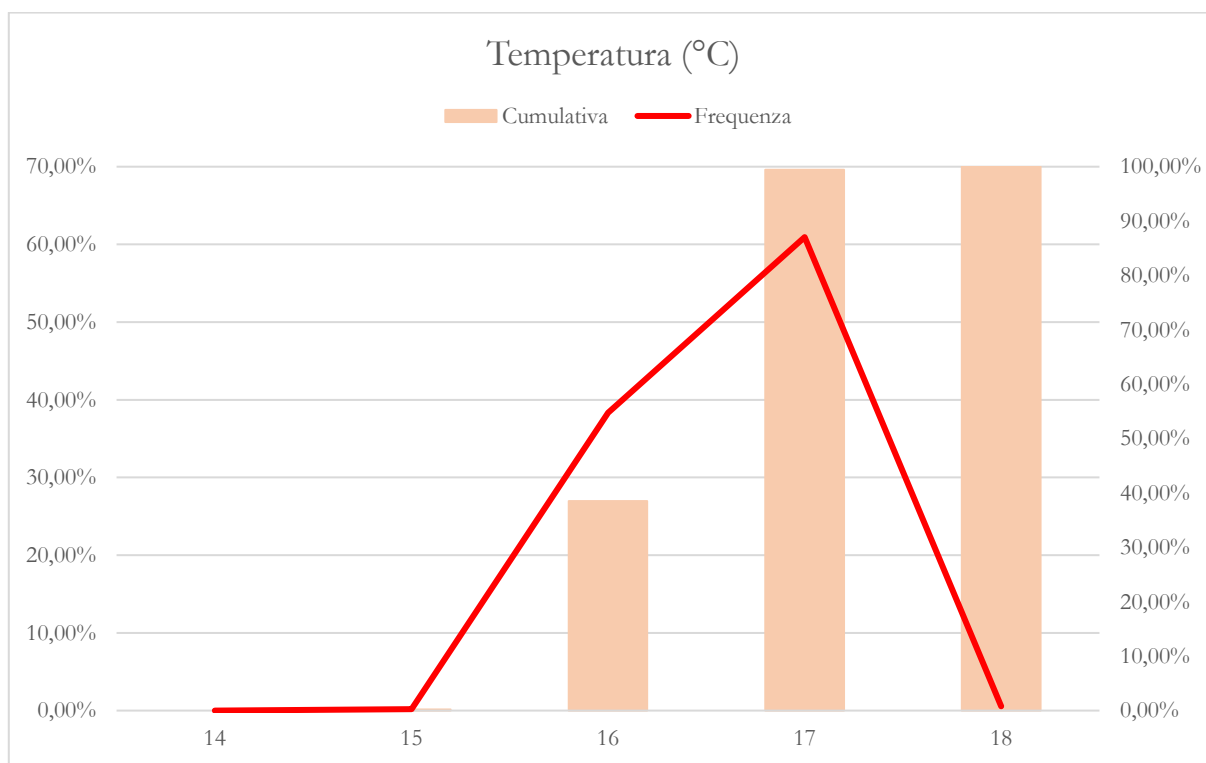


Grafico 81_Temperatura: profili di distribuzione di frequenza e frequenza cumulativa 25/02/2019 – 20/03/2019

Periodo monitoraggio: 25 Febbraio 2019 – 20 Marzo 2019.
 Ambiente monitorato: Portico della Gloria, Cattedrale di Santiago de Compostela.

Impianti: Due unità di trattamento aria attive.
 Parametri misurati: Temperatura dell'aria.
 Errori di misurazione: -
 Valori registrati: Maggioranza di valori registrati: 17 °C (frequenza: 60 %).
 Considerazioni: Si registrano valori della temperatura *indoor* compresi tra un minimo pari a 15 °C, ad un massimo pari ai 17 °C - 18 °C circa. La totalità (100 %) dei dati, registrati nel periodo individuato come invernale, risulta essere inferiore ai 18 °C. Circa il 40% dei dati rilevati è inferiore ai 16 °C. Le temperature registrate con maggiore frequenza si aggirano attorno ai 17 °C: leggermente inferiori rispetto alle temperature suggerite dalla UNI 10829:1999 per la conservazione delle sculture su pietra (19 °C -24 °C).

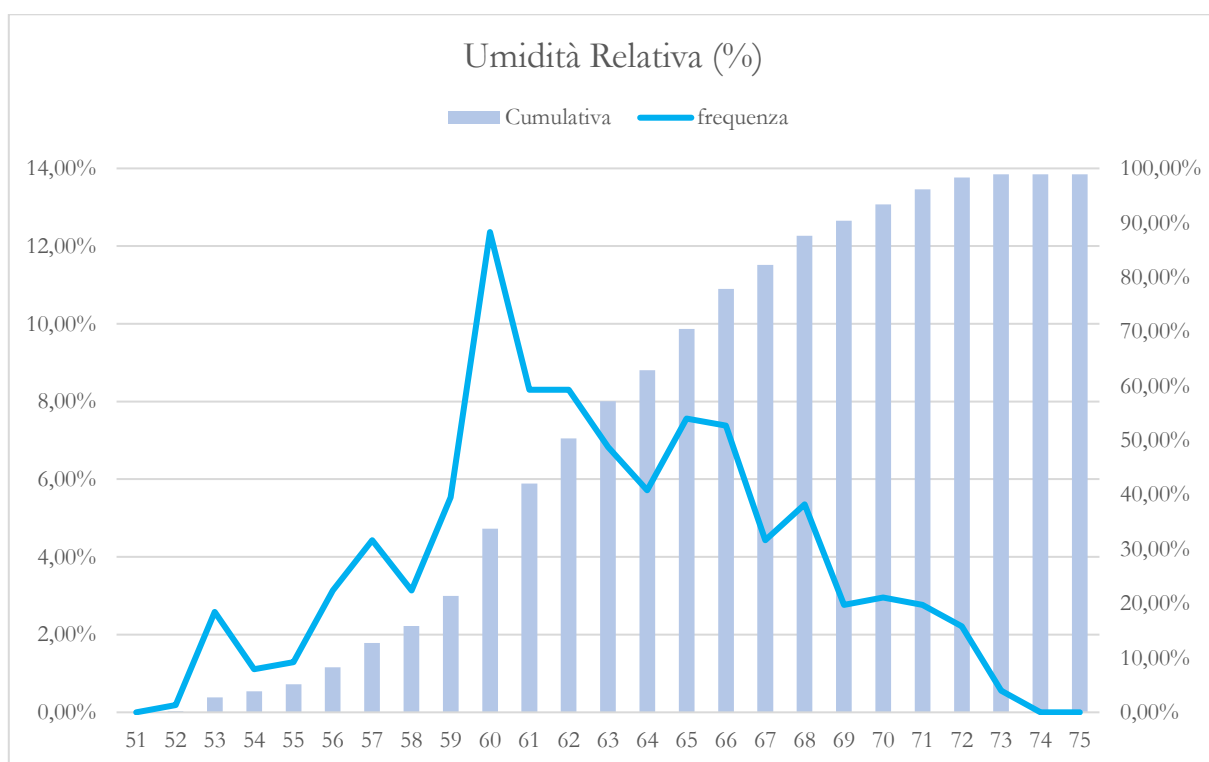


Grafico 82_Umidità Relativa: profili di distribuzione di frequenza e frequenza cumulativa 25/02/2019 – 20/03/2019

Periodo monitoraggio: 25 Febbraio 2019 – 20 Marzo 2019.
 Ambiente monitorato: Portico della Gloria, Cattedrale di Santiago de Compostela.
 Impianti: Due unità di trattamento aria attive.
 Parametri misurati: Umidità Relativa.
 Errori di misurazione: -
 Valori registrati: Maggioranza di valori registrati: 60 % (frequenza: 12,36 %).
 Considerazioni: In questo caso si registrano valori di umidità relativa con maggiore frequenza pari al 60 %; solo il 20 % dei dati registrati risulta inferiore al 59 %; mentre valori compresi tra il 61 % e il 66 % di registrano con una frequenza tra il 6-8 %. Infine, non si registrano valori di UR superiori al 74 %.

I dati di umidità relativa riportati risultano leggermente superiori rispetto agli standard suggeriti dalla normative di riferimento per la conservazione della pietra e delle sculture policrome (45 % - 65 %), nonostante la maggioranza dei dati rilevati risulti entro il *range* consigliato.

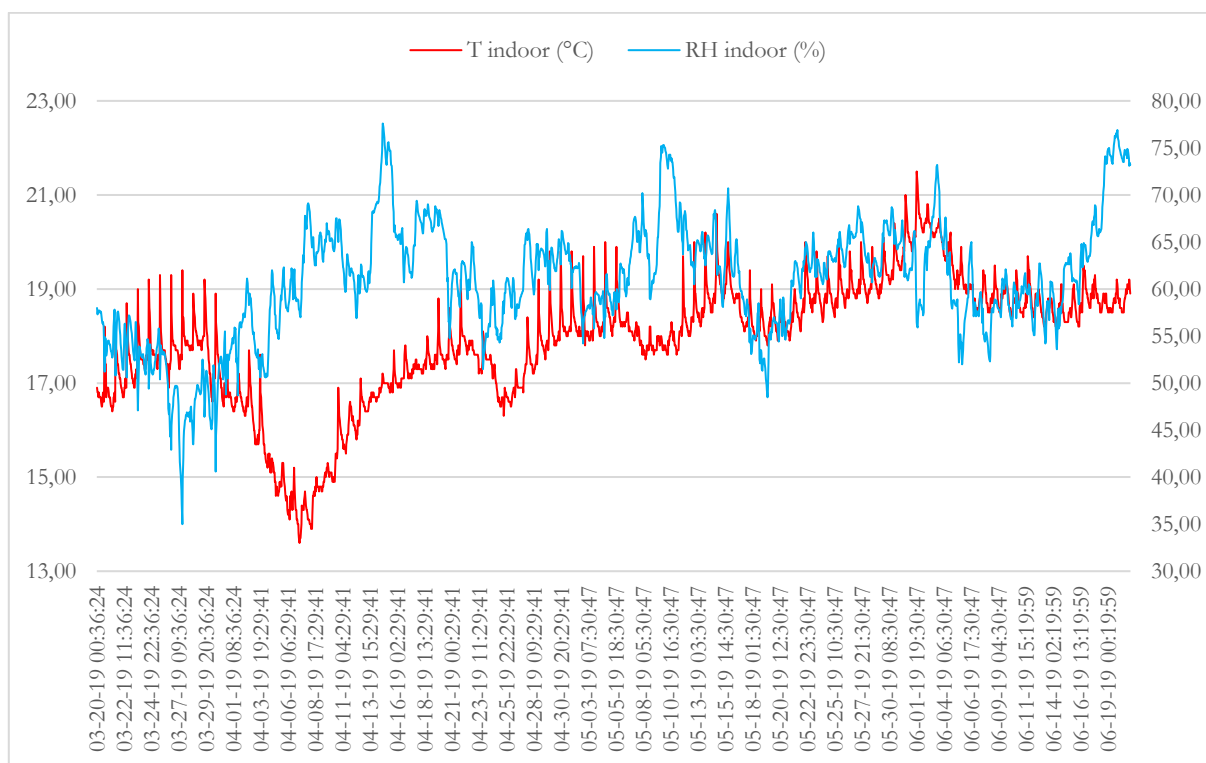


Grafico 83_ Analisi della tendenza: temperatura dell'aria e umidità relativa *indoor* 20/03/2019 – 21/06/2019

- Periodo monitoraggio: 20 Marzo 2019 – 21 Giugno 2019.
 Ambiente monitorato: Portico della Gloria, Cattedrale di Santiago de Compostela.
 Impianti: Due unità di trattamento aria attive.
 Parametri misurati: Temperatura e umidità relativa.
 Errori di misurazione: -
 Valori registrati: *Range* T: 13,60 °C – 21,40 °C; UR : 40 % - 76,80 %
 Considerazioni: Durante il periodo primaverile, l'andamento della temperatura risulta mediamente stabile: si registrano valori compresi tra i 17 °C e i 19 °C durante l'ultima decade di marzo e dalla seconda metà del mese di aprile fino a metà maggio circa; successivamente le temperature iniziano a crescere rientrando in un *range* prevalentemente compreso tra i 19 °C e i 21 °C. La prima metà di aprile risulta invece discostarsi maggiormente rispetto all'andamento del resto dei dati: le temperature calano raggiungendo valori anche inferiori ai 15 °C.
 L'umidità relativa è prevalentemente compresa tra il 50 % e il 70 %, con alcuni picchi negativi che raggiungono anche il 35 % (27/03) e altri picchi positivi che superano il 75 % (15/04; 10/05; 19/06).

L'insieme di tali condizioni risultano mediamente adatti alla conservazione del portico, nonostante siano stati rilevati più volte valori di UR superiori al 60 %.

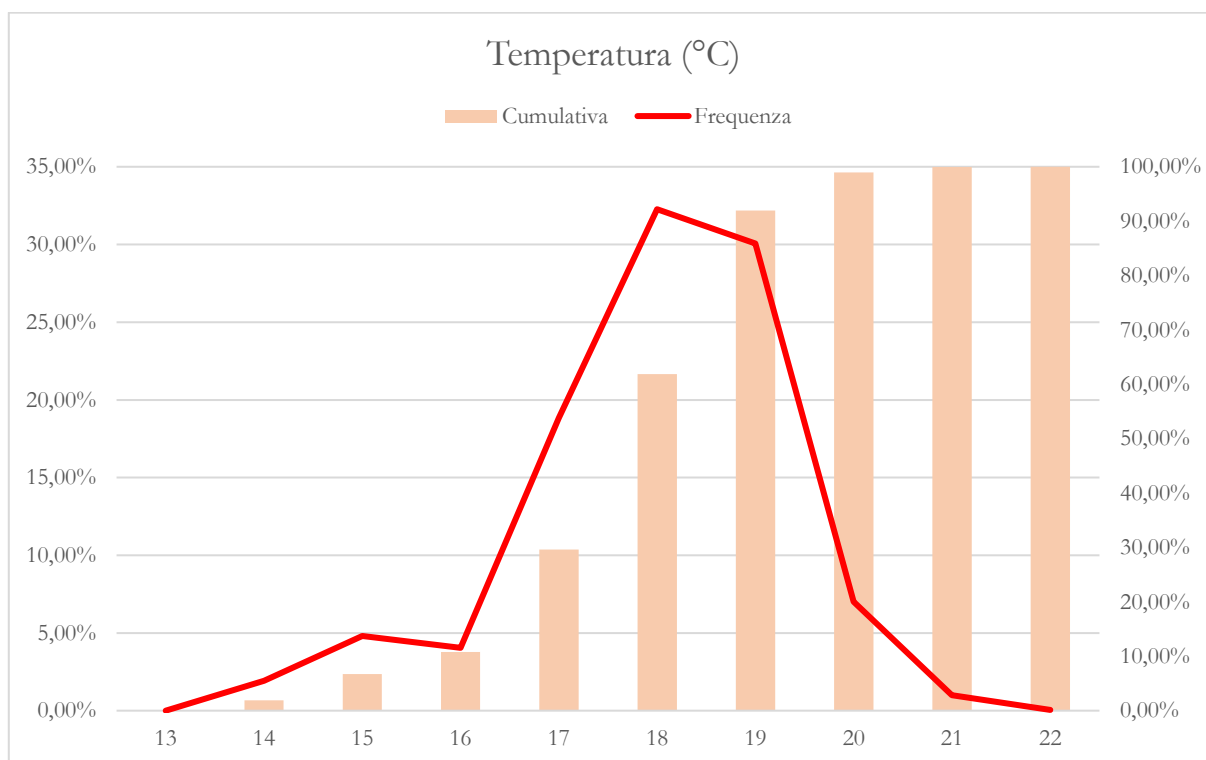


Grafico 84_Temperatura: profili di distribuzione di frequenza e frequenza cumulativa 20/03/2019 – 21/06/2019

- Periodo monitoraggio: 20 Marzo 2019 – 21 Giugno 2019.
 Ambiente monitorato: Portico della Gloria, Cattedrale di Santiago de Compostela.
 Impianti: Due unità di trattamento aria attive.
 Parametri misurati: Temperatura dell'aria.
 Errori di misurazione: -
 Valori registrati: Maggioranza di valori registrati: 18 °C e 19 °C (frequenza: 32,27 %; 30,07 %).
 Considerazioni: Si registrano valori della temperatura *indoor* compresi tra un minimo pari a 13 °C, ad un massimo pari a 21 °C. Gran parte dei dati registrati in questo periodo riportano valori compresi tra i 17 °C e i 19 °C, mentre solo con una frequenza pari al 7 % si registrano valori corrispondenti a 20 °C e unicamente un 10 % circa dei dati registrati risulta inferiore ai 16 °C. Le Temperature registrate risultano -per la maggior parte del periodo analizzato- entro i range già espressi della UNI 10829:1999 e del MIBAC, ad eccezione dei valori compresi tra 13 °C e 17 °C circa, che, come si è potuto vedere dal Grafico 81, corrispondono alle ultime giornate di marzo.

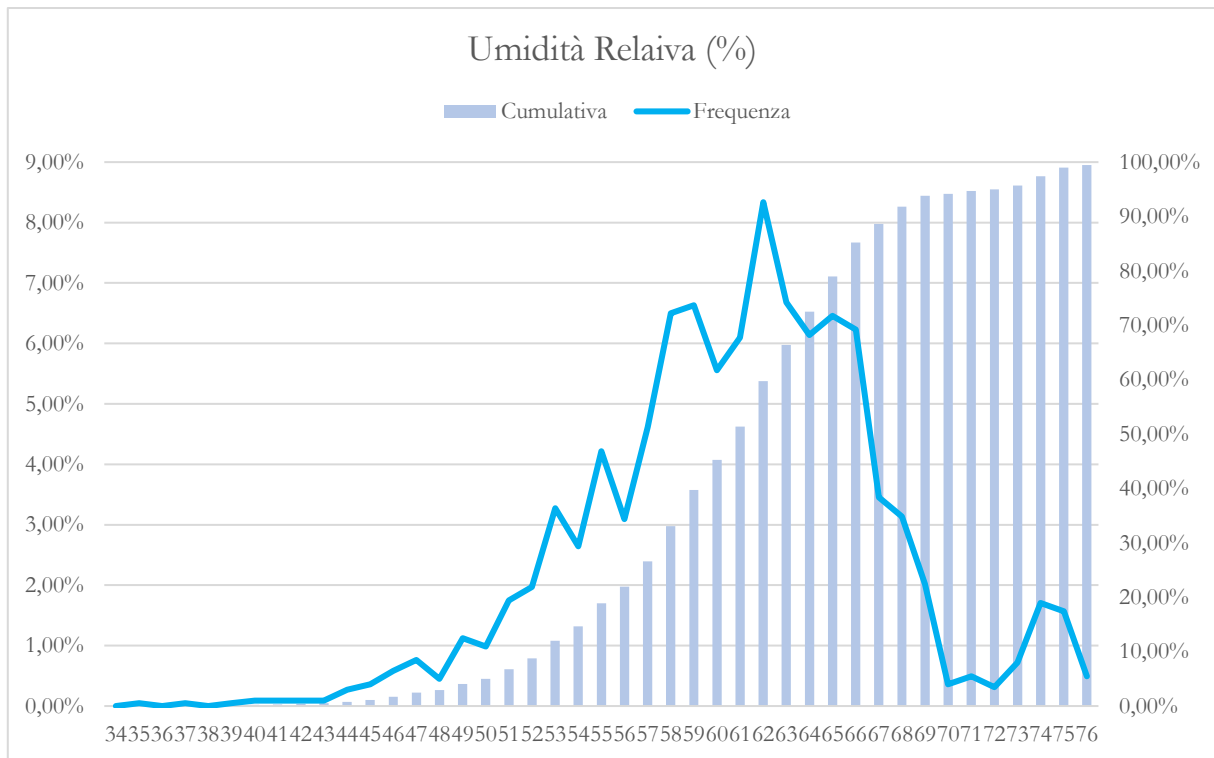


Grafico 85_Umidità Relativa: profili di distribuzione di frequenza e frequenza cumulativa 20/03/2019 – 21/06/2019

Periodo monitoraggio: 20 Marzo 2019 – 21 Giugno 2019.
Ambiente monitorato: Portico della Gloria, Cattedrale di Santiago de Compostela.
Impianti: Due unità di trattamento aria attive.
Parametri misurati: Umidità Relativa.
Errori di misurazione: -
Valori registrati: Maggioranza di valori registrati: 62 % (frequenza: 8,34 %).
Considerazioni: I valori di UR più frequentemente rilevati durante la campagna di monitoraggio nel corso del periodo individuato come primaverile, sono compresi tra il 56 % e il 66 %. I valori dell'umidità relativa non superano comunque mai il 76 % e risultano superiori al 44 %.
 I dati di umidità relativa riportati per il periodo primaverile mostrano valori fino al 10 % superiori rispetto alla condizione limite suggerita dalla normativa (45 % - 65 %).

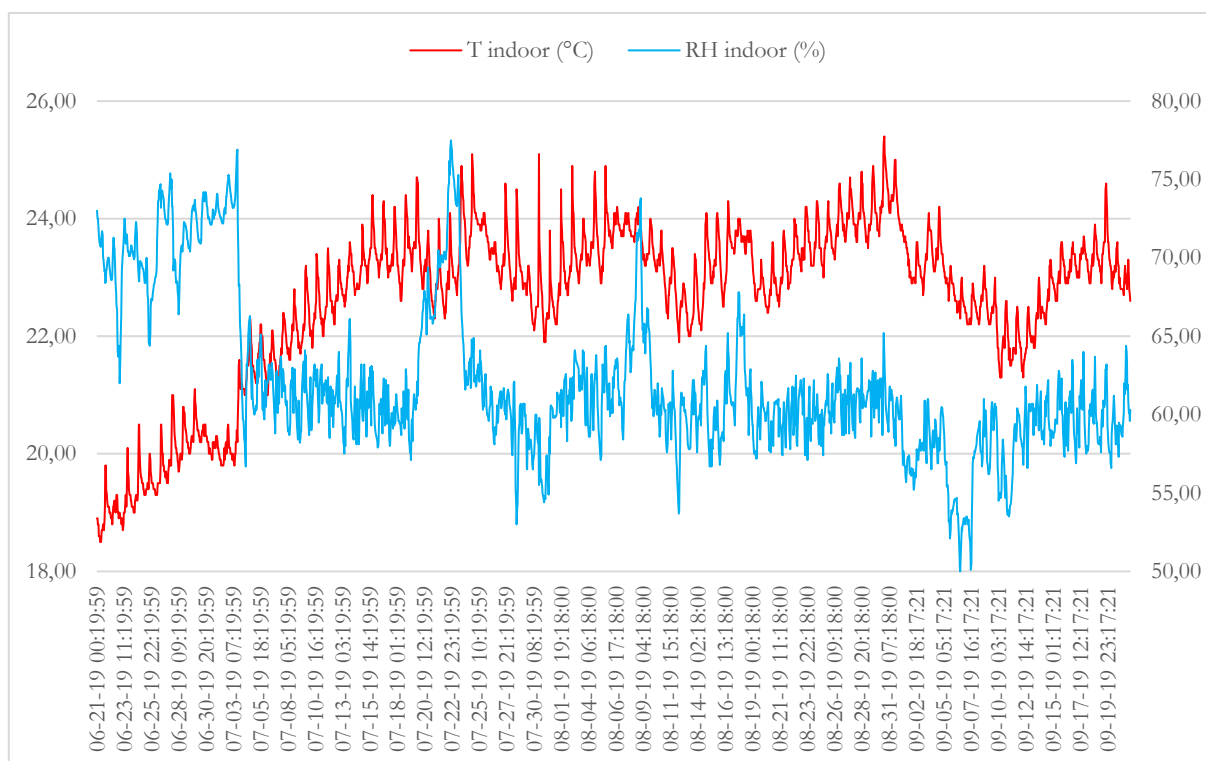


Grafico 86_ Analisi della tendenza: temperatura dell'aria e umidità relativa *indoor* 21/06/2019 – 22/09/2019

- Periodo monitoraggio: 21 Giugno 2019 – 22 Settembre 2019.
- Ambiente monitorato: Portico della Gloria, Cattedrale di Santiago de Compostela.
- Impianti: Due unità di trattamento aria attive.
- Parametri misurati: Temperatura e umidità relativa.
- Errori di misurazione: -
- Valori registrati: *Range* T: 18,50 °C – 25,10 °C; UR : 50 % - 76,60 %
- Considerazioni: Durante il periodo estivo, l'andamento della temperatura dell'aria restituisce dei valori compresi tra i 22 °C e i 24 °C circa tra il 7 luglio fino al 22 settembre, quindi si può dire che sia piuttosto costante. Il mese di giugno invece riporta valori di temperatura inferiori: tra i 18 °C e i 20 °C.
- L'umidità relativa riporta anch'essa un andamento piuttosto costante tra il 7 luglio e il 22 settembre (*range*: 60 % - 65 %), mentre valori compresi tra il 67 % e il 75 % circa durante l'ultima decade di giugno. Tendendo conto dei valori dei dati riportati, della costanza di questi ultimi e del fatto che ci troviamo nel periodo più caldo dell'anno, le tendenze si possono dire ottimali sia per la conservazione sia per il *comfort* di visitatori, lavoratori e fedeli.

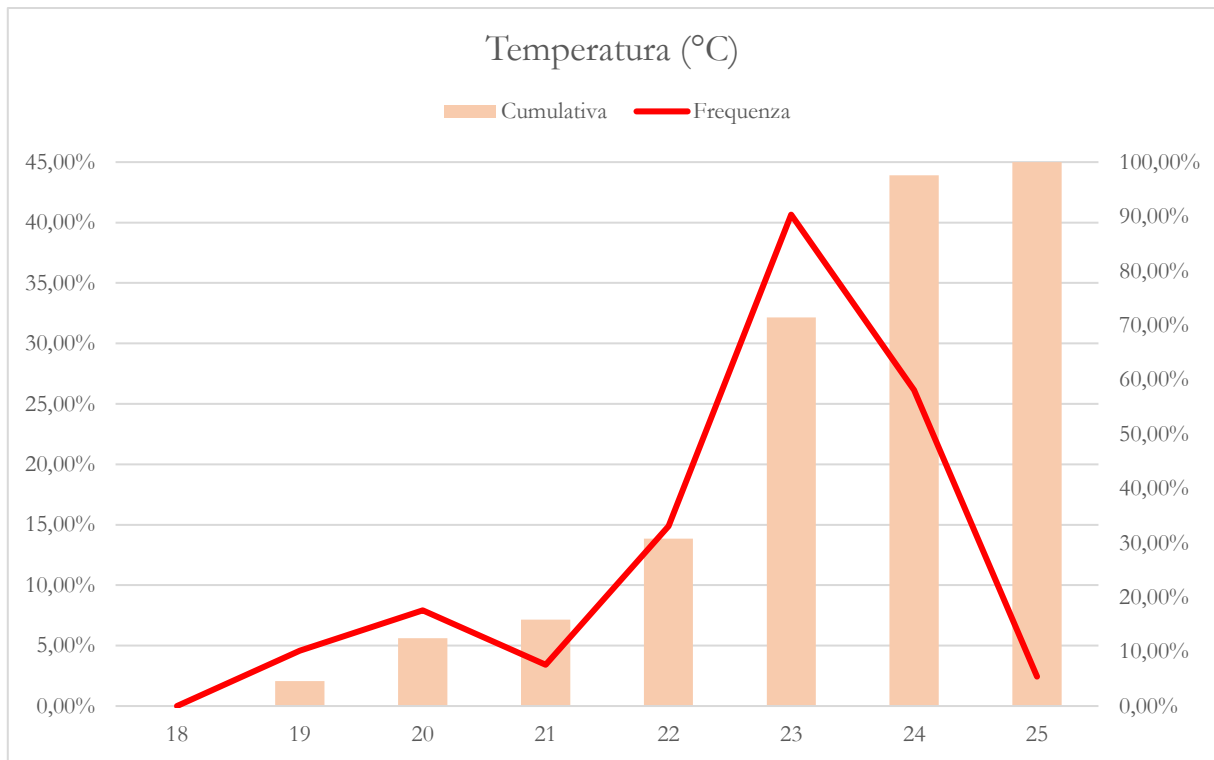


Grafico 87_Temperatura: profili di distribuzione di frequenza e frequenza cumulativa 21/06/2019 – 22/09/2019

- Periodo monitoraggio: 21 Giugno 2019 – 22 Settembre 2019.
 Ambiente monitorato: Portico della Gloria, Cattedrale di Santiago de Compostela.
 Impianti: Due unità di trattamento aria attive.
 Parametri misurati: Temperatura dell'aria.
 Errori di misurazione: -
 Valori registrati: Maggioranza di valori registrati: 23 °C (frequenza: 40,66 %).
 Considerazioni: I valori della temperatura risultano concentrati tra i 22 °C e i 24 °C confermando un andamento costante del dato durante questo periodo del monitoraggio, ad esclusione di alcuni dati che registrano temperature comprese tra i 18 °C e i 20 °C, che corrispondono all'ultima decade di giugno circa. I valori riportati risultano in linea con la normativa di riferimento per quanto concerne la conservazione di sculture policrome in pietra.

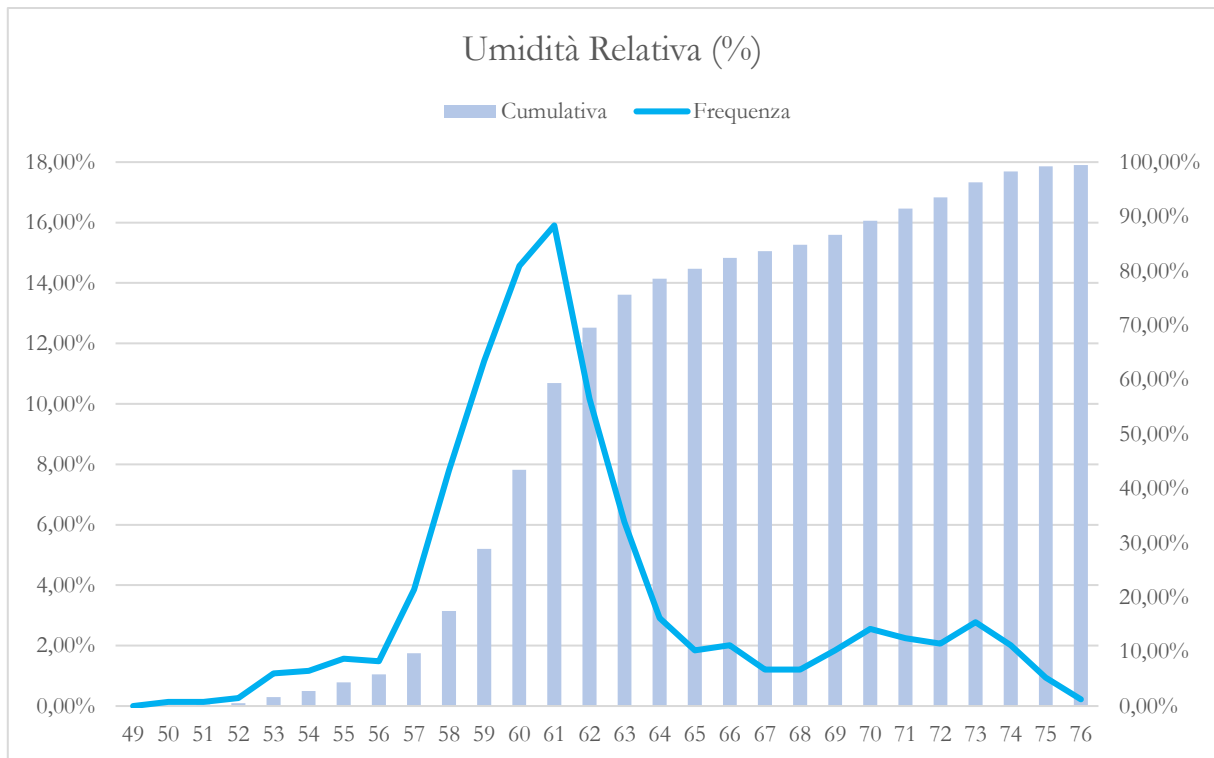


Grafico 88_Umidità Relativa: profili di distribuzione di frequenza e frequenza cumulativa 21/06/2019 – 22/09/2019

Periodo monitoraggio:	21 Giugno 2019 – 22 Settembre 2019.
Ambiente monitorato:	Portico della Gloria, Cattedrale di Santiago de Compostela.
Impianti:	Due unità di trattamento aria attive.
Parametri misurati:	Umidità Relativa.
Errori di misurazione:	-
Valori registrati:	Maggioranza di valori registrati: 60 % e 61 % (frequenza: 14,96 %; 15,91 %).
Considerazioni:	I dati di umidità relativa registrano la maggior parte dei valori tra il 58 % ed il 63 % con frequenze che variano dall' 8 % al 16 %. Una parte contenuta di dati rileva invece valori superiori al 70 %, che anche in questo caso -come nel caso della temperatura- corrisponde alle ultime dieci giornate del mese di giugno. Per la maggior parte del tempo i valori di umidità si mantengono entro il 60 %.

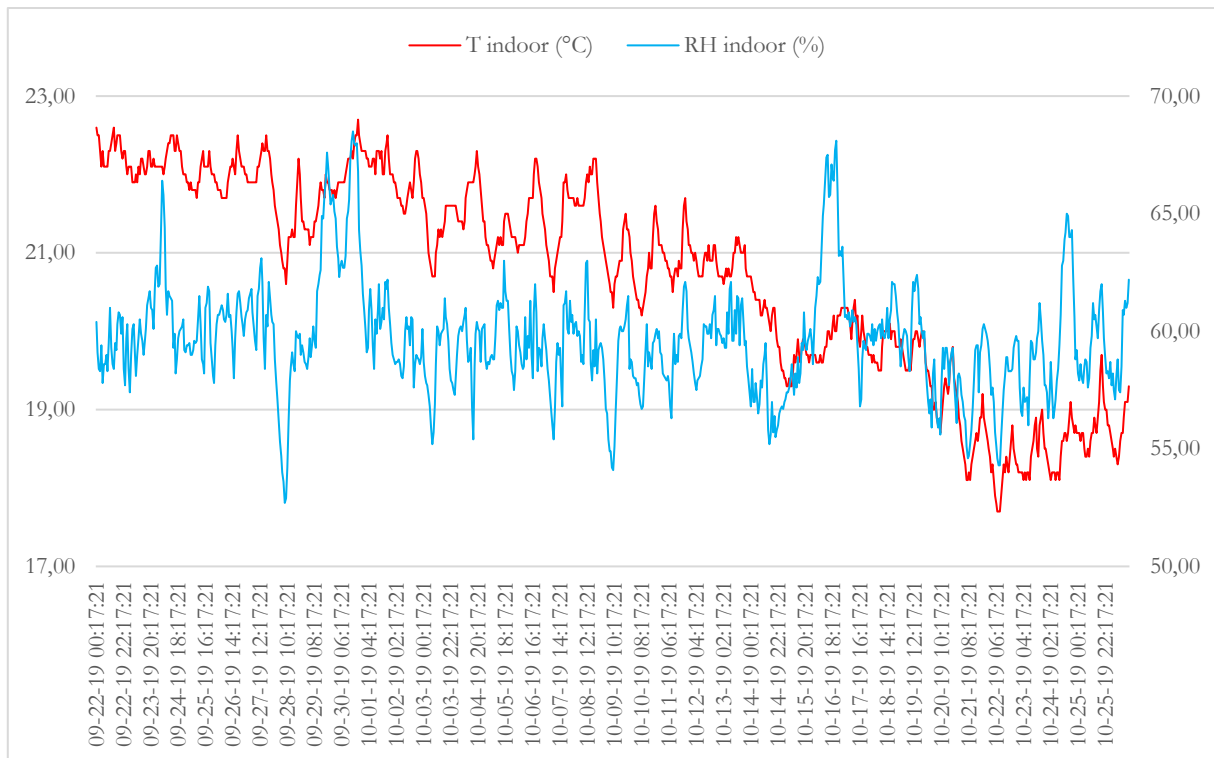


Grafico 89_ Analisi della tendenza: temperatura dell'aria e umidità relativa *indoor* 22/09/2019 – 26/10/2019

- Periodo monitoraggio: 22 Settembre 2019 – 26 Ottobre 2019.
 Ambiente monitorato: Portico della Gloria, Cattedrale di Santiago de Compostela.
 Impianti: Due unità di trattamento aria attive.
 Parametri misurati: Temperatura e umidità relativa.
 Errori di misurazione: -
 Valori registrati: *Range* T: 17,70 °C – 22,50 °C; UR : 52,70 % - 68,10 %
 Considerazioni: L'andamento della temperatura dell'aria, registrato all'interno del Portico della Gloria durante il periodo autunnale, cala gradualmente, mantenendo un *range* adatto alla conservazione del portico: dal 22 settembre al 9 ottobre si registrano temperature comprese tra i 21 °C e i 23 °C; dal 9 al 21 ottobre le temperature scendono, rientrando in un *range* compreso tra 19 °C e 21 °C; tra il 21 e il 26 ottobre le temperature si aggirano tra i 17 °C ed i 19 °C.
 I valori di UR si mantengono per l'intero periodo tra il 55 % e il 62 %, nonostante alcuni picchi isolati che superano il 65 %. Come già visto, la costanza dei valori è una caratteristica ottima per la conservazione.

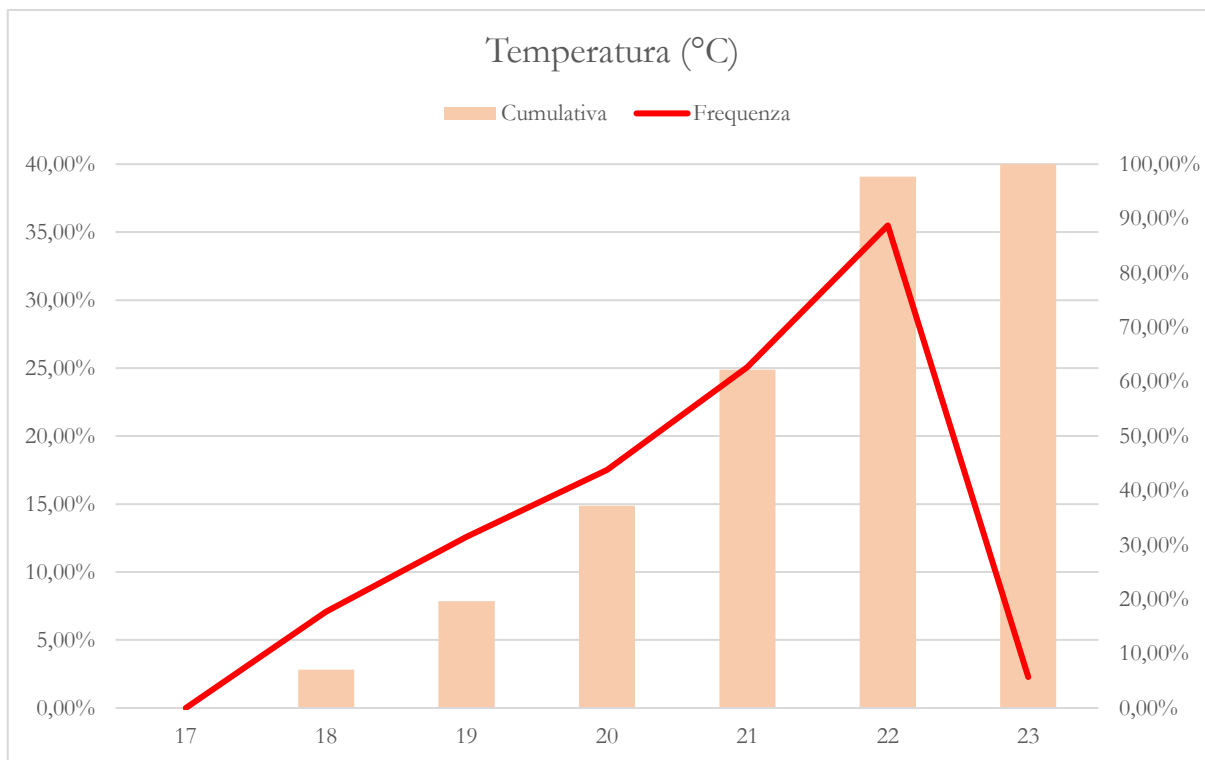


Grafico 90_Temperatura: profili di distribuzione di frequenza e frequenza cumulativa 22/09/2019 – 26/10/2019

- Periodo monitoraggio: 22 Settembre 2019 – 26 Ottobre 2019.
 Ambiente monitorato: Portico della Gloria, Cattedrale di Santiago de Compostela.
 Impianti: Due unità di trattamento aria attive.
 Parametri misurati: Temperatura dell'aria.
 Errori di misurazione: -
 Valori registrati: Maggioranza di valori registrati: 22 °C (frequenza: 35,50 %).
 Considerazioni: La maggior parte dei valori registrati corrisponde a 22 °C, in maniera piuttosto graduale vengono poi registrati valori a calare: tra i 21 °C e i 17 °C. Il 100% dei dati risulta inferiore ai 23 °C durante questo periodo.

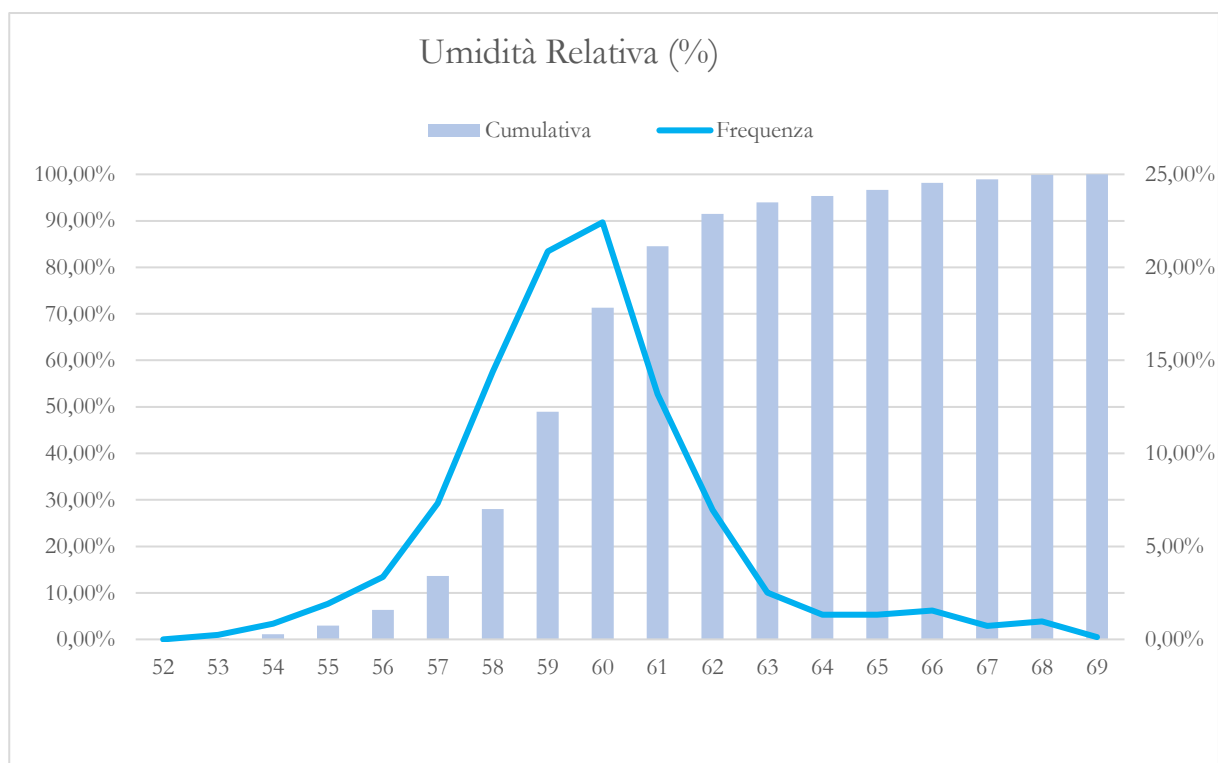


Grafico 91_Umidità Relativa: profili di distribuzione di frequenza e frequenza cumulativa 22/09/2019 – 26/10/2019

Periodo monitoraggio: 22 Settembre 2019 – 26 Ottobre 2019.
 Ambiente monitorato: Portico della Gloria, Cattedrale di Santiago de Compostela.
 Impianti: Due unità di trattamento aria attive.
 Parametri misurati: Umidità Relativa.
 Errori di misurazione: -
 Valori registrati: Maggioranza di valori registrati: 50 - 60 % (frequenza: 20,86 %; 22,42 %).
 Considerazioni: In questo caso i valori di umidità relativa che si registrano con maggiore frequenza sono compresi tra il 58 % e il 62 %. solo il 6 % dei dati registrati risulta superiore al 63 % e solo il 13,67 % inferiore al 57 %. Come visto i dati risultano piuttosto costanti e la maggior parte dei valori sono adeguati alla conservazione preventiva del Portico della Gloria.

Si riporta di seguito un grafico relativo al rapporto tra T e UR durante l'intero periodo di monitoraggio:

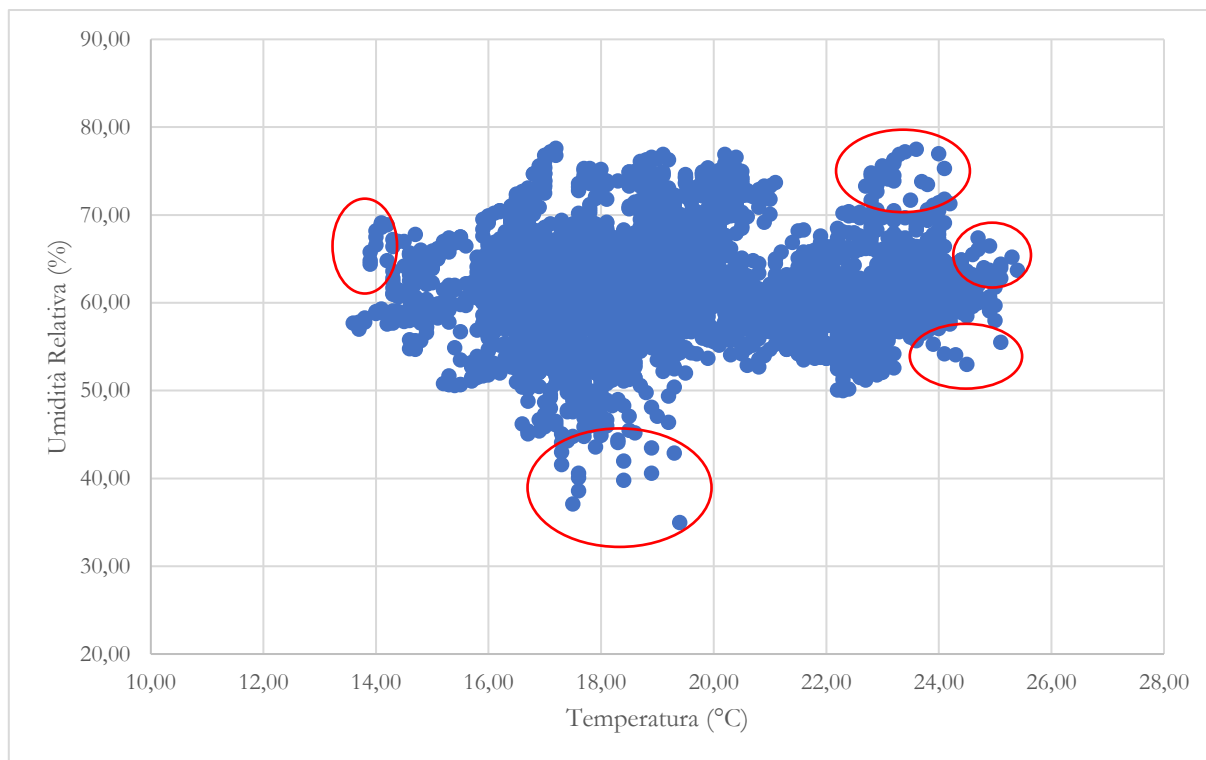


Grafico 92_Nuvola di punti

- Periodo monitoraggio: 25 Febbraio 2019 – 26 Ottobre 2019.
 Ambiente monitorato: Portico della Gloria, Cattedrale di Santiago de Compostela.
 Impianti: Due unità di trattamento aria attive.
 Parametri misurati: Rapporto tra Temperatura e Umidità Relativa.
 Errori di misurazione: -
 Valori registrati: Maggioranza di valori: 16°C-24°C per T; 50%-70% per UR. Si rilevano raramente per entrambi i parametri: valori <14°C, >25°C; valori <55%, >75%.
- Considerazioni: Dal grafico si evidenziano alcune situazioni puntuali, come valori vicino ai 14 °C; inferiori al 45 % per UR; altri superiore al 75% per UR e compresi tra i 24°C-26°C per T: si tratta di situazioni non legate all'involucro, bensì probabilmente dovute a delle anomalie relazionate alla gestione di porte e finestre, o dell'impianto di climatizzazione, o, ancora, ai flussi di visitatori e lavoratori.

3.23.1. Discussione dei risultati

Dopo aver analizzato le condizioni microclimatiche del Portico della Gloria per l'intero periodo di monitoraggio, si nota che: la pietra e le policromie che lo caratterizzano, attualmente risultano custodite in condizioni microclimatiche *indoor* adeguate per la loro conservazione preventiva durante il periodo estivo ed autunnale, mentre si registrano temperature dell'aria *indoor* leggermente al di sotto dei valori riportati dalla UNI 10829:1999 e dal MIBAC e valori di umidità relativa superiori al 65 % (generalmente raggiungono un massimo pari al 70 %) durante il periodo invernale e primaverile. Uno dei fini di ogni analisi dei dati di una qualsiasi campagna di monitoraggio è quello di individuare quali siano i periodi dell'anno in cui le condizioni microclimatiche *indoor* si dimostrano maggiormente sfavorevoli per la

conservazione preventiva dei beni custoditi nell'ambiente indagato: in questo caso il Portico della Gloria, risulta esposto ad un rischio microclimatico maggiore in inverno e in primavera, mentre le condizioni appaiono più favorevoli in estate e in autunno.

3.23.2. Analisi delle oscillazioni giornaliere

Come per il caso-studio della Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, anche in questo caso è stato fatto riferimento a quanto riportato nella UNI 10829:1999, per valutare le oscillazioni giornaliere registrate all'interno del Portico della Gloria: per la temperatura dell'aria la normativa considera accettabili oscillazioni giornaliere pari ad un massimo di $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$; mentre per l'umidità relativa il *range* di oscillazione massimo suggerito è pari a -6% e $+6\%$.

Dividendo il periodo per il quale si dispone del monitoraggio microclimatico *indoor* del Portico della Gloria nei 4 periodi più circoscritti visti al paragrafo precedente -25/02/2019 – 20/03/2019; 20/03/2019 – 21/06/2019; 21/06/2019 – 22/09/2019; 22/09/2019 – 26/10/2019-, sono state calcolate le oscillazioni medie, massime e minime giornaliere, per T e UR.

Tabella 26. Calcolo delle oscillazioni

Periodo	Osc. media T	Osc. media UR	Osc. max T	Osc. max UR	Osc. min T	Osc. min UR
25/02/'19 - 20/03/'19	0,18 °C	3,27 %	1,00 °C	11,50 %	0,00 °C	0,00 %
20/03/'19 - 21/06/'19	0,27 °C	3,35 %	2,50 °C	16,80 %	0,00 °C	0,00 %
21/06/'19 - 22/09/'19	0,30 °C	2,23 %	2,10 °C	16,80 %	0,00 °C	0,00 %
22/09/'19 - 26/10/'19	0,36 °C	2,18 %	2,18 °C	10,00 %	0,00 °C	0,00 %

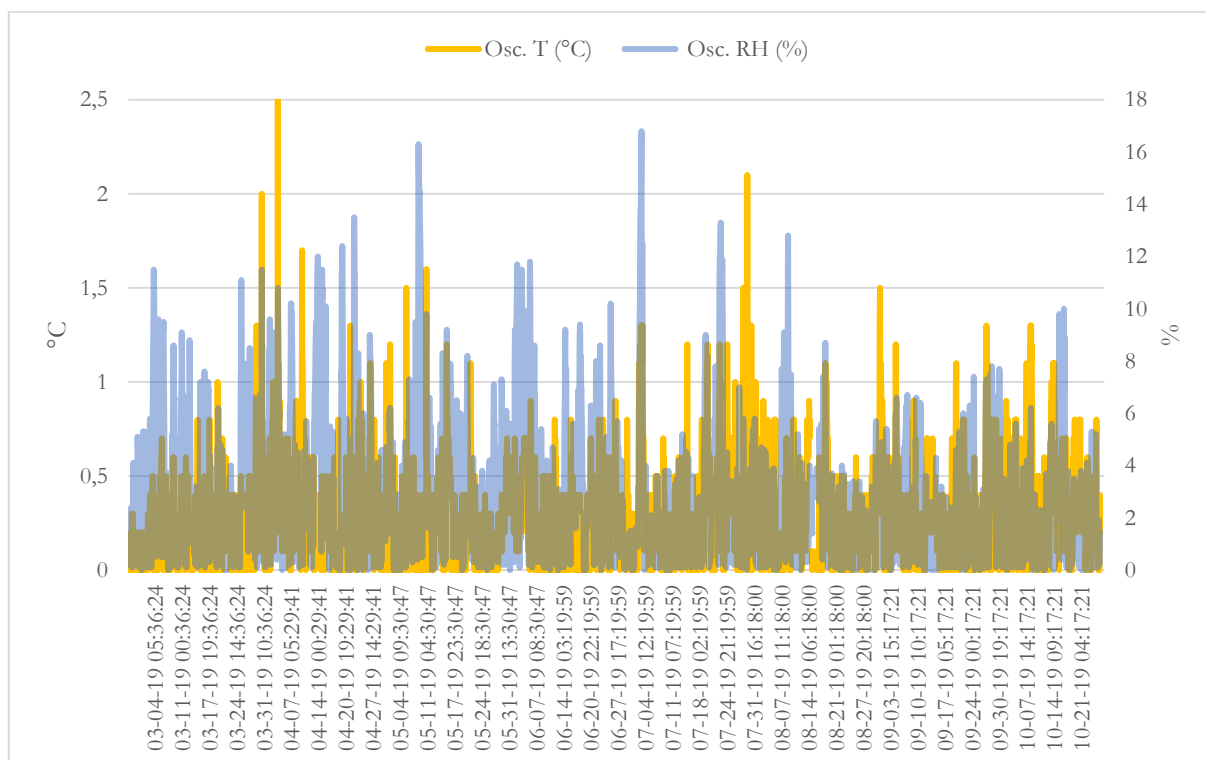


Grafico 93_ Portico della Gloria: oscillazioni medie T e UR

La Tabella 26 e il Grafico 93, mostrano che le oscillazioni medie rientrano, nel caso di entrambi i parametri, ampiamente nei *range* della UNI 10829:1999; mentre le differenze massime rilevate -dovute ad alcuni picchi- risultano superiori per T, con oscillazioni di circa 2 °C – 2,50 °C, tranne nel periodo invernale in cui le oscillazioni massime sono pari ad 1 °C. Le oscillazioni massime rilevate per il parametro UR raggiungono il 16,80 % durante il periodo primaverile ed estivo, mentre si hanno oscillazioni giornaliere pari a circa l'11 % in inverno e autunno. Come detto, le oscillazioni massime sono dovute dei picchi (evidenti al Grafico 93), i quali, considerato il dato medio di oscillazione per entrambi i parametri, si confermano fattori isolati e non rischiosi per la conservazione preventiva delle sculture policrome che costituiscono il Portico della Gloria.

3.23.3. Confronto tra dati climatici *outdoor* e dati microclimatici *indoor*

I dati climatici *outdoor* utilizzati per la presente ricerca sono stati scaricati dalla seguente piattaforma online: https://www.meteogalicia.gal/observacion/estacionshistorico/historico.action?idEst=10050&request_locale=es#.

Mettendo a confronto i valori microclimatici *indoor* degli 8 mesi monitorati, con i dati climatici *outdoor*, si nota come la tendenza di temperatura e umidità dell'aria all'interno del Portico della Gloria tenda a seguire il *trend* del dato esterno, ma come comunque esso non incida fortemente sull'andamento di entrambi i parametri: la tendenza di T e UR si rivela piuttosto lineare, specialmente in estate e autunno (es. Grafico 98,99, 100,101). Su tale dato incide senza dubbio la presenza della due unità di trattamento aria, il cui funzionamento è stato indagato al paragrafo 3.23.5. Nonostante la presenza di tali impianti emerge che l'umidità relativa *indoor* sia più complessa da controllare rispetto alla temperatura dell'aria: UR riporta infatti un andamento meno lineare rispetto a quello di T, in particolar modo nel corso del periodo invernale e primaverile (es. Grafico 94, 95, 96, 97).

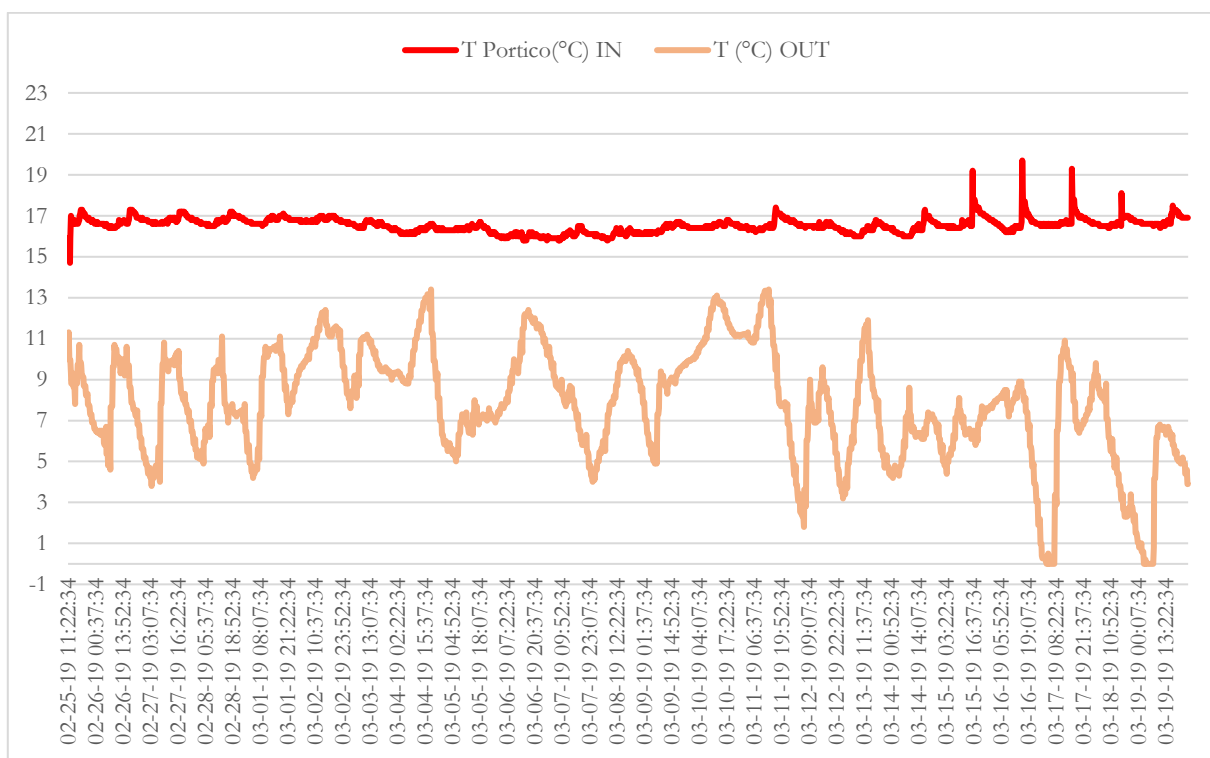


Grafico 94_Confronto tra T indoor e T outdoor: 25/02/'19 - 20/03/'19

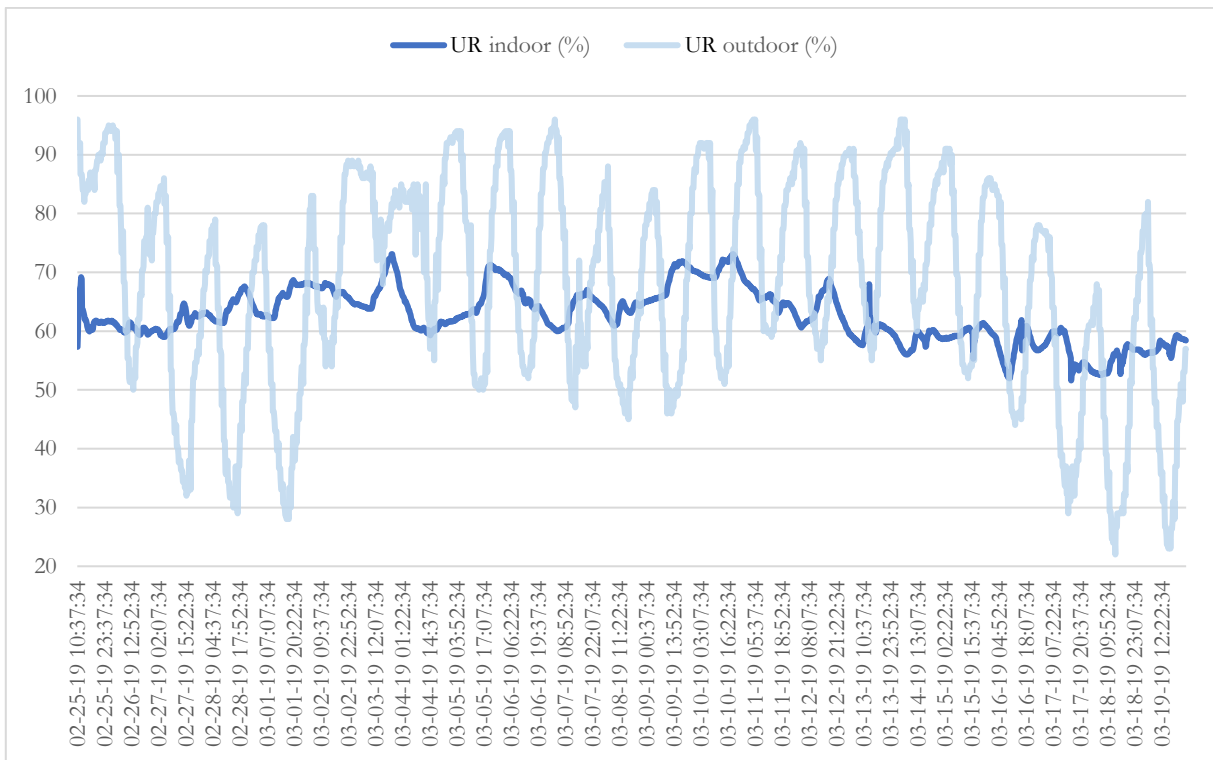


Grafico 95_Confronto tra UR indoor e UR outdoor: 25/02/'19 - 20/03/'19

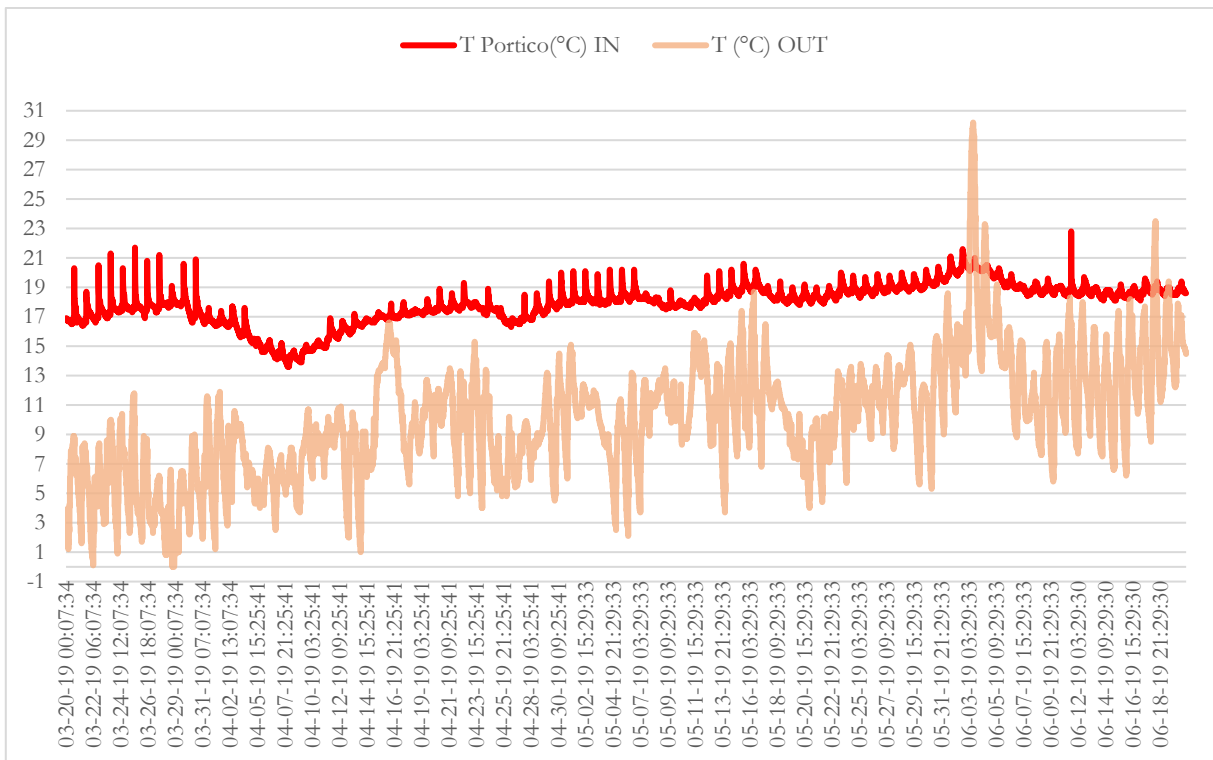


Grafico 96_Confronto tra T indoor e T outdoor: 20/03/'19 - 21/06/'19

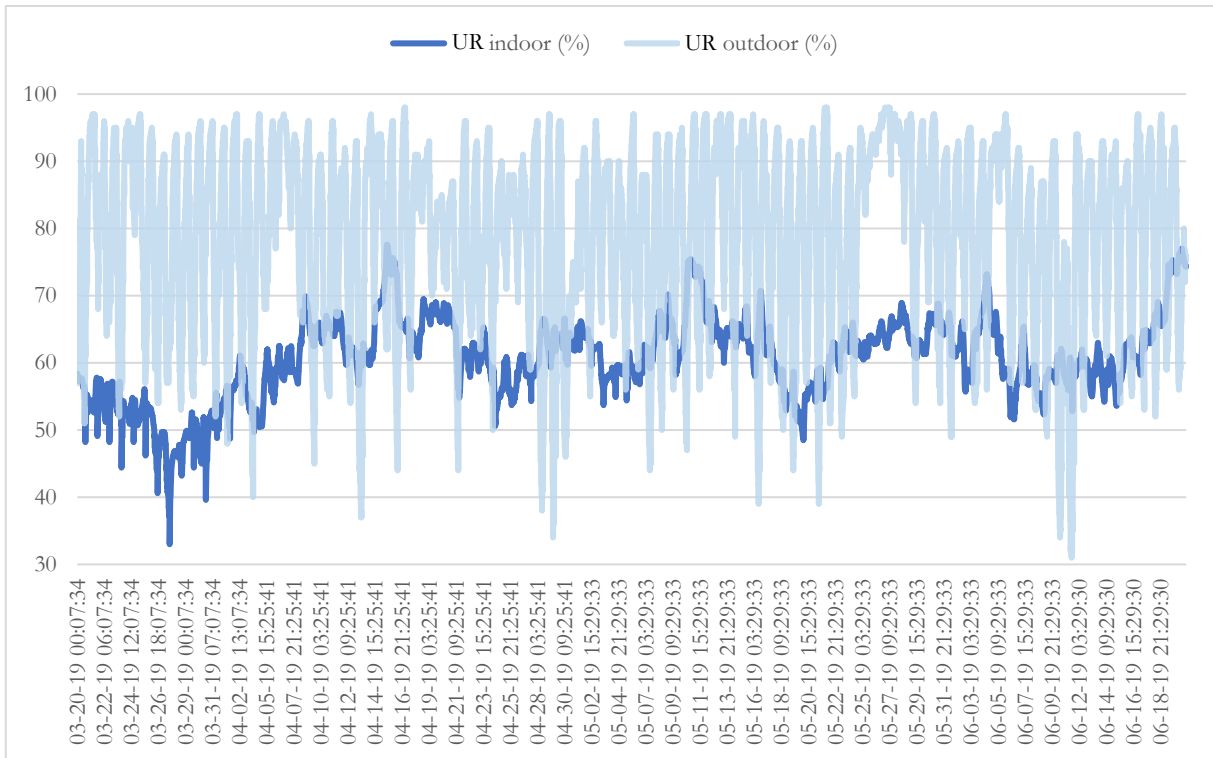


Grafico 97_Confronto tra UR indoor e UR outdoor: 20/03/19 - 21/06/19

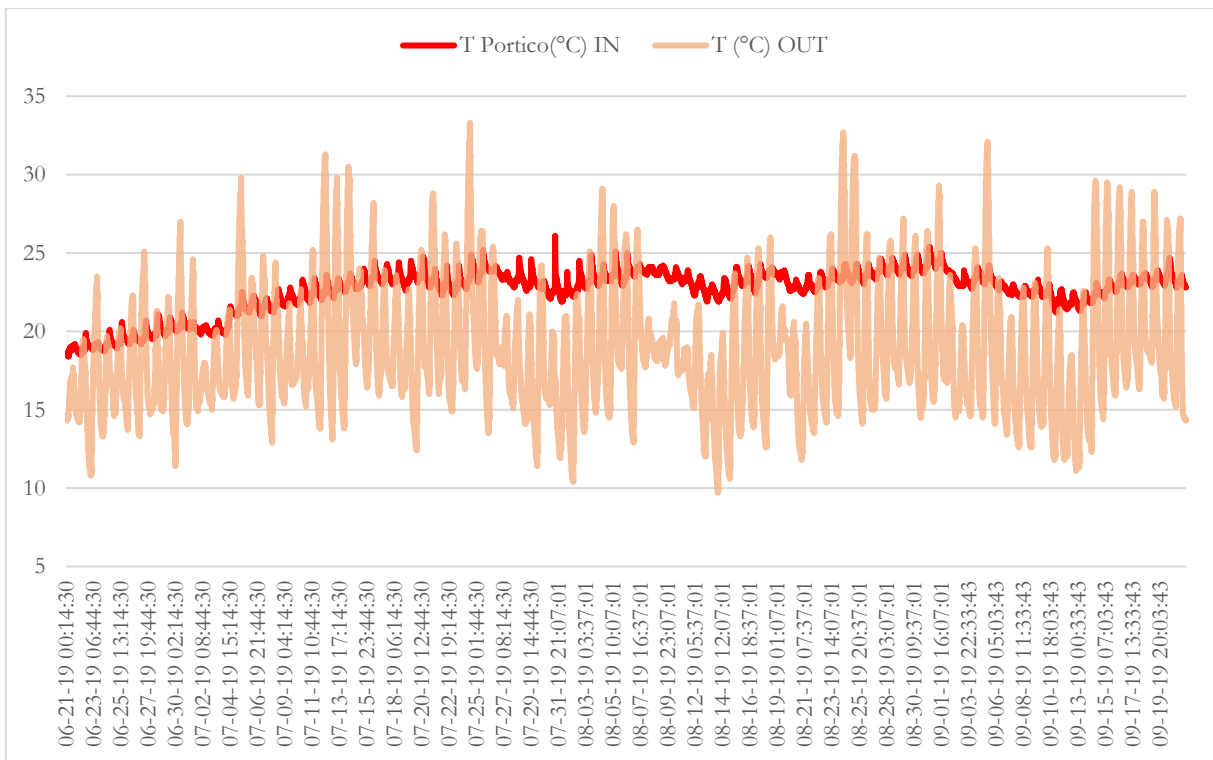


Grafico 98_Confronto tra T indoor e T outdoor: 21/06/19 - 22/09/19

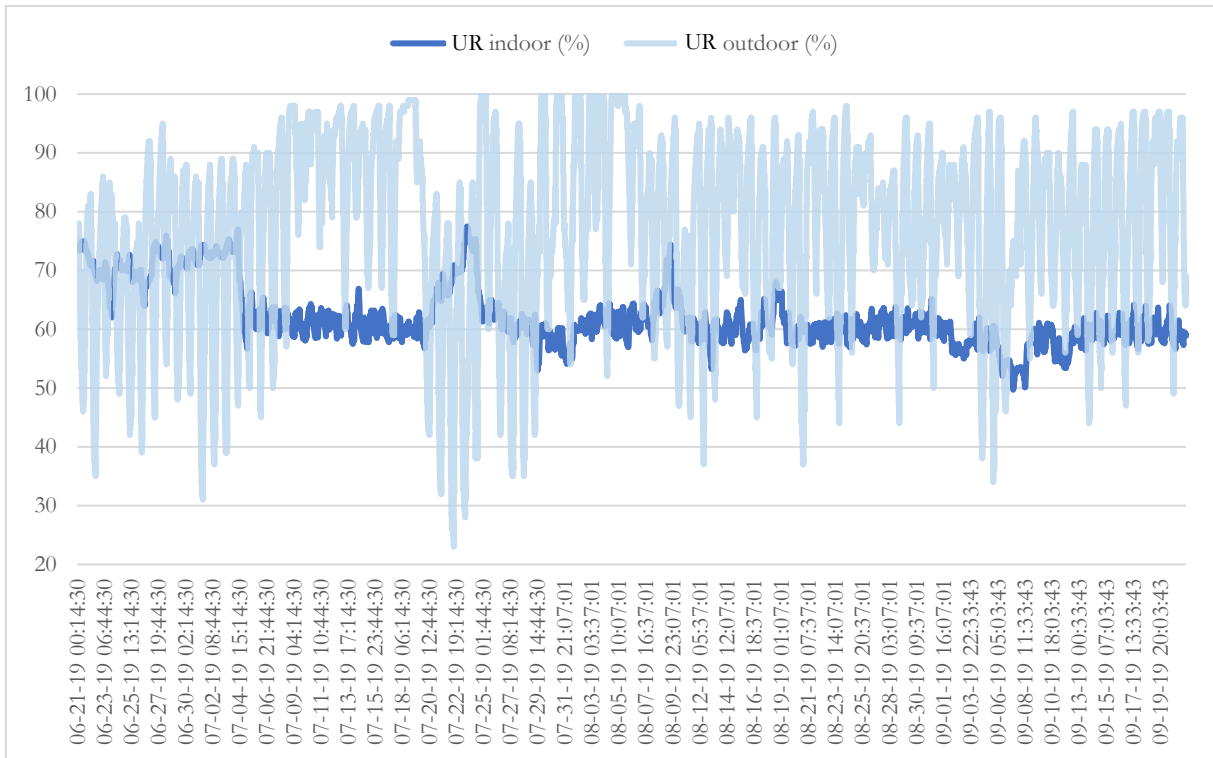


Grafico 99_Confronto tra UR indoor e UR outdoor: 21/06/'19 - 22/09/'19

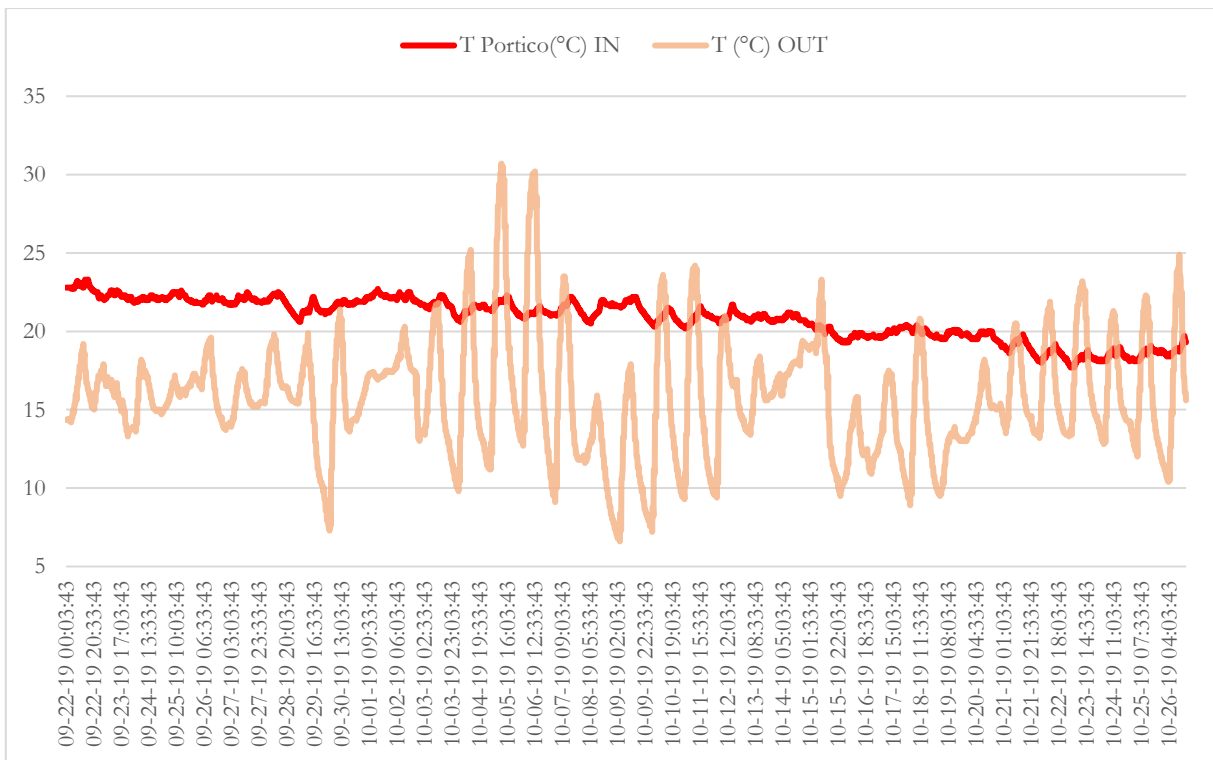


Grafico 100_Confronto tra T indoor e T outdoor: 22/09/'19 - 26/10/'19

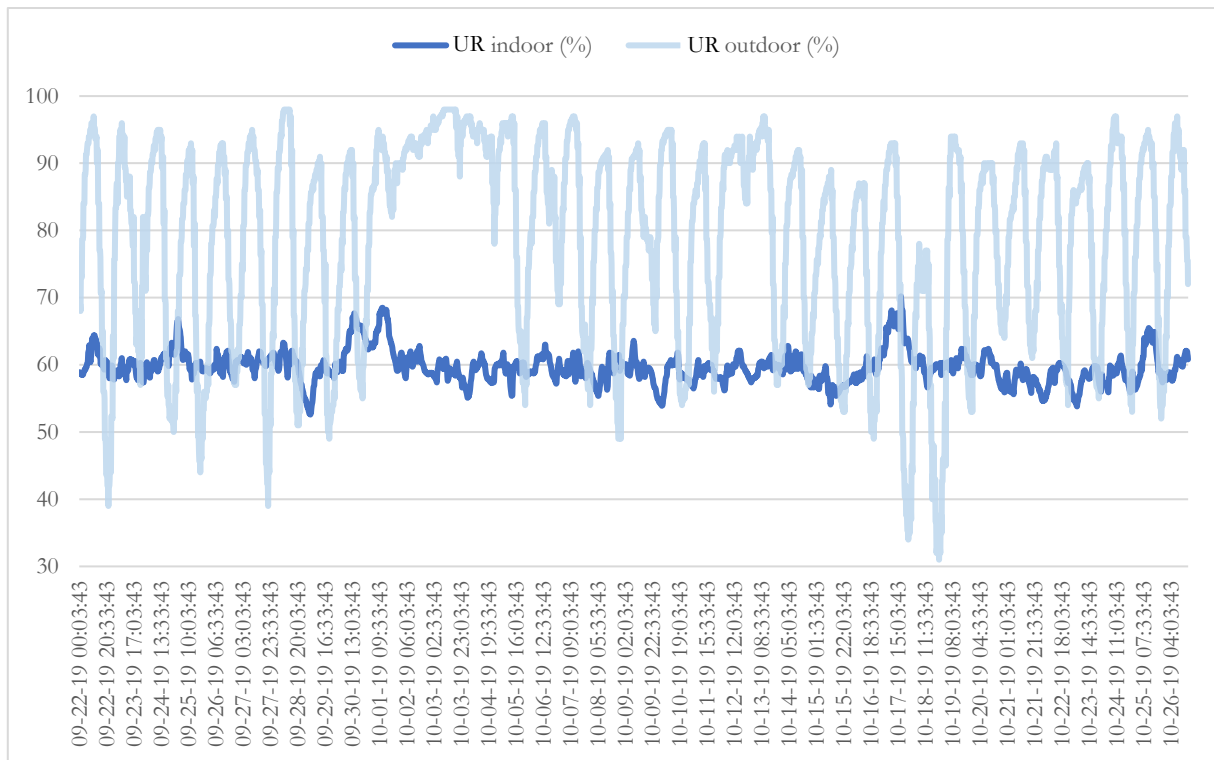


Grafico 101_ Confronto tra UR indoor e UR outdoor: 22/09/'19 - 26/10/'19

Risulta evidente la necessità di individuare quali fattori incidano sull'umidità relativa del Portico della Gloria: parametro che sin dalle prime analisi si è dimostrato leggermente più rischioso, in termini di conservazione, rispetto alla temperatura dell'aria, per il patrimonio che il nartece rappresenta e custodisce.

3.23.4. Influenza dei visitatori

Per verificare l'influenza dei visitatori e delle relative guide, sul microclima interno al Portico della Gloria, è stata calcolata la Mixing Ratio (MR)²⁵⁹ durante gli orari di chiusura e di apertura della Cattedrale.

Le formule utilizzate per calcolare MR sono le seguenti (da [10]):

$$V_{ps} = \frac{e^{(77,3435+0,0057(273(K)+T(^{\circ}C))-\frac{7235}{273(K)+T(^{\circ}C)})}}{(273(K)+T(^{\circ}C))^{8,2}}; \text{ (Pa)} \quad (5)$$

$$V_p = V_{ps} * (\text{UR}/100); \text{ (hPa)} \quad (6)$$

$$\text{MR} = B * V_p / (P_{\text{tot}} - V_p); \text{ (g/m}^3\text{)} \quad (7)$$

Dove :

V_{ps} = vapore acqueo (Pa);

V_p = pressione del vapore acqueo (hPa);

MR = Mixing Ratio;

²⁵⁹ Umidità specifica, ovvero il rapporto tra la massa di vapore acqueo e la massa totale dell'aria.

P_{tot} = Pressione totale dell'aria (hPa);

$B = 621,9907$ (g/kg).

Prendendo come esempio una settimana tipo del periodo invernale, primaverile, estivo e autunnale (Tabella 27) dai dati del monitoraggio, l'incremento medio²⁶⁰ di vapore acqueo nell'aria dovuto alla presenza dei visitatori nel Portico della Gloria risulta essere pari a 1.271 g/kg²⁶¹.

Tabella 27. Settimane tipo: differenza media tra MR minimo e massimo

Orario di apertura – settimane tipo	Inverno (8-14 marzo)	Primavera (17-23 maggio)	Estate (5-11 luglio)	Autunno (3-9 ottobre)
Differenza media di Mixing Ratio	+1.042 g/kg	+1.258 g/kg	+1.204 g/kg	+1.581 g/kg

Come è ovvio che sia, la presenza delle persone all'interno del Portico della Gloria incide sia sul parametro della temperatura, sia su quello dell'umidità relativa: all'aumentare del numero dei visitatori, aumenta la quantità di Mixing Ratio, così come aumentano temperatura e umidità relativa. Per indagare nel dettaglio in che modo incida l'affluenza sul microclima del Portico della Gloria, è stata individuata una settimana-tipo come campione rappresentativo di ciascuna stagione, per la quale sono stati studiati di seguito gli andamenti di T, UR e MR negli orari di apertura e di chiusura al pubblico della Cattedrale.

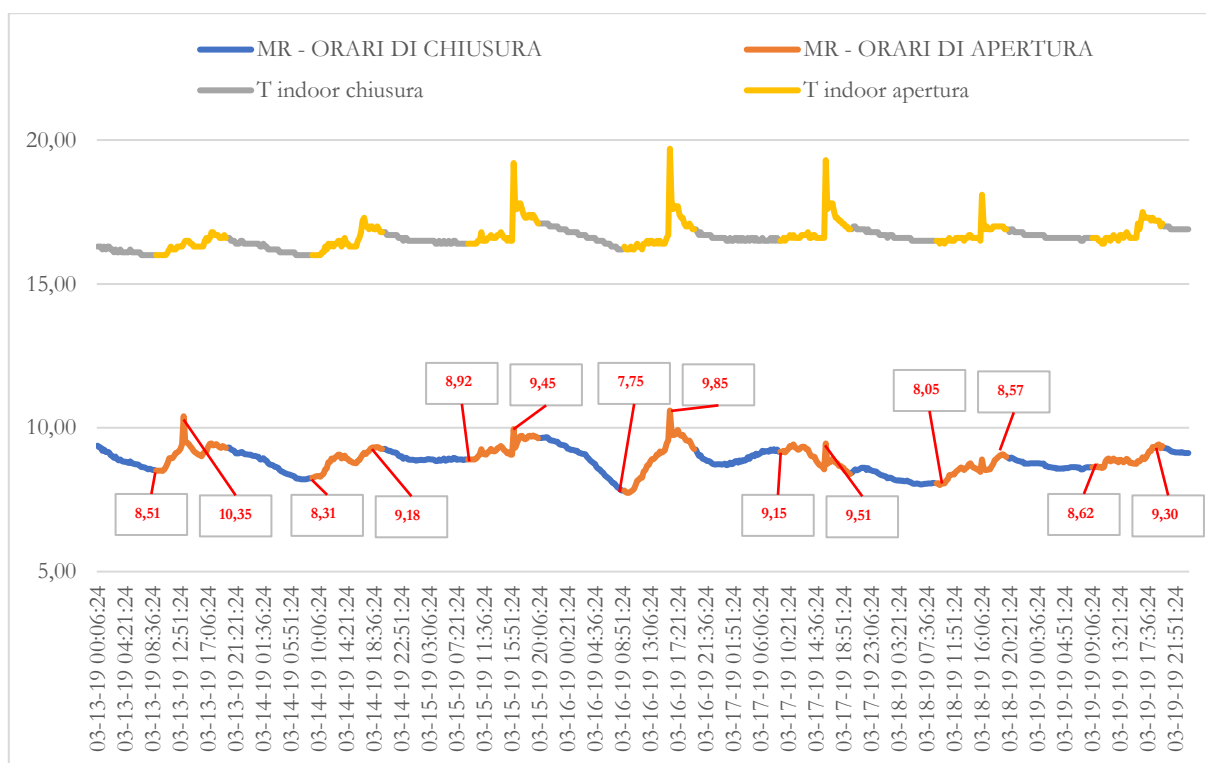


Grafico 102_Settimana tipo in inverno: 13-19 marzo 2019

²⁶⁰ Calcolato considerando il picco minimo ed il picco massimo rilevati durante gli orari di apertura.

²⁶¹ Si specifica che dato di MR per i calcoli effettuati nel corso della ricerca è stato trasformato in g/kg perché MR viene utilizzato per sapere quanti grammi di vapore acqueo sono contenuti in 1 kg d'aria.

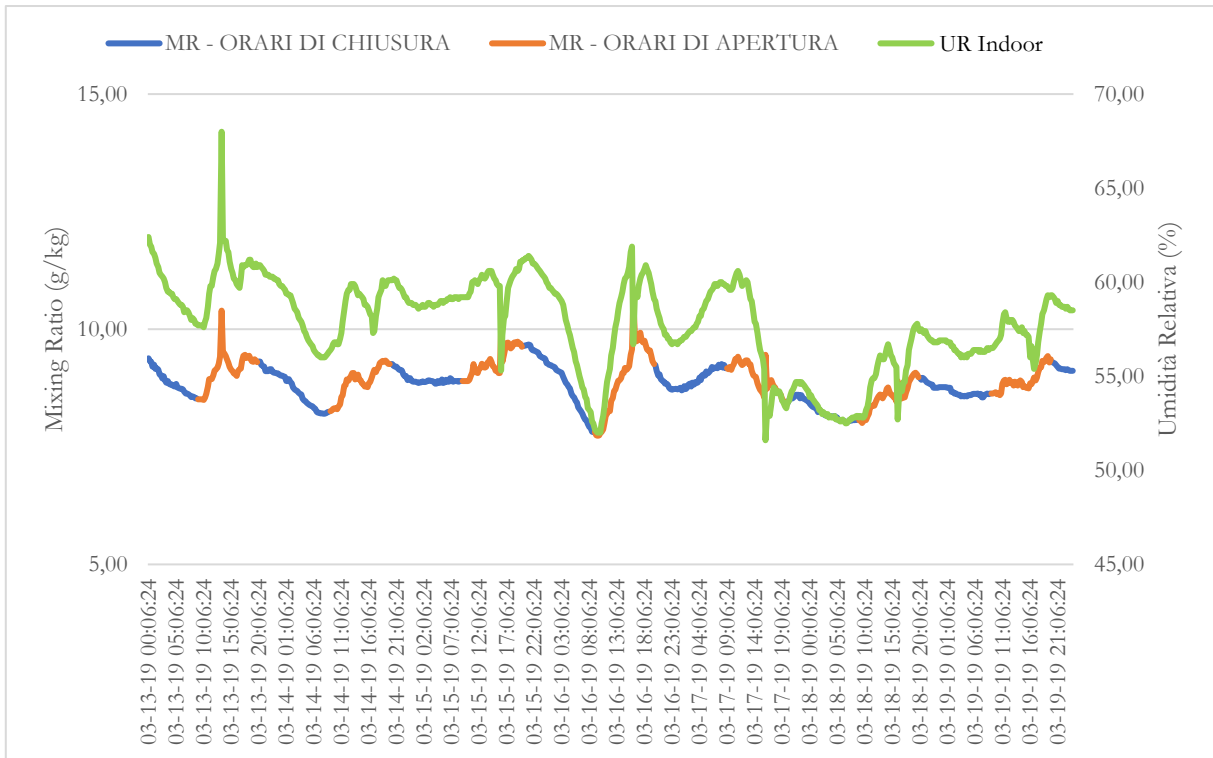


Grafico 103_Settimana tipo in inverno: 13-19 marzo 2019

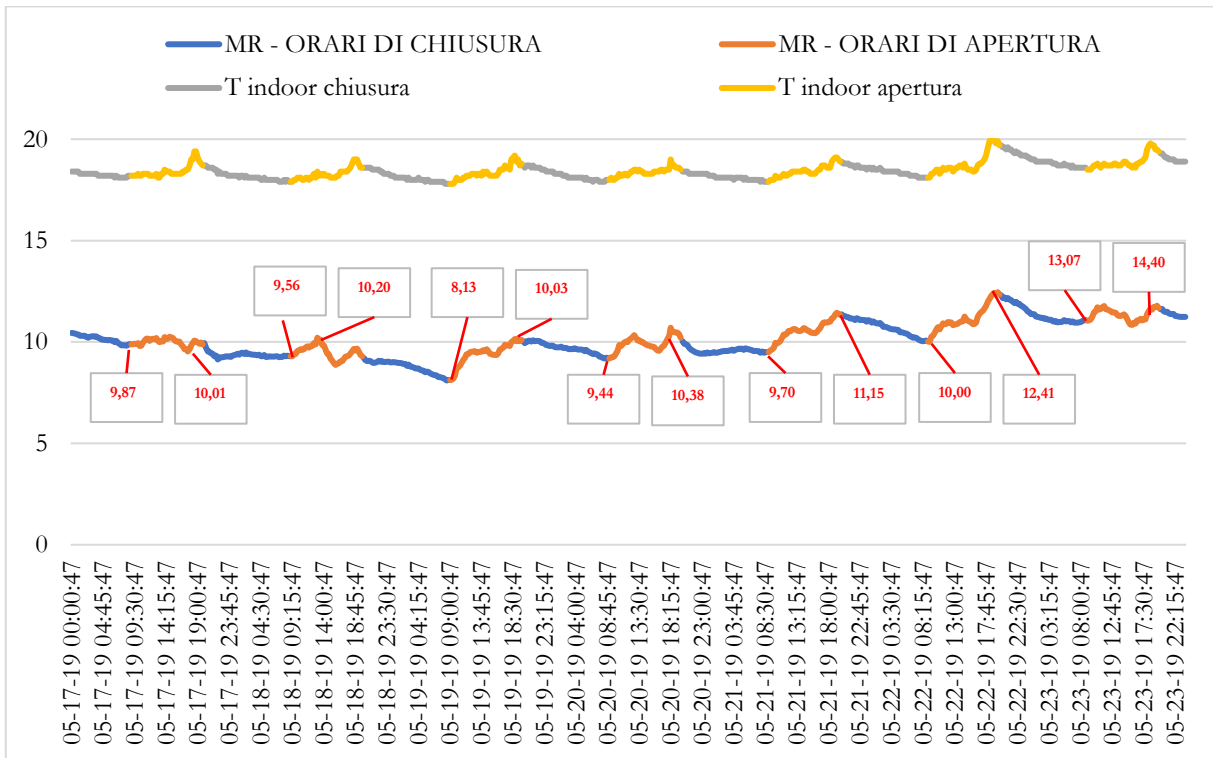


Grafico 104_Settimana tipo in primavera: 17-23 maggio 2019

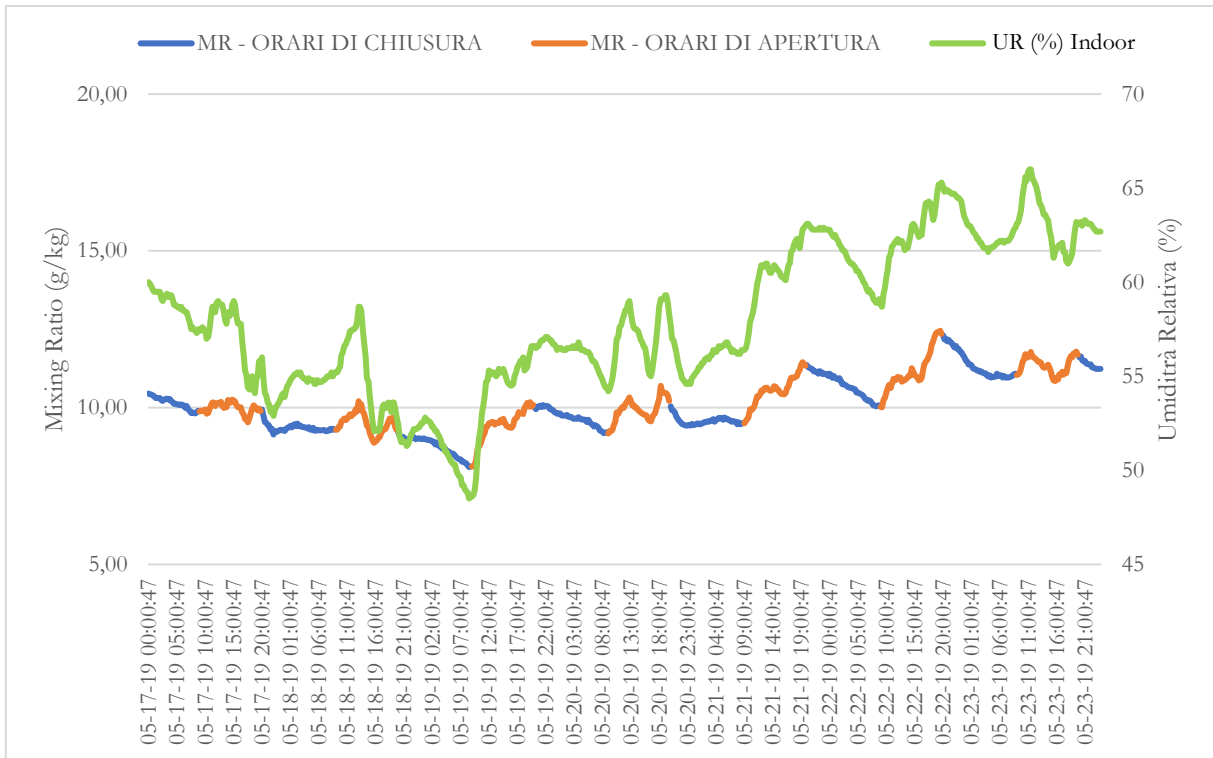


Grafico 105_Settimana tipo in primavera: 17-23 maggio 2019

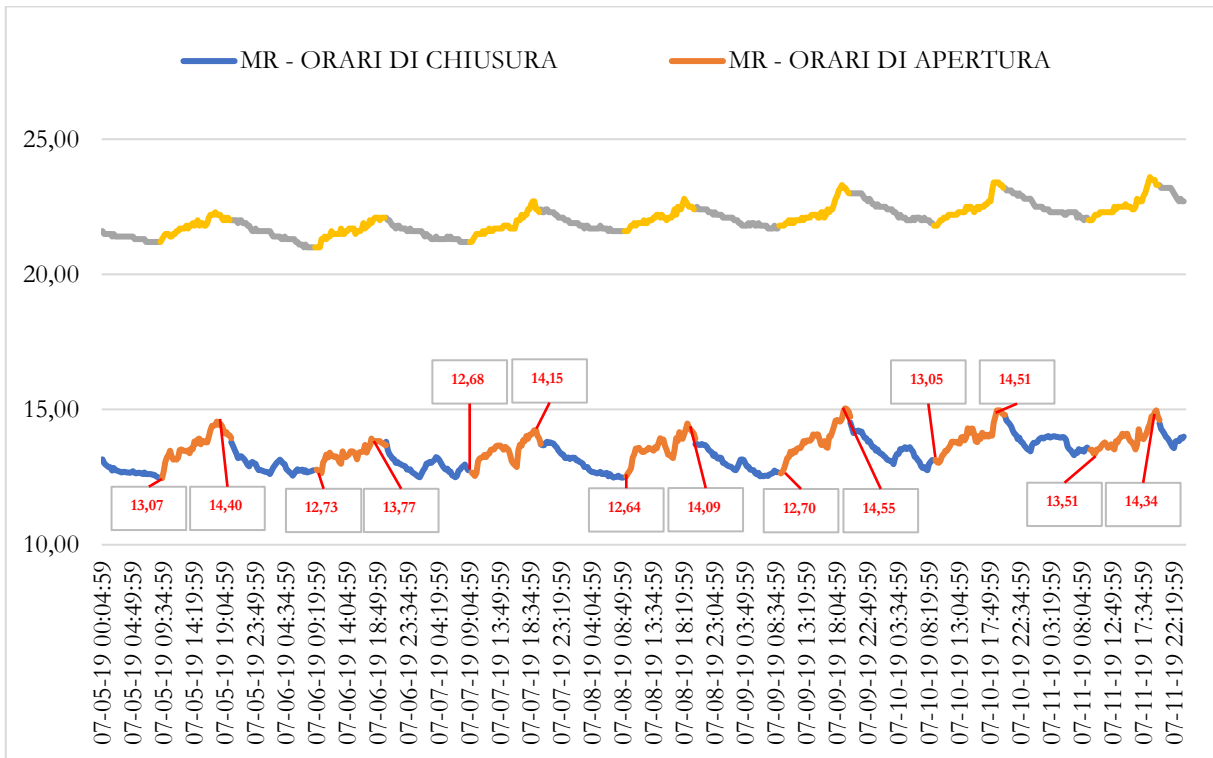


Grafico 106_Settimana tipo in estate: 5-11 luglio 2019

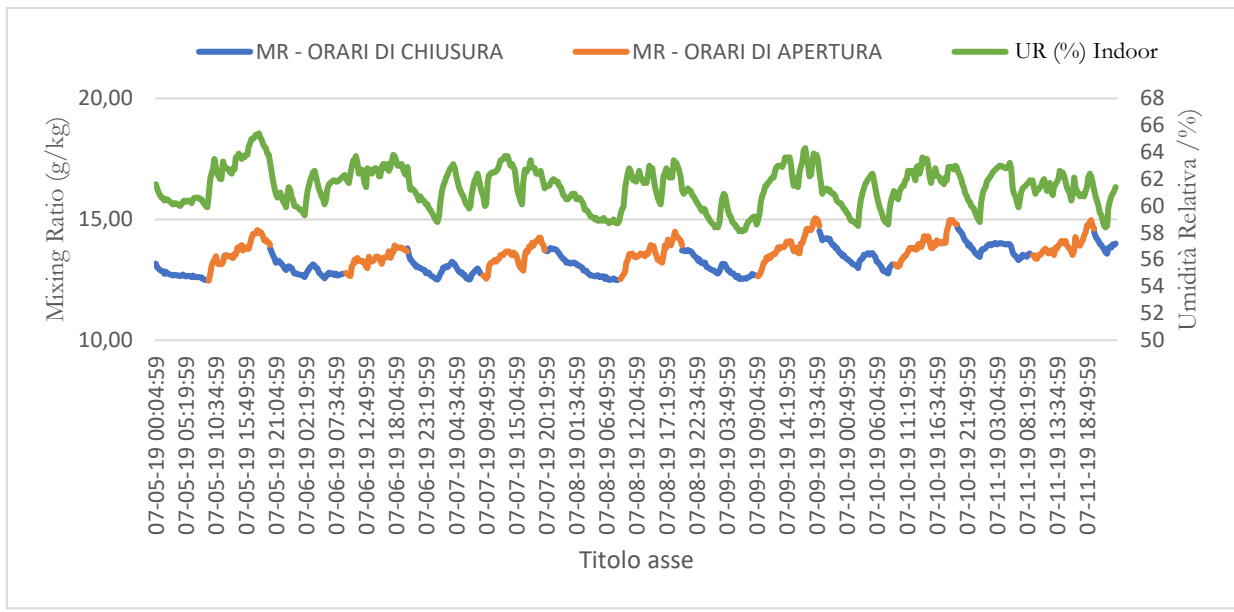


Grafico 107_Settimana tipo in estate: 5-11 luglio 2019

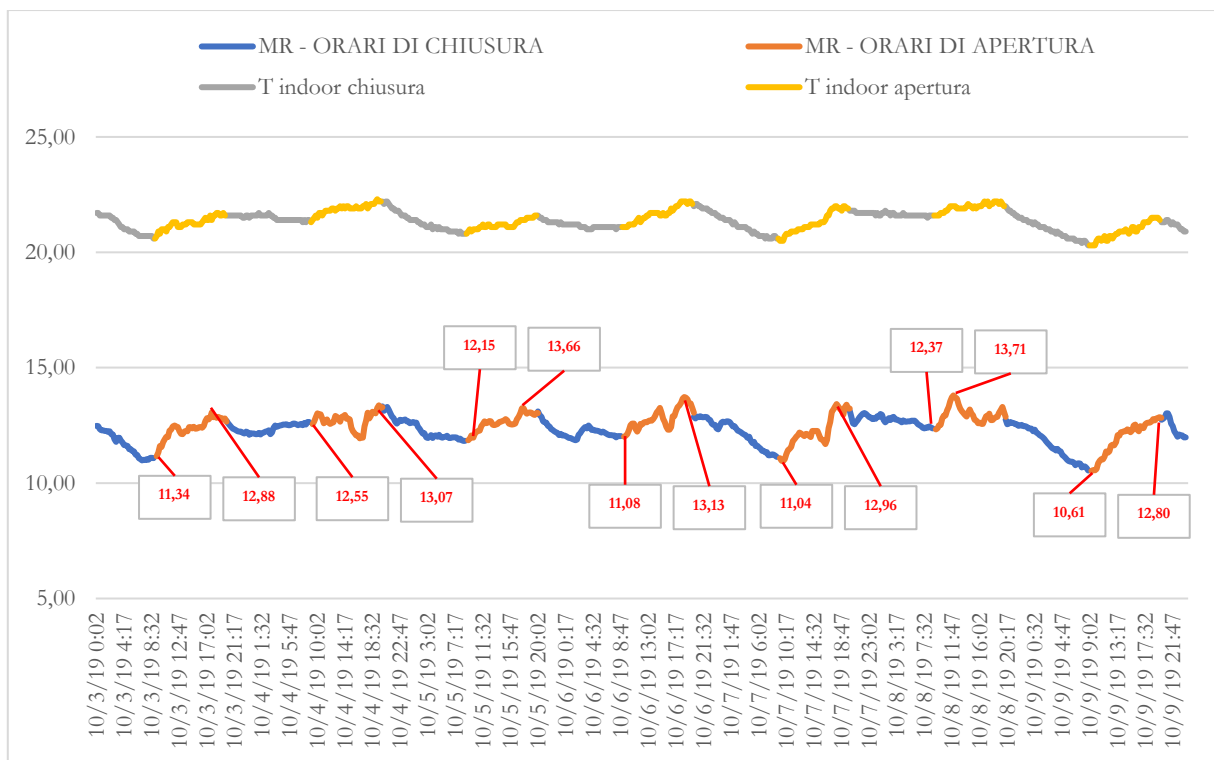


Grafico 108_Settimana tipo in autunno: 3-9 ottobre 2019

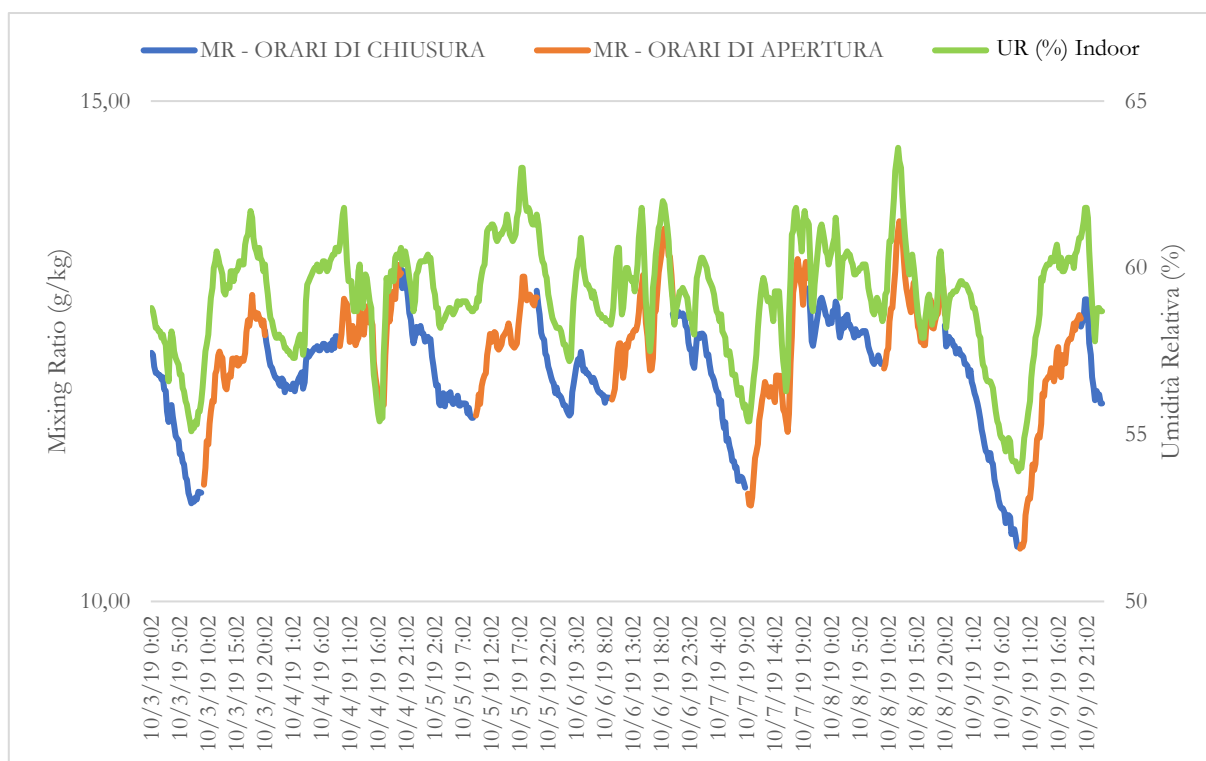


Grafico 109_Settimana tipo in autunno: 3-9 ottobre 2019

Ne emerge che ogni giorno, durante i quattro periodi stagionali analizzati, la quantità di Mixing Ratio, impiega circa 5 ore -a partire dall'orario di chiusura- per diminuire e smaltire completamente le emissioni dei visitatori. Per questa stessa ragione, le differenze tra valori massimi, minimi e medi calcolati per i parametri di T, MR e UR in orario di apertura e chiusura sono molto contenute; l'unico parametro per il quale si leggono variazioni più consistenti è l'umidità relativa, evidentemente più sensibile anche alle piccole variazioni: si registrano differenze tra gli orari di apertura e di chiusura tra l'1% e il 2% (Tabella 28). Inoltre, dai grafici soprastanti emerge un aumento quasi quotidiano di MR attorno alle ore 16:00 in primavera; alle ore 15:00 in estate e alle ore 16:45 in autunno: dovuto o al fatto che corrisponde all'orario di pranzo spagnolo, o legato all'apertura di porte e/o finestre. Il calo di MR è molto repentino, perciò è più plausibile la seconda ipotesi.

Tabella 28. T, MR, UR: valori in orari di apertura e di chiusura

	T °C			MR g/kg			UR %		
	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean
Orari di apertura - Inverno	16	19,70	16,72	7,74	10,60	8,96	51,60	68	58,06
Orari di chiusura - Inverno	16	17,10	16,54	7,81	9,68	8,79	52,50	62,40	57,60
Orari di apertura - Primavera	17,8	20	18,51	8,12	12,45	10,27	48,6	66	58,57
Orari di chiusura - Inverno	17,8	19,7	18,38	8,10	12,31	10	48,5	65,1	57,50
Orari di apertura - Estate	21	23,6	22,11	12,46	15,05	13,72	58,6	65,4	62,36
Orari di chiusura - Estate	21	23,3	21,96	12,48	14,78	13,19	58,1	63,2	60,55

Orari di apertura - Autunno	20,3	22,3	21,45	10,53	13,80	12,54	53,9	63,6	59,64
Orari di chiusura - Autunno	20,3	22,2	21,30	10,55	13,32	12,21	54	61,8	58,68

Infine, è stato verificato che il numero di accessi comunicato dalla Fondazione Cattedrale (gruppi da 20-25 persone) venisse effettivamente rispettato. Sapendo che il portico ha un volume pari a circa 1300 m³, un m³ d'aria corrisponde a 1,225 kg e un individuo emette circa 50 g di MR ogni ora, tenendo conto dei valori di MR calcolati per l'intero periodo di monitoraggio sono stati calcolati gli accessi in 4 giornate-tipo per ciascuna stagione (Grafico 110, 111, 112, 113).

$$N. \text{ persone} = K \text{ g aria} * (MR_{\text{giorno,k,ora}j} - MR_{\text{giorno,k,ora}(j+1)}) / 50 \quad (8)$$

Dove:

K corrisponde ai giorni del monitoraggio

J corrisponde alle ore del giorno

Per i grafici seguenti sono state selezionate con criterio casuale 4 giornate (1 per ogni settimana-tipo) su cui verificare il numero dei visitatori presenti durante gli orari di apertura.



Grafico 110_Giornata invernale: 14/03/2019 – numero di visitatori



Grafico 111_Giornata primaverile: 20/05/2019 – numero di visitatori



Grafico 112_Giornata estiva: 5/07/2019 – numero di visitatori

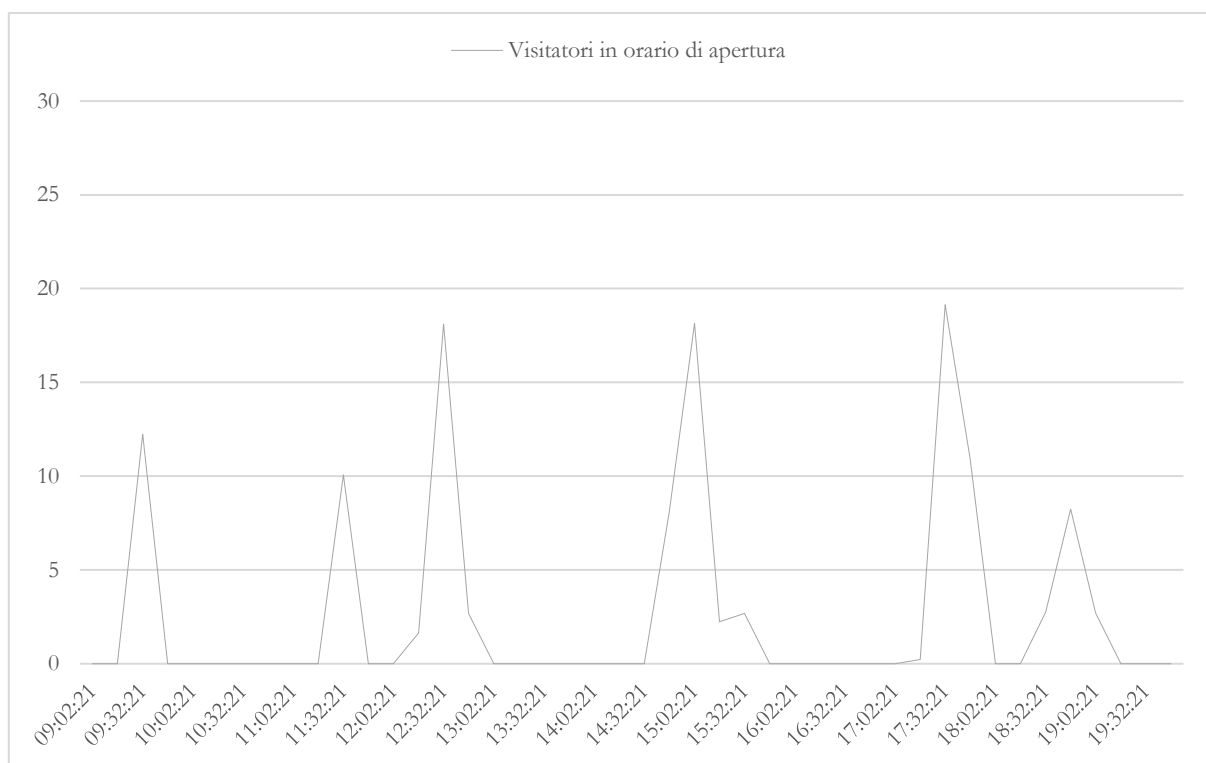


Grafico 113_ Giornata autunnale: 6/10/2019– numero di visitatori

Osservando i grafici soprastanti la limitazione degli accessi risulta rispettata. Logicamente, non tutte le giornate presentano la medesima affluenza, ma gli orari maggiormente affollati sembrano essere, mediamente: verso le 9:30-10:00; tra le 13:00 e le 15:00, con un calo attorno alle 15:30 e un picco positivo verso le ore 17:00; infine si registra affollamento anche nelle ultime ore prima della chiusura (18:00-20:00).

3.23.5. Analisi del funzionamento degli impianti

Un fattore che incide fortemente sui parametri di T e UR all'interno del Portico della Gloria è la presenza delle Unità di Trattamento Aria, attive all'interno del nartece. Dunque, sono stati studiati i dati monitorati da una sonda appoggiata direttamente sopra una delle due UTA, per comprenderne innanzitutto il settaggio²⁶².

Nel grafico seguente (Grafico 114) la temperatura emessa dalle UTA è riportata in giallo e risulta sempre superiore ai 20 °C, raggiungendo tra luglio e ottobre anche i 35 °C. Fa eccezione il periodo evidenziato in rosso, probabilmente legato al mancato funzionamento degli impianti. Nonostante le UTA emettano tali valori di temperatura, la temperatura dell'aria registrata all'interno del Portico durante la campagna di monitoraggio non supera i 25 °C. L'umidità relativa registrata all'interno del Portico della Gloria è riportata in arancione al Grafico 115; in blu, nel medesimo grafico, si riporta invece l'umidità relativa emessa dalle UTA.

²⁶² Step imprescindibile anche per poter procedere con la costruzione del modello virtuale dello stato di fatto del Portico della Gloria (paragrafo 3.24).

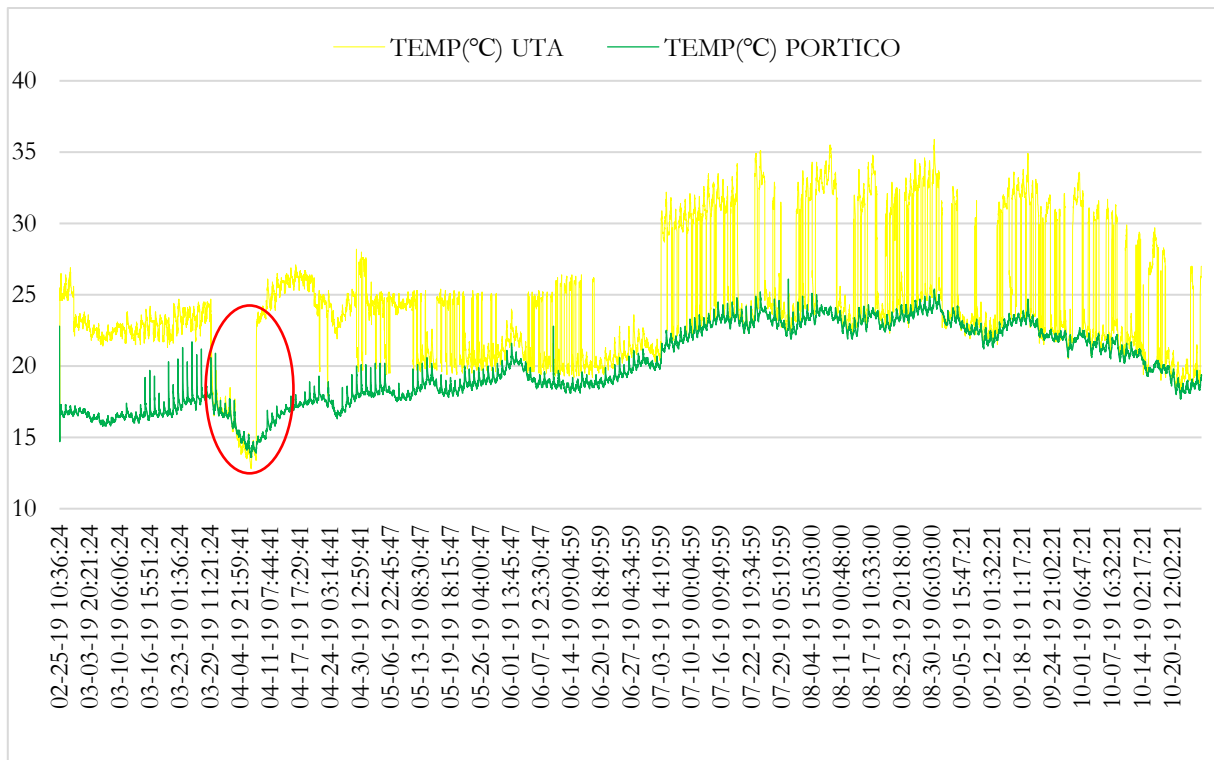


Grafico 114_ Confronto tra T UTA e T Portico della Gloria: 25/02/'19 - 26/10/'19

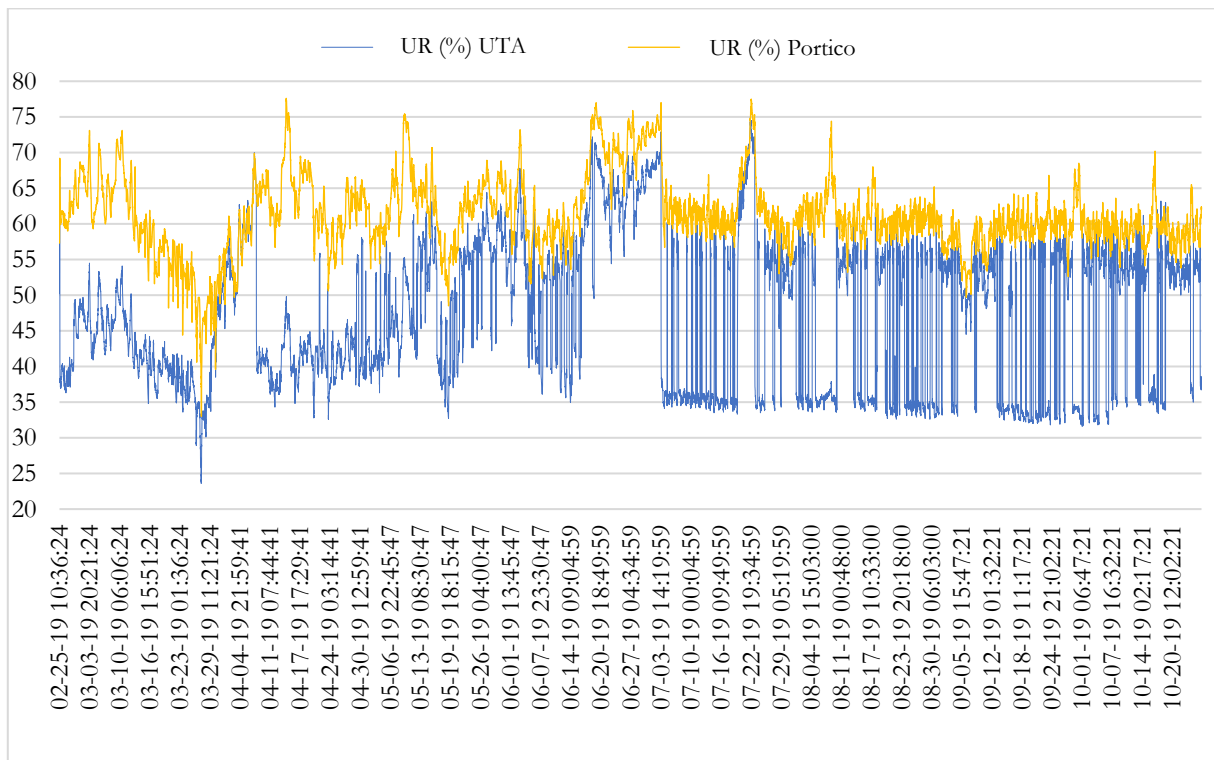


Grafico 115_ Confronto tra UR UTA e UR Portico della Gloria: 25/02/'19 - 26/10/'19

Da una prima analisi pare che le UTA lavorino solo in funzione dell'umidità relativa: emettendo aria calda per abbassare il livello di UR e mai aria fredda per diminuire il livello di T: manca un sistema di raffrescamento, le condizioni microclimatiche *indoor* estive sono garantite non dall'impianto, bensì dall'edificio stesso. Per comprendere se quanto ipotizzato fosse corretto e quali fossero i *set-point* delle

UTA ed il loro profilo d'uso, è stata selezionata una giornata tipo per ciascuna stagione, mettendo a confronto su un medesimo grafico: T registrata all'interno del Portico della Gloria; T emessa dalle UTA; UR rilevata nel Portico della Gloria; UR emessa dalle UTA.

Le giornate-tipo selezionate dalla campagna di monitoraggio per ogni stagione sono state le seguenti:

- inverno: 19/03/2019;
- primavera: 18/05/2019;
- estate: 10/07/2019;
- autunno: 03/10/2019.

Nei grafici seguenti è stato indicato quando le UTA sono inattive: nei periodi non compresi dalla linea tratteggiata in verde sono invece da considerarsi attive.

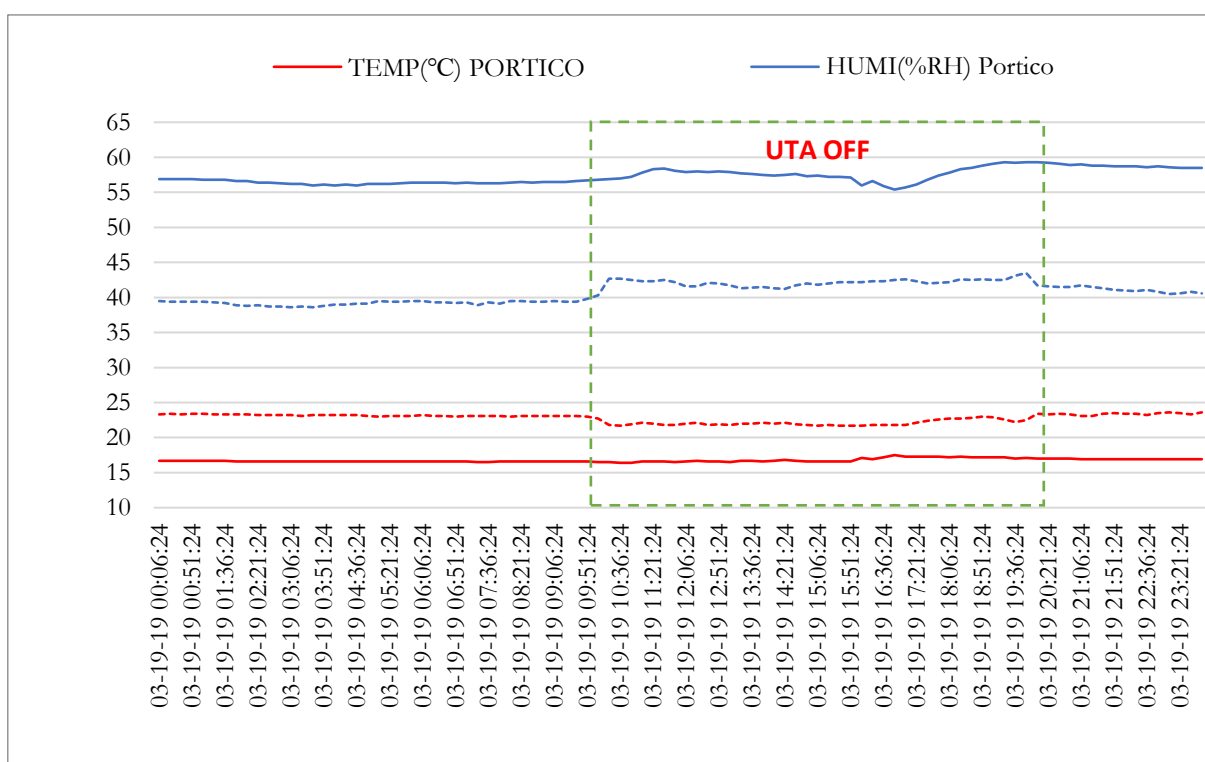


Grafico 116_ Giornata tipo in inverno: 19/03/'19

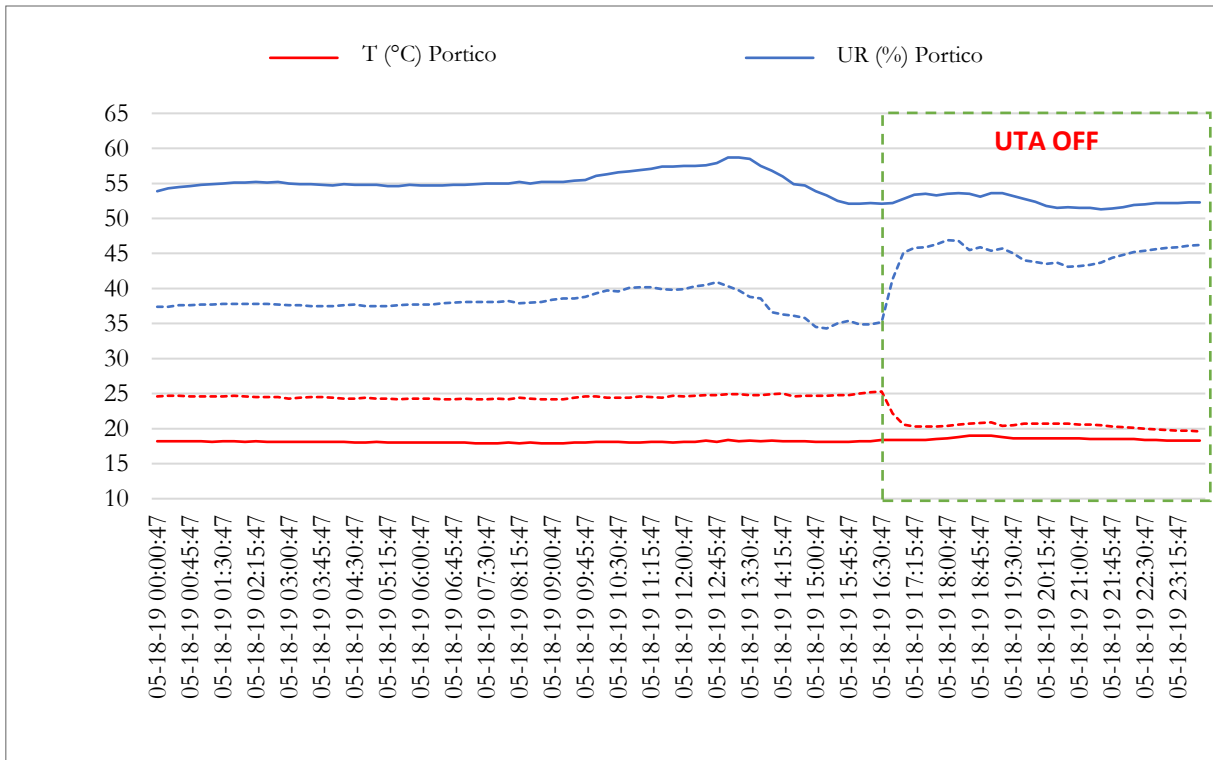


Grafico 117_Giornata tipo in primavera: 18/05/19

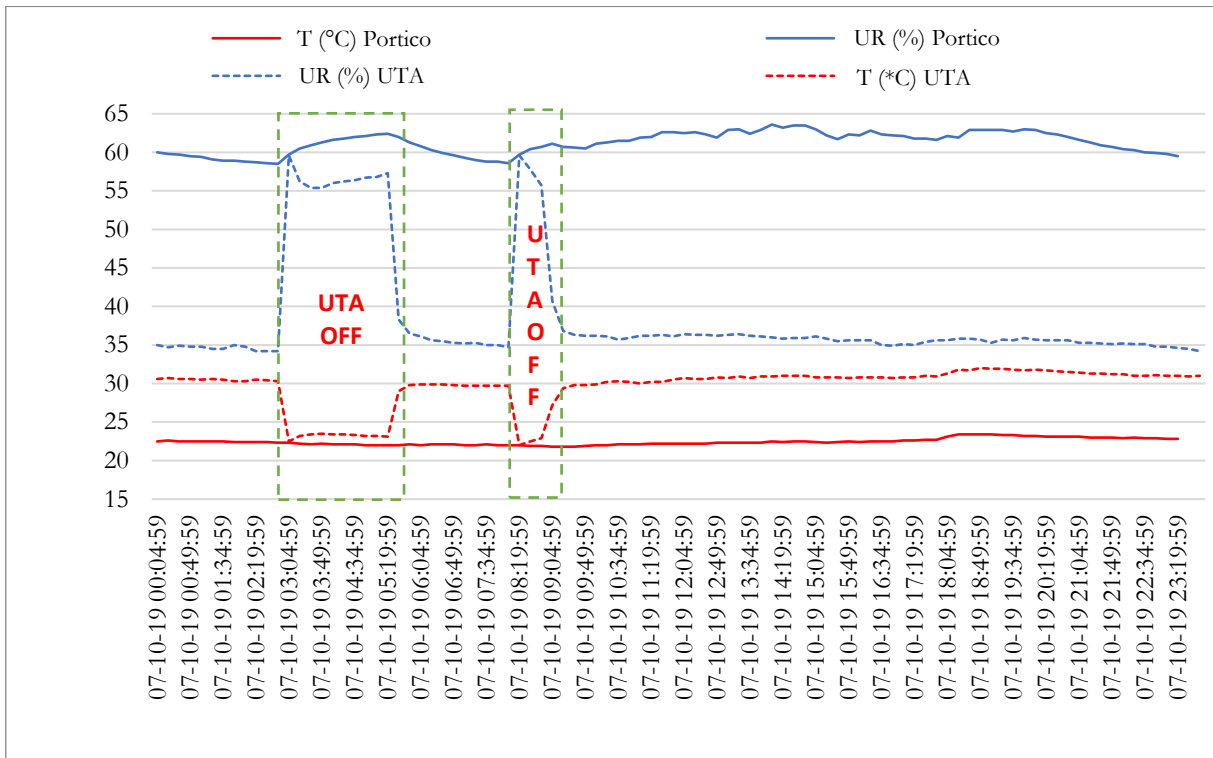


Grafico 118_ Giornata tipo in estate:10/07/19

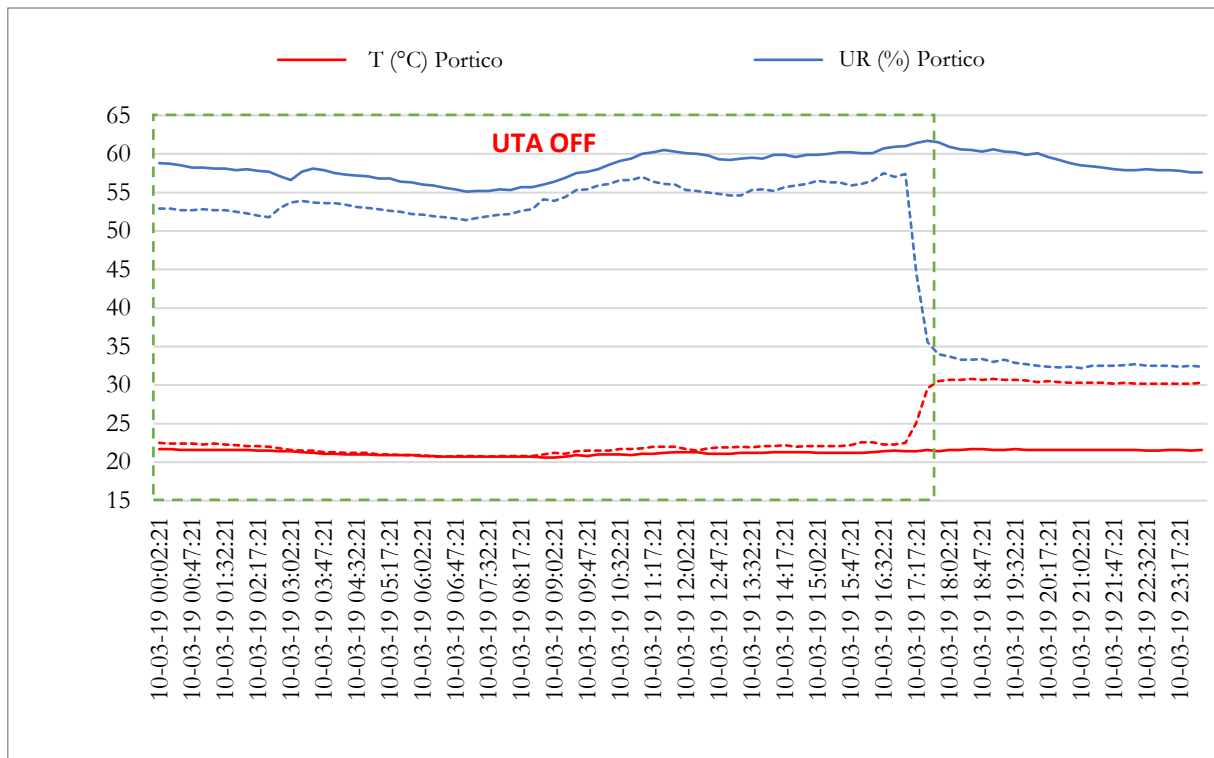
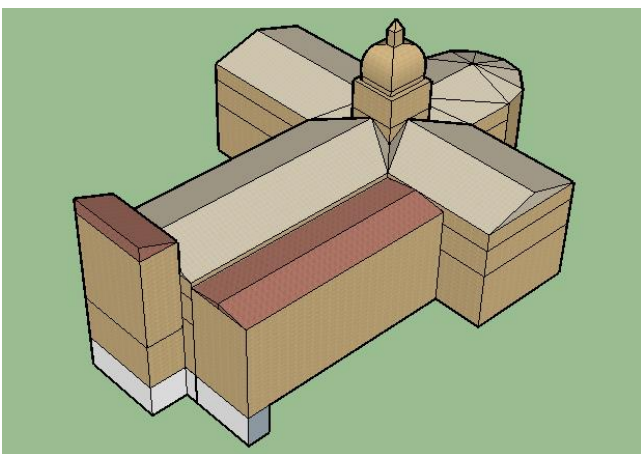


Grafico 119_Giornata tipo in autunno:03/10/'19

Questo approccio ha permesso di verificare che il *set point* di UR corrisponde al 60% e di confermare quanto sopra ipotizzato: elevati valori di T vengono emessi dalle UTA in funzione dell'umidità relativa: per ridurre i picchi di UR, quando superiori al 60 %.

3.24. Costruzione del modello virtuale dello stato di fatto (*Virtual Building 1*)

Per la realizzazione del modello virtuale del Portico della Gloria: sono state utilizzate le planimetrie e una sezione dell'edificio fornite dall'Architetto Soledad Garcia Morales²⁶³; successivamente è stato abbozzato il modello 3D tramite il *software* SketchUp (Figura 86) e ultimato in IES.VE (Figura 87).



²⁶³ Tali documenti non possono essere riportati nel presente elaborato a causa di specifiche direttive della Fondazione Cattedrale.

Figura 86_Modello 3D in SketchUp²⁶⁴

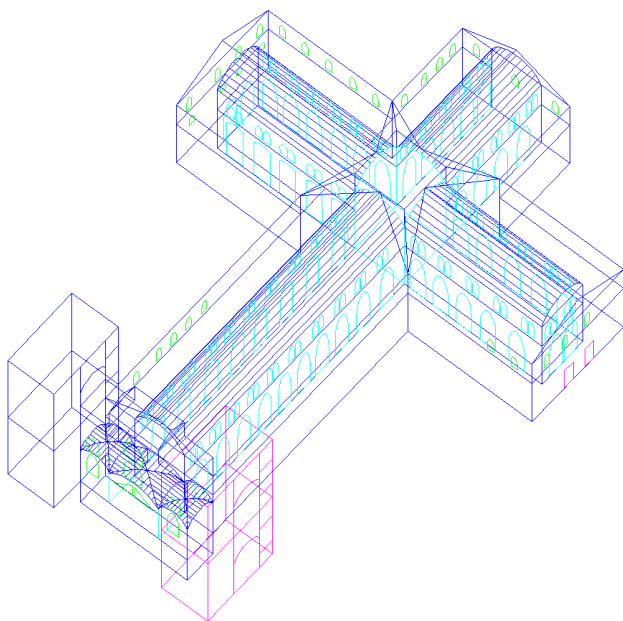


Figura 87_Modello 3D in IES.VE²⁶⁵

Tra le località disponibili su IES.VE, con relative informazioni climatiche, non vi è Santiago de Compostela, nonostante le informazioni geografiche siano disponibili. Tali dati non sono disponibili nemmeno sul sito <https://energyplus.net/weather>: è stato dunque preparato un file *ad hoc* utilizzando i dati climatici *outdoor* reperibili al sito https://www.meteogalicia.gal/observacion/estacionshistorico/historico.action?idEst=10050&request_locale=es#; sono stati convertiti²⁶⁶ i dati necessari e creato un file in formato *epw*, con i dati climatici di un intero anno a Salamanca. Successivamente, il file è stato caricato sulla libreria di IES.VE.

Per quanto riguarda la destinazione d'uso definita sul programma per questo caso-studio, essa coincide con quella riportata per i primi due casi: “*library, museum or gallery*”. Infine, le informazioni relative alla stratigrafia del Portico della Gloria sono state definite con l'aiuto dell'Arch. Soledad Garcia Morales, che oltre a fornire piante e sezioni da cui calcolare le specifiche geometriche, ha ragionato sulla selezione dei materiali proposti da IES.VE, in modo tale da indicare quelli che presentassero le proprietà fisiche più vicine ai materiali che compongono la fabbrica reale.

3.24.1. Errori e semplificazioni adottate

Essendo la Cattedrale un'architettura molto complessa e non disponendo del materiale necessario per poter riprodurre correttamente tutte le aperture e le geometrie presenti all'interno della stessa, in tutte le sue parti, il modello (Figura 88), il modello è stato realizzato utilizzando le piante e le sezioni di cui si disponeva (non esaustive) e le fotografie scattate in loco. Si specifica che nel caso della simulazione virtuale dei parametri microclimatici di un ambiente *indoor* i programmi di simulazione permettono di

²⁶⁴ Registro delle immagini. p. 270.

²⁶⁵ Ibidem.

²⁶⁶ La necessità di convertire alcuni dati deriva dal fatto che le unità di misura riportate dal sito per ogni parametro climatico, non sempre coincidevano con quelle richieste da IES.VE.

ottenere dei modelli validati (per quanto riguarda i parametri microclimatici *indoor*²⁶⁷), nonostante eventuali imperfezioni geometriche.



Figura 88_Modello 3D in IES.VE²⁶⁸

3.25. Validazione del *Virtual Building 1*

Dal confronto tra i dati simulati del *Virtual Building 1* e i dati monitorati, risulta validato²⁶⁹ il parametro T (Tabella 29, Grafico 120, 121, 122, 123), ma non UR (Tabella 30).

Questo accade perché IES.VE è un programma pensato per essere utilizzato per progetti su edifici recenti, che presuppongono impiantistica moderna. La potenza delle UTA presenti nel Portico della Gloria è invece minima.

Tabella 29. Validazione parametri ASHRAE_Dati Temperatura_ *Virtual Building 1*

MBE (%)	4%	Validato se <10%
CV (RMSE) (%)	7%	Validato se <30%
PEARSON	0,92%	Validato se: >0.7 (forte correlazione); 0.3-0.7 (correlazione); <0.3 (debole correlazione)
R ²	0,85	Validato se > 0.5

²⁶⁷ Cfr. Capitolo II.

²⁶⁸ Registro delle immagini. p. 270.

²⁶⁹ I dati simulati rispettano quanto riportato dalla *Guideline 14* ASHRAE [11] per validazione calibrazione software.

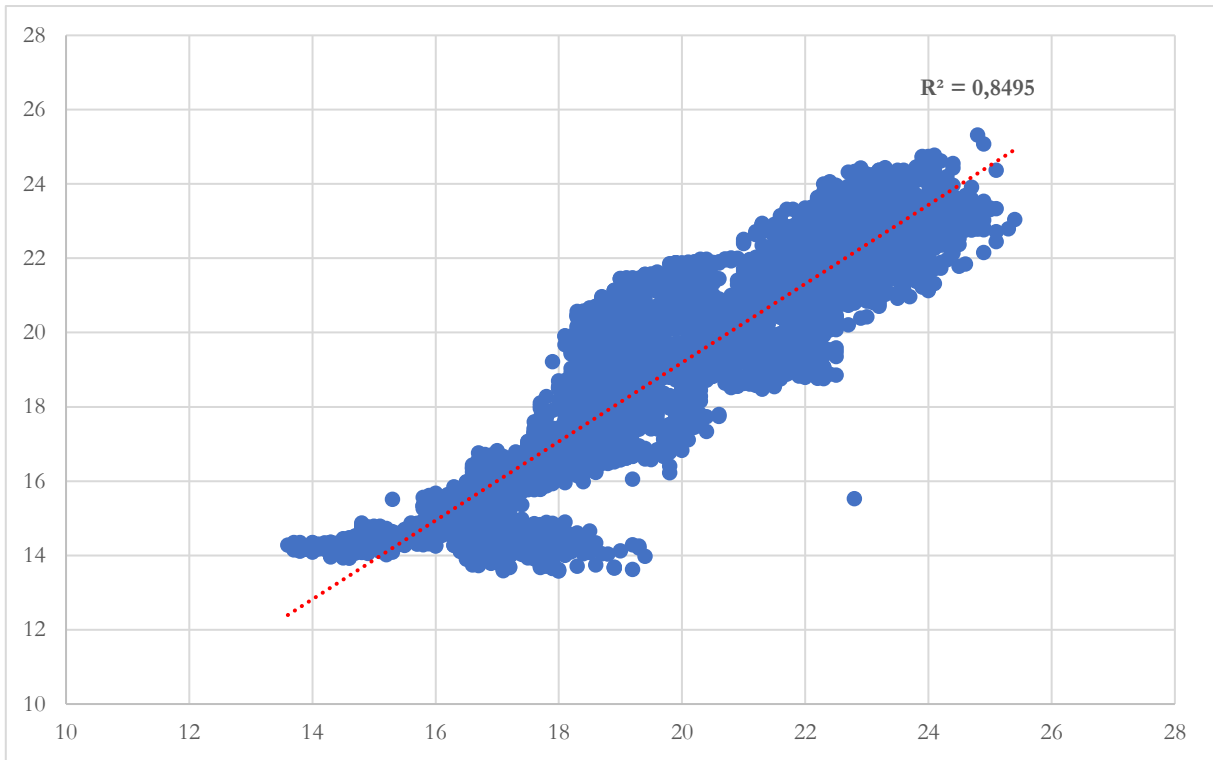


Grafico 120_Validazione temperatura – parametro R^2

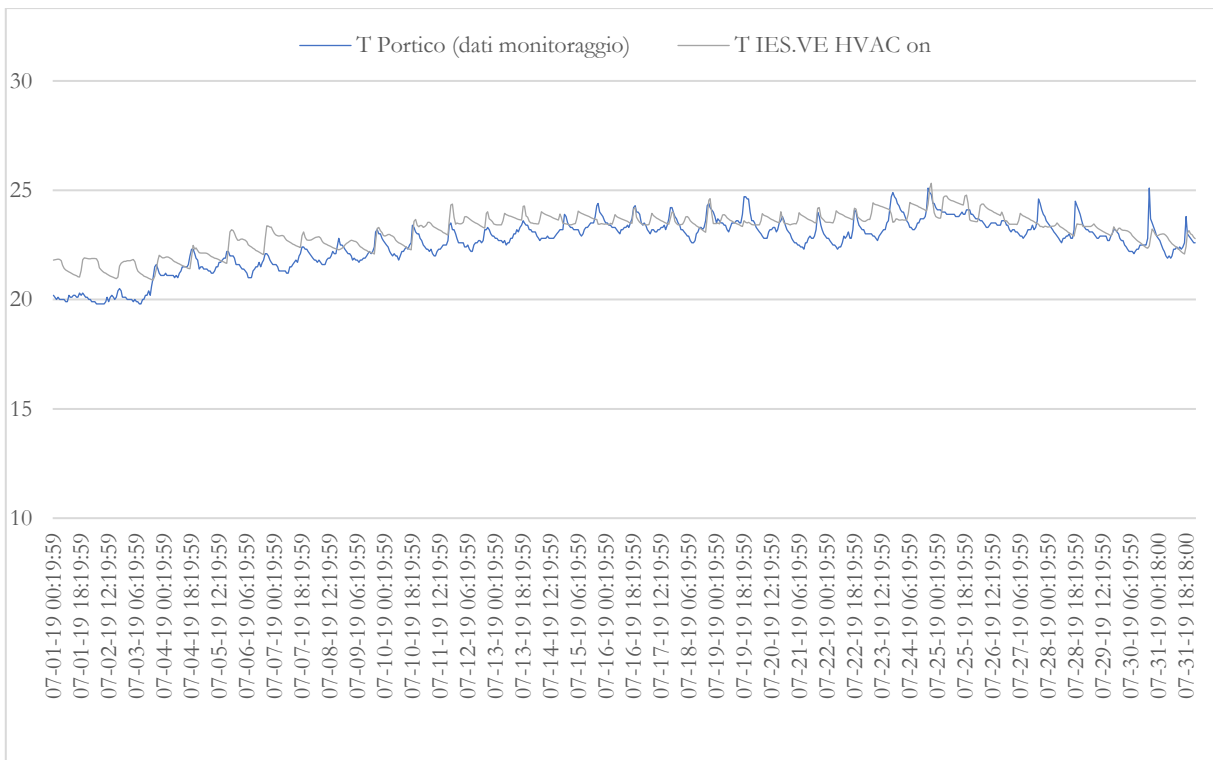


Grafico 121_Validazione temperatura – estrapolazione del mese di luglio

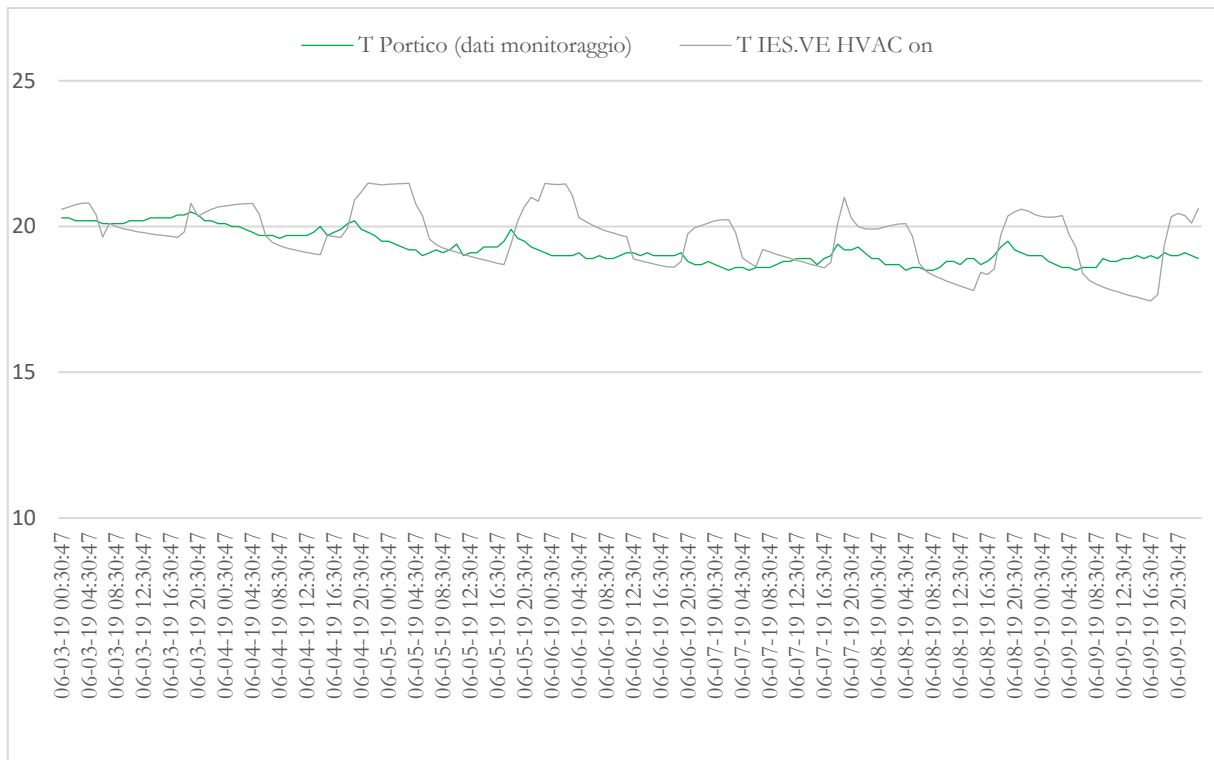


Grafico 122_ Validazione temperatura – estrapolazione del mese di giugno

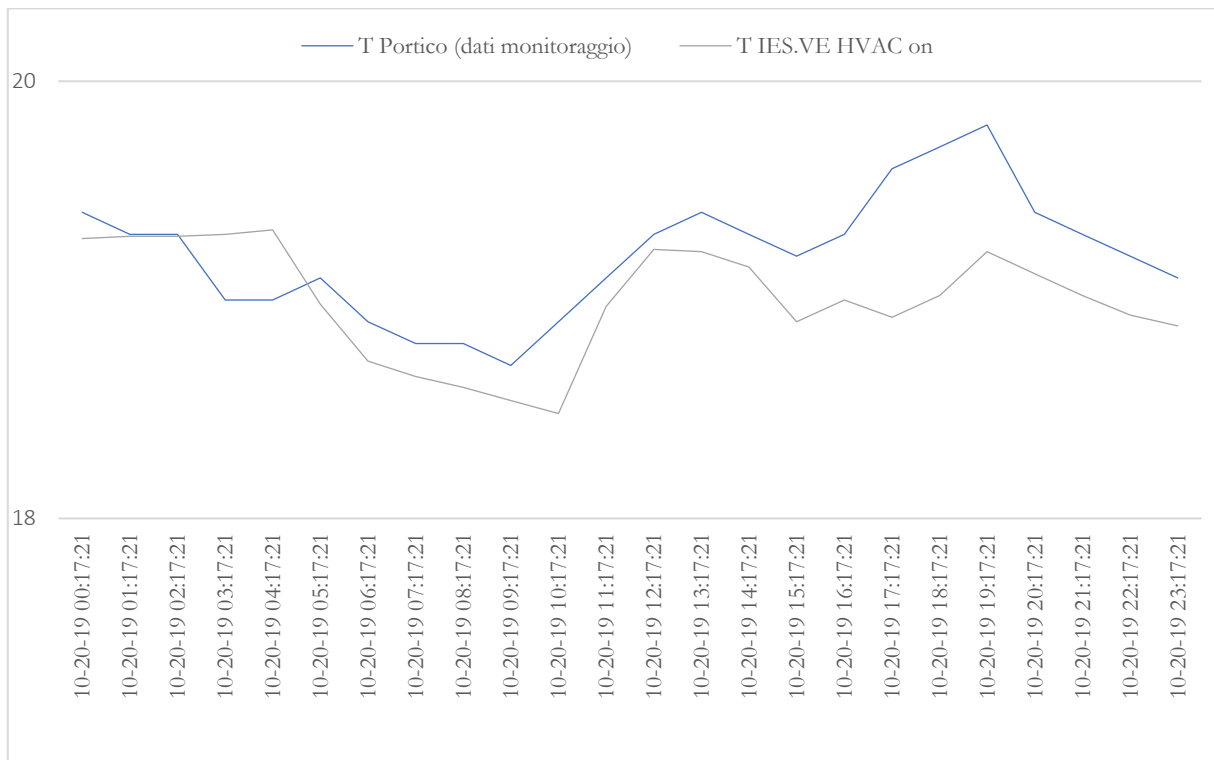


Grafico 123_ Validazione temperatura – estrapolazione del mese di ottobre

Tabella 30. Validazione parametri ASHRAE_Dati Umidità Relativa_Virtual Building 1

MBE (%)	8%	Validato se <10%
CV (RMSE) (%)	14%	Validato se <30%
PEARSON	-14%	Validato se:

		>0.7 (forte correlazione); 0.3-0.7 (correlazione); <0.3 (debole correlazione)
R ²	0,02	Validato se > 0.5

3.26. Confronto dei risultati: stato di fatto - scenario virtuale con UTA off (*Virtual Building 2*)

Allo stato di fatto, come emerso dall'analisi dei dati monitorati²⁷⁰, l'attivazione delle UTA nel Portico della Gloria sembra garantire, principalmente nei periodi estivi e autunnali, valori di umidità relativa e temperatura che rientrano mediamente nei *range* suggerita dalla normativa di riferimento per la conservazione delle policromie originali del Portico della Gloria. Per quanto riguarda i valori di UR, queste condizioni vengono a mancare nei periodi evidenziati in rosso al Grafico 124. Ciononostante, non è ancora possibile affermare che, nelle condizioni attuali (con UTA attive e pannelli divisorii presenti), l'attivazione delle UTA all'interno del Portico della Gloria sia o non sia favorevole per la conservazione preventiva delle sculture policrome in pietra. Per stabilirlo è necessario confrontare i risultati emersi dal monitoraggio e dalla simulazione dello stato di fatto, con quelli emersi invece da uno scenario ipotetico capace di restituire i valori di T e UR che si avrebbero in caso di inattivazione delle UTA all'interno del nartece: *Virtual Building 2*.

Se confrontiamo il *trend* dei dati di UR monitorati dalle sonde *in situ* con quello dei dati simulati dal *Virtual Building 2*, la correlazione²⁷¹ delle due serie di dati coincide maggiormente rispetto a quanto emerso dal confronto tra i dati di UR monitorati e quelli simulati dal *Virtual Building 1* (Tabella 31).

Tabella 31. Indice di correlazione_Dati Umidità Relativa_ *Virtual Building 2*

PEARSON	0,44%	Validato se: >0,7 (forte correlazione); 0,3-0,7 (correlazione); <0,3 (debole correlazione)
---------	-------	---

Il fatto che i dati monitorati quando le UTA erano attive, risultino essere correlati ai dati simulati in uno scenario con UTA inattive, conferma quanto affermato al paragrafo precedente in merito alla scarsa potenza delle UTA attive nel Portico della Gloria. Nonostante tale correlazione dell'andamento dei dati emersa dal calcolo dell'indice Pearson, se riportiamo i dati di UR monitorati *in situ* e quelli simulati dal *Virtual Building 2* su un medesimo grafico (Grafico 124), emerge che i valori che si avrebbero in caso di inattivazione delle Unità di Trattamento Aria sarebbero caratterizzati da forti sbalzi giornalieri e al di fuori dei *ranges* suggeriti dalla UNI 10829:1999 e dal MIBAC.

²⁷⁰ Cfr. 3.23.; 3.23.1.

²⁷¹ Cfr. indice di correlazione Pearson al paragrafo 2.6.

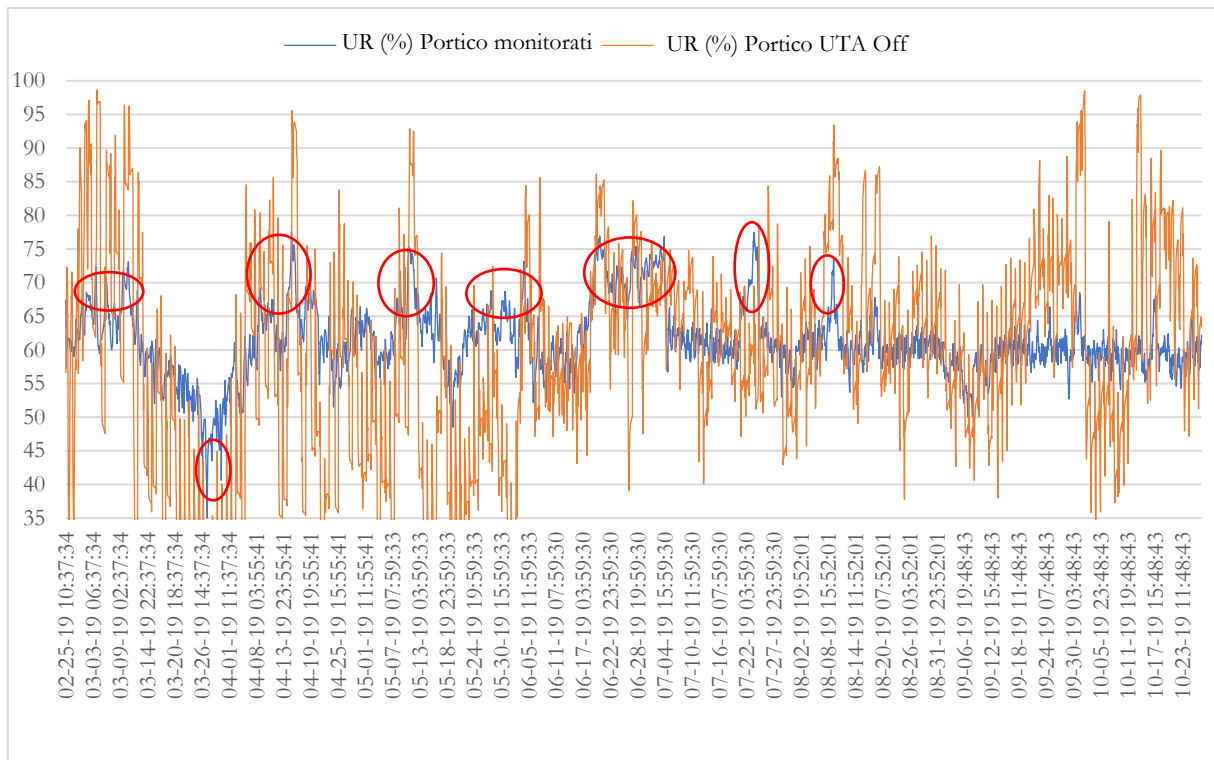


Grafico 124_Confronto umidità relativa – 25/02/2019 – 26/10/2019

Dunque, per quanto concerne i risultati emersi per il parametro dell'umidità relativa, l'attivazione delle UTA sembra favorire un microclima più adatto alla conservazione delle sculture policrome, rispetto a quello che si avrebbe in assenza delle stesse UTA.

Per valutare anche il parametro della temperatura dell'aria è stato riportato un confronto al Grafico 125 tra le simulazioni del parametro della temperatura dell'aria all'interno del Portico della Gloria, emerse dal *Virtual Building 1* e dal *Virtual Building 2*.

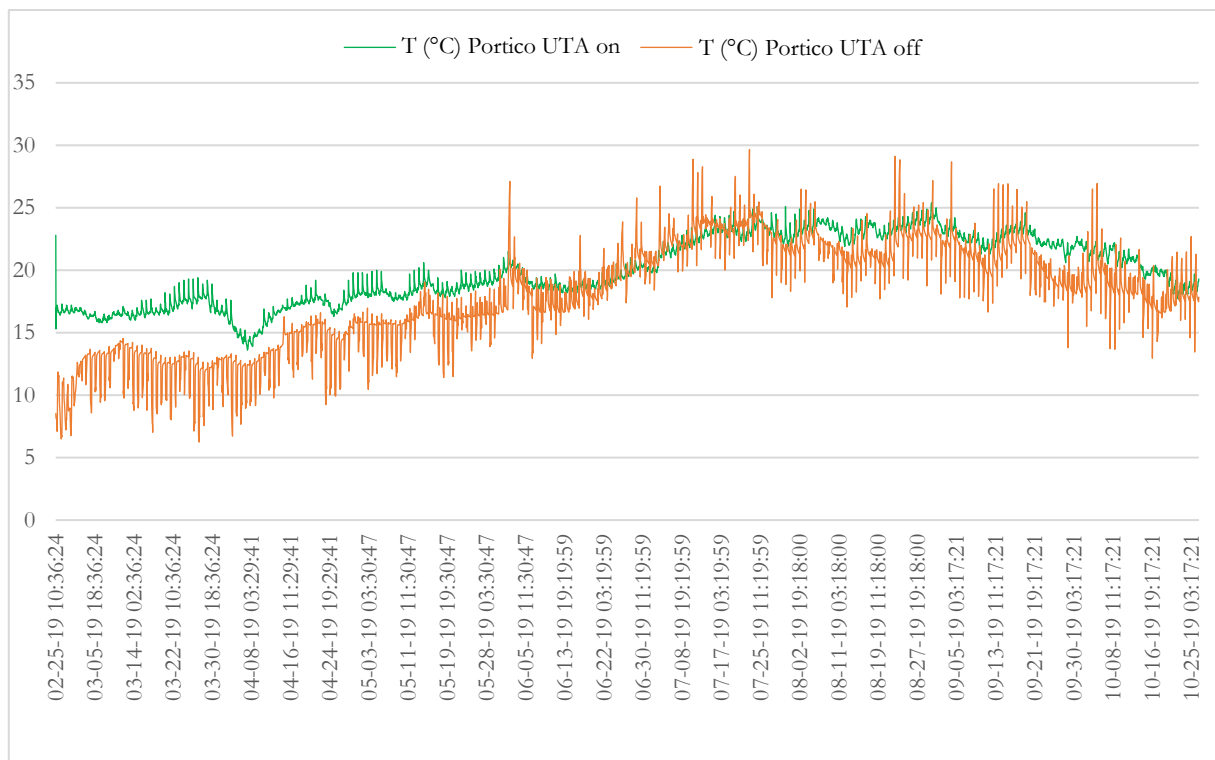


Grafico 125_T: confronto tra *Virtual Building 1* e *Virtual Building 2*

Ne emerge che ipotizzando lo spegnimento delle UTA, le temperature risulterebbero inferiori rispetto ai valori attuali nei mesi di febbraio e marzo, coincidenti da giugno a fine luglio e successivamente coincidenti nella tendenza ma con valori inferiori fino alla fine del monitoraggio (26 ottobre 2019). Questo risultato conferma il fatto che le UTA, durante quasi l'intero periodo di monitoraggio, hanno emesso aria calda (con il fine, come visto al paragrafo 3.23.5., di abbassare i livelli di umidità relativa) causando un aumento della temperatura di circa 3 °C tra febbraio e giugno e di circa 1 °C tra agosto e ottobre, permettendo di mantenere temperature *indoor* superiori ai 15°C anche quando, in caso di inattivazione delle UTA si avrebbero 10°C: l'attivazione delle UTA si conferma dunque favorevole per la conservazione preventiva del Portico della Gloria.

3.27. Ipotesi di scenari futuri: confronto delle simulazioni dei *Virtual Building 3-4-5*

Il volume dell'area della Cattedrale di Santiago de Compostela in cui si trovano le navate, il deambulatorio e l'abside, corrisponde a circa 50000m³. Il volume del nartece è pari a 1300m³ circa. Conoscendo questi dati, è già intuibile come possa comportarsi il microclima *indoor* in caso di rimozione delle partizioni in legno che dividono attualmente questi spazi, con o senza l'attivazione degli impianti. Questo quesito è comunque emerso durante la collaborazione con il Politecnico di Madrid sul presente caso studio, poiché entro l'Anno Santo 2021, tali partizioni verranno realmente rimosse e la Fondazione Cattedrale dovrà valutare se mantenere o rimuovere le due UTA attualmente attive nel Portico della Gloria: si è deciso dunque di procedere con alcune simulazioni virtuali per verificare preventivamente che comportamento microclimatico *indoor* ne conseguirà.

Per poter procedere con tale verifica sono stati simulati tre scenari differenti: il *Virtual Building 3* simula le condizioni microclimatiche *indoor* che si hanno ad oggi nell'area che comprende navate, deambulatorio e abside della Cattedrale; mentre i *Virtual Building 4* e *5* prevedono entrambi la rimozione dei pannelli in

legno e simulano i parametri di T e UR che si otterrebbero in uno spazio unico, costituito dall'unione tra l'ambiente del Portico della Gloria e il corpo delle navate, il deambulatorio e l'abside della Cattedrale. Il *Virtual Building 4* ipotizza però l'inattivazione delle UTA, mentre il *Virtual Building 5* ipotizza che esse siano in funzione.

3.27.1. *Virtual Building 3* e *Virtual Building 4* a confronto

Confrontando i dati ottenuti dal *Virtual Building 3* e il *Virtual Building 4*, ne emerge che sia i valori di T sia quelli di UR sono estremamente coincidenti tra i due scenari (Tabella 32, 33).

Tabella 32. T *Virtual Building 3* – *Virtual Building 4*

MBE (%)	0%	Validato se <10%
CV (RMSE) (%)	11%	Validato se <30%
PEARSON	0,97%	Validato se: >0.7 (forte correlazione); 0.3-0.7 (correlazione); <0.3 (debole correlazione)
R ²	0,95	Validato se > 0.5

Tabella 33. UR *Virtual Building 3* – *Virtual Building 4*

MBE (%)	-14%	Validato se <10%
CV (RMSE) (%)	20%	Validato se <30%
PEARSON	0,97%	Validato se: >0.7 (forte correlazione); 0.3-0.7 (correlazione); <0.3 (debole correlazione)
R ²	0,95	Validato se > 0.5

Emerge che, una volta rimosse le partizioni e spente le UTA attualmente presenti nel Portico (*Virtual Building 4*), ci troveremmo in un unico ambiente il cui microclima risulterebbe pressoché coincidente a quello che attualmente si ha nell'area delle navate (*Virtual Building 3*). Questo risultato è sicuramente dovuto alle rispettive dimensioni dei due ambienti: le caratteristiche microclimatiche dello spazio che include le navate, il deambulatorio e l'abside della Cattedrale, predominerebbero su quelle del narcece.

3.27.2. *Virtual Building 4* e *Virtual Building 5* a confronto

Dal confronto tra il *Virtual Building 4* ed il *Virtual Building 5*, si nota che, in caso di rimozione dei pannelli in legno che separano l'area del Portico della Gloria da quella delle navate, l'influenza delle Unità di Trattamento Aria sarebbe del tutto irrilevante: le due simulazioni riportano infatti dati di T e UR totalmente coincidenti (Tabella 34, 35).

Tabella 34. T *Virtual Building 4 – Virtual Building 5*

MBE (%)	0%	Validato se <10%
CV (RMSE) (%)	0%	Validato se <30%
PEARSON	100%	Validato se: >0.7 (forte correlazione); 0.3-0.7 (correlazione); <0.3 (debole correlazione)
R ²	1	Validato se > 0.5

Tabella 35. UR *Virtual Building 3 – Virtual Building 4*

MBE (%)	0%	Validato se <10%
CV (RMSE) (%)	0%	Validato se <30%
PEARSON	100%	Validato se: >0.7 (forte correlazione); 0.3-0.7 (correlazione); <0.3 (debole correlazione)
R ²	1	Validato se > 0.5

Come era presumibile dai dati riferiti alle dimensioni degli spazi in esame, si evince che una volta rimossi i pannelli divisorii in legno, l'ambiente ottenuto risulterebbe fin troppo ampio perché le UTA potessero avere influenza su di esso.

3.28. Conclusioni

Riprendendo le finalità elencate al paragrafo 3.20.1., si afferma che:

1. la metodologia adottata si è dimostrata replicabile anche per questo caso-studio ed efficace nel permettere di raggiungere le finalità premesse;
2. emerge che ad oggi la presenza dei visitatori incide costantemente sul microclima *indoor* del Portico della Gloria. In che modo? I valori della temperatura dell'aria, nonostante aumentino in presenza dei visitatori, si mantengono sempre al di sotto dei 25°C e superiori ai 15°C (*range* favorevole in termini di conservazione preventiva delle sculture policrome in pietra); mentre i valori dell'umidità relativa -parametro che ha già messo a rischio il Portico della Gloria in passato, rendendo il suo restauro improrogabile- superano spesso la soglia del 65% (suggerita dalle normative di riferimento) a causa della presenza dei visitatori. Si dovrebbe valutare una riduzione del numero di persone per ogni gruppo in visita;
3. dopo aver compreso il profilo d'uso e i *set point* delle UTA presenti all'interno del Portico della Gloria, sono state messe a confronto le condizioni microclimatiche del Portico della Gloria attuali e quelle che si avrebbero in caso di spegnimento delle UTA (ottenute tramite la simulazione di uno scenario virtuale). I risultati hanno mostrato che l'attuale attivazione delle UTA ha un ruolo favorevole in termini di conservazione preventiva: permette di contenere le oscillazioni di umidità relativa e temperatura dell'aria che si avrebbero in loro assenza e mantiene i valori della

temperatura *indoor* al di sopra dei 15°C quando, altrimenti, si avrebbero valori di T attorno ai 10°C. Dunque, nello scenario odierno²⁷² si sconsiglia lo spegnimento delle UTA all'interno del Portico della Gloria;

4. la simulazione virtuale ha permesso di prevedere il microclima che si otterrebbe in due scenari futuri: 1. rimozione dei pannelli divisorii con UTA inattive²⁷³; 2. rimozione dei pannelli divisorii con UTA attive²⁷⁴. In entrambi i casi, una volta rimossi i pannelli, l'area del Portico della Gloria diventerebbe un *unicum* con quella delle navate, del deambulatorio e dell'abside della Cattedrale ed in ambedue gli scenari il microclima *indoor* di questo nuovo unico spazio corrisponderebbe a quello che attualmente già caratterizza la zona delle navate, del deambulatorio e dell'abside. Questo risultato è sicuramente dovuto alle dimensioni degli spazi in esame, essendo il nartece uno spazio di circa 1300m³, mentre la zona che comprende le navate, il deambulatorio e l'abside è pari a circa 50000m³. Tramite la simulazione virtuale è stato quindi confermato quanto poteva essere solo ipotizzato e questo ci permette di giungere alla conclusione che, entro il prossimo Anno Santo (25 luglio 2021), quando verranno rimosse le partizioni in legno che dividono questi ambienti, le UTA potranno essere rimosse, perché la loro influenza sul controllo del microclima sarebbe, a quel punto, irrilevante e comporterebbe un inutile spreco energetico.

²⁷² Caratterizzato dalla presenza dei pannelli divisorii in legno.

²⁷³ Cfr. *Virtual Building* 4.

²⁷⁴ Cfr. *Virtual Building* 5.

Riferimenti

- [1] R. Suárez, A. Alonso, J.J. Sendra, Intangible cultural heritage: The sound of the Romanesque cathedral of Santiago de Compostela, *J. Cult. Herit.* 16 (2015) 239–243. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2014.05.008>.
- [2] D. Gandini, *Il portico della gloria Lourdes, Santiago de Compostela, Finisterre a piedi*, Bologna, 2004.
- [3] J.M. García Iglesias, *Catedral de Santiago e o barroco, a: (1657-1751)*, 1990. <https://doi.org/8485665201>.
- [4] C. Ruckert, *La escultura medieval en Francia y España*, 2010.
- [5] B. Ma Castro Fernández, *Francisco Pons Sorolla: arquitectura y restauración en Compostela (1945- 1985)*, Santiago de Compostela, 2013.
- [6] B. Nicolai, K. Rheidt, *Nuevas investigaciones sobre la historia de la construcción de la catedral de Santiago de Compostela, Ad Limina. vol.1 (2010)*. ISSN 2171-620X.
- [7] H. Karge, *De la portada románica de la transfiguración al pórtico de la gloria. Nuevas investigaciones sobre la fachada occidental de la Catedral de Santiago de Compostela*, BSAA Arte. LXXV (2009).
- [8] MIBACT, Ref.B) MIBACT, Ministerial Decree, *Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei*, 10th May 2001, (2001).
- [9] UNI – Ente Nazionale Italiano di Unificazione (1999) UNI 10829:1999 *Beni di interesse storico e artistico - Condizioni ambientali di conservazione - Misurazione ed analisi*.
- [10] Vaisala oyj, *Humidity conversion formulas – Calculation formulas for humidity*, in: *Humidity Convers Formulas*, 2013, p.16.
- [11] ASHRAE. *Guideline 14, Measurement of Energy and Demand Savings*. Technical report, American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, Georgia, (2014).

Capitolo IV
Indici di Rischio Microclimatico

4.1. Il rischio microclimatico

Un importante esito di questa tesi è la definizione di due indici [1]: *Heritage Microclimate Risk* (HMR), indice di rischio microclimatico; *Predicted Risk of Damage* (PRD), indice di previsione di danno.

4.1.1. Finalità della ricerca

Il capitolo corrente presenta:

1. la descrizione di due nuovi strumenti:

- a. un indice di rischio, *Heritage Microclimatic Risk* (HMR), diviso in HMR_{st} e HMR_{hs} ;
- b. un indice di valutazione della probabilità di danno sui manufatti: *Predicted Risk of Damage* (PRD);

2. l'applicazione dei due indici a un caso studio reale: la Reggia di Venaria Reale, Torino, Italia.

Gli indici HMR e PRD sono correlati tra loro e ci permettono di valutare preventivamente, in architetture di qualsiasi categoria di destinazione (musei, librerie, edifici residenziali, ecc.), sia il -più generico- livello di rischio microclimatico che caratterizza un'ambiente *indoor* (es. una stanza): HMR; sia la -più specifica- previsione di rischio di danno a cui queste condizioni microclimatiche espongono determinate categorie di materiali, conservate in quello stesso ambiente: PRD.

Il punto di forza degli indici HMR e PRD è la messa in relazione tra il microclima, il rischio ed il danno: l'applicazione di questi indici permette di individuare per tempo specifiche condizioni di rischio microclimatico ed il conseguente rischio di danno a cui il Patrimonio è esposto, dimostrandosi strumenti utili a garantire la conservazione preventiva di quest'ultimo. Inoltre, entrambi gli indici possono essere calcolati a partire da una base dati monitorata o simulata che può includere da 1 a infiniti parametri microclimatici.

A chiarimento: all'interno di questo capitolo si riporta il caso-studio della sala 33 della Reggia di Venaria Reale esclusivamente per dimostrare l'utilità degli indici HMR e PRD applicati ad un caso reale.

4.2. Metodologia

4.2.1. Indice *Heritage Microclimate Risk* (HMR)

L'indice HMR è definito come rischio microclimatico del patrimonio storico artistico e culturale e consente di valutare il rischio, legato esclusivamente alle condizioni microclimatiche *indoor*, a cui il *Cultural Heritage* è esposto all'interno di un'ambiente. Il risultato espresso da questo indice può dipendere dalla geometria dell'edificio, dall'attivazione degli impianti, dal clima *outdoor*, dall'affollamento dello spazio in esame, ecc., perché i valori registrati dal monitoraggio (o emersi da una simulazione virtuale) dipendono da tutti questi fattori.

Il range dell'indice HMR va da -1 a +1, dove sia -1 sia +1 rappresentano due condizioni estreme di rischio: a valori di HMR = -1 e HMR = +1 corrisponde un microclima estremamente rischioso per la conservazione del Patrimonio, più ci allontaniamo da questi valori, avvicinandoci allo 0, più il livello di rischio diminuisce. Di seguito si riporta la scala di riferimento (Tabella 36).

Tabella 36. Range Heritage Microclimate Risk

HMR	-1,00	-0,80	-0,60	-0,40	-0,20	0,00	+0,20	+0,40	+0,60	+0,80	+1,00
Livello di rischio	Max	Elevato	Medio	Moderato	Debole	Min	Debole	Moderato	Medio	Elevato	Max

Questa suddivisione per livelli di rischio (Tabella 36) ci consente di monitorare le varie entità del rischio, considerando non solo le condizioni di rischio estreme (minimo e massimo: 0; ± 1), ma anche le condizioni di rischio intermedie: debole (-0,20; +0,20), moderato (-0,40; +0,40), medio (-0,60; +0,60), elevato (-0,80; +0,80).

Il calcolo di HMR è composto dalla somma di HMR_{env} (HMR environmental²⁷⁵) e HMR_{osc} (HMR oscillation²⁷⁶), che calcolano rispettivamente:

5. Il rischio dovuto ai valori dei parametri microclimatici;
6. Il rischio dovuto alle oscillazioni giornaliere dei parametri microclimatici.

Come già citato, la norma EN 15757 [3], 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 questa logica abbiamo stabilito che HMR si distingue in:

1. HMR-*standard* (HMR_{st}), dove i valori di rischio minimo ($HMR_{env,low}^{st}$ and Δosc_{low}^{st})²⁷⁷ e massimo ($HMR_{env,high}^{st}$ and Δosc_{high}^{st})²⁷⁸ di riferimento sono definiti su base empirica dai range riportati dagli standard dalla norma UNI 10829 [2];
2. HMR-*historical* (HMR_{hs}), dove i valori di rischio minimo ($HMR_{env,low}^{hs}$ and Δosc_{low}^{hs})²⁷⁹ e massimo ($HMR_{env,high}^{hs}$ and Δosc_{high}^{hs})²⁸⁰ di riferimento sono definiti dai dati della campagna di monitoraggio in sito o della simulazione virtuale, i cui valori rappresentano il *historical climate*²⁸¹ dell'ambiente indagato.

L'indice HMR_{st} viene applicato agli ambienti che non presentano particolari o anomale situazioni microclimatiche, o in cui si sono verificati danni ai manufatti conservati; mentre l'indice HMR_{hs} si applica nei casi in cui non sono presenti danni da almeno un decennio nonostante le condizioni microclimatiche

²⁷⁵ Traduzione: ambientale.

²⁷⁶ Traduzione: oscillazione.

²⁷⁷ Cfr. formule (10), (11).

²⁷⁸ Cfr. formule (10), (11).

²⁷⁹ Cfr. formule (10), (11).

²⁸⁰ Cfr. formule (10), (11).

²⁸¹ Cfr. norma EN 15757 e paragrafo 1.1.3.

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: ossia casi in cui i beni si sono adattati al microclima storico, indipendentemente da quelli che sarebbero gli standard suggeriti dalle normative di riferimento, per la loro conservazione.

HMR è calcolato secondo la formula (9)

$$HMR = (HMR_{env} + HMR_{osc})/2 \quad (9)$$

HMR_{env} è calcolato secondo la formula (10)

$$HMR_{env} = 1 - \left[\left(\frac{HMR_{e,high} - HMR_{env,data}}{HMR_{e,high} - HMR_{e,low}} \right) \cdot 2 \right] \quad (10)$$

Dove:

$HMR_{env,data}$ è dato dal rapporto $\left(\frac{M_{env,data}}{N} \right)$;

$M_{env,data}$ è la sommatoria dei dati registrati durante la campagna di monitoraggio per ogni variabile considerata (es. temperatura dell'aria e umidità relativa);

N è il totale dei valori registrati durante la campagna di monitoraggio per ogni variabile considerata;

$HMR_{e,high}^{st}$ valore massimo da standard (UNI 10829) moltiplicato per (1+0,2). Questo valore (0,2) è l'intervallo della tabella 36, la Tabella 37 riporta un esempio del relativo calcolo;

$HMR_{e,high}^{hs}$ valore massimo da clima storico (EN 15757): si basa sui dati del monitoraggio o di una simulazione virtuale;

$HMR_{e,low}^{st}$ valore minimo da standard (UNI 10829) moltiplicato per (1-0,2);

$HMR_{e,low}^{hs}$ valore minimo da clima storico (EN 15757): si basa sui dati del monitoraggio o di una simulazione virtuale.

Si specifica che per definire $HMR_{env,high}^{st}$ e $HMR_{env,low}^{st}$ viene moltiplicato rispettivamente il valore massimo e minimo da standard (UNI 10829: 1999) per (1±0,2) per fare sì che questi valori ($HMR_{env,high}^{st}$ e $HMR_{env,low}^{st}$) corrispondano entrambi al livello di rischio massimo (Tabella 36) rispettivamente: +1 e -1. I valori massimo e minimo da standard (UNI 10829: 1999), invece, corrispondono ad un livello di rischio moderato, essendo i valori estremi di un range consigliato dalla normativa per la conservazione dei materiali.

Dal calcolo di $HMR_{env,high}^{hs}$ e $HMR_{env,low}^{hs}$ sono esclusi gli *outliers*, ossia quei valori del monitoraggio *indoor* registrati con una frequenza inferiore al 5% e superiore al 95%. Si riporta un esempio di cosa si intende con il termine “*outliers*” al paragrafo 4.3. (Grafico 126, 127).

Si specifica inoltre che HMR_{env} è da considerarsi come causa predominante del rischio, tra HMR_{env} e HMR_{osc} . Infatti, se $HMR_{env} > 0$, il segno dell'indice HMR risultante sarà “+”; se $HMR_{env} < 0$, il segno sarà “-”.

HMR_{osc} è calcolato secondo la formula (11)

$$HMR_{osc} = 1 - \left[\left(\frac{\Delta osc_{high} - HMR_{osc,data}}{\Delta osc_{high} - \Delta osc_{low}} \right) \cdot 2 \right] \quad (11)$$

Dove:

$HMR_{osc,data}$ è dato dal rapporto tra $\left(\frac{\Delta M_{osc,data}}{N} \right)$

$\Delta M_{osc,data}$ è la sommatoria delle oscillazioni giornaliere registrate durante la campagna di monitoraggio per ogni variabile considerata (es. temperatura dell'aria e umidità relativa), seguendo la formula (12);

N è il totale dei valori registrati durante la campagna di monitoraggio per ogni variabile considerata;

Δosc_{high}^{st} valore massimo di oscillazione giornaliera da standard (UNI 10829) moltiplicato per (1+0,2); segue l'esempio riportato alla tab 2;

Δosc_{high}^{hs} valore massimo di oscillazione giornaliera da clima storico (EN 15757): si basa sui dati del monitoraggio o di una simulazione virtuale;

Δosc_{low}^{st} valore minimo di oscillazione giornaliera da standard (UNI 10829) moltiplicato per (1-0,2);

Δosc_{low}^{hs} valore massimo di oscillazione giornaliera da clima storico (EN 15757): si basa sui dati del monitoraggio o di una simulazione virtuale;

$$\Delta M_{osc,data} = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^{24} (X_{day,k,hourj} - X_{day(k+1),hourj}) \quad (12)$$

Dove:

X è la variabile considerata (es. temperatura)

k è il numero dei giorni della campagna di monitoraggio, dal giorno 1 al giorno n

j sono le ore di una giornata, dalle 0:00 alle 24:00

Tabella 37. Esempio di calcolo di $HMR_{env,high}^{st}$ e Δosc_{high}^{st}

		UNI 10829	HMR^{st}	UNI 10829 daily oscillation	Δosc^{st}
Valori "low"	T	10°C	8.00	-0.75*	-0.60
	RH	20%	16.00	-3.00%**	-2.40%
Valori "high"	T	25°C	30.00	0.75	0.60
	RH	65%	78.00	3.00%	2.40%

*nella UNI 10829 le escursioni giornaliere della temperatura corrispondono a $\Delta T_{max} = 1.5^\circ C$, per questo i valori *low/high* sono compresi tra $\pm 0.75^\circ C$.

*nella UNI 10829 le escursioni giornaliere dell'umidità relativa corrispondono a $\Delta HR_{max} = 6\%$, per questo i valori *low/high* sono compresi tra $\pm 3\%$.

4.2.2. Indice *Predicted Risk of Damage* (PRD)

L'indice PRD è definito come previsione di rischio di danno e valuta la probabilità di rischio di danno che le condizioni microclimatiche possono avere su specifici materiali conservati in un ambiente *indoor*. PRD è calcolato in percentuale e si specifica che il rischio minimo espresso dall'indice PRD equivale al 5% (non allo 0%), perché nessun locale *indoor* è privo di rischio di danno per la conservazione di qualsiasi tipologia di materiale.

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, ...).

L'equazione per il calcolo di PRD è stata ottenuta su base empirica dalla formula che definisce PMV, riportata nella EN ISO 7730 [4].

$$PRD = 1 - 0.95 \cdot e^{(-a \cdot HMR^4 - b \cdot HMR^2)} \quad [\%] \quad (13)$$

Dove:

HMR è calcolato secondo la formula (9)

- a è un esponente -definito nella tabella 38- 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 -definito nella tabella 38- che definisce l'assenza di rischio di danno dovuto al persistere del bene in locali dove sono presenti i valori HMR medio/nulla.

Inoltre, i valori di “a” e “b” definiscono il rischio di danno differenziato per categorie di materiali (Tabella 38) e sono stati determinati su base empirica dagli standard riportati dalla norma UNI 10829 e dalla EN 15757. Infatti, nella UNI 10829 viene riportata una distinzione per categorie di beni e vengono specificati i rispettivi parametri conservativi di riferimento. Le categorie considerate sono: “materiali/oggetti di natura inorganica”; “materiali/oggetti di natura organica”; “oggetti misti”, in cui vengono indicati valori e gradienti termogrometrici per ogni categoria, a seconda delle tipologie dei materiali.

Nello specifico, i tipi di materiali riportati nella norma sono:

1. materiali/ oggetti di natura organica: tessuti, velari, tendaggi, animali e organi anatomici conservati in formalina, pellicce, dipinti su tela, pitture a olio su tela e canavaccio, documenti archivistici su carta o pergamena, ...;
2. materiali/ oggetti di natura inorganica: porcellane, pietre, rocce, terracotta, metalli, vetri instabili, ori, gesso, ...;
3. oggetti misti: pittura murale, affreschi, sinopie, avori, fibre sintetiche, fotografie, nastri magnetici, ...

Per i valori di “a” e “b”, si è deciso di estrapolare dalle categorie riportate sopra, le seguenti: mobili, dipinti, libri e beni archivistici, tenendo conto delle caratteristiche delle collezioni museali e degli oggetti custoditi negli edifici storici.

Tabella 38. Valori di “a” e “b” per materiale

	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

Questi valori definiscono la curva delle gaussiane capovolte (cfr. Grafico 128, 129).

4.3. Applicazione al caso-studio di Venaria Reale.

Al fine di illustrare come gli indici HMR e PRD possano essere applicati a un caso reale, si è deciso di calcolarli per la sala 33 della Reggia di Venaria Reale, già presentata al Capitolo III. Per questa sala, situata al piano nobile di una partizione dell’edificio, adiacente alla Galleria Grande, dal lato ovest (Figura 89), disponiamo dei valori di T e UR di una campagna di monitoraggio di 10 anni: svolta dal CC&R dal 07/08/2007 e al 16/03/2017.

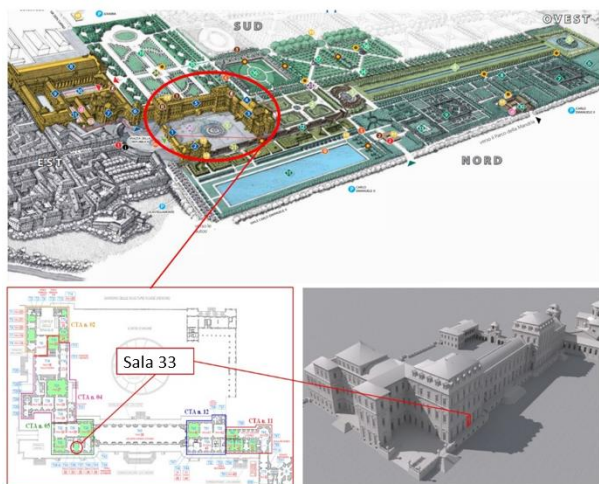


Figura 89_Venaria Reale, sala 33²⁸²

Grazie ai valori dell’anno-tipo²⁸³ a disposizione per la sala 33, è stato possibile procedere con l’individuazione e l’eliminazione dei sopraccitati “outliers”, rilevati in questo ambiente: riportati ai grafici 125 e 126. Con il termine “outliers”, ci si riferisce a dei valori anomali che risultano molto differenti rispetto alla maggior parte dei valori registrati. Sono infatti facilmente individuabili in un grafico a dispersione, ad

²⁸² Registro delle immagini. p. 270.

²⁸³ Calcolato tramite la procedura riportata in [5]. Cfr. paragrafo 3.4.1.

esempio, poiché i punti corrispondenti a questi valori (come riportato chiaramente al grafico 126) si collocano in una posizione distante rispetto alla “nuvola” di punti.

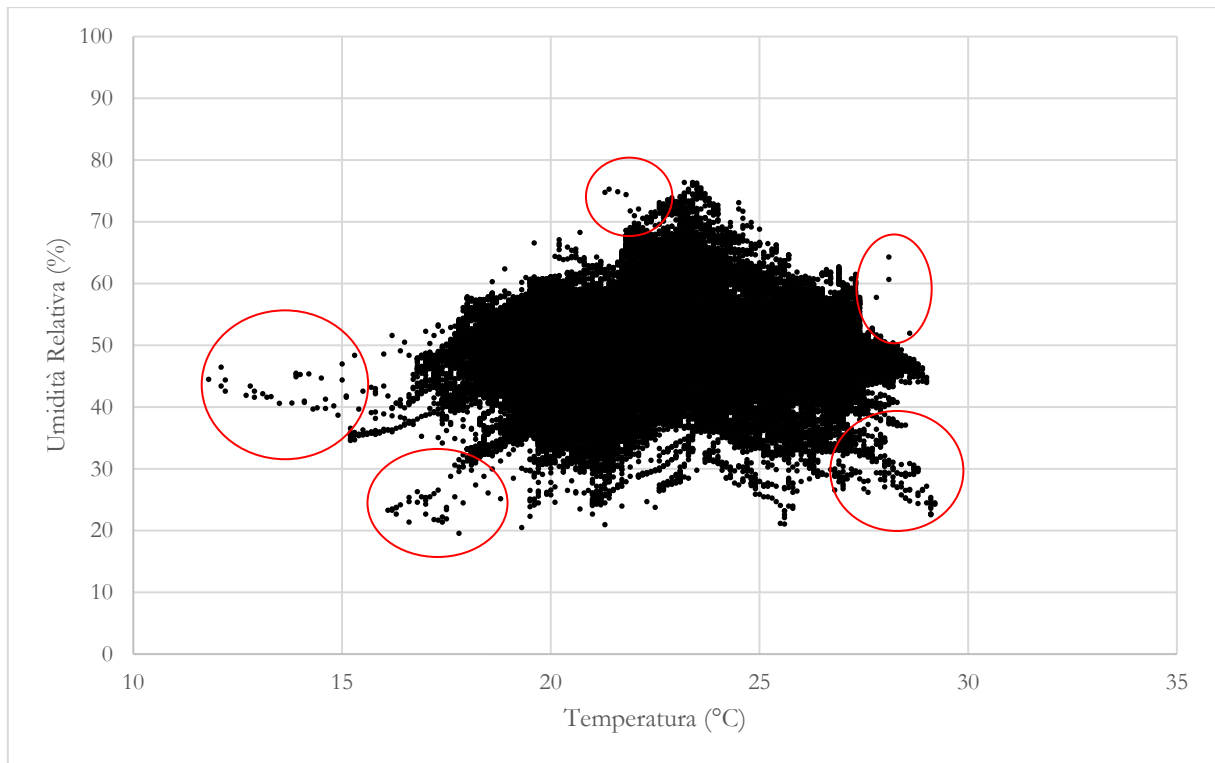


Grafico 126_Sala 33, Reggia di Venaria Reale - Grafico a dispersione: T (°C); UR (%).

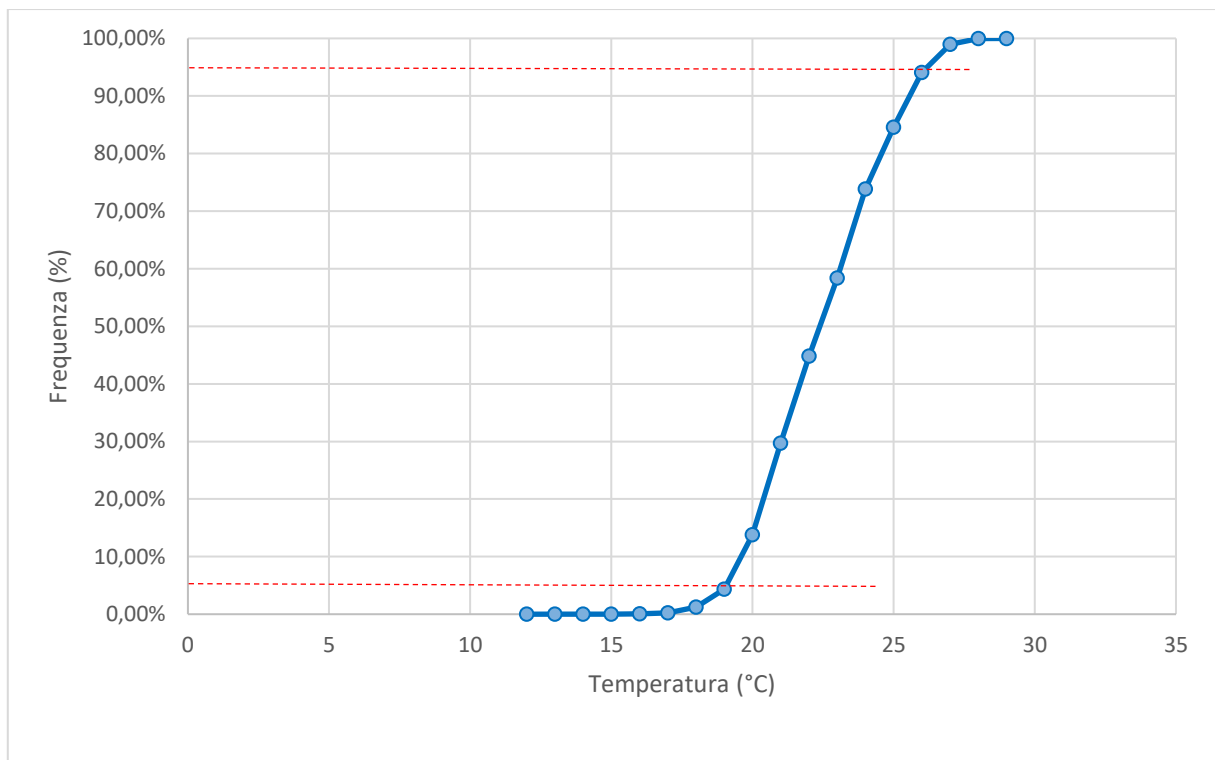


Grafico 127_Sala 33, Reggia di Venaria Reale. Cumulative Frequency T (°C).

L'influenza dei valori anomali dipende dalla loro posizione rispetto agli altri dati (punti): si riporta di seguito un esempio di influenza di un dato anomalo sul coefficiente di correlazione R^2 tra due variabili²⁸⁴.

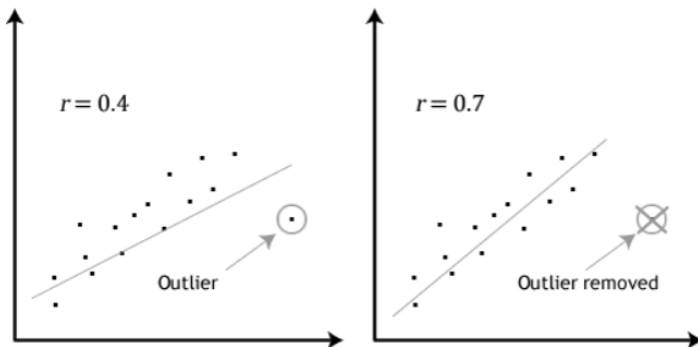


Figura 90_Influenza dei valori anomali²⁸⁵

La correlazione tra le serie di dati messe a confronto nella Figura 90, corrisponderebbe correttamente a: $R^2 = 0,7$ (indice di forte correlazione); mentre, se non viene eliminato il valore anomalo, R^2 risulta essere pari a $0,4$ (indice di scarsa correlazione)²⁸⁶.

4.3.1. Risultati: $HMR_{historical}$ e PRD

Una volta individuati ed eliminati i valori anomali dai dati dell'anno-tipo della sala 33, è stato calcolato il valore di HMR_{hs} , che risulta essere pari a $-0,08$. I risultati di HMR_{env} historical e HMR_{osc} historical sono rispettivamente pari a $-0,09$ e $+0,07$. Il Grafico 128 riporta i conseguenti risultati di PRD, calcolato per diverse categorie di materiali.

²⁸⁴ Per approfondimenti vedi: [6] [7] [8].

²⁸⁵ Registro delle immagini. p. 270.

²⁸⁶ Il coefficiente di correlazione R^2 è presentato al paragrafo 2.6.

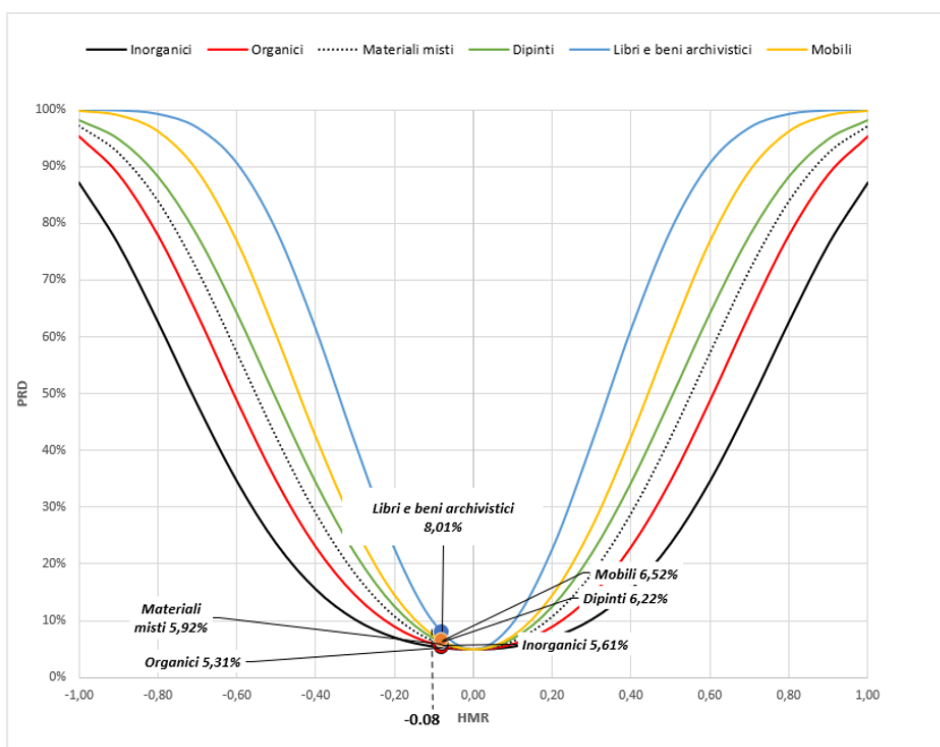


Grafico 128_Risultati indice PRD per la Sala 33 in base al valore di $HMR_{hs} = -0,08$

Dal Grafico 128 si osserva che il valore di $HMR_{hs} = -0,08$ corrisponde a un ambiente con rischio microclimatico minimo (cfr. tabella 36) e ridotta probabilità di danno: PRD è inferiore al 10% per tutti i materiali custoditi nella sala 33²⁸⁷. Questo risultato coincide con quanto emerso dai controlli settimanali effettuati sin dal 2007 da alcuni restauratori del CC&R, secondo i quali tutt'oggi non vi sono segni di degrado sulle opere conservate nella sala 33²⁸⁸. Inoltre, PRD è stato calcolato anche per la categoria “libri e beni archivistici”, per verificare se questa sala sarebbe adatta alla conservazione di questa tipologia di materiali, nonostante attualmente all'interno della sala 33 non vi siano collezioni di questo tipo. Ne emerge che il rischio di danno legato al microclima *indoor* al quale tale categoria sarebbe esposta sarebbe minimo: 8,01%.

4.3.2. Risultati: $HMR_{standard}$ e PRD

Per le ragioni spiegate al paragrafo 4.2.1., in questo caso potremmo fermarci al calcolo di HMR_{hs} , anziché calcolare HMR_{st} (i beni conservati nella sala 33 sono caratterizzati dal medesimo microclima da 10 anni e i beni ivi conservati non presentano segni di degrado). Ciononostante, si è deciso di procedere anche con il calcolo di HMR_{st} perché nel presente capitolo, questo caso-studio ha un ruolo esemplificativo e vuole mostrare come siano concretamente applicabili gli indici HMR_{st} , HMR_{hs} e PRD qui descritti.

I risultati di HMR_{env} standard e HMR_{osc} standard sono rispettivamente +0,13 e +0,00. Il valore di HMR_{st} per la sala 33 è pari a +0,07. Il Grafico 129 riporta i conseguenti risultati di PRD, calcolato per le varie categorie di materiali.

²⁸⁷ Cfr. apparato 1 e paragrafo 3.2.4.

²⁸⁸ Si tratta di semplici ispezioni visive effettuate sempre dal medesimo *team* del CC&R di Venaria Reale, che mantiene aggiornato un report di riferimento.

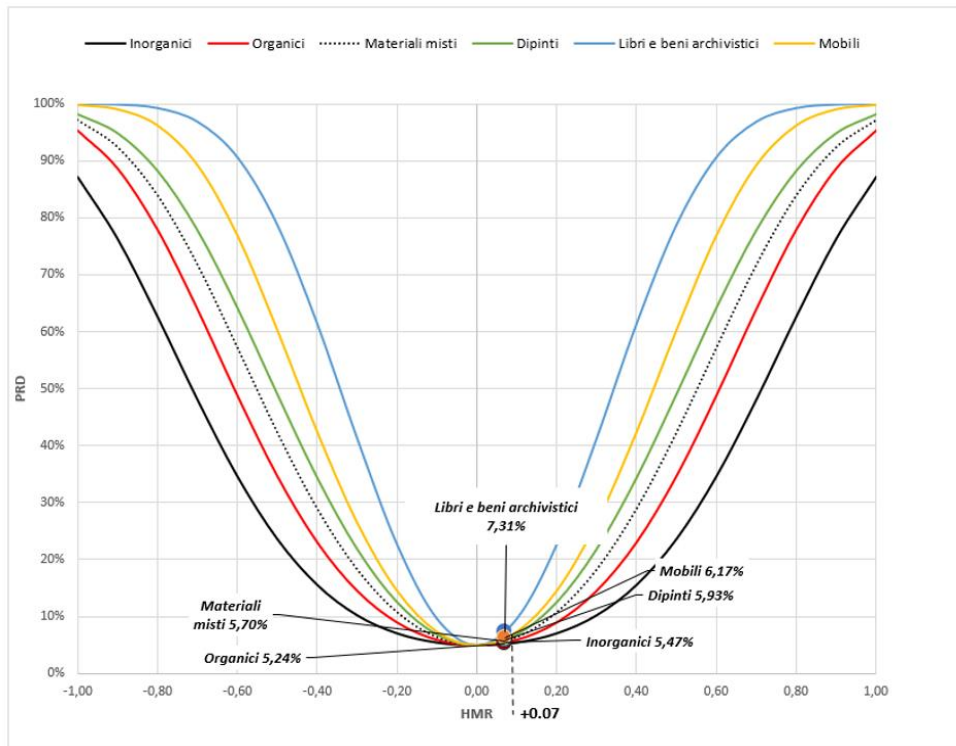


Grafico 129_Risultati indice PRD per la Sala 33 in base al valore di $HMR_{st} = +0,07$

Nel Grafico 129 si osserva che anche il valore di $HMR_{st} = +0,07$, come quello di HMR_{hs} , corrisponde a un ambiente con rischio microclimatico minimo (cfr. tabella 36) e una ridotta probabilità di danno (PRD inferiore all'8%) per tutti i materiali custoditi nella sala 33.

4.4. Discussione dei risultati e conclusioni

Gli indici HMR_{hs} , HMR_{st} e PRD applicati al caso-studio della sala 33 di Venaria Reale restituiscono valori corrispondenti ad un basso rischio microclimatico e di danno. Questo risultato è dovuto al fatto che i valori del *historical climate* che ha caratterizzato questa sala dal 2007 al 2017, coincidono con quelli degli standard definiti dalla UNI 10829:1999. Infatti, come verificato al Capitolo III, sin dal 2007 l'andamento dei parametri microclimatici di questa sala dipende direttamente dagli impianti di condizionamento e ventilazione dell'aria, che sono stati a loro volta impostati secondo tali standard.

Gli indici presentati permettono di verificare preventivamente sia il livello di rischio esercitato dal microclima in un determinato ambiente *indoor* (es. la sala 33) nei confronti del patrimonio storico artistico e culturale; sia il rischio di danno a cui sono esposti gli specifici materiali che compongono tale patrimonio. Facendo un esempio in analogia con il campo medico, possiamo dire che:

1. HMR è un indice che ci consente di definire la relazione tra i dati microclimatici *indoor* e il rischio di influenza, calcolato su un gruppo di persone all'interno di una stanza;
2. PRD ci consente di calcolare che, quando all'interno di una stanza le condizioni microclimatiche sono tali per cui il rischio di prendere l'influenza per chi è in quella sala equivale ad X (HMR), la percentuale di malati di influenza è Y% tra i giovani, ma Z% tra gli anziani.

In questa analogia “X” rappresenta HMR; “Y%” e “Z%” rappresentano l’indice PRD: si ottengono due percentuali differenti per la “categoria” giovani e anziani (la tabella 38 riporta la distinzione per categorie di materiali, in questo caso la distinzione avviene in analogia, per fasce di età).

Infine, il calcolo degli indici HMR e PRD, applicati alla sala 33 della Reggia di Venaria Reale, mostra come i due indici potrebbero essere utilizzati nei processi decisionali per la collocazione o per il prestito -permanente o temporaneo- di collezioni, opere d’arte, mobilio, ecc., da un ambiente *indoor* ad un altro, perché consentono di verificare se le condizioni microclimatiche di uno specifico ambiente siano o meno adeguate per la conservazione di determinati beni, anche nel caso in cui essi si siano acclimatati per anni in specifiche condizioni microclimatiche (indice HMR_{hs}), non per forza corrispondenti a quelle suggerite dagli standard (indice HMR_{st}).

Riferimenti

- [1] K. Fabbri, A. Bonora, Two new indices for preventive conservation of the cultural Heritage: Predicted Risk of Damage and Heritage Microclimate Risk., *Journal of Cultural Heritage*. 47 (2021) 208-217. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.09.006>.
- [2] UNI – Ente Nazionale Italiano di Unificazione (1999) UNI 10829:1999 Beni di interesse storico e artistico - Condizioni ambientali di conservazione - Misurazione ed analisi.
- [3] CEN – European Committee for Standardization, EN 15757:2010, Conservation of Cultural Property. Specifications for temperature and relative humidity to limit climate-induced mechanical damage in organic hygroscopic materials, (2010).
- [4] P. O. Fanger, *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*, 1970.
- [5] A. Bonora, K. Fabbri, M. Pretelli, Widespread Difficulties and Applications in the Monitoring of Historical Buildings: The Case of the Realm of Venaria Reale, *Heritage*. 3 (2020) 128–139. <https://doi.org/10.3390/heritage3010008>.
- [6] B. Pacini, M. Raggi, *Statistica per l'analisi operativa dei dati*, Carrocci, Roma, 2006.
- [7] S. Zani, A. Cerioli, *Analisi dei dati e data mining per le decisioni aziendali*, Giuffrè editore, Milano, 2007.
- [8] R. Daris, M. Kaucic, *Matematica per l'economia e la statistica*, Udine, 2014.

Capitolo V
Conclusioni e prospettive

5.1. Discussione dei risultati

L'oggetto di ricerca della tesi di Dottorato è lo studio del microclima *indoor* delle architetture storiche, quale fattore utile a conoscere e conservare il patrimonio storico, artistico e culturale, costituito dagli edifici e da quanto custodito al loro interno. In particolare, l'analisi del microclima e le simulazioni virtuali ad esso riferite, non solo consentono di comprendere come il microclima si sia modificato nel corso del tempo, a seguito di interventi o eventi che abbiano interessato l'oggetto storico; ma rappresentano anche uno strumento utile a prevedere le conseguenze che si avrebbero in termini di parametri fisici²⁸⁹, in seguito a future variazioni (casuali o progettate) architettoniche, climatiche o delle modalità d'uso e gestione degli edifici indagati.

La ricerca ha permesso di mettere a punto una metodologia di indagine, applicata ai differenti casi-studio. Tale metodologia è sinteticamente definibile come segue: 1. esecuzione di indagini conoscitive storico-architettoniche dell'edificio, con individuazione delle fasi costruttive, delle categorie di materiali e di tecnologie impiegate; 2. campagna di monitoraggio microclimatica, estesa ad almeno quasi un anno; 3. produzione di simulazione virtuale dello scenario contemporaneo; 4. validazione della simulazione virtuale; 5. produzione di scenari possibili e futuri²⁹⁰. I casi-studio indagati sono accomunati dall'uso odierno che ne viene fatto: sono tutti edifici ad uso pubblico-museale, nei quali si riscontrano problematiche tipiche relative alla convivenza tra fruizione e conservazione; ma differiscono per data di costruzione (nonostante risalgano tutti a periodi ante rivoluzione industriale e introduzione di nuove tecnologie costruttive); la situazione è diversa anche rispetto alla presenza/assenza di impianti di condizionamento e ventilazione dell'aria, presenti in alcuni casi (sala 33 della Reggia di Venaria Reale e Portico della Gloria, nartece della Cattedrale di Santiago di Compostela) e assenti in altri (Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca). Nei casi-studio indagati vi è inoltre una eterogeneità significativa relativa alle origini dei problemi microclimatici: in alcuni edifici vi sono problemi -in termini di controllo microclimatico- legati principalmente alla gestione degli impianti; in altri, legati ai flussi dei visitatori; in altri ancora, derivanti da scelte definite in fase di progettazione e/o restauro.

Alla base della poca omogeneità tra i casi-studio selezionati vi è una scelta consapevole: si è ritenuto utile ed interessante poter verificare che la metodologia proposta fosse efficace in casistiche disomogenee, differenti per tipologia architettonica e gestione delle diverse architetture. Si può affermare a questo punto che la metodologia definita e adottata è apparsa efficace, permettendo di comparare oggetti appartenenti a categorie diverse, dimostrando la sua replicabilità in contesti differenti per tipologie architettoniche e distanti per collocazione geografica.

Questo lavoro di ricerca ha voluto portare un contributo al campo di indagine dell'*Historic Indoor Microclimate*: le basi del presente lavoro derivano infatti dalla definizione di HIM, proposta da Marco Pretelli e Kristian Fabbri nel volume "*Historic Indoor Microclimate of the Heritage Buildings - A Guideline for Professionals who care for Heritage Buildings*" [1] e dallo stato dell'arte sulla tematica del microclima *indoor*, correlato alla conservazione preventiva²⁹¹. In questa prospettiva, con questo studio si è ampliata la casistica di indagine, aggiungendo dati e conoscenza a quanto già sperimentato e rendendo più vasto il *know-how* in questo specifico ambito (HIM).

²⁸⁹ I parametri fisici, o variabili oggettive (T, UR, Lux, ecc.) determinano il microclima di una fabbrica.

²⁹⁰ Cfr. Capitolo II.

²⁹¹ Cfr. Paragrafo 1.1.2.

Inoltre, il presente contributo non si è limitato alla verifica dell'efficacia di una metodologia di indagine e di analisi: infatti si è anche giunti qui a definire due nuovi indici di rischio, finora non presenti in letteratura e che rappresentano un avanzamento della ricerca per ciò che concerne la conservazione preventiva: i due indici sono stati definiti come 1. *Heritage Microclimate Risk* (HMR) e 2. *Predicted Risk of Damage* (PRD). La necessità di introdurre questi due nuovi strumenti di controllo nasce da considerazioni relative all'attuale panorama scientifico, in cui, gli indici legati al rischio microclimatico finora proposti sono pensati principalmente per beni culturali di eccezionale valore storico-architettonico, generalmente con destinazione museale, e non viene specificato se siano replicabili in contesti di minore valore.

HMR e PRD, viceversa, sono indici applicabili in via non esclusiva in ambito museale, ma anche in contesti -a valenza storica variabile- con altre destinazioni d'uso. Questo approccio apre la strada alla diffusione di tali indici su larga scala. Con HMR e PRD si vuole chiarire la relazione e la distinzione che esiste tra microclima e rischio di danno: essi permettono di scindere il rischio legato al microclima di un ambiente *indoor* (HMR) e il rischio di danno su specifici materiali che compongono i beni conservati nel medesimo ambiente *indoor* (PRD). Inoltre, essi sono utili a valutare se le condizioni microclimatiche siano adeguate alla conservazione del patrimonio: generalmente, in letteratura vengono confrontati i dati rilevati da una qualsiasi campagna di monitoraggio con esclusivo riferimento ai *range* suggeriti dalle normative in ambito di conservazione preventiva (es. metodologia adottata anche per calcolare il Performance Index, proposto da Corgnati *et al* nel 2009 [2]). Tale procedimento non permette però di ottenere informazioni riguardo al rischio di danno a cui determinati materiali sono esposti, tantomeno di considerare il clima storico²⁹² di un ambiente. I due nuovi indici elaborati, HMR e PRD, permettono invece di valutare sia 1. il rischio di danno differenziato a seconda del materiale²⁹³, sia 2. il rischio microclimatico non solo in base agli standard definiti dalle normative, ma anche in base al microclima storico che da anni caratterizza l'ambiente indagato²⁹⁴, al quale -come definito dalla EN 15757:2010- i materiali risultano ormai acclimatati.

Nel corso delle indagini effettuate sui casi-studio, nella fase di analisi dei dati acquisiti durante le campagne di monitoraggio microclimatico e associando tali dati a quelli di carattere storico-architettonico degli edifici indagati, è stato possibile:

- individuare i principali fattori da cui dipende l'alterazione del microclima *indoor* nei tre ambienti studiati;
- ipotizzare le condizioni di *comfort* di visitatori e lavoratori (nonostante questo aspetto sia stato considerato secondario nella presente ricerca, rispetto alla conservazione preventiva del patrimonio).

Per quanto riguarda invece lo *step* metodologico relativo alla simulazione virtuale, si è deciso di riportare per i diversi casi-studio, varie modalità di impiego del *software* di simulazione dinamica utilizzato. Per la sala 33 della Reggia di Venaria Reale (caso-studio I), ad esempio, la simulazione virtuale ha consentito di valutare alcuni scenari alternativi a quello che è attualmente imposto: è stato infatti simulato il microclima *indoor* che si avrebbe nella sala 33 considerando l'edificio con le caratteristiche attuali, ma con gli impianti di condizionamento e ventilazione dell'aria inattivi, volendo mettere in evidenza con questo esempio, come la simulazione virtuale sia utile a verificare, preventivamente e su modello, conseguenze derivanti da modifiche gestionali volontarie (attivazione/spengimento degli impianti) ma anche involontarie

²⁹² Cfr. definizione riportata nella EN 15757:2010.

²⁹³ Es. un ambiente può contenere oggetti in pietra, altri in legno, altri ancora in argento e questi tre materiali, anche se condividono le medesime condizioni microclimatiche, non sono esposti ad uguale rischio di danno, perché ciascuno di essi è più o meno sensibile ai molteplici parametri microclimatici che caratterizzano lo stesso ambiente.

²⁹⁴ Cfr. HMR_{historical}, HMR_{standard} e i conseguenti PRD, Capitolo IV.

(malfunzionamento degli impianti); successivamente si è deciso di simulare il microclima *indoor* della medesima sala ipotizzando una modifica del clima *outdoor*: aumento della T esterna pari a +1,5 °C. Da questa seconda ipotesi emerge come la simulazione virtuale possa essere utilizzata per valutare, con le modalità già specificate, le conseguenze legate, in questo caso, ad un'importante variabile che incide sul microclima *indoor* -e dunque sulla conservazione- quale è la variazione climatica *outdoor*. Inoltre, le simulazioni CFD (*Computational Fluid Dynamics*) hanno consentito di calcolare il grado di *comfort* e *discomfort* termico degli occupanti tramite gli indici di riferimento PMV e PPD²⁹⁵. L'insieme di queste indagini ha permesso di verificare che, in seguito al recente progetto di recupero e valorizzazione (2001-2009) che ha interessato la Reggia di Venaria Reale, il *comfort* dei visitatori e la conservazione dei beni esposti nelle sale che costituiscono il percorso di visita²⁹⁶, sono stati esclusivamente affidati agli impianti HVAC: in assenza o a causa del malfunzionamento temporaneo dei quali, tali condizioni non potrebbero in alcun modo essere garantite dalle caratteristiche formali e costruttive dell'edificio. I risultati emersi rendono evidente come vi sia l'assoluta necessità di un monitoraggio microclimatico continuo in questi ambienti, con sonde temoigrometriche, e di come tale monitoraggio vada associato alla definizione di condizioni di *alert* per evitare che anche un semplice malfunzionamento degli impianti possa mettere a rischio il patrimonio custodito nella Reggia.

Risultati molto differenti rispetto a quanto appena descritto sono invece emersi dal caso-studio II: la Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, in Spagna. In questo caso ci si trova di fronte ad un ambiente che, grazie ad un approccio conservativo, che ha incluso anche l'adozione di accorgimenti riguardo la regolazione degli accessi in questa sala, divenuti più precisi nel corso degli anni, non ha visto mutarsi le condizioni architettoniche, gestionali e dunque presumibilmente anche microclimatiche, dal 1509 ad oggi, senza che fosse mai introdotta una dotazione impiantistica moderna. In questo caso, dopo aver individuato che attualmente alcuni sbalzi microclimatici, dovuti alla radiazione ultravioletta, mettono a repentaglio la conservazione preventiva di parte del patrimonio della Biblioteca, la simulazione virtuale è stata impiegata per mostrare come si potrebbe verificare, tramite la maggior parte dei *software* di simulazione dinamica, l'andamento della luce naturale negli ambienti *indoor*, per definire la collocazione delle opere tenendo conto anche di questa variabile. Si specifica che in questo caso il ruolo fondamentale in termini di conservazione preventiva è stato giocato dall'analisi dei dati microclimatici: hanno consentito di identificare un andamento anomalo dei parametri *indoor* di T e UR, permettendo di approfondire l'indagine; individuare la causa di tale anomalia e offrire così un attivo contributo alla conservazione del patrimonio della Biblioteca, prima che si manifestassero i segni di degrado. Inoltre, la ricerca ha incluso un confronto tra la Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca e la Biblioteca Malatestiana, situata a Cesena, Italia: grazie alla disponibilità dei dati relativi a uno studio microclimatico svolto nel 2013 su quest'ultima²⁹⁷, è stato possibile definire quali siano le caratteristiche architettoniche, microclimatiche e gestionali che accomunano entrambe le Biblioteche e cosa le distingue; verificando che in entrambi gli edifici che le ospitano esiste un sofisticato equilibrio tra spazio fisico della biblioteca e prestazione microclimatica, tanto delicato quanto voluto e definito, sin dalla fase di progettazione, oltre cinque secoli fa, dai progettisti.

Infine, l'analisi dei dati microclimatici rilevati all'interno del Portico della Gloria (caso-studio III), narcece della Cattedrale di Santiago de Compostela, in Spagna, ha permesso di verificare le variazioni

²⁹⁵ Cfr. Paragrafo 3.8.2. e 3.8.3.

²⁹⁶ Di cui la sala 33 è un esempio rappresentativo.

²⁹⁷ Riportato in: [1] [3-6].

microclimatiche causate dall'accesso all'architettura dei visitatori: i risultati emersi hanno consentito di chiarire come risulti qui indispensabile pianificare una diminuzione numerica dei gruppi di visita ammessi, unica misura possibile per contenere il rischio microclimatico derivante dagli incrementi dei picchi di UR causati dalla presenza di questi ultimi. Inoltre, tramite la simulazione virtuale è stato valutato il ruolo attuale e futuro delle unità di trattamento aria presenti all'interno del narcece. Ne è emerso che l'attivazione degli impianti influisce positivamente (in termini di conservazione) sul microclima del Portico della Gloria nello scenario attuale (caratterizzato dalla presenza di pannelli divisorii in legno tra il narcece e il resto della Cattedrale); mentre nello scenario futuro, che prevede la rimozione di tali pannelli entro il prossimo Anno Santo (25 luglio 2021), l'attivazione delle UTA risulterebbe del tutto irrilevante: infatti, l'eventuale loro attivazione non sarà in alcun modo in grado di modificare le condizioni microclimatiche del Portico della Gloria, che saranno comunque coincidenti con quelle del resto della Cattedrale. Questi ultimi risultati hanno portato a suggerire lo spegnimento e l'eventuale rimozione di tali impianti, una volta rimossi i pannelli.

5.2. Conclusioni

Cesare Brandi affermava che gli interventi di estrema urgenza “*difficilmente -potranno- realizzarsi con un salvataggio completo dell'opera [...]*”²⁹⁸, sottolineando che la prevenzione rappresenta l'unico atteggiamento strategico possibile in funzione di una reale tutela, poiché, diversamente, qualsiasi intervento eseguito *ex post* potrà, nella migliore delle ipotesi, ridurre un danno modesto, non evitarlo. Dunque, si potrà ottenere una prevenzione efficace rispetto alle necessità di tutela di un qualsiasi manufatto solo se si individueranno e si garantiranno le condizioni più favorevoli alla sua conservazione, prevenendo dunque il manifestarsi del danno. Il microclima *indoor* incide in misura rilevante sulla conservazione dei manufatti, ragione per cui il suo studio permette di individuare rischi, evitando che si concretizzino in danni. Si può affermare che ad oggi i vantaggi derivanti dalla conservazione preventiva, siano ampiamente noti a tutti: esperti in materia di restauro e non. Già nel 2009 Salvatore Settis, nella prefazione di [7], scriveva: “*il fine è, deve essere, di tutelare restaurando meglio che si può, ma anche meno che si può. Il miglior restaurare è quello che non si fa, che non c'è bisogno di fare perché [...] in altre parole, perché su quei quadri e monumenti è stata condotta una coerente e razionale opera di conservazione preventiva [...] il restauro è un intervento post factum, cioè riconosce un danno avvenuto e prova a limitarne (non a cancellarne) le conseguenze. Il vero problema, dunque non è eseguire restauri sempre migliori, ma fare in modo che le opere abbiano sempre meno bisogno di restauro*”. Ciononostante, a tutt'oggi la politica più diffusa nel campo dei beni culturali è quella degli interventi d'urgenza; ma anche, concentrandoci sugli aspetti microclimatici indagati in questa ricerca, di interventi di recupero, di valorizzazione o di restauro, per i quali le azioni proposte sono sempre “di riqualificazione” e tendono a ridefinire la dotazione storica degli impianti o a installare *ex novo* impianti sempre più tecnologici, in grado di determinare in modo man mano più sofisticato il microclima *indoor*, tralasciando una attenta valutazione delle possibilità di ottenere dall'architettura le prestazioni microclimatiche “naturali”, riadottando accorgimenti gestionali tradizionali e/o recuperando soluzioni tecniche già esistite e perdute che permettano, secondo quanto storicamente era accaduto, magari per secoli, una simbiosi virtuosa tra il manufatto architettonico e il suo microclima *indoor*²⁹⁹.

²⁹⁸ Cit. C. Brandi, “*Teoria del restauro*”, Edizioni di Storia e Letteratura, Roma, 1963. pag. 56. [8]

²⁹⁹ Come nel caso della Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca e la Biblioteca Malatestiana.

Come noto, il microclima *indoor* di un ambiente dipende da numerosi fattori, la maggior parte dei quali sono determinati dall'interrelazione tra il luogo in cui sorge l'edificio e la fabbrica stessa, mentre altri dipendono dalle soluzioni costruttive e architettoniche storiche e dalla progettazione della fabbrica. Tali soluzioni -che dipendono a loro volta dal contesto culturale, climatico, dalla destinazione d'uso e dalle possibilità e tradizioni tecnico/costruttive- sono state per secoli le uniche in grado di rispondere alle esigenze di *comfort* e di conservazione dell'edificio e del relativo contenuto; si tratta di fattori che hanno mutazioni cicliche -il semplice alternarsi delle stagioni- come anche di lungo periodo -alterazioni delle architetture, cambiamenti macroclimatici etc.-. Ciascuna fase della metodologia applicata nella presente ricerca ci permette di acquisire informazioni importanti ed utili proprio all'individuazione e alla comprensione di quei fattori³⁰⁰ che influiscono sull'evolversi del microclima *indoor* che caratterizza il ciclo di vita di un edificio. Tale iter (metodologico) permette di acquisire una base conoscitiva fondamentale per la definizione di interventi mirati e preventivi. Infatti, la salvaguardia del patrimonio è strettamente legata al miglioramento della sua conoscenza e alla comprensione dei fenomeni che con esso interagiscono, attraverso l'acquisizione di informazioni il più possibile ampie e articolate, tra le quali quelle che sono state al centro di questo studio sono:

- lo studio del microclima *indoor*, che permette di effettuare una valutazione complessiva della qualità degli ambienti, in termine di conservazione del patrimonio, fornendo riferimenti importanti per la successiva redazione del progetto di restauro;
- la simulazione virtuale, che rappresenta uno strumento di previsione, grazie al quale è possibile verificare preventivamente gli esiti microclimatici dovuti ad un intervento mirato (es. introduzione di nuovi impianti; rimozione dei medesimi; effettuazione di modifiche architettoniche interne e/o esterne alla fabbrica; modifiche gestionali inerenti gli orari di apertura/chiusura di porte e finestre; ecc.), permettendo di definire scelte architettonico-progettuali e/o gestionali *ad hoc*, alla luce di cosa ne conseguirebbe in termini di microclima *indoor* e di tutto ciò che esso implica;
- la definizione dei due indici di rischio HMR e PRD, che consente individuare situazioni di rischio di danneggiamento del patrimonio a causa del microclima, permettendo ai tecnici di intervenire per tempo.

A chiudere queste pagine, si ritiene che la metodologia proposta e adottata in questa ricerca rappresenti, per sua stessa natura, la concretizzazione di quella che è stata una delle indicazioni fondamentali fornite da uno dei padri della disciplina, Aloïs Riegl³⁰¹: quanto qui proposto permette infatti di “agire” sul monumento, prevenendo il verificarsi di danni sul patrimonio, grazie alla possibilità di ipotizzare scenari futuri e ipotetici, tramite l'impiego di modelli virtuali, dunque senza esporre la fisicità dell'architettura reale a qualsiasi possibile rischio.

³⁰⁰ Che possono essere: il clima *outdoor*; la presenza dei visitatori; il funzionamento degli impianti di climatizzazione; le caratteristiche costruttive dell'edificio; scelte interventistiche e/o progettuali; ecc.

³⁰¹ Il suo pensiero -espresso in [9]- è riportato al paragrafo 1.1.1. della presente tesi: egli riteneva che tutte le ipotesi, sia sull'evoluzione storica, sia relative a interventi di carattere architettonico, andassero verificate su modelli, anziché sulla fisicità costruita dell'architettura.

5.3. Possibili sviluppi

In questa ricerca il *comfort* dei visitatori, in una prospettiva di tutela del patrimonio, è stato ritenuto non prioritario: si ritiene infatti che il *comfort* sia un cofattore utile a definire la tipologia e il *set up* impiantistico, ma sempre riservando una attenzione prioritaria alle esigenze conservative del patrimonio, anche in considerazione del fatto che, nell'architettura ad elevato valore architettonico, si verificano condizioni di permanenza e di visita poco estese temporalmente, come accade nei casi-studio II e III. Si ritiene però che lo studio del *comfort* negli edifici storici museali possa costituire oggetto di ulteriori ricerche: nell'ambito della valorizzazione "sostenibile"³⁰² del patrimonio culturale, con il fine di trovare punti di equilibrio sempre più virtuosi tra fruibilità e conservazione; si tratta di una ricerca che sconfinava nel campo del *Environmental Psychology*, per il quale si potrebbe indagare qual è il valore di *discomfort* che un soggetto è disposto a sopportare per usufruire di un bene. In più, grazie alle basi derivanti dai casi-studio indagati in questa ricerca e in altre correlate³⁰³, sempre interne al campo di studi del *Historic Indoor Microclimate*, gli studi futuri dovranno puntare alla definizione di protocolli 1. di gestione, da adottare per il controllo del microclima *indoor* all'interno di definite categorie di edifici; e 2. protocolli di prestito, basati su previo studio e definizione delle condizioni adeguate alla conservazione dei beni che possono essere concessi in prestito per mostre ed esposizioni, più o meno temporanee. Infine, come in ogni campo di ricerca, la possibilità di applicare la metodologia e gli indici definiti su altre architetture permetterebbe di affinare lo strumento, contribuendo con certezza ad un suo miglioramento.

³⁰² Sostenibile per il patrimonio stesso: ricercare un equilibrio tra fruizione/accessibilità e conservazione

³⁰³ Es. [1] [3-6] [10-27].

Riferimenti

- [1] M. Pretelli, K. Fabbri, *Historic Indoor Microclimate of the Heritage Buildings - A Guideline for Professionals who care for Heritage Buildings*, Springer International Publishing, Gewerbestrasse, 2018. <http://www.springer.com/it/book/9783319603414>.
- [2] S.P. Corgnati, V. Fabi, M. Filippi, A methodology for microclimatic quality evaluation in museums: Application to a temporary exhibit, *Build. Environ.* (2009). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.09.012>.
- [3] K. Fabbri, M. Pretelli, Heritage buildings and historic microclimate without HVAC technology: Malatestiana Library in Cesena, Italy, UNESCO Memory of the World, *Energy Build.* 76 (2014) 15–31. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.051>.
- [4] M. Pretelli, K. Fabbri, Malatestiana Library in Cesena, Italy, *Hist. Indoor Microclim. Herit. Build.* (2018) 159–183. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60343-8_8.
- [5] A. Ugolini, M. Pretelli, K. Fabbri, A. Mila, P. Errani, Indoor microclimate and preservation of Historic Architecture: the Malatestiana Library in Cesena, in: 6th Int. Congr. “Science Technol. Safeguard Cult. Herit. Mediterr. Basin” Proc. VOL. I – Sess. A, C Resour. Territ. Biol. Divers., Editore VALMAR, Roma, 2014: pp. 23–30.
- [6] L. Tronchin, K. Fabbri, Energy and microclimate simulation in a heritage building: Further studies on the Malatestiana Library, *Energies.* 10 (2017). <https://doi.org/10.3390/en10101621>.
- [7] B. Zanardi, *Il restauro*. Giovanni Urbani e Cesare Brandi, due teorie a confronto, Milano, 2010.
- [8] C. Brandi, *Teoria del restauro*, Edizioni di Storia e Letteratura, Roma, 1963.
- [9] A. Riegl, *Der Moderne Denkmalkultus: Sein Wesen Und Seine Entstehung* (1903), Kessinger Publishing, 2010.
- [10] C. Magnani, *La conservazione del patrimonio storico immateriale: il microclima di Villa Petraia a Firenze*, Tesi di Laurea Magistrale in ingegneria dei sistemi edilizi e urbani, Università di Bologna, Alma Mater Studiorum, 2015/2016, relatore L. Signorelli, co-relatore K. Fabbri. M. Pretelli.
- [11] A. Bonora, *La conservazione del patrimonio storico immateriale: il microclima di Villa Barbaro a Maser*, Tesi di Laurea Magistrale in ingegneria dei processi e dei sistemi edilizi, Università di Bologna, Alma Mater Studiorum, 2015/2016, relatore M. Pretelli, co-relatore K. Fabbri.
- [12] A. Serra, *La ricerca storica unita alla building performance simulation per l’analisi del microclima come strumento di conoscenza innovativo del patrimonio edilizio. Il caso di palazzo Guiccioli a Ravenna*, Tesi di Laurea Magistrale in ingegneria edile-architettura, Università di Bologna, Alma Mater Studiorum, 2016/2017, relatore M. Antonucci, Co-relatore K. Fabbri, V. Gianfrate, E.R. Agostinelli.

- [13] A. Bonora, K. Fabbri, M. Pretelli, L'Historic Indoor Microclimate dell'edilizia contemporanea. Applicazioni e vantaggi derivanti dallo studio diacronico del microclima, in: 33° convegno internazionale Scienza e Beni Culturali. Collana Scienza e Beni Culturali, Le nuove frontiere del restauro. Trasferimenti, Contaminazioni, Ibridazioni, Marghera Venezia, Edizioni Arcadia Ricerche, 2017, pp. 871 – 880.
- [14] A. Bonora, K. Fabbri, M. Pretelli, Study of the indoor microclimate for preventive conservation and sustainable management of historic buildings: the case of Villa Barbaro, Maser, EEHB2018 3rd Int. Conf. Energy Effic. Hist. Build. (2018).
- [15] K. Fabbri, M. Pretelli, A. Bonora, HIM (Historic indoor microclimate) e conservazione preventiva, REHABEND, Spain Euro-American Congress. Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management, Cáceres, 2018, pp. 2531-2536. ISBN: 978-84-697-7033-7.
- [16] M. Pretelli, K. Fabbri, La conservazione degli impianti storici, (a cura di): D. Concas, CONSERVAZIONE vs INNOVAZIONE. L'inserimento di elementi tecnologici in contesti storici, Il Prato Editore, Saonara, 2018. ISBN 978886336418, pp33 -45.
- [17] A. Bonora, K. Fabbri, M. Pretelli, Study of the indoor microclimate for preventive conservation and sustainable management of historic buildings : the case of Villa Barbaro , Maser, EEHB2018 3rd Int. Conf. Energy Effic. Hist. Build. (2018).
- [18] M. Pretelli, K. Fabbri, A. Bonora, The Study of Historical Indoor Microclimate (HIM) to Contribute towards Heritage Buildings Preservation, Heritage. 2 (2019) 2287–2297. <https://doi.org/10.3390/heritage2030140>.
- [19] M. Pretelli, K. Fabbri, A. Bonora, Indoor microclimate monitoring: use and issues. The case of the realm of Venaria Reale, in: Il patrimonio culturale in mutamento. Le sfide dell'uso, Marghera - Venezia, Arcadia Ricerche srl, 2019, pp. 885 – 894.
- [20] A. Bonora, K. Fabbri, M. Pretelli, Environmental microclimate management and risk in the UNESCO world Heritage site of Villa Barbaro Maser (Italy), «international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences», 2019, Volume XLII-2/W11, pp. 269 – 276.
- [21] K. Fabbri; M. Pretelli; A. Bonora, Building simulation to measure indoor microclimate in heritage buildings, 2-5 Settembre, Roma, 2019, Convegno Building Simulation. Vol. 29 N. 2, pp. 4086 – 4093. ISBN: 978-1-7750520-1-2, DOI: 10.26868/25222708.2019.210181.
- [22] A. Bonora, Studio del microclima indoor per la conservazione preventiva di Villa Barbaro, Maser, in Restauro: Conoscenza, Progetto, Cantiere, Gestione. Sezione 1.3: Conoscenza previa (preventiva) e puntuale (mirata) Casi studio: grande scala, pp.229-233, Quasar, Roma, 2020. ISBN:978-88-5491-016-4.
- [23] K. Fabbri, A. Bonora, Two new indices for preventive conservation of the cultural Heritage: Predicted Risk of Damage and Heritage Microclimate Risk., Journal of Cultural Heritage. 47 (2021) 208-217. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.09.006>.

- [24] A. Bonora, K. Fabbri, M. Pretelli, Widespread Difficulties and Applications in the Monitoring of Historical Buildings: The Case of the Realm of Venaria Reale, «HERITAGE», 2020, 3, pp. 128 - 139.
- [25] A. Bonora, K. Fabbri, G. Favaretto, M. Pretelli, Le diverse consistenze dell'acqua. Dotazioni impiantistiche e controllo del microclima a Villa Tugendht a Brno, 2020, Atti del Convegno di studi Bressanone XXXVI Gli effetti dell'acqua sui beni culturali. Valutazioni, critiche e modalità di verifica, 17- 10 Novembre 2020, pp.513-524. ISSN 2039-9790 ISBN: 978-88-95409-24-5.
- [26] A. Bonora, APPROCCI CONSERVATIVI A CONFRONTO. La Reggia di Venaria Reale a Torino e la Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, «RECUPERO E CONSERVAZIONE», 2021, 163, pp. 28 – 38.
- [27] V. Costanzo, K. Fabbri, E. Schito, M. Pretelli, L. Marletta, Microclimate monitoring and conservation issues of a Baroque church in Italy: a risk assessment analysis, 2021, Building Research and Information.

Nomenclatura

a, b	Esponenti di PRD che definiscono il rischio di danno – formula (13)
AIM	Actual Indoor Microclimate
B	Coefficiente dal valore pari a 621,9907 (g/kg) – formula (7)
BUSAL	Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca
CC&R	Centro Conservazione e Restauro https://www.centrorestaurovenaria.it/ (ultima visita 20/07/2020)
CFD	Computational Fluid Dynamics
CV (RMSE)	Coefficient of Variation of Root Mean Square Error
EN	European Norm
HIM	Historical indoor Microclimate
HMR	Heritage Microclimate Risk
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i>
ICCROM	International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property https://www.iccrom.org/ (ultima visita 20/07/2020)
IES.VE	Integrated Environmental Solutions Virtual Environment
IM	Indoor Microclimate
M	Monitored or Measured – formula (10)
MBE	Mean Bias Error
MHS	Monitoring Heritage System
MR	Mixing Ratio, misurata g/kg
N	Numero di valori registrati per ogni variabile durante la campagna di monitoraggio – formula (10)
N. persone	Numero di persone – formula (8)
OIM	Original Indoor Microclimate
PMV	Predicted Mean Value
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied
PRD	Predicted Risk of Damage
P _{tot}	Pressione totale dell'aria, misurata in hPa – formula (7)
R ²	Coefficiente di determinazione
RH	Relative Humidity, misurato in %
SIM	Subsequent Indoor Microclimate
T	Temperatura dell'aria, misurata in °C
UNI	Ente Nazionale Italiano di Unificazione
UR	Umidità Relativa, misurata in %
UTA	Unità di trattamento aria
V _{ps}	Vapore acqueo, misurata in Pa – formula (5)
V _p	pressione del vapore acqueo, misurata in hPa – formula (6)
X	Variabile considerata – formula (12)
<i>Apici e pedici</i>	
data	Dati misurati – formula (10)
env	Environmental – formula (9,10)
high	Valore massimo – formula (10)
hs	Historical, riferito a HMR
K	Giorni di monitoraggio – formula (8,12)
J	Ore del giorno – formula (8,12)
low	Valore minimo – formula (10)
osc	Oscillation, riferito a HMR – formula (9)
st	Standard, riferito a HMR

Normativa di riferimento

- CEN – European Committee for Standardization, EN 15757:2010, Conservation of Cultural Property. Specifications for temperature and relative humidity to limit climate-induced mechanical damage in organic hygroscopic materials, (2010).
- CEN – European Committee for Standardization, EN 15758:2010, Conservation of cultural property – Procedures and instruments for measuring temperatures of the air and the surfaces of objects, (2010).
- CEN – European Committee for Standardization, EN 15759-1:2011, Conservation of cultural property — Indoor climate — Part 1 : Guidelines for heating churches , chapels and other places of worship Contents, (2011) 1–24.
- CEN/TC346, Business Plan, Draft 4, (2012) cfr. A. Burmester, M. Eibl, Climate for Collections. Standards and uncertainties, Munich, 2013. pp.38-43.
- MIBACT, Ref.B) MIBACT, Ministerial Decree, Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei, 10th May 2001, (2001).
- UNI – Ente Italiano di Unificazione (2004) Norma UNI 11120:2004 Beni culturali. Misurazione in campo della temperatura dell'aria e della superficie dei manufatti.
- UNI – Ente Italiano di Unificazione (2005) Norma UNI 11131:2005 Beni culturali. Misurazione in campo dell'umidità dell'aria.
- UNI – Ente Nazionale Italiano di Unificazione (1999) UNI 10829:1999 Beni di interesse storico e artistico - Condizioni ambientali di conservazione - Misurazione ed analisi.
- UNI – Ente Nazionale Italiano di Unificazione (2002) UNI EN 10969:2002 - Beni Culturali. Condizioni ambientali di conservazione. Principi generali per la scelta e il controllo dei parametri microclimatici in ambienti interni.

Glossario

Bridge: raccogliatore di dati (inviati dai nodi, o sonde), in grado di trasmetterli ad una piattaforma internet.

Computational Fluid Dynamics: simulazione fluidodinamica.

Historical climate: microclima *indoor* che ha caratterizzato l'ambiente di conservazione di un oggetto per un periodo di tempo pari ad almeno un anno.

Historic Indoor Microclimate: campo di ricerca che valuta l'evoluzione nel corso del tempo delle caratteristiche microclimatiche *indoor* di un edificio e la relazione tra queste ed il degrado dei beni, conservati nell'edificio stesso.

HVAC: *Heating, Ventilating and Air Conditioning* (riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria).

Microclima: clima locale, determinato dalla presenza di peculiari elementi topografici e ambientali.

Monitoraggio microclimatico: rilevamento di parametri che caratterizzano il microclima, come temperatura, umidità relativa, CO₂, ecc., per una determinata durata di tempo.

Nodi: sonde microclimatiche capaci di rilevare diversi parametri ambientali.

Simulazione *Apache*: simulazione termodinamica.

Rischio microclimatico: influenza negativa causata dai tipici parametri microclimatici (Temperatura, Umidità Relativa, Illuminamento, CO₂) alla conservazione di beni.

Validazione: verifica della corrispondenza dei dati ottenuti dalla simulazione e quelli registrati dalle sonde termoigrometriche.

Virtual building: modello virtuale.

Registro delle immagini

FIGURA	FONTE
1	M.H.L. Stappers, B. Ankersmit, <i>Managing Indoor Climate Risks in Museums</i> , Springer, International Publishing, Amsterdam, 2017. (p. 3)
2	http://www.artemagazine.it/attualita/item/9796-gallerie-degli-uffizi-da-record-aferragosto (ultima visita 12/10/2020)
3	https://www.thetimes.co.uk/article/italy-turns-against-renaissance-man-k8s5jmj0q (ultima visita: 12/10/2020)
4	Elaborazioni dell'autore su IES.VE
5	Elaborazioni dell'autore su SketchUp
6	https://www.shutterstock.com/it/video/search/palace-venaria (ultima visita 10/10/2020)
7	F. Pernice, <i>La Venaria Reale. Ombre e luci</i> , Celid, Torino, 2013. (p.28)
8	G. Gritella, <i>Juvarra l'architettura</i> , Franco Cosimo Panini, Modena, 1992. Vol. 1. (p.178-179)
9	D. Severo, "Filippo Juvarra", Zanichelli, Milano, 1996. (p.145)
10	G. Gritella, <i>Juvarra l'architettura</i> , Franco Cosimo Panini, Modena, 1992. Vol. 1. (p.328)
11	F. Pernice, <i>La Venaria Reale. Ombre e luci</i> , Celid, Torino, 2013. (p.33)
12	G. Gritella, <i>Juvarra l'architettura</i> , Franco Cosimo Panini, Modena, 1992. Vol. 1. (p.187)
13	Da sinistra: foto dell'autore; F. Pernice, <i>La Venaria Reale. Ombre e luci</i> , Celid, Torino, 2013. (p.73); https://www.forbes.com/sites/catherinesabino/2019/11/29/7-of-italys-most-fascinating-museums-are-in-seriously-stunning-underratedturin/?sh=5dbbd4977dd4 (ultima visita: 11/10/2020)
14	G. Gritella, <i>Juvarra l'architettura</i> , Franco Cosimo Panini, Modena, 1992. Vol. 1 (p.183)
15	https://www.lavenaria.it/it/mostre/teatro-scultura (ultima visita: 11/10/2020)
16	D. Severo, "Filippo Juvarra", Zanichelli, Milano, 1996. (p. 152)
17	G. Gritella, <i>Juvarra l'architettura</i> , Franco Cosimo Panini, Modena, 1992. Vol. 1. (p.334)
18	G. Gritella, <i>Juvarra l'architettura</i> , Franco Cosimo Panini, Modena, 1992. Vol. 1. (p.494)
19	F. Pernice, <i>La Venaria Reale. Ombre e luci</i> , Celid, Torino, 2013. (p.107)
20	https://www.lavenaria.it/it/esplora/reggia/arte-contemporanea (ultima visita: 11/10/2020)
21	F. Pernice, <i>La Venaria Reale. Ombre e luci</i> , Celid, Torino, 2013. (p.147)
22	Immagine resa disponibile dal CC&R de La Venaria Reale
23	Elaborazioni dell'autore su 3D Studio Max
24	Elaborazioni dell'autore su SketchUp
25	Elaborazioni dell'autore su SketchUp
26	Elaborazioni dell'autore su IES.VE
27	Elaborazioni dell'autore su IES.VE
28	Elaborazioni dell'autore su IES.VE
29	Elaborazioni dell'autore su IES.VE
30	Elaborazioni dell'autore su IES.VE
31	Elaborazioni dell'autore su IES.VE
32	Elaborazioni dell'autore su IES.VE
33	Elaborazioni dell'autore su IES.VE
34	http://www.fachadausal.com/escalera.php (ultima visita: 11/10/2020)
35	https://www.salamancaenelayer.com/2012/08/calle-libreros.html (ultima visita: 11/10/2020)
36	https://www.salamancaenelayer.com/2012/08/calle-libreros.html (ultima visita: 11/10/2020)
37	https://www.salamancaenelayer.com/2012/08/calle-libreros.html (ultima visita: 11/10/2020)

38	Foto dell'autore
39	Foto dell'autore
40	Immagine resa disponibile dalla Fundación Santa María la Real del Patrimonio Histórico
41	https://www.eleusal.com/informacion-ele-usal/ (ultima visita: 11/10/2020)
42	Foto dell'autore
43	Foto dell'autore
44	Foto dell'autore
45	Immagine resa disponibile dalla Fundación Santa María la Real del Patrimonio Histórico
46	Immagine resa disponibile dalla Fundación Santa María la Real del Patrimonio Histórico
47	Immagine resa disponibile dalla Fundación Santa María la Real del Patrimonio Histórico
48	Immagine resa disponibile dalla Fundación Santa María la Real del Patrimonio Histórico
49	https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/humidity-sensors/humidity-temperature-sensor-sht2x-digital-i2c-accurate/ (ultima visita: 20/05/2019)
50	Foto dell'autore
51	https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/humidity-sensors/humidity-temperature-sensor-sht2x-digital-i2c-accurate/ (ultima visita: 20/05/2019)
52	Elaborazioni dell'autore su SketchUp
53	Elaborazioni dell'autore su IES.VE
54	Elaborazioni dell'autore su IES.VE
55	Elaborazioni dell'autore su IES.VE
56	Elaborazioni dell'autore su IES.VE
57	Elaborazioni dell'autore su IES.VE
58	Elaborazioni dell'autore su IES.VE
59	Elaborazioni dell'autore su IES.VE
60	Elaborazioni dell'autore su Autocad
61	Estrapolazione da apparato VII
62	Estrapolazione da apparato VII
63	Estrapolazione da apparato IV
64	Estrapolazione da apparato IV
65	Immagine resa disponibile dal Prof. Arch. Marco Pretelli e dall'Arch. Kristian Fabbri
66	Elaborazioni dell'autore su IES.VE
67	Elaborazioni dell'autore su IES.VE
68	Immagine resa disponibile dal Prof. Arch. Marco Pretelli e dall'Arch. Kristian Fabbri
69	Immagine resa disponibile dal Prof. Arch. Marco Pretelli e dall'Arch. Kristian Fabbri
70	Elaborazioni dell'autore su Autocad
71	Immagine resa disponibile dal Prof. Arch. Marco Pretelli e dall'Arch. Kristian Fabbri
72	Immagine resa disponibile dalla Prof. Arch. Soledad Garcia Morales
73	https://www.turismo.gal/que-visitar/destacados/catedral-e-centro-historico/catedral-de-santiago-de-compostela?langId=it_IT (11/10/2020)
74	http://www.artigianelli.org/wordpress/wp-content/uploads/2012/09/Il-Porticodella-Gloria.pdf (ultima visita: 5/10/2020)
75	B. Ma Castro Fernández, Francisco Pons Sorolla: arquitectura y restauración en Compostela (1945-1985), Santiago de Compostela, 2013. (p. 88)
76	B. Ma Castro Fernández, Francisco Pons Sorolla: arquitectura y restauración en (1945-1985), Santiago de Compostela, 2013. (p.85)
77	Foto dell'autore

78	Da sinistra: https://www.spain.info/it/immagini/portico-gloria-santiago-compostela/ (11/10/2020); foto dell'autore
79	https://www.spain.info/it/immagini/portico-gloria-santiago-compostela/ (11/10/2020)
80	Foto dell'autore
81	Foto dell'autore
82	Foto dell'autore
83	Foto dell'autore
84	Foto dell'autore
85	Foto dell'autore
86	Elaborazioni dell'autore su SketchUp
87	Elaborazioni dell'autore su IES.VE
88	Elaborazioni dell'autore su IES.VE
89	Elaborazioni dell'autore
90	https://statistics.laerd.com/statistical-guides/pearson-correlation-coefficient-statistical-guide-2.php (ultima visita: 11/10/2020)

Bibliografia

- H.C. Ackermann, *The Basle Cabinets of Art and Curiosities in the sixteenth and seventeenth centuries*, in: *Orig. Museums Cabinet Curiosit. Sixt. Seventeenth-Century Eur.* 2nd Ed., Londra, 2001.
- L. B. Alberti, *De Re Aedificatoria*, Vol. 1-2, Edizioni Il Polifilo, Milano, 1966.
- M. Alexander, E. Porter, *Museums in motion: an introduction to the history and functions of museums.*, Rowman & Littlefield, Maryland, 2008.
- M. Andretta, F. Coppola, A. Modelli, N. Santopuoli, L. Seccia, Proposal for a new environmental risk assessment methodology in cultural heritage protection, *J. Cult. Herit.* 23 (2017) 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.08.001>.
- ASHRAE, *Guideline 14, Measurement of Energy and Demand Savings*. Technical report, American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, Georgia, (2014).
- ASHRAE, *Handbook HVAC Applications: Museums, galleries, archives and libraries*, American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, Georgia, (1999).
- ASHRAE, *Standard 55-2013, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, Georgia, (2013).
- N. Aste, R.S. Adhikari, M. Buzzetti, S. Della Torre, C. Del Pero, H.E. Huerto C, F. Leonforte, Microclimatic monitoring of the Duomo (Milan Cathedral): Risks-based analysis for the conservation of its cultural heritage, *Build. Environ.* 148 (2019) 240–257. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.015>.
- R. Banham, *The architecture of the well-tempered environment*, Architectural press, London, 1969.
- G. Barbieri, *Andrea Palladio e la cultura veneta del Rinascimento*, Il Velcro Editore, Roma, 1983.
- C. Barelli, S. Ghisotti, *Decorazione e arredo in un cantiere del Seicento: Venaria Reale*, in *Figure del barocco: la corte, la città, il cantiere, le province*, a cura di G. Romano, Torino, CRT, 1988, pp. 139–162
- T. Basiricò, S. Bertorotta, *L'industrializzazione nei quartieri di edilizia residenziale pubblica*, ARACNE editrice, Roma, 2013.
- F. Becherini, A. Bernardi, E. Frassoldati, Microclimate inside a semi-confined environment: Valuation of suitability for the conservation of heritage materials, *J. Cult. Herit.* (2010). <https://doi.org/10.1016/j.culher.2010.01.005>.
- W. Beck, M. Koller, Problems of heating within historic buildings of Austria, in Bromelle, N. S., Thomson, G., Smith, P. eds., *Conservation within historic buildings: preprints of the contributions to the Vienna congress, 7-13 September 1980*, IIC, London, pp. 22-29.
- B. Benedetti, Il concetto e l'evoluzione del museo come premessa metodologica alla progettazione di modelli 3D, *SCIRES-IT.* 3 (2013). <https://doi.org/10.2423/i22394303v3n1>.
- A. Bernardi, *Conservare opere d'arte. Il microclima negli ambienti museali*, Padova, Il Prato, 2003.
- A. Bernardi, D. Camuffo, M. Del Monte, C. Sabbioni, Microclimate and weathering of a historical building: The Ducal Palace in Urbino, *Sci. Total Env.* 46 (1985) 243–260. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(85\)90297-9](https://doi.org/10.1016/0048-9697(85)90297-9).
- M. Bloch, *Apologia della Storia o Mestiere dello Storico.*, Torino, 2009.

- C. Bonacina, P. Baggio, F. Cappelletti, P. Romagnoni, A.G. Stevan, The Scrovegni Chapel: The results of over 20 years of indoor climate monitoring, *Energy Build.* 95 (2015) 144–152. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.018>.
- A. Bonet Correa, B. Blasco Esquivas, G. Cantone, Filippo Juvarra e l'architettura europea, Electa, Napoli, 1998.
- A. Bonora, APPROCCI CONSERVATIVI A CONFRONTO. La Reggia di Venaria Reale a Torino e la Biblioteca Generale Storica dell'Università di Salamanca, «RECUPERO E CONSERVAZIONE», 2021, 163, pp. 28 – 38.
- A. Bonora, K. Fabbri, G. Favaretto, M. Pretelli, Le diverse consistenze dell'acqua. Dotazioni impiantistiche e controllo del microclima a Villa Tugendht a Brno, 2020, Atti del Convegno di studi Bressanone XXXVI Gli effetti dell'acqua sui beni culturali. Valutazioni, critiche e modalità di verifica, 17- 10 Novembre 2020, pp.513-524. ISSN 2039-9790 ISBN: 978-88-95409-24-5.
- A. Bonora, K. Fabbri, M. Pretelli, Environmental microclimate management and risk in the UNESCO world Heritage site of Villa Barbaro Maser (Italy), «international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences», 2019, Volume XLII-2/W11, pp. 269 – 276.
- A. Bonora, K. Fabbri, M. Pretelli, L'Historic Indoor Microclimate dell'edilizia contemporanea. Applicazioni e vantaggi derivanti dallo studio diacronico del microclima, in: 33° convegno internazionale Scienza e Beni Culturali. Collana Scienza e Beni Culturali, Le nuove frontiere del restauro. Trasferimenti, Contaminazioni, Ibridazioni, Marghera Venezia, Edizioni Arcadia Ricerche, 2017, pp. 871 – 880.
- A. Bonora, K. Fabbri, M. Pretelli, Widespread Difficulties and Applications in the Monitoring of Historical Buildings: The Case of the Realm of Venaria Reale, *Heritage.* 3 (2020) 128–139. <https://doi.org/10.3390/heritage3010008>.
- A. Bonora, K. Fabbri, M. Pretelli, Study of the indoor microclimate for preventive conservation and sustainable management of historic buildings: the case of Villa Barbaro, Maser, EEHB2018 3rd Int. Conf. Energy Effic. Hist. Build. (2018).
- A. Bonora, La conservazione del patrimonio storico immateriale: il microclima di Villa Barbaro a Maser, Tesi di Laurea Magistrale in ingegneria dei processi e dei sistemi edilizi, Università di Bologna, Alma Mater Studiorum, 2015/2016, relatore M. Pretelli, co-relatore K. Fabbri.
- A. Bonora, Studio del microclima indoor per la conservazione preventiva di Villa Barbaro, Maser, in *Restauro: Conoscenza, Progetto, Cantiere, Gestione. Sezione 1.3: Conoscenza previa (preventiva) e puntuale (mirata) Casi studio: grande scala*, pp.229-233, Quasar, Roma, 2020. ISBN:978-88-5491-016-4.
- S. Bosman, *The National Gallery in wartime*, The National Gallery, London, 2008.
- S. Bradley, 'Preventive Conservation Research and Practice at the British Museum', *Journal of the American Institute for Conservation*, Vol. 44, No. 3, pp. 159-173, 2005.
- C. Brandi, *Teoria del restauro*, Edizioni di Storia e Letteratura, Roma, 1963.
- F. Braudel, S. Matthews, *Sulla Storia*, The University of Chicago Press, Chicago, 1982.
- J. R. Briggs, Environmental control for old buildings: two case studies, in Bromelle, N. S., Thomson, G., Smith, P. eds., *Conservation within historic buildings: preprints of the contributions to the Vienna congress*, 7-13 September 1980, IIC, London, pp.9-14.
- A.W. Brokerhof, B. Ankersmit, F. Ligterink, *Risk Management for Collections*, 2017.

- J. P. Brown, W. B. Rose, Humidity and Moisture in Historic Buildings: The Origins of Building and Object Conservation, *APT bulletin*, Vol.27, No.3, pp.12-23, (1996).
- R. Bruegmann, Central Heating and Forced Ventilation: Origins and Effects on Architectural Design, *J. Soc. Archit. Hist.* 37 (1978) 143–160. <https://doi.org/https://doi.org/10.2307/989206>.
- E. Bucur, A. Vasile, R. Diodiu, A. Catrangi, M. Petrescu, Assessment of indoor air quality in a wooden church for preventive conservatio, *J. Environ. Prot. Ecol.* 16 (2015) 7–17. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84946744489&partnerID=40&md5=1c721de8d84a8923b1cae267912dd45b>.
- P. Burke, Una rivoluzione storiografica. la scuola delle “Annales” (1929-1989), Laterza Collana Universale, Laterza, 2019.
- A. Burmester, M. Eibl, Climate for Collections. Standards and uncertainties, Munich, 2013.
- D. Camuffo, Il clima storico per la conservazione dei beni culturali: materiali organici e variazioni microclimatiche, *U&C.* 9 (2014) 11–12.
- D. Camuffo, P. Brimblecombe, R. Van Grieken, H.J. Busse, G. Sturaro, A. Valentino, A. Bernardi, N. Blades, D. Shooter, L. De Bock, K. Gysels, M. Wieser, O. Kim, Indoor air quality at the Correr Museum, Venice, Italy, *Sci. Total Environ.* 236 (1999) 135–152. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00262-4](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00262-4).
- D. Camuffo, Microclimate for Cultural Heritage: Conservation, Restoration, and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments: Second Edition, 2014. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-00676-7>.
- D. Camuffo, C. Bertolin, The earliest temperature observations in the world: The Medici Network (1654-1670), *Clim. Change.* (2012). <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0142-5>.
- D. Camuffo, Environment and microclimate, in: *Sci. Technol. Eur. Cult. Herit.*, 1991. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-0237-2.50012-5>.
- D. Camuffo, G. Sturaro, A. Valentino, Showcases: a really effective mean for protecting artworks, 365 (2000) 65–77.
- D. Camuffo, R. Van Grieken, H.J. Busse, G. Sturaro, A. Valentino, A. Bernardi, N. Blades, D. Shooter, K. Gysels, F. Deutsch, M. Wieser, O. Kim, U. Ulrych, Environmental monitoring in four European museums, *Atmos. Environ.* (2001). [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(01\)00088-7](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(01)00088-7).
- D. Camuffo, A. Bernardi, Fattori microclimatici e conservazione dei beni artistici, Edizioni del Laboratorio, Brescia, 1985.
- D. Camuffo, V. Fassina, J. Havermans, Basic environmental mechanism affecting cultural heritage, Nardini, Firenze, 2010.
- D. Camuffo, Indoor Dynamic Climatology: Investigations on the Interactions between Walls and Indoor Environment, *Atmospheric Environment*, Vol.17, No.9, pp.1803-1809 (1983).
- D. Camuffo, Clima e microclima: la normativa in ambito nazionale ed europeo, *Kermes. La rivista del Restauro*, Vol. 21, No. 71, pp. 49-67 (2008).
- D. Camuffo, Il riscaldamento nelle chiese e la conservazione dei beni culturali: guida all’analisi dei pro e dei contro dei vari sistemi di riscaldamento, Electa Mondadori, Milano, 2006.
- D. Camuffo, A. Bernardi, Indoor and outdoor microclimate case studies: the Trajan Column and Sistine Chapel, in: *Sci. Technol. Eur. Cult. Herit.*, 1991. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-0237-2.50034-4>.

- A. Caratelli, A.M. Siani, G.R. Casale, A. Paravicini, K.H. Fiore, D. Camuffo, Stucco panels of Room VI in the Galleria Borghese (Rome): Physical-chemical analysis and microclimate characterization, *Energy Build.* 61 (2013) 133–139. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.013>.
- T. Cardinale, G. Rospi, N. Cardinale, The influence of indoor microclimate on thermal comfort and conservation of artworks: The case study of the Cathedral of Matera (South Italy), *Energy Procedia.* 59 (2014) 425–432. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.398>.
- M. Cassar, *Environmental management. Guidelines for Museums and Galleries*, Routledge and Routledge, London-New York, 1995.
- CEN – European Committee for Standardization, EN 15757:2010, Conservation of Cultural Property. Specifications for temperature and relative humidity to limit climate-induced mechanical damage in organic hygroscopic materials, (2010).
- CEN – European Committee for Standardization, EN 15758:2010, Conservation of cultural property – Procedures and instruments for measuring temperatures of the air and the surfaces of objects, (2010).
- CEN – European Committee for Standardization, EN 15759-1:2011, Conservation of cultural property — Indoor climate — Part 1 : Guidelines for heating churches , chapels and other places of worship Contents, (2011) 1–24.
- CEN/TC346, Business Plan, Draft 4, (2012) cfr. A. Burmester, M. Eibl, *Climate for Collections. Standards and uncertainties*, Munich, 2013. pp.38-43.
- J.E. Christensen, C.G. Kollias, Hygrothermal evaluation of a museum storage building based on actual measurements and simulations, *Energy Procedia.* 78 (2015) 651–656. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.051>. S.P. Corgnati, V. Fabi, M. Filippi, A methodology for microclimatic quality evaluation in museums: Application to a temporary exhibit, *Build. Environ.* (2009). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.09.012>.
- S.P. Corgnati, M. Filippi, Assessment of thermo-hygrometric quality in museums: Method and in-field application to the “ Duccio di Buoninsegna” exhibition at Santa Maria della Scala (Siena, Italy), *J. Cult. Herit.* 11 (2010) 345–349. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2009.05.003>.
- S.P. Corgnati, M. Filippi, M. Perino, A new approach for the IEQ (Indoor Environment Quality) assessment, in: *Proc. 3rd Int. Build. Phys. Conf. - Res. Build. Phys. Build. Eng.*, 2006.
- P. Cornaglia, *Giardini di marmo ritrovati. La geografia del gusto in un secolo di cantiere a Venaria Reale (1699-1798)*, Torino, Lindau, 1994.
- L. Cortés, *Ad summum caeli Programa alegórico humanista de escalera de la universidad*, 1994.
- S. Costanzo, A. Cusumano, C. Giaconia, G. Giaconia, Preservation of the artistic heritage within the seat of the Chancellorship of the University of Palermo. A proposal on a methodology regarding an environmental investigation according to Italian Standards, *Build. Environ.* 41 (2006) 1847–1859. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.06.010>.
- V. Costanzo, K. Fabbri, S. Piraccini, Stressing the passive behavior of a Passivhaus : An evidence-based scenario analysis for a Mediterranean case study, *Build. Environ.* 142 (2018) 265–277. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.035>.
- V. Costanzo, K. Fabbri, E. Schito, M. Pretelli, L. Marletta, Microclimate monitoring and conservation issues of a Baroque church in Italy: a risk assessment analysis, 2021, *Building Research and Information*.

- J. Cuesta Bustillo, *La Universidad de Salamanca: Ochocientos años*, Ediciones Universidad de Salamanca, Salamanca, 2018.
- V. D'Agostino, F.R. D'Ambrosio Alfano, B.I. Palella, G. Riccio, The museum environment: A protocol for evaluation of microclimatic conditions, *Energy Build.* 95 (2015) 124–129. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.009>.
- D. Dagostino, A. Macchia, R. Cataldo, L. Campanella, A. Campbel, Microclimate and salt crystallization in the crypt of lecces duomo, *J. Arch. Herit.* 9 (2015) 290–299. <https://doi.org/10.1080/15583058.2013.777862>.
- R. Daris, M. Kaucic, *Matematica per l'economia e la statistica*, Udine, 2014.
- G. De Guichen, *Climate in Museums*, ICCROM, Rome, (1980).
- G. De Guichen, *Conservation in Museums: a didactic exhibition organized by ICCROM*, Museum, Vol.30, No.1, pp. 61-63 (1978).
- G. De Guichen, *Introduzione alla Conservazione Preventiva*, in C. Menegazzi, I. Silvestri, *Servizi e professionalità "nuove" per la tutela. La Conservazione Preventiva delle raccolte museali [Atti del convegno del 27 Marzo 1999]*, Nardini Editore, Firenze, 2003.
- G. De Guichen, *La conservation préventive: un changement profond de mentalité*, Cah. d'étude Com. Conserv. (1995).
- D. Del Curto, M. Fratelli, *Edifici storici e destinazione museale. Conservazione degli edifici e delle opere d'arte. Progetti per il restauro e l'integrazione di impianti esistenti*, Il Prato, Saonara, 2010.
- J. Diamond, *Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed*, Viking Press, New York, 2004.
- K. Fabbri, A. Bonora, Two new indices for preventive conservation of the cultural Heritage: Predicted Risk of Damage and Heritage Microclimate Risk., *Journal of Cultural Heritage.* 47 (2021) 208-217. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.09.006>.
- K. Fabbri; M. Pretelli; A. Bonora, *Building simulation to measure indoor microclimate in heritage buildings*, 2-5 Settembre, Roma, 2019, *Convegno Building Simulation*. Vol. 29 N. 2, pp. 4086 – 4093. ISBN: 978-1-7750520-1-2, DOI: 10.26868/25222708.2019.210181.
- K. Fabbri, M. Pretelli, *Heritage buildings and historic microclimate without HVAC technology: Malatestiana Library in Cesena, Italy, UNESCO Memory of the World*, *Energy Build.* 76 (2014) 15–31. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.051>.
- K. Fabbri, M. Pretelli, A. Bonora, *HIM (Historic indoor microclimate) e conservazione preventiva, REHABEND, Spain Euro-American Congress. Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management*, Cáceres, 2018, pp. 2531-2536. ISBN: 978-84-697-7033-7.
- P. O. Fanger, *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*, 1970.
- P.M. Farina (a cura di), *Dal restauro alla Manutenzione, Dimore Reali in Europa*, Atti del primo Convegno Internazionale di studi (Monza-Milano, 12-15 ottobre, 2000), Il prato, Saonara, 2003.
- J. Ferdyn-Grygierek, *Indoor environment quality in the museum building and its effect on heating and cooling demand*, *Energy Build.* (2014). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.014>.
- J. Ferdyn-grygierek, *Monitoring of indoor air parameters in large museum exhibition halls with and without air-conditioning systems*, *Build. Environ.* 107 (2016) 113–126. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.07.024>.

- D. Fiorani, L'invecchiamento e il degrado, in CARBONARA G. (a cura di), *Trattato del Restauro Architettonico*, vol.2, Torino, UTET, 1996, pp. 297-409.
- G. Forino, J. MacKee, J. von Meding, A proposed assessment index for climate change-related risk for cultural heritage protection in Newcastle (Australia), *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 19 (2016) 235–248. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2016.09.003>.
- D. Forleo, S. De Blasi, N. Francaviglia, A. Pawlak, *Cronache 7 – EPICO – European Protocol in Preventive Conservation – Phase 1 Metodi di valutazione della conservazione di collezioni nelle dimore storiche*
- S. Franceschi, L. Germani, *Il degrado dei materiali nell'edilizia. Cause e valutazioni delle patologie*, DEI Editore, Milano, 2012.
- F. Frasca, E. Verticchio, C. Cornaro, A.M. Siani, *Optimising Conservation of Artworks , Energy Performance and Thermal Comfort Combining Hygrothermal Dynamic Simulation and On-Site Measurements in Historic Buildings Department of Physics , Sapienza Università di Roma , Rome , Italy Department of Earth Sc, (2019) 2856–2863.*
- D. Gandini, *Il portico della gloria Lourdes, Santiago de Compostela, Finisterre a piedi*, Bologna, 2004.A. Griseri, *Le metamorfosi del Barocco*, Torino, 1967.
- J.M. García Iglesias, *Catedral de Santiago e o barroco, a: (1657-1751), 1990.* <https://doi.org/8485665201>.
- F. García-Diego, M. Zarzo, *Microclimate monitoring by multivariate statistical control: The renaissance frescoes of the Cathedral of Valencia (Spain, J. Cult. Herit. (2010).* <https://doi.org/10.1016/j.culher.2009.06.002>.
- V.E. Gianazzo di Pamparato, *Il castello della Venaria Reale. Cenni storico-artistici con note, documenti e tavole illustrate*, Torino, 1888.
- S. Giedion, *Mechanization Takes Command*, Oxford, 1948.
- G. Giovannoni, *Il restauro dei monumenti*, Cremonese, Roma, 1946.
- G. Gritella, *Juvarra l'architettura*, Franco Cosimo Panini, Modena, 1992.
- J.A. Herraiez, M.A.Rodriguez Lorite (1991): *Recomendaciones para el Control de las Condiciones Ambientales en Exposiciones Temporales*. Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, Ministerio de Cultura. Madrid.
- Z. Huijbregts, R.P. Kramer, M.H.J. Martens, A.W.M. van Schijndel, H.L. Schellen, *A proposed method to assess the damage risk of future climate change to museum objects in historic buildings, Build. Environ.* 55 (2012) 43–56. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.008>.
- ICR – Istituto Centrale del Restauro (1976) *Piano pilota per la conservazione programmata dei beni culturali in Umbria. Progetto esecutivo a cura di Ministero per i Beni Culturali e Ambientali, ICR, Roma*
- IPCE, *Normas de conservación preventiva para la implantación de sistemas de control de condiciones ambientales en museos, bibliotecas, archivos, monumentos y edificios históricos*, Ministerio de cultura, Madrid, 2009.
- ISO 7730:2006, *Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale*, (2006).

- H. Janssen, J.E. Christensen, Hygrothermal optimisation of museum storage spaces, *Energy Build.* 56 (2013) 169–178. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.043>.
- F. Karaca, An AHP-based indoor Air Pollution Risk Index Method for cultural heritage collections, *J. Cult. Herit.* 16 (2015) 352–360. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2014.06.012>.
- H. Karge, De la portada románica de la transfiguración al pórtico de la gloria. Nuevas investigaciones sobre la fachada occidental de la Catedral de Santiago de Compostela, *BSAA Arte.* LXXV (2009).
- R.P. Kramer, H.L. Schellen, A.W.M. van Schijndel, Impact of ASHRAE’s museum climate classes on energy consumption and indoor climate fluctuations: Full-scale measurements in museum Hermitage Amsterdam, *Energy Build.* 130 (2016) 286–294. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.016>.
- B. Krupińska, R. Van Grieken, K. De Wael, Air quality monitoring in a museum for preventive conservation: Results of a three-year study in the Plantin-Moretus Museum in Antwerp, Belgium, *Microchem. J.* (2013). <https://doi.org/10.1016/j.microc.2013.05.006>.
- M. La Gennusa, G. Lascari, G. Rizzo, G. Scaccianoce, Conflicting needs of the thermal indoor environment of museums: In search of a practical compromise, *J. Cult. Herit.* 9 (2008) 125–134. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2007.08.003>.
- J. Leissner, R. Kilian, L. Kotova, D. Jacob, U. Mikolajewicz, T. Broström, J. Ashley-Smith, H.L. Schellen, M. Martens, J. Van Schijndel, F. Antretter, M. Winkler, C. Bertolin, D. Camuffo, G. Simeunovic, T. Vyhřídál, Climate for culture: Assessing the impact of climate change on the future indoor climate in historic buildings using simulations, *Herit. Sci.* 3 (2015) 1–15. <https://doi.org/10.1186/s40494-015-0067-9>.
- Le Corbusier, *Verso una nuova architettura*, Collana Grandi Libri, Longanesi, Milano, 1923.
- G. Litti, A. Audenaert, J. Braet, K. Fabbri, A. Weeren, Synthetic scan and simultaneous index aimed at the Indoor Environmental Quality evaluation and certification for people and artworks in heritage buildings, *Energy Procedia.* 78 (2015) 1365–1370. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.155>.
- S. Lorusso, *L’ambiente di conservazione dei beni culturali*, Pitagora, Bologna, 2001.
- E. Lucchi, Review of preventive conservation in museum buildings, *J. Cult. Herit.* (2017) 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.09.003>.
- B. Ma Castro Fernández, *Francisco Pons Sorolla: arquitectura y restauración en Compostela (1945- 1985)*, Santiago de Compostela, 2013.
- C. Magnani, *La conservazione del patrimonio storico immateriale: il microclima di Villa Petraia a Firenze*, Tesi di Laurea Magistrale in ingegneria dei sistemi edilizi e urbani, Università di Bologna, Alma Mater Studiorum, 2015/2016, relatore L. Signorelli, co-relatore K. Fabbri. M. Pretelli.
- A. Marchetti, S. Pilehvar, L. ’t Hart, D. Leyva Pernia, O. Voet, W. Anaf, G. Nuyts, E. Otten, S. Demeyer, O. Schalm, K. De Wael, Indoor environmental quality index for conservation environments: The importance of including particulate matter, *Build. Environ.* 126 (2017) 132–146. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.09.022>.
- K. Maroy, M. Steeman, A. Janssens, L. De Backer, M. De Paepe, Conservation climate analysis of a church containing valuable artworks, *Energy Procedia.* 78 (2015) 1269–1274. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.286>.
- M.H.J. Martens, *Climate Risk Assessment in Museums*, Eindhoven University of Technology, 2012.
- MIBACT, Ref.B) MIBACT, Ministerial Decree, Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei, 10th May 2001, (2001).

- C.M. Muñoz-González, A.L. León-Rodríguez, J. Navarro-Casas, Air conditioning and passive environmental techniques in historic churches in Mediterranean climate. A proposed method to assess damage risk and thermal comfort pre-intervention, simulation-based, *Energy Build.* 130 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.078>.
- S.F. Musso, *Recupero e restauro degli edifici storici. Guida pratica al rilievo e alla diagnostica*, Roma, 2016.
- S. Michalski, Preventive conservation: a wall chart, IIC-CG GC 13th Annual Conference Abstracts, Ottawa 1987, p. 53-54 (1987).
- S. Michalski, Quantified risk reduction in the humidity dilemma', *APT bulletin*, Vol. 27, No.3, p.25-29 (1996).
- A. Neri, S. Corbellini, M. Parvis, L. Arcudi, S. Grassini, M. Piantanida, E. Angelini, Environmental monitoring of heritage buildings, *IEEE Work. Environ. Energy, Struct. Monit. Syst. EESMS*. 2009 (2009) 93–97. <https://doi.org/10.1109/EESMS.2009.5341308>.
- B. Nicolai, K. Rheidt, Nuevas investigaciones sobre la historia de la construcción de la catedral de Santiago de Compostela, *Ad Limina*. vol.1 (2010). ISSN 2171-620X.
- J. Nora, J. Le Goff, *Faire de l'histoire*, 3 vol., Gallimard, Parigi, 1974.
- B. Pacini, M. Raggi, *Statistica per l'analisi operativa dei dati*, Carrocci, Roma, 2006.
- P. Pasquarella, C. Balocco, G. Pasquariello, G. Petrone, E. Saccani, P. Manotti, M. Ugolotti, F. Palla, O. Maggi, R. Albertini, A multidisciplinary approach to the study of cultural heritage environments: Experience at the Palatina Library in Parma, *Sci. Total Env.* 536 (2015) 557–567. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.10>.
- C. Passanti, *Sulla decorazione architettonica di Juvarra a Torino. Nuovi progetti per la città*, a cura di A. Griseri, G. Romano, Torino, 1989
- A. Palladio, *I Quattro libri dell'Architettura*, edizione elettronica del 15 Settembre 2009, copia anastatica, Hoepli, Milano, 1980.
- G. Pavlogeorgatos, Environmental parameters in museums, *Build. Environ.* 38 (2003) 1457–1462. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00113-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00113-6).
- P. Pellegrini, *L'Architettura*, Edizioni Il Polifilo, Milano, 1990.
- F. Pernice, *La chiesa di Sant'Uberto a Venaria Reale: storia e restauri*, Celid, Torino, 2003.
- F. Pernice, *La Venaria Reale. Ombre e luci*, Celid, Torino, 2013.
- R. Pommer, Eighteenth Century Architecture in Piedmont, pp. 23-35.
- L.M. Possati, *Ricoeur e l'esperienza storica. L'ermeneutica filosofica nella tradizione delle "Annales,"* Edizioni Carrocci collana Biblioteca di testi e studi, Roma, 2008.
- M. Pretelli, K. Fabbri, A. Bonora, Indoor microclimate monitoring: use and issues. The case of the realm of Venaria Reale, in: *Il patrimonio culturale in mutamento. Le sfide dell'uso*, Marghera - Venezia, Arcadia Ricerche srl, 2019, pp. 885 – 894.
- M. Pretelli, K. Fabbri, A. Bonora, The Study of Historical Indoor Microclimate (HIM) to Contribute towards Heritage Buildings Preservation, *Heritage*. 2 (2019) 2287–2297. <https://doi.org/10.3390/heritage2030140>.

- M. Pretelli, K. Fabbri, *Historic Indoor Microclimate of the Heritage Buildings - A Guideline for Professionals who care for Heritage Buildings*, Springer International Publishing, Gewerbestrasse, 2018. <http://www.springer.com/it/book/9783319603414>.
- M. Pretelli, K. Fabbri, *La conservazione degli impianti storici, (a cura di): D. Concas, CONSERVAZIONE vs INNOVAZIONE. L'inserimento di elementi tecnologici in contesti storici*, Il Prato Editore, Saonara, 2018. ISBN 978886336418, pp33 -45.
- M. Pretelli, K. Fabbri, *Malatestiana Library in Cesena, Italy, Hist. Indoor Microclim. Herit. Build.* (2018) 159–183. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60343-8_8.
- M. Pretelli, A. Ugolini, K. Fabbri, *Historic plants as monuments preserving, rethinking and re-using historic plants*, *J. Cult. Herit.* 14 (2013) S38–S43. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.12.013>.
- F.I.G. Rawlins, *Care of works of art in war-time*, *Nature*, Vol.150, No.3795, pp.112-114 (1942).
- A. Riegl, *Der Moderne Denkmalkultus: Sein Wesen Und Seine Entstehung* (1903), Kessinger Publishing, 2010.
- C. Roggero, M. Turetta, A. Vanelli, *Le residenze sabaude*, Allemandi, Torino, 2018.
- L. Rovere, V. Viale, *Filippo Juvarra*, Oberdan Zucchi, Milano, 1937.
- C. Ruckert, *La escultura medieval en Francia y España*, 2010.
- J. Ruskin, *Le sette lampade dell'architettura*, Jaca Book, Milano, 1982.
- E. Schito, P. Conti, D. Testi, *Multi-objective optimization of microclimate in museums for concurrent reduction of energy needs, visitors' discomfort and artwork preservation risks*, *Appl. Energy.* (2018). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.076>.
- E. Schito, L. Dias Pereira, D. Testi, M. Gameiro da Silva, *A procedure for identifying chemical and biological risks for books in historic libraries based on microclimate analysis*, *J. Cult. Herit.* 37 (2019) 155–165. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.10.005>.
- E. Schito, D. Testi, W. Grassi, *A proposal for new microclimate indexes for the evaluation of indoor air quality in museums*, *Buildings.* (2016). <https://doi.org/10.3390/buildings6040041>.
- A. Serra, *La ricerca storica unita alla building performance simulation per l'analisi del microclima come strumento di conoscenza innovativo del patrimonio edilizio. Il caso di palazzo Guiccioli a Ravenna*, Tesi di Laurea Magistrale in ingegneria edile-architettura, Università di Bologna, Alma Mater Studiorum, 2016/2017, relatore M. Antonucci, Co-relatore K. Fabbri, V. Gianfrate, E.R. Agostinelli.
- D. Severo, *Filippo Juvarra*, Zanichelli, Milano, 1996. G. Sgarzini, *Residenze sabaude. Corona di delizie*, Ist. Poligrafico dello Stato, 2008.
- H. Sharif-Askari, B. Abu-Hijleh, *Review of museums' indoor environment conditions studies and guidelines and their impact on the museums' artifacts and energy consumption*, *Build. Environ.* 143 (2018) 186–195. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.07.012>.
- H.E. Silva, F.M.A. Henriques, *Microclimatic analysis of historic buildings: A new methodology for temperate climates*, *Build. Environ.* 82 (2014) 381–387. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.005>.
- H.E. Silva, F.M.A. Henriques, *Preventive conservation of historic buildings in temperate climates. The importance of a risk-based analysis on the decision-making process*, *Energy Build.* 107 (2015) 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.067>.

- H.E. Silva, F.M.A. Henriques, T.A.S. Henriques, G. Coelho, A sequential process to assess and optimize the indoor climate in museums, *Build. Environ.* 104 (2016) 21–34. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.023>.
- M.H.L. Stappers, B. Ankersmit, *Managing Indoor Climate Risks in Museums*, Original D, Springer, International Publishing, Amsterdam, 2017.
- R. Suárez, A. Alonso, J.J. Sendra, Intangible cultural heritage: The sound of the Romanesque cathedral of Santiago de Compostela, *J. Cult. Herit.* 16 (2015) 239–243. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2014.05.008>.
- G. Thomson, Contributions to the London Conference on museum climatology. 18-23 Settembre 1967, *Int. Ist. Conserv. Hist. Artist. Work.* (1967).
- L. Tronchin, K. Fabbri, Energy and microclimate simulation in a heritage building: Further studies on the Malatestiana Library, *Energies.* 10 (2017). <https://doi.org/10.3390/en10101621>.
- A. Ugolini, M. Pretelli, K. Fabbri, A. Mila, P. Errani, Indoor microclimate and preservation of Historic Architecture: the Malatestiana Library in Cesena, in: 6th Int. Congr. “Science Technol. Safeguard Cult. Herit. Mediterr. Basin” Proc. VOL. I – Sess. A, C Resour. Territ. Biol. Divers., Editore VALMAR, Roma, 2014: pp. 23–30.
- UNI – Ente Italiano di Unificazione (2004) Norma UNI 11120:2004 Beni culturali. Misurazione in campo della temperatura dell’aria e della superficie dei manufatti.
- UNI – Ente Italiano di Unificazione (2005) Norma UNI 11131:2005 Beni culturali. Misurazione in campo dell’umidità dell’aria.
- UNI – Ente Nazionale Italiano di Unificazione (1999) UNI 10829:1999 Beni di interesse storico e artistico - Condizioni ambientali di conservazione - Misurazione ed analisi.
- UNI – Ente Nazionale Italiano di Unificazione (2002) UNI EN 10969:2002 - Beni Culturali. Condizioni ambientali di conservazione. Principi generali per la scelta e il controllo dei parametri microclimatici in ambienti interni.
- G. Urbani, *Intorno al restauro*, a cura di B. Zanardi, Milano, 2000.
- G. Urbani, *Problemi di conservazione. Atti della Commissione per lo sviluppo tecnologico della conservazione dei beni culturali*, Compositori, Bologna, 1973.
- Vaisala Oyj, Humidity conversion formulas – Calculation formulas for humidity, in: *Humidity Conversion Formulas*, 2013, p.16.
- G. Valadier, *L’Architettura Pratica*, Vol. I-II-III-IV-V, Sapere 2000, Roma, 1992.
- O.F. Van Den Brink, G.B. Eijkel, J.J. Boon, Dosimetry of paintings : determination of the degree of chemical change in museum-exposed test paintings by mass spectrometry, *Thermochim. Acta.* 365 (2000) 1–23.
- M.J. Varas-muriel, R. Fort, M.I. Martínez-garrido, A. Zornoza-indart, Fluctuations in the indoor environment in Spanish rural churches and their effects on heritage conservation : Hygro-thermal and CO₂ conditions monitoring, *Build. Environ.* J. 82 (2014).
- M. Vitruvio Pollione, *I dieci libri dell’architettura*, tradotto e commentato da Daniele Barbaro, Edizioni Il Polifilo, Milano, 1567.

- E. Vuerich, F. Malaspina, M. Barazutti, T. Georgiadis, M. Nardino, Indoor measurements of microclimate variables and ozone in the church of San Vincenzo (Monastery of Bassano Romano - Italy): A pilot study, *Microchem. J.* 88 (2008) 218–223. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2007.11.014>.
- B. Zanardi, *Il restauro*. Giovanni Urbani e Cesare Brandi, due teorie a confronto, Milano, 2010.
- S. Zani, A. Cerioli, *Analisi dei dati e data mining per le decisioni aziendali*, Giuffrè editore, Milano, 2007.
- C. Zhu, N. Li, Study on indoor air quality evaluation index based on comfort evaluation experiment, *Procedia Eng.* 205 (2017) 2246–2253. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.066>.
- V. Živković, V. Džikić, Return to basics - Environmental management for museum collections and historic houses, *Energy Build.* 95 (2015) 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.023>.

Siti consultati

<http://www.icom-cc.org/332/-icom-cc-documents/declaration-on-environmental-guidelines/#.Xs5ug2gzZEY>

www.revista.ge-iic.com

<https://online.ucpress.edu/jsah/article/37/3/143/57007/Central-Heating-and-Forced-Ventilation-Origins-and>

https://www.metmuseum.org/-/media/files/about-the-met/annual-reports/2010_2011/mission-statement.pdf

<https://www.centrorestaurovenaria.it/ricerca-e-innovazione/progetti/epico-project-european-protocol-preventive-conservation>

http://heritagecare.eu/wp-content/uploads/2019/10/HeritageCare-Guidelines-for-Good-Practices-EN_compressed.pdf

<https://www.salamancaenlayer.com/2012/08/calle-libreros.html>

<http://www.fachadausal.es/index.php>

<https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/humidity-sensors/humidity-temperature-sensor-sht2x-digital-i2c-accurate/>

<http://www.unesco.org/new/fr/communication-and-information/flagship-project-activities/memory-of-the-world/register/full-list-of-registered-heritage/registered-heritage-page-8/the-malatesta-novello-library/#c187210>

<https://www.spain.info/it/immagini/portico-gloria-santiago-compostela/>

https://www.turismo.gal/que-visitar/destacados/catedral-e-centro-historico/catedral-de-santiago-de-compostela?langId=it_IT

<http://www.artigianelli.org/wordpress/wp-content/uploads/2012/09/Il-Portico-della-Gloria.pdf>

<https://www.camminosantiagodecompostela.it/cammino-di-santiago-dati-e-statistiche-di-tutto-il-2019/#:~:text=Sono%20da%20poco%20uscite%2C%20come,sono%20stati%20in%20totale%20347.578.>

[http://www.ansamed.info/ansamed/it/notizie/stati/spagna/2018/07/03/spagna-portico-della-gloria-ritrova-lo-splendore-medievale_8c0b1b8f-f6d1-4896-9389-1918680f85ab.html#:~:text=Nella%20Cattedrale%20di%20Santiago%20ultimato%20il%20restauro%20durato%2010%20anni&text=\(ANSAmed\)%20%2D%20MADRID%2C%203,un%20restauro%20durato%20dieci%20anni;https://fundacionbarrie.org/programa-catedral;](http://www.ansamed.info/ansamed/it/notizie/stati/spagna/2018/07/03/spagna-portico-della-gloria-ritrova-lo-splendore-medievale_8c0b1b8f-f6d1-4896-9389-1918680f85ab.html#:~:text=Nella%20Cattedrale%20di%20Santiago%20ultimato%20il%20restauro%20durato%2010%20anni&text=(ANSAmed)%20%2D%20MADRID%2C%203,un%20restauro%20durato%20dieci%20anni;https://fundacionbarrie.org/programa-catedral;)

<https://www.artribune.com/dal-mondo/2018/07/restauro-cattedrale-santiago-compostela/>

https://online.ibc.regione.emilia-romagna.it/I/libri/pdf/oggetti_nel_tempo.pdf

https://www.meteogalicia.gal/observacion/estacionshistorico/historico.action?idEst=10050&request_locale=es#

<https://energyplus.net/weather>

https://www.meteogalicia.gal/observacion/estacionshistorico/historico.action?idEst=10050&request_locale=es#

<https://www.centrorestaurovenaria.it/>

<https://www.iccrom.org/>

<https://www.beniculturali.it/comunicato/manutenzione-e-cura-del-territoriosintesi-degli-orientamenti-maturati-con-il-seminario-del-21-ottobre-2016-promosso-dalla-diocesi-di-brescia-e-dall-istituto-mnemosyne>

Apparato I: I beni conservati nella sala 33 della Reggia di Venaria Reale sono i seguenti³⁰⁴:



Autore: Giovanna Maria Battista Clementi detta Clementina, attribuito

Titolo: Ritratto di Polissena d'Assia Rheinfels

Periodo: XVIII Secolo

Anno: 1728-1730

Tipologia: Dipinto

Materiale e tecnica: Olio su tela

Ente prestatore: Nichelino (TO), Palazzina di Caccia di Stupinigi –
Fondazione Ordine Mauriziano

Collocazione: Sala 33 - Gabinetto di Toeletta della Regina

Dimensioni: h 91 X l 66 cm



Autore: Pietro Domenico Olivero, attribuito

Titolo: Il miracolo del Santissimo Sacramento nella Piazza
del Grano a Torino: la caduta dell'asina

Periodo: XVIII Secolo

Anno: 1753 circa

Tipologia: Dipinto

Materiale e tecnica: Olio su tela

Ente prestatore: Regione Piemonte

Collocazione: Sala 33 - Gabinetto di Toeletta della Regina

Dimensioni: h 113 X l 135 cm (con cornice h 135 X l 160 x p 6 cm)

³⁰⁴ Cfr. <https://www.lavenaria.it/it/collezione>



Autore: Imitatore di André-Charles Boulle

Titolo: Scrivania a otto gambe

Periodo: XVII Secolo

Anno: ultimo decennio del XVII secolo

Tipologia: Mobile/Arredo

Materiale e tecnica: Legno di noce e pioppo, lamina di ottone

Ente prestatore: Torino, Palazzo Madama – Museo Civico d'Arte Antica

Collocazione: Sala 33 - Gabinetto di Toeletta della Regina

Dimensioni: h 86 X l 131 X p 75 cm

Dall'immagine si nota anche la presenza di un tappeto in sala.

Dall'immagine soprastante si nota anche la presenza di un tappeto in sala.



Autore: Intagliatore torinese

Titolo: Serie di due sedie a bracciolo

Periodo: XVIII Secolo

Anno: primo quarto XVIII secolo

Tipologia: Mobile/Arredo

Materiale e tecnica: Legno di noce intagliato,
tessuto a piccolo e grande punto

Ente prestatore: Torino, Compagnia di San Paolo

Collocazione: Sala 33 - Gabinetto di Toeletta della Regina

Dimensioni: h 109 X l 67 cm



Autore: Argentiere piemontese

Titolo: Due coppie di candelieri

Periodo: XVIII Secolo

Anno: 1770

Tipologia: Oggetto

Materiale e tecnica: Argento

Ente prestatore: Regione Piemonte

Collocazione: Sala 33 - Gabinetto di Toeletta della Regina



Autore: Argentiere piemontese

Titolo: Tre zuccheriere con coperchio

Periodo: XVIII Secolo

Anno: 1760 circa

Tipologia: Oggetto

Materiale e tecnica: Argento

Ente prestatore: Regione Piemonte

Collocazione: Sala 33 - Gabinetto di Toeletta della Regina



Autore: Argentiere piemontese

Titolo: Caffettiera

Periodo: XVIII Secolo

Anno: 1770 circa

Tipologia: Oggetto

Materiale e tecnica: Argento

Ente prestatore: Regione Piemonte

Collocazione: Sala 33 - Gabinetto di Toeletta della Regina



Autore: Gabriel Marcello Giuliano

Titolo: Coppia di saliere

Periodo: XVIII Secolo

Anno: 1785 circa

Tipologia: Oggetto

Materiale e tecnica: Argento

Ente prestatore: Regione Piemonte

Collocazione: Sala 33 - Gabinetto di Toeletta della Regina



Autore: Andrea Boucheron

Titolo: Tazza da puerpera (paiola) con coperchio e vassoio

Periodo: XVIII Secolo

Anno: metà XVIII secolo

Tipologia: Oggetto

Materiale e tecnica: Argento dorato (vermeil) fuso e cesellato

Ente prestatore: Regione Piemonte

Collocazione: Sala 33 - Gabinetto di Toeletta della Regina

Dimensioni: Paiola: h 15 cm e diametro di 30 cm; Vassoio: diametro di 24 cm

I beni conservati nella sala 33 della Reggia di Venaria Reale sono i seguenti³⁰⁵:



Autore: Ambito francese

Titolo: Putti vendemmianti (Allegoria dell'autunno)

Periodo: XVIII Secolo

Anno: metà XVIII secolo (?)

Tipologia: Scultura

Materiale e tecnica: Terracotta

Ente prestatore: Torino, Fondazione Ottavio Mazzonis

Collocazione: Sala 38 - Camera da Letto del Re

Dimensioni: h 45,5 cm



Autore: Intagliatore piemontese

Titolo: Specchiera

Periodo: XVIII Secolo

Anno: 1730-1740

Tipologia: Mobile/Arredo

Materiale e tecnica: Legno e specchio

Ente prestatore: Torino, Palazzo Madama – Museo Civico d'Arte Antica

Collocazione: Sala 38 - Camera da Letto del Re

Dimensioni: h 200 X l 120 cm

³⁰⁵ Cfr. <https://www.lavenaria.it/it/collezione>



Autore: Manifattura piemontese

Titolo: Coppia di appliques con specchio

Periodo: XVIII Secolo

Anno: 1740-1770

Tipologia: Mobile/Arredo

Materiale e tecnica: Legno, bronzo dorato e specchio

Ente prestatore: Torino, Palazzo Madama – Museo Civico d'Arte Antica

Collocazione: Sala 38 - Camera da Letto del Re

Dimensioni: h 147 X 142 cm



Autore: Robert (Parigi)

Titolo: Orologio da muro

Periodo: XVIII Secolo

Anno: 1740 circa

Tipologia: Oggetto

Materiale e tecnica: Legno, tartaruga e ottone

Ente prestatore: Torino, Palazzo Madama – Museo Civico d'Arte Antica

Collocazione: Sala 38 - Camera da Letto del Re

Dimensioni: h 91 X 150 X p 30 cm; Mensola: h 40 X 150 x p 30 cm



Autore: Intagliatore piemontese

Titolo: Console

Periodo: XVIII Secolo

Anno: 1750-1760

Tipologia: Mobile/Arredo

Materiale e tecnica: Legno e marmo

Ente prestatore: Racconigi (CN), Castello

Collocazione: Sala 38 - Camera da Letto del Re

Dimensioni: h 87 X l 136 X p 70 cm



Autore: Intagliatore piemontese (?)

Titolo: Tavolo da muro con mensa ad intarsi

Periodo: XVII Secolo

Anno: 1690-1710

Tipologia: Mobile/Arredo

Materiale e tecnica: Legno intagliato e dorato, marmi policromi e lapislazzuli

Ente prestatore: Nichelino (TO), Palazzina di Caccia di Stupinigi

↳ Fondazione Ordine Mauriziano

Collocazione: Sala 38 - Camera da Letto del Re

Dimensioni: h 82 X l 136 X p 71 cm



Autore: Bottega piemontese

Titolo: Coppia di sedie a bracciolo della serie di quattro

Periodo: XVIII Secolo

Anno: metà XVIII secolo

Tipologia: Mobile/Arredo

Materiale e tecnica: Legno intagliato e dorato, tessuto con fondo in filato metallico applicato a spirale e inserti a piccolo punto

Ente prestatore: Torino, Compagnia di San Paolo

Collocazione: Sala 38 - Camera da Letto del Re

Dimensioni: h 109 X l 72 X p 56 cm



Autore: Maria Giovanna Battista Clementi detta Clementina

Titolo: Ritratto di Vittorio Amedeo III giovane

Periodo: XVIII Secolo

Anno: 1740 circa

Tipologia: Dipinto

Materiale e tecnica: Olio su tela

Ente prestatore: Collezione Intesa Sanpaolo

Collocazione: Sala 38 - Camera da Letto del Re

Dimensioni: h 115 X 190 cm



Autore: Pittore piemontese

Titolo: Allegoria delle virtù sabaude

Periodo: VIII Secolo

Anno: 1730-1740

Tipologia: Dipinto

Materiale e tecnica: Olio su tela

Ente prestatore: Rivoli (TO), Municipio

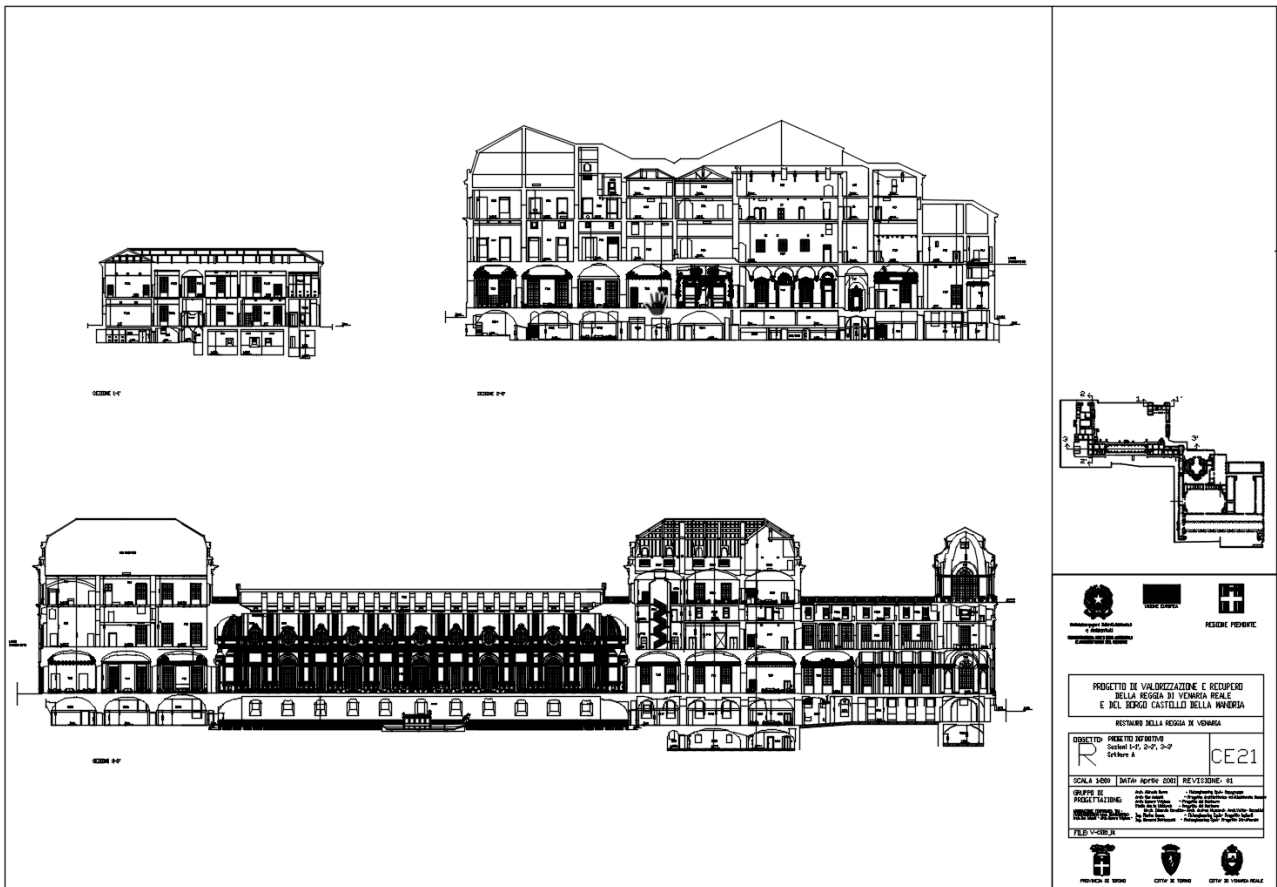
(dal Castello – Museo d'Arte Contemporanea)

Collocazione: Sala 38 - Camera da Letto del Re

Dimensioni: h 172 X 1 232 cm (con cornice h 182 X 1 242 cm)

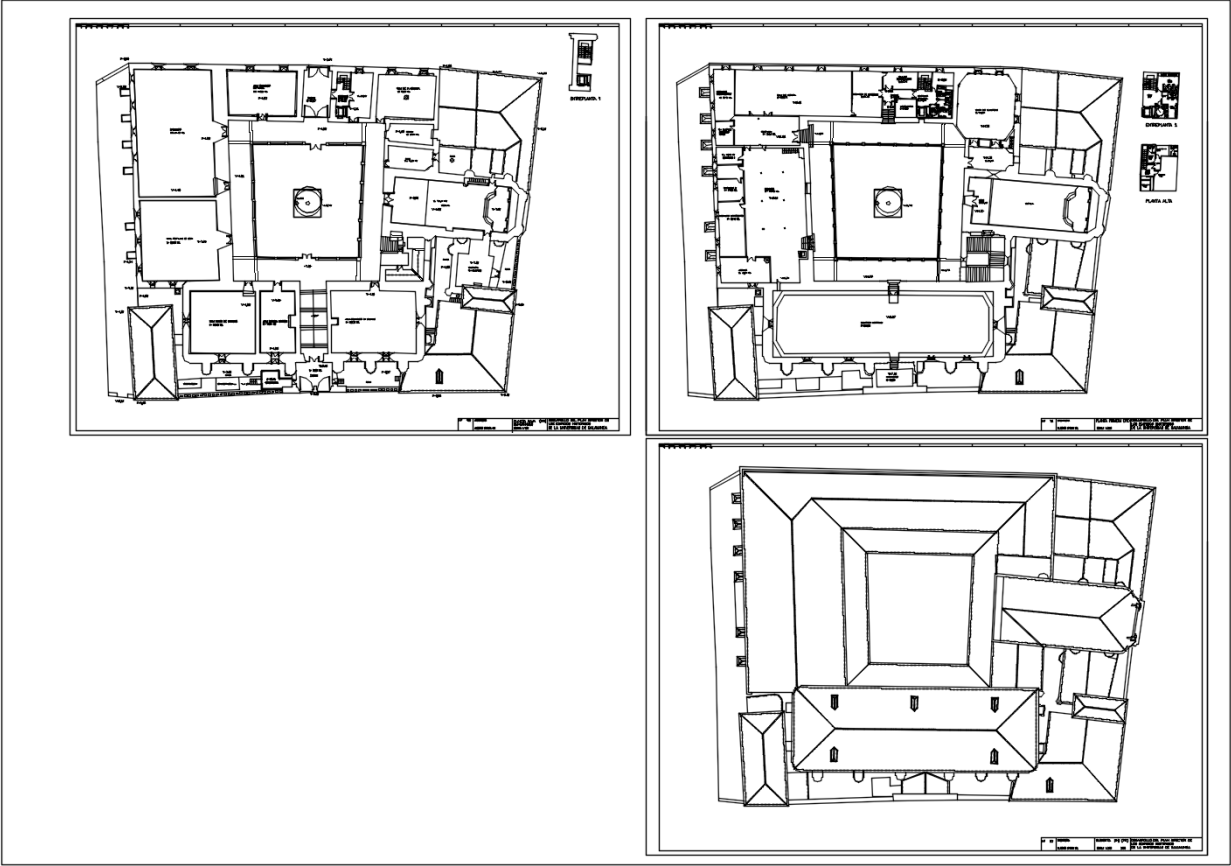
Apparato III: Sezioni della Reggia di Venaria Reale. Stampa in A0, scala 1:200.

Fonte: CC&R La Venaria Reale.



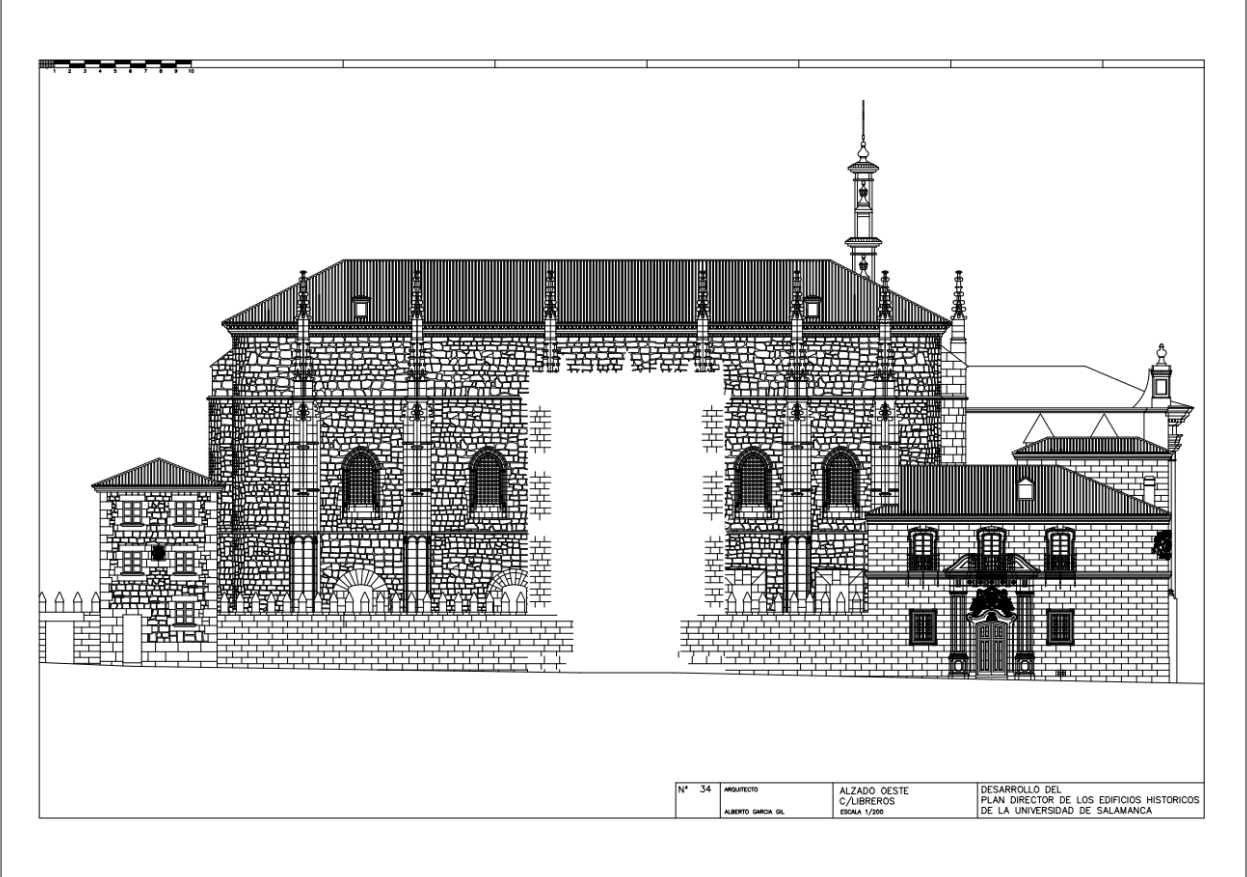
Apparato IV: Pianta dell'edificio de *Las Escuelas Mayores*. Stampa in A0, scala 1:200.

Fonte: Fondazione Santa María la Real.



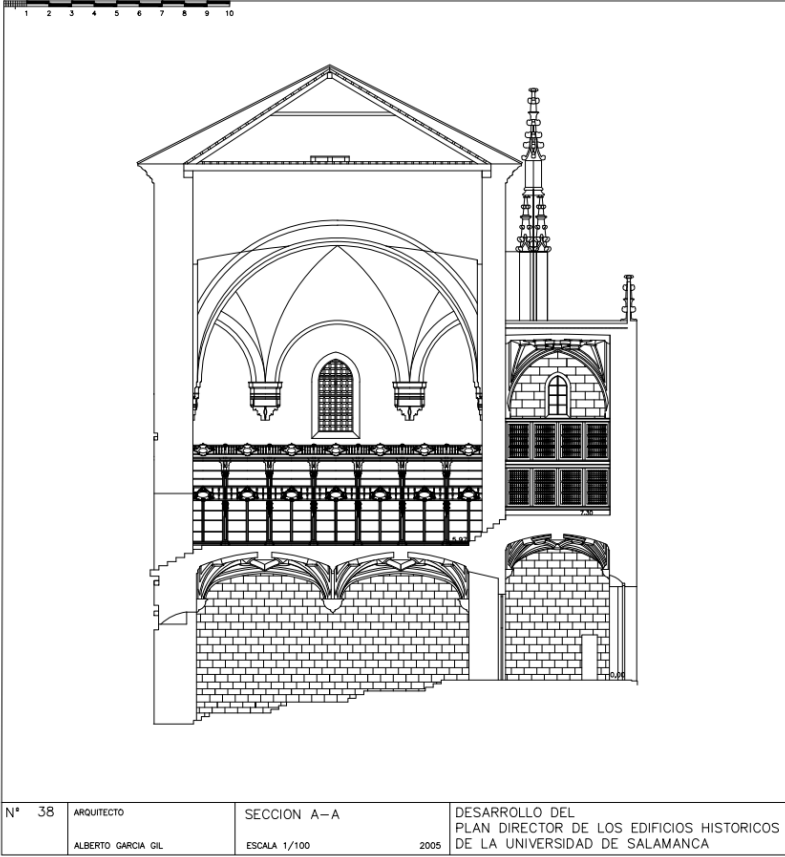
Apparato V: Prospetto dell'edificio de *Las Escuelas Mayores*. Stampa in A3, scala 1:200.

Fonte: Fondazione Santa María la Real.



Apparato VI: Sezione dell'edificio de *Las Escuelas Mayores*. Stampa in A2, scala 1:100.

Fonte: Fondazione Santa María la Real.



Apparato VII: Piante e sezioni della Biblioteca Malatestiana. Stampa in A0, scala 1:200.

Fonte: Paola Errani, ex Direttrice della Malatestiana Antica.

