

Position Paper multisocietario, GISIO-SITI/SIMPIOS, sull'utilizzo della radiazione ultravioletta nella disinfezione ambientale di aree critiche sanitarie

Multi-society Position Paper, GISIO-SITI/SIMPIOS, on the use of ultraviolet radiation in environmental disinfection of critical health areas

Gruppo di lavoro: Beatrice Casini¹, Gaetano Privitera¹, Angelo Baggiani¹, Enrica Esposito¹, Sara Bracaloni¹, Michela Scarpaci¹, Michele Totaro¹, Federica Chioveili¹, Yasmine Ferchichi¹, Daniela D'Alessandro², Giovanni Orsi², Christian Napoli², Alessandra Marani³, Amelia Focaccia⁴, Aurelio Rispettoso⁴, Osvalda De Giglio⁵, Maria Teresa Montagna⁵, Stefano Tardivo⁶, Umberto Moscato⁷, Patrizia Laurenti⁷, Flavia Beccia⁷, Maria Francesca

Rossi⁷, Maria Luisa Cristina⁸, Angelo Rossini⁹, Luca Arnoldo¹⁰, Giancarlo Ripabelli¹¹, Vincenzo Romano Spica¹², Federica Valeriani¹², Tatjana Baldovin¹³, Irene Amoroso¹³, Giovanni Boccia¹⁴, Giuseppe Calamusa¹⁵, Pasqualina Laganà¹⁶, Carla Maria Zotti¹⁷, Costanza Vicentini¹⁷, Fabrizio Bert¹⁷, Ida Torre¹⁸, Francesca Pennino¹⁸, Raffaele Zarrilli¹⁸, Fabrizio Gemmi¹⁹, Licia Veronesi²⁰, Roberto Albertini²⁰, Cesira Pasquarella²⁰,

Stefania Paduano²¹, Annalisa Bargellini²¹, Gioia Calagreti²², Domenica Di Benedetto²³, Matteo Moro²⁴, Spartaco Mencaroni²⁵, Costanza Bertoni²⁶, Andrea Patroni²⁶, Agnese Lucesoli²⁷, Enrica Martini²⁷, Andrea Tedesco²⁸, Elisa Fabbri²⁹, Angelo Pan³⁰, Giovanni Pareschi³¹, Andrea Bianco³¹, Manuela Lualdi³², Federico Patanè³³, Gabriele Milazzo³³, Antonella Agodi³³, Andrea Giuseppe Maugeri³³, Martina Barchitta³³

1. Università di Pisa, AOU Pisana
2. La Sapienza Università di Roma
3. Istituto Nazionale per le Malattie Infettive "Lazzaro Spallanzani" IRCCS
4. Università degli Studi dell'Aquila
5. Università degli Studi di Bari Aldo Moro
6. Università degli Studi di Verona
7. Università Cattolica del Sacro Cuore di Roma
8. Università degli Studi di Genova, E.O. Ospedali Galliera Genova

9. Fondazione Santa Lucia IRCCS, Roma
10. Università degli Studi di Udine
11. Università degli Studi del Molise
12. Università degli Studi di Roma "Foro Italico"
13. Università degli Studi di Padova
14. Università degli Studi di Salerno
15. Università degli Studi di Palermo
16. Università degli Studi di Messina
17. Università degli Studi di Torino
18. Università degli Studi di Napoli "Federico II"

19. Agenzia Regionale della Sanità della Toscana
20. Università degli Studi di Parma, AOU di Parma
21. Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia
22. Azienda USL Umbria 1, Perugia
23. Agenzia Regionale Emergenza Urgenza della Regione Lombardia, Milano
24. IRCCS Ospedale San Raffaele, Milano
25. Presidio Ospedaliero Lucca e Valle del Serchio

26. ASST Valcamonica, Breno (BS)
27. AOU delle Marche
28. IRCCS Sacro Cuore Don Calabria Hospital, Negrar di Valpolicella (VR), Verona
29. Direzione Generale cura della Persona, Salute e Welfare- Regione Emilia-Romagna
30. Istituti Ospitalieri di Cremona
31. Istituto Nazionale di Astrofisica
32. Fondazione IRCCS Istituto Nazionale dei Tumori, Milano
33. Università degli Studi di Catania.

Riassunto

Nelle aree critiche sanitarie l'implementazione delle procedure di pulizia e disinfezione ambientale è una delle azioni da mettere in atto all'interno dei programmi di prevenzione e controllo delle infezioni correlate all'assistenza (ICA). La possibilità di attuare queste azioni di miglioramento attraverso l'uso di nuove strategie di disinfezione ha recentemente introdotto l'impiego di tecnologie automatizzate che, oltre ai biocidi, fanno uso di metodi fisici, come la radiazione UV. L'integrazione dei sistemi di disinfezione a radiazione UV all'interno dei protocolli di sanificazione standard richiede che questi siano sottoposti a test standardizzati per la valutazione dell'efficacia, in termini di riduzione della contaminazione microbica ambientale e della trasmissione delle ICA, della valutazione della sicurezza nell'impiego e dell'uso sostenibile. In tale contesto, il Position Paper si pone l'obiettivo primario di offrire un quadro chiaro delle caratteristiche tecniche e prestazionali delle tecnologie che utilizzano sorgenti d'emissione a radiazione UV e del loro impatto in termini di sicurezza ed efficacia. Inoltre, obiettivo secondario del Position Paper è offrire indicazioni per il corretto utilizzo di sistemi fissi o mobili di emissione della radiazione UV da applicare in ambiente sanitario, definendo le modalità operative necessarie a garantire un uso sicuro, efficace, appropriato e sostenibile, sia in termini economici che organizzativi.

Parole chiave. Aree critiche sanitarie, disinfezione, radiazione UV, infezioni correlate all'assistenza.

Summary

In critical healthcare areas, the implementation of environmental cleaning and disinfection procedures is one of the actions to be implemented within the prevention and control programs of healthcare associated infections (HAI). The possibility of implementing these improvement actions with new disinfection strategies has recently introduced the use of automated technologies that, in addition to biocides, make use of physical methods, such as UV radiation. The integration of UV radiation disinfection systems within standard sanitation protocols requires that they be subjected to standardized tests for the evaluation of efficacy, in terms of reduction of environmental microbial contamination and the transmission of HAI, the evaluation of safety in use and sustainability. In this context, the Position Paper has the primary objective of offering a clear overview of the technical and performance characteristics of technologies that use UV radiation emission sources and their impact in terms of safety and efficacy. Furthermore, a secondary objective of the Position Paper is to provide guidance for the correct use of fixed or mobile UV radiation emission systems to be applied in healthcare settings, defining the operating methods necessary to ensure safe, effective, appropriate and sustainable use, both in economic and organizational terms.

Key words. Critical healthcare areas, disinfection, UV radiation, healthcare-associated infections.

Premessa

Nelle aree critiche sanitarie l'implementazione delle procedure di pulizia e disinfezione ambientale è una delle azioni da mettere in atto all'interno dei programmi di prevenzione e controllo delle infezioni correlate all'assistenza (ICA). La possibilità di attuare queste azioni di miglioramento attraverso l'uso di nuove strategie di disinfezione ha recentemente introdotto l'impiego di tecnologie automatizzate che, oltre ai biocidi, fanno uso di metodi fisici, come la radiazione UV.

L'assenza di un quadro normativo di riferimento ha tuttavia favorito negli ultimi anni l'insorgenza di episodi come quello riportato dalla Commissione Europea nel Rapporto RAPEX (Sistema comunitario di allerta rapido) del 10 luglio 2020, il quale ha descritto come molti dispositivi commercializzati in Europa emettano radiazioni non efficaci verso i microrganismi dichiarati in scheda tecnica, dando falsa sicurezza sull'efficacia del trattamento di disinfezione. Il rapporto inoltre evidenzia i rischi per la salute dovuti all'emissione di dosi di raggi UV-A, UV-B, UV-C non conformi alla norma EN 62471:2010 per la sicurezza fotobiologica delle lampade, o allo standard ISO 15858:2016, sui requisiti minimi di sicurezza per coloro che utilizzano dispositivi con lampade UV-C. A causa di questi eventi, l'ECRI Institute nel 2021 ha incluso le radiazioni UV-C tra i dieci più importanti rischi legati alle tecnologie sanitarie.

Introduzione

Il ruolo dell'ambiente è stato dimostrato rilevante nella trasmissione delle infezioni durante l'attività assistenziale. Insieme alle precauzioni standard e all'applicazione delle buone pratiche nell'effettuazione delle procedure invasive, la sanificazione ambientale è uno dei tre pilastri della prevenzione e controllo delle ICA.^{1,2} Le recenti disposizioni in materia di contenimento e gestione della pandemia Covid-19 hanno ulteriormente sottolineato l'importanza della pulizia e disinfezione ambientale.^{3,4}

È stato tuttavia dimostrato che il 5-30% delle superfici nell'ambiente sanitario può rimanere potenzialmente contaminato, nonostante la corretta applicazione dei protocolli standard di pulizia e disinfezione.⁵ Per tale motivo e a causa della recente e rapida diffusione di patogeni multiresistenti (MDRO), nelle strutture sanitarie è stato raccomandato di implementare le procedure in uso, anche attraverso l'impiego di tecnologie automatizzate di provata efficacia. Queste tecnologie consentono di ridurre la variabilità del risultato dovuta all'operatore, effettuando cicli di trattamento con parametri definiti, programmabili e lasciando tracciabilità dell'operazione effettuata.

In tale contesto, lo sviluppo di nuove tecniche che privilegiano l'azione fisica permette di offrire un'alternativa al ricorso esclusivo a prodotti chimici, riducendo l'impatto che questi hanno sull'ambiente e sulla sicurezza degli operatori. Le radiazioni UV coprono la porzione dello spettro elettromagnetico con una lunghezza d'onda compresa tra 100 e 400 nanometri (nm) e si dividono in tre categorie principali: UVA (315-400 nm), UVB (280-315 nm) e UVC (100-280 nm). L'uti-

lizzo della radiazione UV può essere un valido ausilio nell'implementazione di una efficace disinfezione ambientale, non sostituendosi ai protocolli di sanificazione, bensì integrandoli.

L'integrazione dei sistemi di disinfezione a radiazione UV all'interno dei protocolli di sanificazione standard richiede che questi siano sottoposti a test standardizzati per la valutazione dell'efficacia, in termini di riduzione della contaminazione microbica ambientale e della trasmissione delle ICA, della valutazione della sicurezza nell'impiego e dell'uso sostenibile. Questa valutazione è richiesta a livello nazionale dalla recente pubblicazione della prassi di riferimento "Sanificazione degli ambienti indoor", UNI/PdR, 2024.

L'acquisizione di queste tecnologie può avere un impatto economico e organizzativo importante per la struttura sanitaria, che richiede un'attenta valutazione delle modalità d'impiego, affinché siano compatibili con l'attività clinica e definite all'interno di un piano di formazione del personale dedicato al loro utilizzo. La valutazione dovrà tenere in considerazione anche l'impatto ambientale che, seppur mitigato dal ridotto utilizzo di biocidi, prevede lo smaltimento di un rifiuto speciale pericoloso, quali sono le lampade a vapori di mercurio, la fonte di radiazione UV-C più utilizzata. In tale contesto, il Position Paper si pone l'obiettivo primario di offrire un quadro chiaro delle caratteristiche tecniche e prestazionali delle tecnologie che utilizzano sorgenti d'emissione a radiazione UV e del loro impatto in termini di sicurezza ed efficacia.

Inoltre, obiettivo secondario del Position Paper è offrire indicazioni per il corretto utilizzo di sistemi fissi o mobili di emissione della radiazione UV da applicare in ambiente sanitario, definendo le modalità operative necessarie a garantire un uso sicuro, efficace, appropriato e sostenibile, sia in termini economici che organizzativi.

Ruolo dell'ambiente nella diffusione delle ICA

L'acquisizione delle ICA dipende da una complessa interazione tra ospite, patogeno e ambiente. L'ambiente riveste un ruolo cruciale sia per la stretta interazione di pazienti e operatori sanitari con esso, sia per l'elevata presenza di microrganismi, inclusi importanti patogeni umani.

I microrganismi hanno notevoli capacità di diffondersi nell'ambiente e di proliferare, in particolare in zone umide o nelle quali è presente materiale organico. Anche su superfici asciutte e abiotiche, alcuni microrganismi hanno capacità di sopravvivere per lunghi periodi in forme inattive. Nonostante l'evidenza di microrganismi nell'ambiente, non è semplice stabilirne la rilevanza clinica.⁶ La determinazione di un eventuale ruolo causale dell'ambiente inanimato nel determinare un rischio infettivo per i pazienti avviene sulla base di sei livelli di evidenza proposti da Rhame.⁷

Possibili sorgenti di ICA esogene, non causate cioè da microrganismi che sono già parte del microbiota del paziente, sono l'ambiente sanitario inanimato, gli altri pazienti e i loro familiari, nonché gli operatori sanitari. In particolare, gli operatori sanitari, e le loro mani nello specifico, sono un'importante sorgente di infezioni, in grado di trasferire potenziali patogeni tra pazienti e dall'ambiente al paziente.⁸

La contaminazione della superficie di strumenti e dispositivi medici può essere causa di infezione del paziente se queste superfici non vengono disinfettate o sterilizzate prima dell'utilizzo. Oltre alle superfici ambientali nelle stanze in cui sono ricoverati i pazienti e i loro arredi (comodini, strutture dei letti, lampade, tende) anche gli elettromedicali (pompe infusionali, monitor, tastiere dei computer) possono determinare la trasmissione di potenziali patogeni, tramite contaminazione delle mani degli operatori sanitari, se queste non vengono accuratamente pulite e disinfettate. Alcuni microrganismi possono sopravvivere fino a sette mesi su superfici asciutte, in particolare batteri gram-negativi. Su superfici umide quali lavandini e scarichi, la formazione di biofilm da parte di alcuni batteri gram-negativi può essere la causa della loro sopravvivenza per periodi ancora più lunghi,⁹ nonché un ambiente dove possono moltiplicarsi e scambiarsi geni di resistenza.¹⁰

Nel 1982, Maki et al. pubblicarono uno studio di riferimento per quanto riguarda la relazione tra superfici ambientali e ICA, fornendo forti prove di efficacia a favore della contaminazione dell'ambiente da parte dei pazienti.¹¹ Numerosi studi più recenti dimostrano come l'occupazione pregressa da parte di un paziente infetto di una stanza sia associata a un incrementato rischio di acquisizione di ICA causata dallo stesso patogeno in pazienti occupanti successivamente la stessa stanza.^{9,11}

Le maggiori evidenze sono disponibili a favore dell'associazione tra contaminazione delle superfici e trasmissione nosocomiale di *Staphylococcus aureus* (incluso *S. aureus* meticillino-resistente, MRSA), Enterococchi resistenti alla vancomicina (VRE), *Clostridioides difficile*,⁸ nonché *Acinetobacter* spp. e Norovirus.¹² Diversi studi hanno dimostrato che la riduzione della contaminazione ambientale è associata con una riduzione significativa delle ICA.¹³

Oltre all'ambiente, serbatoi per ICA trasmesse per via aerea includono anche personale e visitatori. Sono stati descritti focolai epidemici nosocomiali di tubercolosi, morbillo e varicella trasmessi secondo questa modalità.¹⁴ È opportuno segnalare come, per la maggioranza dei patogeni con trasmissione per via aerea, gli esseri umani, più che l'ambiente, rappresentano la principale sorgente di infezione. Le relative misure di prevenzione e controllo sono rappresentate principalmente dall'identificazione precoce dei pazienti infetti e dal loro isolamento in stanze di isolamento.⁶

Sono descritti inoltre focolai di legionellosi e di infezioni fungine (ad esempio infezioni da *Aspergillus* spp.) riconducibili a serbatoi ambientali in cui i microrganismi erano stati disseminati tramite l'aria, causando infezioni per inalazione diretta, inoculazione o ingestione.¹⁵

L'acqua può rappresentare un importante veicolo per la trasmissione di patogeni responsabili di ICA. A livello ospedaliero l'acqua sanitaria è un veicolo quando utilizzata per l'igiene del paziente, per la balneoterapia e per altre procedure assistenziali, come le cure dialitiche, quelle odontoiatriche, quelle di aerosolizzazione, ecc. L'acqua ha inoltre un importante ruolo nei processi tecnologici associati al condizionamento o al funzionamento dei dispositivi medici. I patogeni più frequentemente associati all'acqua sono rappresentati da bacilli gram-negativi in particolare *Pseudomonas*

aeruginosa, *Legionella* spp. e micobatteri non tubercolari.⁸

In conclusione, nonostante i progressi nell'ambito del controllo infezioni, l'ambiente continua a rappresentare una fonte rilevante di ICA. Misure chiave per ridurre le ICA associate all'ambiente includono appropriate procedure di pulizia, disinfezione e sterilizzazione dei dispositivi e delle superfici ambientali, sorveglianza prospettica, indagini epidemiologiche appropriate quando si verificano cluster, nonché aderenza alle misure di prevenzione e controllo delle ICA.^{8,16}

Gli interventi di sanificazione ambientale sono raccomandati e regolati da linee guida nazionali e internazionali.¹⁷⁻²⁰ Anche la recente Sentenza della Corte di Cassazione n.6386 del 3.3.2023 ha evidenziato tra gli oneri probatori a carico della struttura assistenziale "l'indicazione dei protocolli relativi alla disinfezione, disinfestazione e sterilizzazione di ambienti e materiali".

L'implementazione delle procedure di sanificazione per la riduzione del serbatoio microbico

L'igiene ambientale in ambito sanitario, in particolare negli ospedali, presenta importanti criticità nella sua applicazione operativa. Si possono identificare tre gruppi fondamentali di fattori che agiscono contribuendo alla presenza e alla sopravvivenza dei patogeni ambientali:

- gli aspetti logistici e organizzativi, che si traducono in una maggiore frammentazione dei processi, con fattori tecnologici, logistici, edilizi che rendono difficoltosa l'applicazione delle procedure di sanificazione. Inoltre, la variabilità delle procedure di sanificazione in uso (metodi, frequenze, tipologie di agenti per la pulizia e disinfezione) può non garantire esiti adeguati e comunque paragonabili;
- l'alterazione dell'equilibrio ospite-parassita, legata alla suscettibilità e fragilità dell'ospite e all'accresciuta resistenza dei patogeni dovuta alla formazione di biofilm;²⁰ questi ultimi sono capaci di favorire la sopravvivenza dei microrganismi sulle superfici critiche e l'insorgenza di resistenza alle procedure di sanificazione ambientale.²¹ L'incremento delle resistenze ai comuni biocidi è stato associato a un equivalente aumento della resistenza agli antibiotici;
- fattori legati alla formazione dell'operatore e anche alla carenza di risorse, che determinano problematiche di adesione ed efficace attuazione delle procedure di prevenzione delle ICA incluse quelle di pulizia e disinfezione ambientale.

Le procedure di pulizia e disinfezione ambientali possono ridurre la contaminazione delle superfici e la trasmissione esogena di agenti patogeni, tuttavia è stato dimostrato che le procedure standard, basate sull'utilizzo di prodotti chimici, seppur correttamente applicate, non sono in grado di ridurre completamente la contaminazione ambientale, dal momento che sul 5-30% delle superfici trattate rimane materia organica, carboidrati e proteine, in grado di sostenere una veloce ricolonizzazione microbica. Per queste ragioni, a seguito della rapida diffusione di patogeni multiresistenti

(MDRO) nelle strutture sanitarie, esiste un bisogno urgente di trovare alternative ai prodotti di pulizia e disinfezione chimici impiegati oggi, che siano efficaci ed economicamente sostenibili.

Lo studio di soluzioni alternative all'uso di biocidi, oltre a preservare l'obiettivo di contrasto delle infezioni stesse, deve comunque garantire elevati livelli di disinfezione e consentire di ridurre gli effetti negativi apportati dai prodotti chimici in termini di rischio clinico per i pazienti e il personale sanitario. Ancora poco studiato è l'impatto sull'ambiente, potenzialmente pericoloso, causato da eventi di contaminazione delle acque reflue da parte di biocidi utilizzati per la disinfezione delle superfici.

L'importanza di implementare i protocolli di sanificazione nel contrasto della diffusione delle ICA è stato recentemente dimostrato da uno studio australiano randomizzato multicentrico, lo studio "REACH",²² dove queste azioni (utilizzo di prodotti più efficaci, maggiore frequenza delle operazioni, adeguata formazione del personale, ecc.) hanno portato a una riduzione significativa delle infezioni da enterococchi vancomicina resistenti e a un generale risparmio dei costi assistenziali legati alla riduzione delle ICA.

Nell'ambito delle azioni di implementazione, l'uso delle tecnologie no-touch, in particolare della radiazione UV, non è una novità nello scenario della disinfezione ambientale, essendo stata utilizzata negli anni passati per la sanificazione di locali adibiti all'isolamento di pazienti infetti o per mantenere livelli igienici elevati in locali destinati a pazienti fragili o alla preparazione di farmaci sterili. Nuova, tuttavia, è l'introduzione di sistemi automatizzati, spesso dotati di movimento proprio, in grado di facilitare l'uso e migliorare l'efficacia della dose emessa, garantendo la ripetibilità del processo ed eliminando la possibilità di errore da parte dell'operatore. Questi sistemi hanno il grande vantaggio di non richiedere modifiche alla ventilazione degli ambienti, necessarie quando sono utilizzati prodotti biocidi che richiedono la saturazione dei locali trattati. La loro azione non sostituisce i protocolli di sanificazione standard, ma li integra in efficacia, con un impiego di tempo limitato rispetto ad altre tecnologie che utilizzano biocidi. La disinfezione con radiazione UV non ricade nel campo di applicazione della normativa biocidi né tantomeno del DPR 392/98 sui presidi medico chirurgici, attuandosi mediante un'azione di natura fisica.

L'assenza di prodotti chimici ha il grande vantaggio di non indurre l'acquisizione di resistenze da parte dei microrganismi, sebbene sia riconosciuta la capacità di alcuni microrganismi di riparare i danni indotti dalla radiazione a dosi sub-letali. Lo sviluppo di nuove tecniche che privilegiano l'azione fisica permette di offrire alternative o di integrare il ricorso esclusivo a prodotti chimici, riducendo l'impatto che questi hanno sull'ambiente e sulla sicurezza degli operatori.

Nel piano di prevenzione delle ICA è indispensabile adottare tutte le misure necessarie a mantenere un basso livello di carica microbica sulle superfici, per un periodo di tempo che sia il più prolungato possibile. L'obiettivo a cui si deve aspirare è quello di mantenere la qualità igienica nel tempo, riducendo al minimo i fenomeni di ricolonizzazione dell'ambiente.

Le politiche di prevenzione e controllo delle ICA devono includere la definizione, l'applicazione e il monitoraggio sistematico delle procedure di pulizia e disinfezione ambientale; laddove poi queste attività siano esternalizzate, è necessario assicurarne il pieno recepimento nei documenti contrattuali.

In particolare, la sanificazione ambientale deve essere considerata un elemento chiave della gestione del rischio infettivo; pertanto, fin dalla stesura dei capitolati tecnici, bisogna assicurare la flessibilità contrattuale e organizzativa necessaria a permettere la revisione continua delle procedure, del livello di rischio delle varie aree e dei prodotti e metodi in uso, anche attraverso l'introduzione di nuove tecnologie di disinfezione, in risposta ai cambiamenti dello scenario epidemiologico e degli altri aspetti del rischio infettivo.

Ai fini della sicurezza dell'assistenza, le amministrazioni appaltanti e le direzioni ospedaliere devono considerare strategico l'investimento nelle attività di controllo e monitoraggio dei servizi di sanificazione esternalizzati; devono perciò essere formalizzati e incentivati gruppi tecnici di lavoro interdisciplinari e interprofessionali dedicati alle verifiche sul campo, vanno definite e formalizzate le procedure di monitoraggio e i raccordi funzionali fra i gruppi di controllo dei servizi esternalizzati e i Comitati di Controllo delle Infezioni Ospedaliere (CIO) locali.

La formazione degli operatori addetti ai servizi di sanificazione è un elemento strategico per il controllo della contaminazione ambientale e per il controllo del rischio infettivo; i contenuti, la frequenza degli interventi formativi e le modalità di verifica dell'apprendimento devono essere periodicamente ridefiniti con le Direzioni Ospedaliere e in base alle criticità e priorità stabilite in collaborazione con il CIO. In tale ambito, l'utilizzo di nuove tecnologie e la loro inclusione nei documenti di gara di appalto devono essere previsti solo se sono disponibili prove di efficacia, che ne dimostrino un'attività superiore rispetto alla sola applicazione dei protocolli standard, oltre alla sicurezza nel loro impiego per i pazienti e gli operatori, come pure per l'ambiente. L'utilizzo di queste apparecchiature, oltre a essere oneroso per le strutture sanitarie, crea importanti interferenze negli aspetti organizzativi, necessitando dell'assenza dei pazienti e operatori negli ambienti da trattare e una formazione specifica degli operatori addetti al loro utilizzo per garantire un uso adeguato in termini di costo/efficacia.²¹⁻²⁸

La disinfezione "no-touch" delle aree sanitarie critiche

Le emergenti tecnologie no-touch possono essere un valido ausilio ai protocolli di disinfezione manuale,²⁹ col fine di migliorare l'efficacia del processo e ridurre il rischio di ICA. Questa potenzialità è stata dimostrata durante la pandemia da SARS-CoV-2, dove sono state utilizzate nel ridurre la diffusione del virus negli ambienti di assistenza dei pazienti affetti da Covid-19.^{30,31} Mahesh e Siewerdsen hanno dimostrato come l'utilizzo della disinfezione con radiazione UV-C su macchinari TAC fosse capace di abbattere la carica virale di 6 logaritmi, con un'irradianza pari a 580,9 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ e 3-5 minuti di esposizione.³² Zhang et al. hanno dimostrato

Position Paper multisocietario, GISIO-SITI/SIMPIOS, sull'utilizzo della radiazione ultravioletta nella disinfezione ambientale di aree critiche sanitarie

l'efficacia della radiazione UV-C nella disinfezione dell'aria in ambulatori dove erano presenti apparecchiature TAC per la diagnostica di Covid-19, con esposizioni di circa 60 minuti, 2-3 volte al giorno.³³ Analoghi risultati sono stati ottenuti da Wan et al. con esposizioni di 30 minuti.³⁴ L'utilizzo della radiazione UV-C nella disinfezione delle apparecchiature TAC era già stato valutato in epoca pre-Covid da Cadnum et al., in relazione alla contaminazione da *Staphylococcus aureus* meticillino-resistente (MRSA), *Enterococchi* resistenti alla vancomicina (VRE) e *Clostridioides difficile*. I dispositivi a raggi UV-C utilizzati per la disinfezione avevano caratteristiche diverse, per tipologia e numero di lampade, tuttavia, trattamenti di 4 minuti sono risultati efficaci nell'abbattere la carica di VRE ed MRSA di almeno 2 log e delle spore di *C. difficile* di almeno 1 log.³⁵ I dispositivi che impiegano la radiazione UV sono generalmente utilizzati negli ambienti di cura più critici, dove è necessario ridurre al minimo la presenza di agenti patogeni, per evitare l'infezione crociata di altri pazienti e per garantire la sicurezza degli operatori sanitari. Queste aree sono riconducibili alle camere di degenza di pazienti colonizzati o infetti da patogeni trasmissibili per contatto o per via aerea, le terapie intensive, le sale operatorie, gli ambulatori e i laboratori. Pur rappresentando una valida soluzione al problema delle ICA, l'applicazione delle tecnologie no-touch nelle aree critiche presenta alcune limitazioni. In primo luogo, non possono essere utilizzate in presenza di pazienti o personale sanitario, con la necessità di interrompere lo svolgimento delle attività ospedaliere.³⁵ L'arredamento delle stanze è un altro importante ostacolo, a causa delle "zone d'ombra" che esso crea,³⁶ sebbene l'utilizzo di superfici riflettenti potrebbe essere una soluzione.³⁷ Infine, idealmente tali tecnologie andrebbero utilizzate in stanze singole, ma il loro numero, all'interno delle strutture ospedaliere, è estremamente esiguo.³⁸

In letteratura si è assistito, già prima della pandemia, a un incremento degli studi riguardanti l'applicazione di tecnologie che utilizzano la radiazione UV in aree sanitarie critiche. Le principali applicazioni individuate sono le seguenti:

- i dispositivi UV-C si sono dimostrati idonei nel disinfettare le stanze di degenza in seguito alla dimissione di un paziente infetto o colonizzato da patogeni multiresistenti. Casini et al. hanno ottenuto una riduzione del 12% dei campioni positivi raccolti dalle stanze dei pazienti quando la radiazione UV veniva utilizzata nell'implementazione del protocollo standard di pulizia e disinfezione manuale.³⁸ *C. difficile* e *Klebsiella pneumoniae* sono solo alcuni dei microrganismi contro i quali le tecnologie UV si sono dimostrate utili all'interno delle stanze di degenza con pazienti a elevata complessità di cura;³⁹
- le superfici delle sale operatorie (SO) sono note fonti di patogeni responsabili di infezioni del sito chirurgico e delle protesi,³³ quali *Staphylococcus* spp., *Streptococcus* spp., *Pseudomonas* spp. ed *E. coli*.⁴⁰ La possibilità di contaminazione risulta correlata alla numerosità dei movimenti in sala in quanto causa della diffusione nell'aria dei microrganismi presenti sul pavimento. In letteratura si evidenzia come la radiazione UV abbia ridotto il numero di superfici risultate non conformi rispetto agli standard igienici (carica microbica totale ≥ 15 CFU/24 cm) del 93%

nelle SO a basso turnover e del 183% in quelle ad alto turnover.⁴⁰ Le SO sono sì un ambito in cui la disinfezione tramite i dispositivi UV-C è consigliabile e relativamente semplice, perché può effettuarsi prima o dopo gli interventi chirurgici, ma eventuali difficoltà logistiche potrebbero insorgere nel caso in cui le sedute chirurgiche fossero estremamente rigide e con una tempistica non dilazionabile.

Le ICA nelle unità di terapia intensiva rappresentano un problema significativo a livello globale. In questo setting, a causa dell'alta prevalenza di microrganismi multiresistenti e la presenza di apparecchiature sofisticate, per le quali la pulizia risulta essere più complicata, la contaminazione ambientale acquista maggiore rilevanza.⁴¹

L'eventuale efficacia di utilizzo in altre aree, seppur critiche, va approfondita in quanto in alcune situazioni non ha dato a oggi risultati incoraggianti, come nel caso, ad esempio, delle unità di trapianto di midollo osseo.⁴²

Scopo e campo di applicazione

Il presente Position Paper, alla luce delle più recenti conoscenze scientifiche, offre un quadro chiaro relativo alle caratteristiche tecniche e prestazionali delle tecnologie che utilizzano sorgenti di emissione a radiazione UV (spettro 100-400nm) e del loro impatto in termini di sicurezza, riduzione della contaminazione microbica e del rischio d'infezione. Questi dispositivi sono utilizzabili per il trattamento delle superfici ambientali e delle matrici aria e acqua. Quest'ultima matrice non sarà oggetto del presente documento.

A tal fine, attraverso la revisione sistematica della letteratura scientifica e dei documenti della letteratura grigia si procederà a:

- approfondire le diverse sorgenti di emissione della radiazione UV e i fattori che ne condizionano l'irradianza;
- effettuare l'analisi della dose necessaria per la riduzione della contaminazione microbica sulle superfici e nell'aria;
- valutare la capacità di ridurre la frequenza di infezioni correlate all'assistenza;
- esaminare i rischi sanitari e occupazionali derivanti dall'utilizzo di queste tecnologie;
- indagare l'impatto ambientale di questa disinfezione rispetto ai protocolli di disinfezione standard;
- vagliare gli effetti a lungo termine dell'esposizione alla radiazione UV delle superfici degli elettromedicali.

Inoltre, il documento si pone l'obiettivo di offrire indicazioni sul corretto utilizzo di sistemi fissi o mobili di emissione della radiazione UV da applicare in ambiente sanitario, definendo le modalità operative necessarie a garantire un uso sicuro, efficace, appropriato e sostenibile, sia in termini economici che organizzativi.

Le sorgenti di emissione della radiazione UV

L'effetto germicida della radiazione UV è basato sulla proprietà di questa radiazione di danneggiare il DNA e

l'RNA di batteri, virus e altri microrganismi, impedendone la replicazione e la riproduzione e contribuendo così alla loro inattivazione.

La capacità di danneggiare il materiale genetico, funzione delle proprietà energetiche della radiazione elettromagnetica, è tanto maggiore quanto più bassa è la lunghezza d'onda e ciò giustifica le varietà di applicazione delle lampade in relazione al tipo di UV emesso nel campo della disinfezione.⁴³⁻⁴⁵

Lampade a radiazione UV-C

La radiazione UV-C (100-280 nm) è quella più comunemente utilizzata per la disinfezione, poiché l'effetto germicida è massimo in tale banda di lunghezza d'onda. La radiazione UV-C per la disinfezione viene prodotta da lampade a gas-plasma o a diodi emettitori di luce (LED).

Lampade ad arco a vapori di mercurio, incluse quelle ad amalgama

Le lampade ad arco a vapori di mercurio (LPL) e le lampade ad amalgama (LPA) sono lampade a bassa pressione, nelle quali la miscela di gas è racchiusa all'interno di un tubo di quarzo.

L'argon garantisce l'eccitazione e ionizzazione del mercurio, che passa istantaneamente dallo stato liquido (a temperatura ambiente) allo stato gassoso nel momento in cui avviene la ionizzazione dell'argon, ottenuta dalla corrente che passa tra due elettrodi in tungsteno. La tensione applicata al filamento eccita gli elettroni del gas, che decadendo emettono fotoni. La completa emissione di luce richiede che tutto il mercurio sia ionizzato ed è in funzione della tensione utilizzata e del tempo. Queste lampade hanno una massima emissione a 253,7 nm e una, di minore entità, a 182-185 nm (vacuum UV-C), in grado di interagire con le molecole di ossigeno atmosferico, generando ozono. L'efficienza di conversione dell'energia elettrica in radiazione UV-C è compresa tra il 25% e il 45%, dipendendo dalla completa ionizzazione del mercurio.

La potenza dell'irradiazione o irradianza è il flusso radiante di una sorgente elettromagnetica incidente su una superficie per unità di area. L'irradianza è espressa in watt per metro quadrato (W/m^2) o mW/cm^2 . La dose emessa per unità di superficie nel tempo è espressa in $J/cm^2/sec$ (1 Watt = 1 Joule/sec).

L'aumento della temperatura causato dall'aumento della pressione del gas-plasma crea nel corso del tempo il deterioramento dell'arco creato dai due elettrodi e la perdita di funzionalità della lampada. Mediamente queste lampade hanno una durata di 8.000 ore, ma ogni produttore definisce la durata media delle proprie lampade.

Alcune lampade a bassa pressione utilizzano alogenuri metallici in amalgama con il mercurio (ioduro di sodio e scandio ioduro), che a fronte di una minore efficienza di conversione, hanno una durata superiore (circa 12.000 ore).

Lampade ad arco a gas xenon

Le lampade a gas xenon a luce pulsata (PX-UV) hanno tubi in quarzo in cui il gas, sottovuoto, viene eccitato da due elettrodi di tungsteno ad arco corto, attraversato da una corrente ad alta tensione, ma intermittente, per evitare il danneggiamento dell'arco. Queste lampade emettono in un ampio spettro di radiazioni UV-C (100-280 nm), UV-A (315-400 nm) e dello spettro visibile (380-700 nm). L'azione germicida si realizza sia attraverso l'azione della radiazione UV-C che di quella UV-A. In questo range di emissione viene prodotto ozono. La durata media di queste lampade è 500-1.500 ore.

Lampade allo stato solido (diodi) a emissione 255-280 nm

Le lampade a diodi emettitori di luce UV-C (LED UV-C) sono dispositivi in grado di emettere luce monocromatica alla lunghezza d'onda di 255 nm, 265 nm o 280 nm. I LED-UV utilizzano semiconduttori (gallio, silicio) "drogati", in grado di eccitarsi a bassa potenza, riducendo così il loro decadimento. L'attivazione è immediata, non hanno latenza nell'accensione e quindi emettono subito alla massima irradianza. Sono sorgenti puntiformi con un determinato angolo di emissione (variabile a seconda della lente applicata); è quindi necessario combinare più LED per illuminare aree ampie con una certa irradianza. La potenza per singolo componente elettrico (chip) è ancora inferiore al Watt. Tali dispositivi hanno basso impatto ambientale, perché non contengono mercurio, agiscono a basso consumo energetico ed hanno potenzialmente una durata media più lunga.

Lampade allo stato solido (eccimeri) a emissione 222 nm

Una tipologia di lampade recentemente introdotta sul mercato è quella delle lampade DBD (dielectric barrier discharge), o lampade a eccimeri, che emettono "far-UVC", tra 207 e 222 nm. Tra i composti che possono dare luogo alla formazione di eccimeri, il più utilizzato è krypton chloride ($KrCl$), in grado di emettere a 222 nm: questo tipo di radiazione, pur avendo effetto germicida, non provoca citotossicità o mutagenicità alle cellule umane, come avviene con la radiazione a 254 nm. L'utilizzo di filtri che impediscono l'emissione di una lunghezza d'onda $\lambda > 230nm$ (short pass) consente a tali lampade di mantenere un effetto germicida, inattivando batteri e virus ($< 1\mu m$), ma agendo solo parzialmente sulle cellule di mammifero (circa 10-25 μm di diametro), in particolare sui tessuti con strato corneo, in virtù del basso coefficiente di penetrazione.

Lampade a radiazione UV-B, UV-A e viola (tra 290 e 405 nm)

Le sorgenti che emettono luce UV tra 290 e 390 nm e, nella parte visibile dello spettro, intorno a 405 nm, trovano una ridotta applicazione nell'ambito della disinfezione rispetto a quelle a UV-C, a causa della minore efficacia germicida.

Le lampade a diodi emettitori di luce UV-B, UV-A e viola (LED UV-B, - A, viola) sono strutturalmente simili ai LED UV-C, ma cambia il semiconduttore e il tipo di drogaggio. Nel caso dei LED UV-B (290 nm, 305 nm, 315 nm) le potenze sono abbastanza limitate, come nel caso UV-C, a causa di un'efficienza ancora limitata e il tempo di vita non così lungo come i classici LED visibili.

I LED UV-A (365 nm, 390 nm) e viola (405 nm) presentano tutte le caratteristiche dei comuni LED, ma hanno potenze per singolo chip molto elevate (diversi Watt) e tempi di vita molto lunghi (>50.000 ore).

Un altro aspetto da considerare è la trasparenza dei materiali alle lunghezze d'onda di emissione di questi LED, la quale è molto più elevata per quasi tutti i vetri e le plastiche. Ciò rende più semplice l'implementazione di sistemi di illuminazione. Di contro, come detto, si ha un'efficacia di disinfezione limitata dei LED UV-B e ancora meno degli UV-A e del viola, in relazione alle crescenti lunghezze d'onda.

Sistemi a radiazione UV per il trattamento di aria e superfici

La radiazione germicida più utilizzata per il trattamento dell'aria e delle superfici è la radiazione prodotta da lampade a vapori di mercurio a bassa pressione, che emettono energia nel campo degli UV-C, alla lunghezza d'onda di 254 nm. Il processo tramite cui questi raggi ostacolano la replicazione di agenti patogeni è detto fotocatalisi.

Sono disponibili diversi sistemi per il trattamento sia dell'aria che delle superfici. In particolare, si distinguono sistemi fissi o mobili. I primi sono costituiti da sistemi chiusi, in cui le lampade sono collocate all'interno nelle unità di trattamento aria (U.T.A.) o di fan coil, per la disinfezione dell'aria; altri sistemi fissi sono invece aperti e prevedono l'installazione di lampade germicide collocate a parete o a soffitto.

Nei sistemi mobili, le lampade sono alloggiate su piattaforme dotate di movimento, in grado di spostarsi su più punti e garantire così la disinfezione di tutto l'ambiente. Le lampade UV possono trovare collocazione anche all'interno di sistemi portatili di filtrazione dell'aria, utilizzati all'interno di ambienti a contaminazione controllata.

È importante notare che l'efficacia di questi sistemi dipende dalla corretta installazione delle lampade, che devono essere in grado di irradiare completamente la matrice esposta, oltre al fatto che devono essere sottoposte a manutenzione per garantirne la pulizia o la loro sostituzione in caso di esaurimento. La conformità alle norme tecniche garantisce la loro efficacia e la sicurezza nell'impiego.

Di seguito sono descritte le caratteristiche principali di questi sistemi.

Sistemi integrati nelle unità di trattamento aria

I sistemi di disinfezione UV integrati nelle unità di trattamento aria consistono in moduli di lampade posizionati all'interno dell'impianto di ventilazione, finalizzati alla disinfezione dell'aria che vi transita al suo interno. Tali sistemi

possono essere impiegati per disinfettare direttamente alcuni componenti dell'impianto che possono essere particolarmente soggetti a contaminazione, quali ad esempio i filtri o le batterie di raffreddamento con scarico della condensa. La radiazione utilizzata è di tipo UV-C alla lunghezza d'onda di 254 nm. Queste installazioni non determinano problematiche relative all'esposizione umana, in quanto la radiazione è del tutto confinata all'interno dell'impianto.

Le prestazioni di tali sistemi sono valutate in termini di efficienza di inattivazione microbica calcolata attraverso l'applicazione di norme standard che prevedono di valutare la differenza tra la concentrazione microbica prima e dopo l'esposizione nel condotto alla radiazione UV-C, espressa in percentuale rispetto alla concentrazione iniziale. Generalmente, in condizioni ideali, si riescono a raggiungere valori di efficienza superiori al 90%, tuttavia numerosi fattori influiscono su tale valore, tra cui:

- il tipo di microorganismo e la sua sensibilità alla radiazione UV-C,
- l'intensità della radiazione UV-C, che dipende, oltre che dalla potenza delle lampade installate, anche dal loro stato di manutenzione e di pulizia,
- il tempo di esposizione dei microorganismi alla radiazione, che dipende a sua volta dalla velocità dell'aria e da eventuali turbolenze all'interno del canale,
- temperatura e umidità relativa. Se tali parametri si discostano eccessivamente dai valori raccomandati per gli ambienti sanitari (20-24°C per la temperatura e 40-60% per l'umidità relativa), è necessario aumentare il valore dell'irradianza per raggiungere la medesima efficacia.

In fase di progettazione occorre prestare particolare attenzione ai valori della velocità dell'aria all'interno dell'impianto. Infatti, una velocità troppo elevata potrebbe ridurre eccessivamente il tempo di esposizione alla radiazione UV-C dei microorganismi. In questo caso è necessario incrementare l'intensità delle lampade per assicurare che la dose assorbita nel tempo di transito sia sufficiente all'inattivazione dei microorganismi.

Utili indicazioni sono fornite dalla norma ISO 15714:2019 e dallo standard ASHRAE 185.1-2020, che descrivono i test di laboratorio per valutare le prestazioni dei sistemi UV-C per unità di trattamento aria, in funzione della velocità dell'aria e prendendo in considerazione diverse specie di microorganismi.

I sistemi sopra descritti possono essere installati, oltre che in impianti fissi, anche all'interno di dispositivi portatili per la purificazione dell'aria. In questo caso le prestazioni del sistema sono definite tramite il Clean Air Delivery Rate (CADR), che può essere quantificato come il prodotto tra la portata d'aria aspirata dal dispositivo e l'efficacia di inattivazione microbica del sistema UV-C così come sopra definita.

I sistemi a UV-C per la disinfezione dell'aria, in impianti fissi o dispositivi portatili, possono essere utilizzati in combinazione con sistemi di filtrazione meccanica del particolato. In questo caso viene massimizzata l'efficienza dell'intero sistema di trattamento dell'aria nel rimuovere i microorganismi aerodispersi.⁴⁶

Sistemi fissi a parete o soffitto

I sistemi fissi sono frequentemente utilizzati per la disinfezione dell'aria. Le lampade sono installate su supporti a soffitto o fissati alle pareti; in quest'ultimo caso le lampade sono schermate in modo da orientare la radiazione solo nella parte superiore della stanza, per massimizzare i livelli di irraggiamento sulla parte alta e minimizzare quelli nella parte bassa, dove sono presenti gli astanti. Se correttamente progettati e installati, questi sistemi sono in grado di abbattere la carica microbica aerodispersa prodotta dalle sorgenti indoor e pertanto possono essere installati nelle stanze di isolamento di pazienti infetti, nei locali in cui sono effettuate procedure a rischio di generare aerosol, o in ambienti in cui è possibile la presenza di pazienti affetti da patologie a trasmissione aerea non diagnostiche (es. pronto soccorso, Osservazione Breve Intensiva). È necessario che tali sistemi siano progettati con attenzione e sottoposti a regolare manutenzione, per garantire che nella parte alta della stanza il valore dell'irraggiamento sia sufficiente ad inattivare i microrganismi e che, nello stesso tempo, l'esposizione di coloro che occupano la parte bassa della stanza non superi la soglia di sicurezza.

In letteratura alcuni studi hanno riportato l'efficacia di questi sistemi. La radiazione UV-C a 254 nm emessa da lampade a soffitto con una irradianza di $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ($0,01 \text{ mJ}/\text{cm}^2$) è risultata efficace nel ridurre del 70% il rischio di infezione da *Mycobacterium tuberculosis* in cavie esposte ad aria contaminata.⁴⁷ L'esposizione ad una irradianza di $1,048 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, prodotta da lampade UV-C a 254 nm collocate a soffitto, ha completamente inattivato la presenza di SARS-CoV-2 da una soluzione con titolo virale pari a $5 \times 10^6 \text{ TCID}_{50}/\text{mL}$. La completa inattivazione è stata dimostrata anche su altre tipologie di virus, come i poxvirus.⁴⁸

Un aspetto da prendere in considerazione in questi contesti è sicuramente l'altezza del soffitto e la distanza dalle superfici da trattare. È stato dimostrato che l'uso di lampade a soffitto in grado di emettere un'irradianza pari a $30 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ($0,03 \text{ mJ}/\text{cm}^2$) risulta efficace nel ridurre la contaminazione delle superfici da spore di *Bacillus atrophaeus*, con un abbattimento pari al 67%.^{48,49} Nel lavoro di Andersen et al., ambienti a pressione negativa sono stati trattati per 40 minuti con una radiazione generata da lampade UV-C ($160 \text{ J}/\text{m}^2$), installate sia a soffitto che a parete: superfici direttamente esposte hanno rilevato abbattimenti significativi, mentre superfici molto ombreggiate, come la sponda letto e i materassi hanno visto una riduzione significativa solamente dopo disinfezione chimica.⁵⁰

Negli ultimi anni sono stati condotti studi per valutare l'efficacia di lampade a radiazione UV-A, installate a soffitto, per la disinfezione di superfici artificialmente contaminate: l'esposizione a $3 \text{ W}/\text{m}^2$ per un periodo di 4 ore ha portato ad una riduzione modesta della concentrazione di MRSA e dei batteriofagi MS2 e Phi X174 (1 Log), mentre è risultata inefficace su *Candida auris* e sulle spore di *Clostridioides difficile*.⁵¹ In un altro studio, le superfici sono state esposte alla radiazione di lampade UV-A collocate a 2 metri di distanza (irradianza pari a $20\text{-}40 \text{ J}/\text{cm}^2$) ed è stata osservata una riduzione di 2 Log della concentrazione iniziale di *K. pneumoniae* e fino

a 4 Log per *S. aureus*, *P. aeruginosa* ed *E. coli*. Ad una distanza di 3 metri la riduzione è scesa a 3 Log per *S. aureus* e *P. aeruginosa*.⁵²

Attualmente sono in fase di studio sistemi che utilizzano la radiazione UV-C a 222 nm, la cui pericolosità per l'uomo sembra limitata, rendendo così possibile l'irraggiamento in continuo dell'ambiente da trattare.

Gli aspetti che è necessario tenere in considerazione per assicurare l'efficacia e la sicurezza di tali sistemi sono i seguenti:

- irradianza: per garantire una efficace inattivazione dei microrganismi nella parte alta della stanza l'irradianza a 254 nm deve attestarsi nel range $30\text{-}50 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Le lampade devono essere distribuite per fornire un'irradianza il più uniforme possibile;
- ventilazione dell'ambiente: il sistema è efficace quando è installato in ambienti che presentano un numero di ricambi d'aria/ora pari o inferiore a sei. Al crescere dei ricambi d'aria, il tempo di irraggiamento dei microrganismi diminuisce, quindi l'efficienza del sistema UV si riduce. Si può affermare quindi che il sistema rappresenta una misura efficace in ambienti con scarsa ventilazione;
- miscelazione dell'aria: il sistema è efficace solo se nell'ambiente è garantita una buona miscelazione verticale dell'aria. Se questa non dovesse essere garantita, ad esempio a causa di un non corretto posizionamento delle bocchette di mandata e di ripresa, possono essere installati uno o più ventilatori portatili;
- microclima: l'efficienza del sistema è influenzata dalla temperatura e dall'umidità relativa, come già discusso nel paragrafo precedente.

In base a quanto sopra descritto, la progettazione di sistemi fissi richiede un'attenta valutazione sia della ventilazione dei locali, sia del posizionamento e della potenza delle lampade. Si ritiene necessario, pertanto, avvalersi di modelli matematici o di simulazioni di fluido-dinamica computazionale (CFD). Inoltre, è necessario effettuare misurazioni periodiche (preferibilmente annuali) dell'irradianza, sia nella parte alta sia nella parte bassa dell'ambiente, per assicurarsi che i valori misurati si mantengano nel tempo sui valori di progetto.

Sistemi mobili

Il principale vantaggio dell'impiego di dispositivi mobili è quello di poter irradiare tutte le superfici, movimentando il sistema nelle aree più critiche, dove la presenza di arredi o attrezzature può creare zone d'ombra. Grazie alla presenza di una base mobile, l'operatore può spostare il sistema da una posizione all'altra. L'integrazione, nel sistema, di sensori di movimento consente di interrompere tempestivamente l'irradiazione in ambienti popolati o laddove sia percepita qualsiasi tipologia di movimento, come ad esempio l'apertura/chiusura delle porte. Negli ultimi anni i sistemi mobili si sono evoluti in sistemi a navigazione autonoma. Questi sistemi sono dotati di sensori di movimento in grado di percepire l'ambiente circostante e di in-

teragire con esso. Attraverso sensori laser sono in grado di codificare l'ambiente circostante e pianificare percorsi che permettono una disinfezione uniforme dell'ambiente, mantenendo sempre la stessa performance e riducendo così errori legati all'operatore. Una revisione pubblicata nel 2023 da Mehta et al., mette a confronto diversi dispositivi mobili sulla base della loro capacità di abbattere la carica microbica presente su varie superfici.⁵³ Nello specifico, l'emissione di UV-C (222 nm, da 1,2 a 1,7 mJ/cm²) ha rilevato abbattimenti pari al 99,9% (3 Log) della carica virale di coronavirus (HCoV-229E e HCoV-OC43). UV-C-LED (267–297 nm) e lampade UV-C (254 nm) hanno ottenuto un'inattivazione di 3 Log di HCoV-OC43 a una dose di 6–7 mJ/cm² dopo 60 secondi, mentre la lampada UV-C ha inattivato completamente SARS-CoV-2 a 1.047 mJ/cm² dopo 9 minuti di esposizione.⁵⁴

In un recente studio, l'esposizione a cicli di 4 minuti di raggi UV-C erogati da 4 dispositivi al mercurio a bassa pressione si è rivelata efficace nel ridurre batteri antibiotico-resistenti come *Staphylococcus aureus* meticillina-resistente (MRSA) e, seppur in misura minore, le spore di *Clostridioides difficile* nel lettino del paziente su aree a elevato contatto.³⁵ Uno studio italiano, condotto presso blocchi operatori, ha evidenziato come il 64% delle superfici ad alta frequenza di contatto erano ancora contaminate dopo il protocollo standard di pulizia e disinfezione, mentre tale percentuale è scesa al 17% dopo il trattamento UV-C (240 nm) per 5 minuti.⁵⁵

Nerandzic et al. utilizzando un sistema a PX-UV hanno dimostrato una riduzione da 0,55-Log a 1,85-Log della presenza delle spore di *C. difficile* e di MRSA e VRE su superfici ad alta frequenza di contatto all'interno di un ospedale, dopo 10 minuti di trattamento.⁵⁶

L'impiego di un sistema mobile a navigazione autonoma a radiazione UV-C (254 nm, 100 mJ/cm²) è stato valutato in aree assistenziali per l'abbattimento di *Candida auris* da Astrid et al. che hanno verificato un'attività fungicida variabile in funzione del ceppo di *Candida* utilizzato.⁵⁷

Lo studio di Yildirim et al., effettuato in aree ad alta intensità di cura, ha visto come l'utilizzo di PX UV-C (200–280 nm) per 10 minuti sia in grado di eliminare le spore di *C. difficile* oltre ai batteri MRSA e VRE dalle superfici ad alta frequenza di contatto.⁵⁸

Uno studio condotto presso le aree di terapia intensiva ha visto come l'applicazione, per un periodo di oltre 2 anni, della disinfezione con un sistema mobile a PX-UV subito dopo le attività di pulizia e disinfezione standard, sia stata in grado di ridurre significativamente la contaminazione delle diverse superfici con conseguente riduzione del numero di casi di infezione da MRSA.⁵⁹

Valutazione della dose necessaria per la riduzione della contaminazione microbica sulle superfici e nell'aria

La dose è la quantità di radiazione UV emessa da una sorgente nel tempo di esposizione e viene calcolata moltiplicando l'irradianza (espressa in mW/cm²) per il tempo espresso in secondi, per il Duty Rate. Quest'ultimo esprime il

rapporto tra la durata degli impulsi e la durata delle pause tra di essi, che influenzano il tempo di esposizione effettivo, in particolare per le lampade a luce pulsata. Tale valore si misura in percentuale e nelle emissioni continue corrisponde a 1. La dose ha come unità di misura J/m², mJ/cm² o mWsec/cm² e la formula di calcolo è la seguente:

$$\text{Dose (mJ/cm}^2\text{)} = \text{Irradianza (mW/cm}^2\text{)} \times \text{Tempo di Esposizione (s)} \times \text{Duty Rate (\%/100)}.$$

L'irradianza è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente. L'inattivazione microbica ottenuta tramite la radiazione UV dipende quindi dalla distanza e da molteplici variabili, come la lunghezza d'onda, il tempo di esposizione, l'umidità e la temperatura dell'aria, oltre a fenomeni di riflessione e rifrazione della radiazione nel mezzo in cui essa si propaga. L'irradianza prodotta dalle lampade UV-C a bassa pressione di mercurio varia anche in funzione dell'età del bulbo, riducendosi del 20% dopo circa 8.000 ore di lavoro, come può variare all'accensione, quando è necessario ionizzare il mercurio; pertanto, molte lampade raggiungono la massima irradianza dopo alcuni secondi dall'accensione. Un recente studio ha messo in evidenza come modelli differenti di lampade UV-C a bassa pressione raggiungono un'irradianza variabile tra il 62% e l'88% dopo 15 secondi dall'accensione e tra l'88% e il 98% dopo 30 secondi dall'accensione.⁶⁰

L'inverso della dose, espressa come J/m², rappresenta una costante (k), che descrive la suscettibilità dei microrganismi agli UV, ossia quanto un microrganismo è sensibile alla luce UV o quanto facilmente può essere inattivato dalla radiazione; essa dipende dalla specie e dalle caratteristiche del microrganismo. Il prodotto tra la dose e la costante rappresenta il tasso di inattivazione, espresso come N_0/N (%) o $\log(N_0/N)$, dove N_0 rappresenta la concentrazione iniziale di un microrganismo attivo e N quella conseguente alla disinfezione. Mettendo in relazione il tasso d'inattivazione di uno specifico microrganismo e la dose media si ottiene una curva dose-risposta.

La maggior parte dei dati ottenibili in letteratura è riferita a lampade monocromatiche (254 nm) ad arco a vapori di mercurio a bassa pressione (LP), per le quali l'irradianza viene misurata empiricamente, attraverso l'uso di un sensore UV radiometrico calibrato e moltiplicata per il tempo di esposizione (in secondi) per ottenere la dose. Per fornire stime approssimative della dose erogata possono essere utilizzate delle schede per test UV fotocromatici qualitativi; queste schede possono esser posizionate sulle superfici per verificare se la dose desiderata è stata raggiunta in tutti i punti dell'ambiente da trattare.⁶¹

La sensibilità dei microrganismi alla radiazione UV varia in funzione della lunghezza d'onda della radiazione, della struttura biologica e dimensione del microrganismo, oltre che in base alla tipologia di mezzo in cui si trovano (aria, superfici, acqua). La dose applicata influisce sull'efficacia della disinfezione. In generale, i batteri in forma vegetativa per essere inattivati richiedono una dose inferiore rispetto alle spore batteriche, che a loro volta richiedono una dose inferiore rispetto a virus e miceti. Tuttavia, vi è incertezza circa le

dosi esatte necessarie per ottenere una determinata riduzione per un microrganismo specifico. Questo può essere spiegato da una mancanza di standardizzazione nelle tecniche di misura che non fanno ricorso a metodi di prova raccomandati da norme tecniche.⁶²

In letteratura sono riportati per lo più studi sperimentali riguardanti la dose di UV necessaria per la disinfezione dell'acqua destinata al consumo umano o delle acque reflue, con abbattimenti significativi di almeno 3 log₁₀. Tuttavia, non si può presumere che dosi che inattivano i patogeni nei liquidi siano ugualmente efficaci contro gli stessi sulle superfici o nell'aria.⁶³

I microrganismi presenti nell'aria sono più sensibili agli UV rispetto a quelli presenti nei biofilm o in sospensione. Questo effetto varia tra i microrganismi; ad esempio, i batteri generalmente sono circa 5 volte più resistenti all'inattivazione nell'acqua che nell'aria in presenza di bassa umidità; allo stesso modo i virus sono 3 volte più resistenti quando sono sospesi in acqua rispetto a quando si trovano in aria a bassa umidità.⁶⁴ Uno studio di McDavitt et al. ha rilevato che la radiazione UV-C è più efficace nell'inattivazione del virus dell'influenza A quando l'umidità relativa dell'aria è più bassa; allo stesso modo, anche l'inattivazione di altri virus, come il batteriofago MS2, risulta maggiore quando la percentuale di umidità è del 30%, a fronte di esperimenti analoghi con umidità del 60% e 90%.⁶⁵ Questo è stato attribuito all'assorbimento della radiazione UV da parte delle molecole d'acqua presenti nell'aria, che determinano un effetto protettivo sui microrganismi; anche la maggiore turbolenza dell'aria, aumenta la loro vulnerabilità, facilitandone la disidratazione.

L'efficacia della radiazione sulle superfici è influenzata da variabili che includono, oltre alla quantità di irradianza generata da una lampada UV, l'angolo con cui i raggi UV colpiscono la superficie, l'esposizione diretta piuttosto che riflessa da altri oggetti (ad es. superfici in aree ombreggiate), il livello di pulizia delle superfici (ad es. la presenza di materiale organico svolge azione protettiva sui microrganismi) e la tipologia di materiale di cui esse sono composte. Livelli di irradianza di circa 1.000 µW/cm² sono stati ottenuti su superfici verticali, situate in linea diretta con la sorgente di emissione, a una distanza media di 1,3 metri dal dispositivo, mentre solo 3-10 µW/cm² sono stati raggiunti su superfici orizzontali localizzate in aree ombreggiate, a una distanza media di 3,3 metri. Comunque, nonostante il marcato calo della dose nelle aree ombreggiate, sono state osservate riduzioni di 2 log₁₀ per *S. aureus* meticillino-resistente (MRSA) sia a 1,3 m che a 3,3 m. Al contrario, le spore di *C. difficile* si sono dimostrate relativamente resistenti; in aree ombreggiate sono state ottenute riduzioni minime delle spore e sia la distanza che l'orientamento delle superfici hanno avuto un maggiore impatto sull'efficacia degli UV.⁶⁶ Vincent et al. hanno dimostrato che l'inattivazione di spore di *B. atrophaeus* dopo 10 minuti di esposizione variava significativamente a seconda che queste ricevessero un'esposizione UV-C diretta (riduzione di 4,3 log), un'esposizione sia diretta che riflessa (riduzione da 3,0 a 4,0 log) o la sola esposizione UV-C riflessa (riduzione <1,0 log). In egual modo, le riduzioni logaritmiche di *S. aureus* sono risultate 5,5 log per esposizione

diretta, da 3,6 a 5,2 log per l'esposizione sia diretta che riflessa e circa 2,75 log per la sola esposizione UV riflessa.⁶⁷ Per limitare questo problema, Jelden et al. hanno dimostrato che l'utilizzo di una vernice riflettente sulle pareti della stanza è in grado di migliorare l'efficacia della disinfezione, in linea con quanto descritto nel lavoro di Boyce et al. dove l'uso di tali vernici ha aumentato le dosi di UV-C nelle zone d'ombra, ottenendo riduzioni logaritmiche maggiori rispetto all'uso di vernici non riflettenti.^{66,68} Donskey et al. hanno dimostrato che l'efficacia della radiazione UV-C può diminuire di 3 log se le condizioni di esposizione non sono ideali (direzione non ortogonale, superfici riflettenti o ruvide, presenza di sostanza organica, ecc.).⁶⁹ Ali et al. riportano dati di riduzione logaritmica ottenuta in prove di laboratorio su supporti (coupon) artificialmente contaminati con sospensioni batteriche in sieroalbumina bovina (SAB) a bassa concentrazione (0,03%) o alta concentrazione (10%); per MRSA e *K. pneumoniae* sono stati evidenziati 4-5 log di riduzione della concentrazione iniziale a bassa concentrazione di SAB e minori e più variabili riduzioni in presenza di alte concentrazioni, mentre per le spore di *C. difficile* sono state osservate riduzioni tra 0,5 e 2,5 log solo in presenza di una bassa concentrazione.⁷⁰

Si evidenzia, quindi, come in letteratura siano riportate differenze significative nei risultati ottenuti per la valutazione dell'efficacia microbica delle radiazioni UV nell'aria e sulle superfici, anche quando vengono analizzati dispositivi che utilizzano la stessa fonte luminosa, con la stessa irradianza, nei confronti del medesimo microorganismo.

Poiché non si conosce la misura in cui gli agenti patogeni presenti nell'ambiente debbano essere ridotti per prevenirne la trasmissione, non esistono criteri ampiamente accettati riguardo al livello di riduzione che i dispositivi UV dovrebbero raggiungere. Per quanto riguarda le superfici, ad esempio, dato che quelle ad alto contatto nelle stanze dei pazienti sono spesso contaminate con cariche microbiche inferiori a 100 CFU/25 cm², Boyce et al. hanno scelto di considerare efficaci le D99,9, ossia le dosi espresse in J/m² in grado di rendere inattivo il 99,9% della popolazione microbica (riduzione di 3 log), criterio di efficacia utilizzato anche da altri autori.⁶⁶⁻⁷⁰

Fattori che condizionano la dose

L'utilizzo della radiazione ultravioletta (UV) risulta essere una strategia di disinfezione con notevoli potenzialità in ambito sanitario; tuttavia, la sua efficacia è influenzata da diversi fattori che vanno considerati per massimizzare il suo effetto. Tra questi possiamo indicare la lunghezza d'onda della luce e la tipologia, le condizioni microclimatiche, la presenza di materiale organico, il tipo di microrganismo e anche le modalità di esposizione/irraggiamento.^{56,71} Inoltre, la stessa tipologia di superficie svolge un ruolo fondamentale.⁷²⁻⁷⁴ L'applicazione delle radiazioni UV nell'ambiente sanitario, come ad esempio nelle sale operatorie, nelle stanze di isolamento o nei sistemi di bio-contenimento (cappe o armadi di sicurezza biologica) richiede la completa inattivazione di microrganismi patogeni aerodispersi o presenti sulle superfici e ogni condizione che limiti tale azione costituisce un punto critico da valutare e controllare.⁷¹⁻⁷⁹ Di se-

guito, saranno considerati tre aspetti chiave: i fattori microclimatici, la tipologia di superfici irradiate e le modalità di esposizione.

Fattori microclimatici

I parametri microclimatici nelle strutture sanitarie e nelle aree critiche sono definiti da standard specifici, che sono stati aggiornati nel corso degli ultimi decenni. ASHRAE e altre linee guida definiscono i valori sia per i reparti ospedalieri, sia per le aree maggiormente critiche.⁸⁰ In sintesi, la temperatura nelle aree critiche sanitarie dovrebbe essere compresa tra 21°C e 24°C e l'umidità relativa dovrebbe essere compresa tra il 30 e il 60%. Inoltre, il ricambio d'aria presenta valori tra le varie aree molto variabili, che si attestano tra un minimo di 2 e un massimo di 15 ricambi per ora (AC/H). In particolare, per le aree critiche i valori sono compresi tra 2 e 6 AC/H.⁸¹⁻⁸³ Nel caso si utilizzino lampade UV, il mantenimento di tali valori è legato all'efficacia della disinfezione, oltre che al mantenimento del benessere e del confort degli utenti e lavoratori presenti.⁸⁴⁻⁹⁰ La temperatura può influire sulla efficacia; in particolare, questo sembra essere correlato alla tipologia di sorgente luminosa.

Le lampade a vapori di mercurio a bassa pressione presentano una massima efficacia intorno a 20-21°C, come riportato in alcuni studi,⁹¹ mentre per i LED la dipendenza dalla temperatura non sembra essere così determinante; tuttavia, in questo tipo di sorgente è stato osservato come l'emissione diminuisca con l'aumentare della temperatura.⁹²⁻⁹⁶ È opportuno quindi operare a temperature più basse, alle quali si ha una diversa penetranza e diffusione dell'irraggiamento sulla base dell'energia cinetica delle molecole dell'aria.⁹¹ Temperature più basse sono state associate anche a una foto-riparazione minore e più lenta dei microrganismi. Anche l'aumento dell'umidità relativa influisce negativamente sull'efficacia della radiazione, a causa della minore suscettibilità dei microrganismi alla luce UV e una diminuzione dell'azione dell'irradiazione.^{89,90} La riduzione della sensibilità si suppone possa essere dovuta alla maggiore presenza di acqua, che proteggerebbe i microrganismi dai danni al DNA, RNA e macromolecole.⁸⁴ L'irradiazione UV, comunque, diminuisce a causa dell'assorbimento, della rifrazione e della riflessione della luce UV da parte delle molecole di acqua presenti nell'aria, nel rispetto delle leggi che regolano la trasmittanza o assorbanza della luce attraverso un cammino ottico.⁹⁰⁻⁹² Altri autori hanno osservato un cambiamento nell'irradiazione UV del 34% quando l'umidità relativa aumentava dal 50% al 90%, con punti critici oltre il 70%. La percentuale di influenza dell'umidità relativa sull'efficienza UV dipende dal microrganismo presente ed è più evidente per i batteri rispetto ai virus.⁹² Tra i parametri microclimatici, la stessa ventilazione, naturale o forzata, influenza l'azione disinfettante dei raggi UV, favorendo la rimozione dei microrganismi dall'aria, il tempo di esposizione all'irraggiamento e/o la quantità di microrganismi che sono esposti alla luce UV. Una corretta progettazione dei sistemi di ventilazione può essere utilizzata persino per migliorare l'efficacia della disinfezione tramite UV, per esempio permettendo di indirizzare l'aria verso i dispositivi di sanificazione.⁹³⁻⁹⁶ Pertanto, sembra op-

portuno adeguare i valori di umidità, temperatura e ventilazione alle indicazioni del fornitore del dispositivo a supporto di un mantenimento ottimale dell'efficacia.⁷⁸

Tipologia delle superfici irradiate

In ospedale, diverse tipologie di superfici possono essere irradiate anche in aree critiche, come ad esempio la parte superiore o le maniglie del carrello per anestesia, il mouse e la tastiera del computer, il contenitore per aspirazione, i lati del tavolo operatorio, le pareti, il pavimento, ecc.^{95,97} Occorre considerare altri limiti insiti nell'utilizzo dei soli raggi UV, quali la presenza di zone d'ombra, ovvero aree della stanza che la luce non riesce a raggiungere, ma anche i livelli di pulizia e disinfezione delle superfici.⁹⁸ Ad esempio, i microrganismi presenti sulle superfici dei piani di lavoro nascosti alla radiazione possono non subire la piena inattivazione.⁹⁹ Un punto critico nel processo di disinfezione delle superfici tramite UV è proprio il processo di pulizia precedente la disinfezione.¹⁰⁰⁻¹⁰¹ Il tipo di materiale utilizzato per le superfici, inoltre, può essere soggetto a deterioramento, come avviene per i materiali plastici.¹⁰²

Per massimizzare l'effetto delle radiazioni UV, dunque, sono state introdotte superfici resistenti e foto-cataliticamente attive, contenenti catalizzatori quali il Biossido di Titanio o Monossido di Zinco, che sono capaci di generare specie reattive dell'ossigeno in presenza di luce.¹⁰³ L'ossidazione fotocatalitica è una strategia per incrementare l'azione antimicrobica di rivestimenti utilizzati in ambiente ospedaliero o come coadiuvante per l'azione di raggi UV.¹⁰⁴⁻¹⁰⁶

Modalità di esposizione

La dose applicata e la modalità di esposizione influiscono sull'efficacia della disinfezione. In generale, i microrganismi richiedono dosi diverse di radiazione, ma vi è incertezza sull'esatto fabbisogno di energia necessaria per ottenere una definita riduzione per ciascun microrganismo specifico.¹⁰⁷ Infatti, oltre alle condizioni microclimatiche, i materiali e le caratteristiche di resistenza delle diverse specie microbiche, le variazioni osservate della dose inattivante possono essere spiegate da una mancanza di standardizzazione che porta all'uso di tecniche di misurazione differenti.¹⁰⁸ La valutazione della dose viene determinata in modo indiretto attraverso l'intensità e il tempo di esposizione.¹⁰⁹⁻¹¹⁰ Nello specifico, l'intensità è inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra la sorgente luminosa e la superficie.¹⁰¹ Risulta chiaro da questa definizione che l'intensità dei raggi UV ricevuta da una superficie diminuisce in modo consistente quanto più la superficie è lontana dalla sorgente.⁷⁹⁻⁸² Inoltre, la potenza di una lampada diminuisce nel tempo, quindi sarebbe opportuno calcolare la dose al termine della durata della lampada, che è rappresentativo dello scenario peggiore. Nel calcolo della dose è importante il calcolo del Duty Rate per le lampade a luce pulsata.⁸⁸ La dose efficace è correlata ai meccanismi di foto-riparazione dei microrganismi. Alcuni autori hanno, infatti, riscontrato come la percentuale di foto-riparazione diminuisca dal 5% allo 0% all'aumentare della dose fino a 19,7 mJ/cm².¹¹¹ Pertanto, una dose più elevata ha

un'influenza sia sulla foto-riparazione che sull'inattivazione iniziale, venendo così a definire un intervallo di dose efficace che tenga conto dei vari parametri, tra cui le condizioni microclimatiche.

Un'attenta valutazione dell'ambiente, delle condizioni microclimatiche e dei materiali deve preventivamente essere effettuata prima di pianificare i trattamenti con UV, per ridurre i rischi collaterali e massimizzare l'efficacia dell'azione dell'irraggiamento in quel particolare contesto.

Le norme per la certificazione dell'attività microbica

Al fine di garantire l'efficacia dei sistemi di disinfezione a UV è necessario determinare quantitativamente la dose efficace, sia in aria sia sulle superfici, attraverso l'applicazione di metodi di prova definiti all'interno di norme standard. Il fabbricante di sistemi a radiazione UV dovrà dichiarare l'efficacia del proprio sistema, indicando le condizioni di prova, l'abbattimento logaritmico raggiunto e la dose necessaria.

Il requisito relativo all'efficacia germicida delle lampade UV su superfici non può essere certificato secondo norma ISO, ma può esserlo conformemente alla norma francese AFNOR NF T72 281- 2014, alla norma britannica BS 8628: 2022 o allo Standard americano ASTM 3135-18.

La norma AFNOR NF T72 281- 2014 definisce il metodo di prova per valutare la dose di radiazione richiesta per definire il livello di abbattimento logaritmico richiesto su ceppi microbici di riferimento. Nello specifico, in Annexe E sono riportate le condizioni di prova per determinare la dose necessaria, espressa in mJ/cm^2 , per la riduzione di 5 Log dei batteri, di 4 Log dei miceti, micobatteri (tubercolari e non) e virus, e di 3 Log delle spore batteriche.

Analogamente, la norma BS 8628:2022 fornisce il metodo di prova per la verifica quantitativa dell'attività di disinfezione della radiazione UV attraverso l'uso di sistemi automatizzati utilizzati all'interno di strutture sanitarie o di preparazione degli alimenti.

In alternativa, la certificazione dell'attività microbica potrà essere dimostrata conformemente allo Standard ASTM 3135-18, sviluppato dall'American Society for Testing and Materials International (ASTM), che definisce le condizioni di prova per la verifica dell'attività microbica di tutti i sistemi a UV per la disinfezione delle superfici (compresi i LED), pur non definendo l'entità dell'abbattimento richiesto. Esso definisce le specie microbiche da valutare, le tipologie di materiali e le condizioni operative, anche in caso di simulazione di presenza di materiale organico.

Il fabbricante di sistemi a radiazione UV collocati all'interno delle unità di trattamento aria (UTA) dovrà dichiarare l'efficacia del proprio sistema, indicando le condizioni di prova, l'abbattimento logaritmico raggiunto e la dose necessaria.

Il requisito relativo all'efficacia germicida di dispositivi di irradiazione ultravioletta collocati all'interno di UTA può essere certificato secondo la norma ISO 15714:2019. La norma descrive il metodo di prova per determinare la dose UV capace di inattivare ceppi microbici surrogati di quelli patogeni, aerodispersi all'interno di una condotta, a diverse ve-

locità di flusso dell'aria. Nello specifico, prevede il calcolo del tasso d'inattivazione di tre specie microbiche (*Serratia marcescens*, *Bacillus subtilis*, *Cladosporium sphaerospermum*) all'interno di un impianto pilota, in condizioni controllate di umidità, temperatura e velocità dell'aria. La norma non contempla l'utilizzo di virus, nonostante la crescente rilevanza di questi patogeni. Per una serie di batteri, miceti e virus, la norma fornisce la costante di suscettibilità, ottenuta dai dati riportati da Kowalski, che permette di stimare la dose (J/m^2) efficace per una riduzione del 90% (1 Log_{10}) per specie di interesse, una volta calcolato il tasso di inattivazione dei microrganismi test previsti dalla norma. Quando si utilizzano tali costanti per la valutazione delle prestazioni dei dispositivi UV, bisogna tenere conto che devono essere considerate solo una stima e trattate come comportamenti rappresentativi, poiché possono avere una grande differenza rispetto ai valori osservati in condizioni reali. La norma non definisce l'entità dell'abbattimento richiesto.

Lo standard ASHRAE 241-2023 riporta il metodo per valutare l'efficacia di sistemi UV in aria nei confronti del batteriofago MS2, di cui è nota la capacità di foto-riparazione, grazie al parassitismo endocellulare nell'ospite *Escherichia coli*.

I protocolli sperimentali

L'utilizzo efficace della radiazione UV nella disinfezione ambientale di aree critiche sanitarie presuppone l'erogazione sull'area interessata di una dose sufficiente all'inattivazione del patogeno presente. La dose è il risultato del prodotto dell'irradianza $\times$ il tempo di esposizione $\times$ Duty Rate. Noto il patogeno che si suppone essere presente sulla superficie e ricavata dalla letteratura la dose necessaria per l'inattivazione del patogeno stesso, si suggerisce di moltiplicare cautelativamente tale dose per un fattore 10 al fine di considerare la parziale schermatura offerta dai biofilm eventualmente presenti sulla superficie da sanificare o di altri effetti di schermatura indesiderata.

Il protocollo di pulizia e disinfezione deve tener conto del tempo di esecuzione, che non può interferire con il servizio sanitario erogato, causando ritardi nell'erogazione delle pratiche assistenziali. Inoltre, esposizioni prolungate alla radiazione UV possono alterare i materiali irradiati, soprattutto i polimeri plastici.

Al fine di garantire l'erogazione della dose necessaria sulla superficie di interesse, si suggerisce il protocollo tecnico riportato di seguito, attuabile con diverse modalità in base alle competenze e alla dotazione strumentale di cui dispone la struttura sanitaria:

Scelta delle lampade a raggi ultravioletti

La disinfezione ambientale può essere effettuata utilizzando lampade con emissione nella banda dell'UV-A o dell'UV-C. Tra queste, le lampade a vapori di mercurio rappresentano la scelta più pratica ed economica con lo svantaggio rappresentato dalla modalità di smaltimento del mercurio e dal fatto che non sono liberamente direzionabili a causa della forma estesa. Indipendentemente dalla tipologia di lampada scelta, è opportuno richiedere al fornitore almeno

le seguenti specifiche tecniche: banda o lunghezza d'onda di emissione, irradianza a 1 m e durata in ore attesa di funzionamento ottimale.

Scelta del posizionamento delle lampade a raggi ultravioletti

Il posizionamento ottimale delle lampade UV e la decisione se fissarle al soffitto, alle pareti o su un'unità mobile, dipendono dalle dimensioni e dalla forma dell'ambiente da sanificare, ma soprattutto dalla posizione degli oggetti all'interno della stanza che hanno la più alta probabilità di essere contaminati. Sebbene le lampade fisse siano più pratiche da usare per il personale addetto, le unità mobili hanno il vantaggio di essere trasportabili in diversi ambienti e possono così ottimizzare l'uniformità di irraggiamento ed essere economicamente più convenienti. Anche la forma della lampada e la presenza di riflettori posteriori e/o laterali sono fattori importanti per ottenere un trattamento efficace; ad esempio, nel caso di lampade installate a parete o a soffitto, la presenza di un riflettore posteriore consente di sfruttare più efficacemente l'irradianza emessa, riflettendo nell'emivolume anteriore al corpo luminoso una porzione significativa della radiazione emessa nell'emivolume posteriore. Nella scelta del numero di lampade da installare, occorre prestare attenzione alle superfici inclinate di un angolo inferiore a 45° rispetto all'asse ortogonale del corpo luminoso; in questo caso, soprattutto in assenza di riflettori laterali, è opportuno aumentare il numero di lampade utilizzate e ottimizzarne il posizionamento per massimizzare l'area irradiata. È infine importante ricordare che possono essere irradiate e quindi sanificate solo le superfici esposte alla luce diretta della lampada; la componente riflessa della radiazione primaria, proveniente dai materiali comuni presenti nell'ambiente, contribuisce in maniera trascurabile alla disinfezione. Questo è sicuramente il limite principale della disinfezione UV, che deve quindi essere proposta in aggiunta e non in sostituzione ai protocolli di pulizia e disinfezione standard.

Stima del tempo di esposizione

Il calcolo del tempo di esposizione, nei siti dove si ritiene possibile la presenza di patogeni, può essere effettuato mediante uno dei due approcci riportati di seguito, scelto in base alla disponibilità o meno di uno strumento di misura. Il primo approccio prevede la misurazione dell'irradianza nei siti d'interesse mediante un radiometro calibrato in un intervallo di lunghezze d'onda che comprenda la banda di emissione della lampada; i corrispondenti tempi di esposizione possono essere ottenuti dividendo la dose di inattivazione selezionata per i valori di irradianza misurati. Il secondo approccio consiste nel calcolare i valori di irradianza attesi sulle superfici da sanificare utilizzando il valore di irradianza nominale fornito dal produttore (solitamente a 1 m dal corpo luminoso) corretto per la legge dell'inverso del quadrato della distanza; i corrispondenti tempi di esposizione possono essere ottenuti dividendo la dose di inattivazione selezionata per i valori di irradianza attesi. Utilizzando questo approccio è bene ricordare che l'irradianza nominale fornita dal produttore è solitamente un valore medio a diversi

angoli dall'asse ortogonale del corpo luminoso. L'applicazione di questo approccio è inoltre penalizzata dall'uso della legge dell'inverso del quadrato della distanza, che introduce un errore tanto maggiore quanto più le dimensioni ortogonali del corpo luminoso sono diverse tra loro. Per compensare tali incertezze, si consiglia di incrementare i tempi di esposizione calcolati in assenza di misure di irradianza di almeno il 20%. A seguito del calcolo del tempo di esposizione, è opportuno dotare la lampada di un timer con il quale impostare sia la durata del tempo di effettivo funzionamento delle lampade sia il tempo di ritardo tra l'attivazione della lampada e l'effettiva erogazione di radiazione in modo tale da consentire all'operatore di allontanarsi dall'ambiente da sanificare. Se l'urgenza di sanificare l'ambiente non è immediata ma procrastinabile e se la pianificazione dell'attività sanitaria lo consente, è opportuno impostare il funzionamento delle lampade a UV durante la notte.

Verifica della dose effettivamente erogata

Nel caso di utilizzo di lampade con emissione nella banda dell'UV-C, è possibile verificare che la dose pianificata per il conseguimento dell'inattivazione del patogeno sia stata effettivamente erogata su tutte le superfici esposte mediante misure semiquantitative del dosaggio effettuate con rilevatori monouso di radiazione UV-C. Tali dosimetri presentano uno strato di inchiostro fotoattivo che reagisce alla radiazione UV-C cambiando colore in base al dosaggio. L'inchiostro può essere calibrato per assumere tonalità diverse a seconda dei diversi dosaggi indicando visivamente una dose accumulata da UV-C di 25, 50, 75 e 100 mJ/cm². I dosimetri descritti rappresentano un importante strumento per la verifica della dose effettivamente erogata soprattutto sulle superfici con inclinazione minore di 45° rispetto all'asse del corpo luminoso della lampada.

Valutazione dei presidi di sicurezza e monitoraggio del tempo di funzionamento delle lampade

L'esposizione alla radiazione UV può determinare l'insorgenza di effetti biologici e conseguentemente di danni sanitari a carico degli occhi e della cute dell'individuo esposto. L'utilizzo della radiazione UV nella sanificazione degli ambienti deve dunque prevedere l'adozione di misure di sicurezza specifiche. Per minimizzare la possibile esposizione degli operatori potenzialmente presenti nell'ambiente oggetto di sanificazione, si possono scegliere lampade dotate di sensore di presenza che comportano l'automatica sospensione dell'erogazione della radiazione. Il funzionamento della lampada (dotata o meno del sensore di presenza) dovrà essere inoltre indicato da idonea cartellonistica e da segnaletica luminosa, attiva a lampada in funzione, in corrispondenza dei possibili accessi all'ambiente in sanificazione. Infine, per garantire l'efficacia del protocollo di sanificazione nel tempo, si consiglia di monitorare il tempo di vita delle lampade in quanto la loro irradianza (soprattutto nel caso di lampade UV-C al mercurio) diminuisce con il tempo. Sarà necessario adeguare nel caso i tempi di esposizione e prevedere, ove opportuno, la sostituzione della lampada.

Il meccanismo della fotoriparazione microbica

Il principio della disinfezione UV si basa sulla capacità della luce ultravioletta di indurre danni al genoma dei microrganismi, rendendoli incapaci di replicarsi. Nello spettro della luce UV, la radiazione UV-C mostra l'effetto germicida più rilevante. Infatti, tra 200 e 300 nm l'energia della radiazione corrisponde a quella di eccitazione degli orbitali molecolari dei doppi legami coniugati ($C=C-C=C$) presenti nelle più importanti molecole biologiche, gli acidi nucleici, dove i gruppi cromofori responsabili dell'assorbimento sono costituiti dalle basi puriniche e pirimidiniche [78]. Le basi pirimidiniche sono alterate con una efficienza maggiore di quella relativa alle basi puriniche di circa un ordine di grandezza. L'esposizione alla radiazione UV porta alla formazione di dimeri e/o foto-prodotti in funzione della lunghezza d'onda: in seguito all'irraggiamento con UV-C, il dimero TT è il più frequente per lunghezze d'onda inferiori a 300 nm, mentre a 300 e 313 nm i dimeri TC e CC si formano con più alta efficienza.

I foto-prodotti dominanti sono i dimeri ciclobutano di pirimidina (CPD) (75%), seguiti dai foto-prodotti pirimidina-pirimidone 6-4 (6-4PP) (25%). Si stima, inoltre, che circa il 20% dei 6-4PP vada incontro a fotoisomerizzazione, con conseguente formazione di isomeri di valenza di Dewar. Tuttavia, fino ad oggi, è stata dedicata minore attenzione a queste specie, anche se potenzialmente mutagene [112]. Per quanto concerne i CPD, è noto come essi blocchino il progresso delle DNA polimerasi: in caso di mancata riparazione, un singolo CPD risulta sufficiente per bloccare l'espressione di interi geni, interferendo sia con il processo di trascrizione sia di replicazione. I CPD non riparati possono dunque portare a una lettura errata del codice genetico, causando mutazioni e, infine, morte cellulare.¹¹³⁻¹¹⁵

Nell'UV-B le pirimidine hanno un coefficiente di estinzione molare più basso.

Anche le proteine hanno gruppi cromofori che possono assorbire la radiazione, rappresentati dagli amminoacidi aromatici, come il triptofano e la tirosina.

Nel complesso, è possibile assimilare l'inattivazione dei microrganismi mediante UV a una cinetica del primo ordine, cioè sussiste una relazione lineare tra il tasso logaritmico di inattivazione e la dose UV impiegata. Tale relazione è caratterizzata dalla cosiddetta costante di inattivazione k , espressa in mJ/cm^2 , la quale differisce tra le varie specie e riflette la vulnerabilità dei microrganismi al danno UV.¹¹⁶ In alcuni microrganismi è inoltre possibile individuare una dose di irradiazione minima, al di sotto della quale non si riscontra alcuna inattivazione e una dose massima, oltre alla quale non si osserva nessun ulteriore incremento del grado di inattivazione. Come regola generale, i microrganismi più resistenti risultano essere i virus, in particolare quelli privi di pericapside (es. Adenovirus) e le spore batteriche. Tra i protozoi *Acanthamoeba* spp. risulta altamente resistente ai raggi UV, mentre le oocisti di *Cryptosporidium parvum* e *Giardia* spp. sono maggiormente sensibili. Diversi studi hanno riportato come i batteri ambientali e loro spore, ove presenti, esibiscano una maggiore resistenza ai raggi UV rispetto ai loro omologhi di laboratorio.^{116,117}

La vulnerabilità o meno all'irraggiamento UV dipende in larga misura, oltre che dalle caratteristiche strutturali dei microrganismi, anche dal fatto che essi possiedono meccanismi intrinseci di riparazione del DNA, con potenziale capacità di recupero del danno indotto dai raggi UV-C.^{115,116-119} Sebbene la radiazione UV-C non sia rilevante dal punto di vista ecologico, in quanto essa viene schermata dall'atmosfera, i microrganismi, tuttavia, possiedono meccanismi di riparazione del DNA che si sono evoluti per contrastare l'effetto della componente extraterrestre UV-A e UV-B che, di fatto, risulta in grado di esercitare effetti di rilievo sul biota.¹²⁰

Il genoma dei microrganismi viene continuamente scansionato da parte di proteine specializzate nel riconoscimento di lesioni al DNA. Quando viene rilevata una lesione, tali proteine innescano un'efficace riparazione del DNA, indirizzata al ripristino dell'informazione genetica originale. Esistono due meccanismi, entrambi ben caratterizzati, di riparazione del DNA contro il danno inferto dai raggi UV quando esposto a dosi letali: la fotoriparazione (fase luce-dipendente) e la riparazione per escissione (fase luce-indipendente).

Fotoriparazione

La fotoriparazione è il sistema di riparazione più semplice e probabilmente il più antico, dal punto di vista evolutivo. È mediata dalla fotoliasi, un enzima appartenente alla classe delle liasi che si legano specificamente ai CPD o ai 6-4PP originati in seguito al danno indotto dall'esposizione a radiazione ultravioletta. Le lesioni del DNA vengono riparate utilizzando l'energia di fotoni nel range della luce visibile/UV vicino (300-500 nm), in un processo noto come fotoriattivazione. Vale la pena sottolineare come anche eventuali sorgenti luminose artificiali, che emettono lunghezze d'onda compatibili con l'attivazione della fotoliasi, potrebbero potenzialmente indurre la fotoriparazione in seguito all'irradiazione UV-C, favorendo così il recupero dell'attività metabolica dei microrganismi.^{114,119,120}

Le fotoliasi e il loro meccanismo di catalisi enzimatica sono stati caratterizzati in batteri, funghi, piante, animali invertebrati e vertebrati. A titolo di esempio, la fotoliasi CPD-desossiribosio-pirimidina di *Escherichia coli*, codificata dal gene *phr*, si lega al buio al CPD, ruotandolo verso l'esterno della doppia elica di DNA e posizionandolo in una tasca contenente il cofattore catalitico acido folico. Quando, successivamente, la cellula viene esposta alla luce visibile, l'acido folico, assorbendo un fotone, distrugge l'anello ciclobutanico del dimero. L'efficienza del processo di riparazione è elevata: si stima che, per ciascun fotone di attivazione, venga a essere separato un CPD. In aggiunta, sono state ipotizzate anche funzioni alternative della fotoliasi. Si ritiene che, in assenza di fotoni attivanti, l'enzima sia in grado di stimolare il sistema di riparazione per escissione, contribuendo, pertanto, alla riparazione del danno indotto dai raggi UV anche indipendentemente dalla presenza di luce.^{113,114,118-120}

Di fatto, è noto come la capacità di fotoriattivazione di *E. coli* cambi in seguito all'irradiazione UV a bassa o media pressione. Le lampade UV a media pressione (MP) emettono uno

spettro che va dal range UV di 200-400 nm fino al visibile, con conseguente irraggiamento dei microrganismi con lunghezze d'onda multiple. Le lampade UV a bassa pressione (LP), al contrario, sono caratterizzate da un'emissione monocromatica a 253.7 nm.¹¹⁵ A livello applicativo, è stato dimostrato come, nel trattamento a bassa dose dell'acqua a scopo di potabilizzazione, la radiazione UV policromatica delle lampade MP possa offrire un vantaggio rispetto a quella monocromatica delle LP. Le lampade MP, infatti, sembrano fornire una migliore protezione contro la fotoriattivazione, a condizione che l'irraggiamento UV avvenga prima delle unità di processo in cui l'acqua viene esposta alla luce, anche per brevi periodi di tempo (per esempio da 30 a 180 minuti). L'uso delle lampade LP, per tali applicazioni, dovrebbe essere evitato poiché la riparazione avviene rapidamente in seguito all'esposizione alla luce.¹²¹

Riparazione per escissione

Anche la riparazione per escissione è un meccanismo mediato da enzimi, sebbene non necessita dell'attivazione da parte di fotoni, come accade per la fotoliasi. Nel complesso, la riparazione per escissione è un sistema più complesso della fotoriattivazione, operata da un singolo enzima. Esso prevede, infatti, il ripristino del DNA danneggiato con nuovi elementi e non la riparazione diretta della lesione arrecata dall'irradiazione UV. Esistono due percorsi distinti di riparazione per escissione: la riparazione per escissione di basi (BER) e la riparazione per escissione di nucleotidi (NER).

Riparazione per escissione di basi

Il meccanismo della BER si attiva per sostituire singole basi, modificate o danneggiate. Gli enzimi chiave della BER sono le DNA-glicosilasi: esse rimuovono la base danneggiata scindendo il legame N-glicosidico che la tiene unita al desossiribosio nucleotidico. Esistono molteplici DNA-glicosilasi, ciascuna specializzata nel rimuovere un diverso tipo di base danneggiata (uracil-glicosilasi; 3-metiladenina-glicosilasi). La specificità del percorso di riparazione dipenderà, pertanto, dal tipo di glicosilasi reclutata. La rimozione della base danneggiata ad opera della DNA-glicosilasi lascia un sito abasico o apurinico/apirimidinico (sito AP) che, a sua volta, viene rimosso da una specifica AP-endonucleasi. Il residuo di desossiribosio-fosfato restante viene rimosso da una fosfodiesterasi, consentendo, infine, a una DNA polimerasi di riparare il filamento. Da ultimo, una ligasi sigilla il filamento di DNA appena ricostituito. Alcuni microrganismi, particolarmente resistenti ai raggi UV (*Micrococcus luteus*), oltre alle glicosilasi della BER, contengono anche le cosiddette UV-endonucleasi, dei peculiari enzimi che possono generare delle vere e proprie rotture del filamento di DNA a ridosso dei siti CPD, incidendo immediatamente in posizione 5' rispetto alla lesione. Geni che codificano per enzimi simili alle UV-endonucleasi sono stati trovati anche nel batteriofago T4, nei lieviti *Saccharomyces cerevisiae*, *Schizosaccharomyces pombe* e nella muffa *Neurospora crassa*.¹²⁰

Riparazione per escissione di nucleotidi

Il sistema della NER è presente nella maggior parte degli organismi e può aggiustare sia i CPD che i 6-4PP. La NER procariotica coinvolge un unico enzima trimetrico, la nucleasi UvrABC, che esegue l'intero processo di riconoscimento ed escissione della lesione. Al contrario, la NER eucariotica necessita di circa 30 diversi prodotti genici per rimuovere un oligonucleotide danneggiato. Sia nei procarioti che negli eucarioti, il processo della NER viene avviato da un fattore di riconoscimento della distorsione della doppia elica (componente UvrA), seguito dall'azione di una DNA-elicasa energia-dipendente (UvrB), la quale promuove l'apertura di un complesso di pre-incisione che viene ulteriormente clivato da apposite nucleasi, portando al rilascio di un oligonucleotide mediante duplice incisione. Come nella BER, lo spazio vuoto verrà ad essere colmato da una polimerasi e sigillato dall'azione di una ligasi.¹²⁰ Si ritiene che la NER rappresenti anche il principale metodo di riparazione degli isomeri di Dewar.¹¹²

Meccanismi di riparazione alternativi

Oltre alla fotoriattivazione e alla riparazione per escissione, in alcuni microrganismi sono stati identificati percorsi alternativi per la riparazione dei danni da UV, ad esempio il dimer-bypass e la sintesi translesionale, la riparazione ricombinante o ancora un sistema alternativo di riparazione per escissione scoperto nei lieviti.¹²⁰ Di particolare interesse e novità, lo studio dei meccanismi di riparo e tolleranza agli UV nei microrganismi estremofili. Notevole l'esempio dell'attinobatterio d'alta quota *Nesterenkonia* sp. Act20, per il quale, di recente, è stata intrapresa la caratterizzazione del cosiddetto "UV-resistoma", una rete funzionale di processi fisiologici e molecolari che vengono attivati dall'esposizione alla radiazione UV.¹²²⁻¹²³

Riduzione delle infezioni correlate all'assistenza: quali sono le evidenze

Al fine di valutare quale sia il contributo della disinfezione UV nella riduzione delle infezioni correlate all'assistenza (ICA), è stata effettuata una revisione sistematica della letteratura pubblicata negli ultimi dieci anni. La revisione ha seguito le raccomandazioni delle linee guida PRISMA e la ricerca è stata limitata agli articoli pubblicati in lingua inglese su riviste peer-reviewed dal 2013 al 2022, presenti sui database PubMed, Web of Science e Scopus. I criteri prevedevano l'inclusione di studi osservazionali o sperimentali e l'esclusione di revisioni sistematiche e metanalisi, lettere, editoriali e case report.

Inizialmente sono stati estratti 411 articoli, dei quali sono rimasti 210 dopo rimozione dei duplicati. Questi articoli sono stati sottoposti a uno screening preliminare basato su titoli e abstract, che ha portato all'esclusione di 94 articoli. I restanti 116 articoli sono stati sottoposti a una revisione del testo completo, che ha portato all'esclusione di 91 articoli per i seguenti motivi: 67 studi non hanno valutato l'effetto

sulla comparsa di ICA, 14 studi non hanno riportato dati sufficienti, 4 erano revisioni e 6 non avevano testi completi accessibili. Sono stati quindi selezionati 25 studi,¹²⁴⁻¹⁴⁸ suddivisi in studi osservazionali e sperimentali, riguardanti principalmente la disinfezione con tecnologia PX-UV e/o UV-C continua.

Questi studi nel loro insieme dimostrano quale sia il potenziale ma anche i limiti della disinfezione UV come strumento d'implementazione dei protocolli di pulizia e disinfezione standard utilizzati negli ambienti sanitari. Alcuni di essi hanno dimostrato riduzioni notevoli nelle infezioni da MDRO, come MRSA e VRE, quando l'utilizzo della luce UV è stata utilizzata in aree ad alto rischio, come le unità di terapia intensiva. Allo stesso modo, alcuni autori hanno riportato significative diminuzioni delle infezioni acquisite nelle case di cura e delle ospedalizzazioni correlate alle infezioni, dopo l'introduzione della disinfezione PX-UV. L'efficacia della disinfezione con luce UV però sembra variare a seconda del patogeno e dell'ambiente sanitario. Ad esempio, mentre alcuni autori non hanno riscontrato riduzioni significative nell'incidenza delle infezioni da VRE o C. difficile in un'unità di trapianti di midollo osseo, altri hanno osservato una riduzione sostanziale nei tassi d'infezione da C. difficile in un ospedale per acuti dopo l'implementazione della disinfezione PX-UV.

Queste discrepanze possono essere attribuite a differenze nel disegno dello studio, nei tassi di infezione di base e nelle condizioni ambientali specifiche di ciascun contesto sanitario. Inoltre, diversi fattori influenzano l'efficacia della disinfezione UV, tra cui la quantità di irraggiamento, la disposizione interna della stanza, la temperatura, l'umidità, la posizione della lampada e i modelli di circolazione dell'aria. Alcuni studi evidenziano l'importanza di ottimizzare queste variabili per massimizzare l'efficacia della luce UV nella riduzione delle ICA. Inoltre, l'integrazione della disinfezione a luce UV con altre misure di controllo delle infezioni, come l'uso di agenti sporicidi e l'adesione ai protocolli di igiene delle mani, gioca un ruolo cruciale nel raggiungere riduzioni significative nei tassi di infezione.

Nonostante la disinfezione UV mostri un notevole potenziale nel ridurre la contaminazione microbica e, in alcuni casi, nel diminuire i tassi di alcune ICA, emergono diverse sfide e limitazioni alla sua applicazione, quali ad esempio i costi elevati, la necessità di formazione specifica e la difficoltà nel raggiungere tutte le superfici contaminate, in particolare in aree ombreggiate o con superfici irregolari.

In conclusione, la nostra revisione indica che la disinfezione a luce UV, in particolare PX-UV e UV-C continua, può ridurre significativamente la carica microbica sulle superfici ad alto contatto e nell'aria, riducendo successivamente i tassi di alcune ICA; tuttavia, i risultati evidenziano anche diversi aspetti critici dell'applicazione delle tecnologie UV nella riduzione delle ICA. La disinfezione UV rappresenta un utile strumento complementare ai protocolli standard di pulizia e disinfezione, ma la sua efficacia complessiva dipende da fattori operativi e ambientali. Sono necessari ulteriori studi a lungo termine per comprenderne meglio l'impatto e per ottimizzarne l'uso in termini di costi e benefici nelle strutture sanitarie.

Norme di sicurezza per l'uso dei sistemi a radiazione UV

La sicurezza fotobiologica delle lampade UV-C (EN 62471) e i requisiti minimi di sicurezza per coloro che utilizzano dispositivi con lampade UV-C (ISO 15858:2016)

Le lampade germicide a raggi UV-C, con lunghezza d'onda compresa tra i 100 ed i 280 nanometri, sono in grado di causare danni diretti al genoma e danni indotti da specie chimiche reattive (ad esempio, perossidi, superossidi, radicali ossidrilici, ossigeno "singoletto", alfa-ossigeno e ozono) che si formano per interazione dei raggi UV con le molecole di ossigeno ed acqua. La radiazione ultravioletta è cancerogena per l'uomo, ed è classificata dalla Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) nel Gruppo 1. Il rischio è dipendente da una serie di fattori, ma un'esposizione accidentale agli UV-C generati da lampade germicide è in grado di causare gravi danni, quali irritazioni, eritema, ustioni e gravi forme di fotocheratite e infiammazione della cornea, in soggetti esposti anche per brevi periodi.¹²³

Per la loro capacità germicida, la pandemia Covid-19 ha portato a una grande diffusione di lampade UV, sollevando le criticità legate a un utilizzo improprio. In relazione a questo, l'Organizzazione Mondiale della Sanità ha prodotto un'infografica e un breve video sui possibili rischi per la salute dovuti all'esposizione alle lampade UV. Successivamente, l'Istituto Superiore di Sanità, come riportato nel Rapporto ISS Covid-19 n. 12/2021 "Raccomandazioni ad interim sulla sanificazione di strutture non sanitarie nell'attuale emergenza Covid-19: ambienti/superfici" (aggiornamento Rapporto ISS Covid-19 n. 25/2020), sconsiglia l'utilizzo di lampade UV-C per impiego non professionale.¹⁴⁹

I raggi ultravioletti rientrano nei metodi di sanificazione dell'aria ad attività disinfettante mediante un'azione di natura fisica; pertanto, il loro uso è regolamentato in ambito occupazionale dal D. lgs. 81/08, Titolo VIII Capo V, e i valori limite di esposizione, recentemente confermati dallo Scientific Committee for Health, Environmental and Emerging Risks (SCHEER), il comitato tecnico di consultazione della Commissione Europea, si attestano a 30 J/m² per UV con lunghezza d'onda comprese tra 180 e 400 nm per una durata massima di 8 ore.¹⁵⁰⁻¹⁵² La normativa obbliga, inoltre, il produttore a eseguire delle prove di laboratorio e indicare sulla confezione e sulla lampada la rispettiva classe di rischio, nel caso sia presente.

L'analisi della sicurezza fotobiologica delle lampade e dei sistemi di lampada è normata a livello europeo dalla norma EN 62471, che definisce tutte le prove che dovranno essere eseguite, le classi di rischio, i limiti di emissione consentiti per tutelare le persone e l'ambiente e la tecnica di misura di riferimento.¹⁵⁰ La norma CEI EN 62471, che recepisce la IEC 62471 (2006) "Sicurezza fotobiologica delle lampade e dei sistemi di lampade", è la norma di riferimento specifica per la standardizzazione volontaria delle lampade che utilizzano radiazioni UV-C (CEI EN 62471-5). È utile come guida di indirizzo per la valutazione della sicurezza fotobiologica delle lampade e dei sistemi di lampade, compresi gli apparecchi di illuminazione. Descrive il metodo di misurazione di rife-

Position Paper multisocietario, GISIO-SITI/SIMPIOS, sull'utilizzo della radiazione ultravioletta nella disinfezione ambientale di aree critiche sanitarie

rimento, lo schema di categorizzazione e i limiti di esposizione, in particolare per la valutazione e la gestione dei rischi fotobiologici derivanti da tutte le sorgenti di radiazioni ottiche incoerenti ad ampio spettro, compresi i LED, nell'intervallo di lunghezza d'onda 200-3.000 nm.¹⁵³ I risultati di alcuni test di laboratorio condotti su lampade UV-C a LED portatili, appena immesse sul mercato, sono disponibili nel database ROA (Radiazioni Ottiche Artificiali) del Portale Agenti Fisici.¹⁵⁴

La norma UNI EN ISO 15858:2016 "Dispositivi UV-C - Informazioni sulla sicurezza - Limiti ammissibili per l'esposizione umana" specifica i requisiti minimi di sicurezza relativi alle persone per l'uso di dispositivi con lampade UV-C. È applicabile ai sistemi UV-C a conduzione, ai sistemi UV-C ad aria in ambiente, ai dispositivi UV-C portatili per la disinfezione in ambiente e a qualsiasi altro dispositivo UV-C che possa causare un'esposizione ai raggi UV-C per le persone. Non è applicabile ai prodotti UV-C utilizzati per la disinfezione dell'acqua.¹⁴⁸ Inoltre, la stessa norma UNI EN ISO 15858:2016 fornisce indicazioni relative ai sistemi e dispositivi di protezione da adottare contro le conseguenze acute sulla salute causate dall'esposizione ai raggi UV-C (UV-C Devices - Safety information - Permissible human exposure, ISO 15858:2016), descrivendo gli standard minimi per la sicurezza umana quando si utilizzano dispositivi con lampade UV-C. È relativa a sistemi UV-C installati nelle condotte aeree, utilizzati per la disinfezione dell'aria, e ai dispositivi, sempre UV-C ma portatili, utilizzati per la disinfezione di superfici e oggetti, oltre a qualsiasi altro dispositivo UV-C che potrebbe esporre le persone a tali radiazioni, ad eccezione, come già descritto, dei sistemi utilizzati per disinfettare l'acqua e che non dovrebbero (poiché installati in "celle chiuse") determinare esposizione umana.

La norma in materia di salute e sicurezza delle lavoratrici e dei lavoratori nei luoghi di lavoro

Diversi studi hanno dimostrato come l'esposizione cronica alle radiazioni UV, a differenza di quelle episodiche, può indurre diversi tipi di danno. In base alle lunghezze d'onda, la cute viene colpita in modalità diversa, più lunga è la lunghezza d'onda, più in profondità penetra. I raggi UV-A (315-400 nm) possono raggiungere il derma in profondità, gli UV-B (280-315 nm) sono assorbiti superficialmente dall'epidermide e gli UV-C (100-280 nm) arrivano nello strato più esterno della cute, lo strato corneo; solo una piccola frazione degli UV-C è capace di penetrare negli strati più profondi. Il rischio di carcinogenesi da radiazioni UV-C rispetto alle radiazioni UV-B, è ridotto per la presenza dello strato corneo e dei tessuti epiteliali. In termini di sicurezza, non esiste nessuna evidenza che possa confermare la correlazione tra la radiazione a breve termine della luce UV-C a 254 nm e il cancro della pelle, l'esposizione cronica può portare a eritema cutaneo, desquamazione ed esami istologici come paracheratosi, edema intracellulare e iperplasia epidermica. Tra gli effetti cronici delle radiazioni UV-C 254 nm: le scottature e le desquamazioni sono state osservate dopo 4-5 giorni di esposizione e questi effetti avversi si sono attenuati dopo aver interrotto per 2 giorni le radiazioni; lesioni al DNA attraverso

la dimerizzazione delle pirimidine, in particolare, i prodotti maggiormente danneggiati nel DNA, risultano essere i CPD (dimero di pirimidina ciclobutano) e i fotoprodotto pirimidina-pirimidone (6-4 PP); problemi alla cornea, con irritazione congiuntivale (foto-cheratocongiuntivite), anche solo due minuti di esposizione diretta sono sufficienti per causare un'inflammatione della congiuntiva, mentre tempi di esposizione più lunghi, senza protezione adeguata, possono indurre cecità.¹⁵⁵

Le attuali linee guida sottolineano che l'esposizione alle radiazioni UV-C non dovrebbe superare i 30 J/m² a 270 nm per gli occhi e la cute. Le radiazioni UV-C con lunghezza d'onda di 254 nm si usano per la loro azione germicida, il limite massimo di esposizione è fissato a 60 J/m². L'uso sicuro dell'UV-C da 222 nm nella disinfezione è in gran parte dovuto al fatto che non può penetrare nei nuclei delle cellule e non raggiunge nemmeno lo strato corneo a causa della sua breve lunghezza d'onda.^{156,157}

Una delle raccomandazioni è quella di coprire le parti esposte con i vestiti e altri DPI per evitare i danni delle radiazioni croniche e dirette della luce UV-C e la zona da decontaminare deve essere liberata sia dalla presenza dei pazienti che degli operatori.¹⁵⁵

L'Organizzazione Mondiale della Sanità definisce la luce UV-C come la più dannosa per la cute, anche rispetto agli UV trasmessi dalla luce solare. Nonostante la presenza di melatonina possa avere una funzione protettiva contro l'irradiazione UV-C, è ancora da esplorare se essa possa proteggere dagli UV-C o eventualmente dagli UV-B emessi dalle lampade germicide.^{155,157}

In uno studio sono stati somministrati questionari anonimi ai partecipanti di 4 unità medico/chirurgiche di un ospedale di cura terziaria in cui i dispositivi UV-C sono stati utilizzati per un periodo di 6 mesi. Tra le domande del sondaggio si valutavano le percezioni riguardanti l'importanza della disinfezione ambientale, l'efficacia della decontaminazione degli UV-C, la disponibilità a ritardare il ricovero ospedaliero per utilizzare gli UV-C e la sicurezza dei dispositivi UV-C. Lo studio ha rilevato che la stragrande maggioranza dei pazienti e degli operatori sanitari ritiene che la tecnologia della luce UV-C sia utile nella prevenzione delle infezioni. Questo risultato è stato ulteriormente supportato dalla constatazione che la maggior parte dei partecipanti erano disposti a ritardare il turnover della stanza di mezz'ora per consentire l'uso della luce UV-C per decontaminare gli ambienti. Questi risultati sono incoraggianti per gli ospedali che prendono in considerazione l'uso della luce UV-C per ridurre il rischio di ICA e, in particolare, di MDRO. Inoltre, la maggior parte dei pazienti e degli operatori sanitari considera la luce UV-C sicura. Attraverso la formazione continua e protocolli di sicurezza chiari, possiamo continuare ad affrontare i problemi di sicurezza e migliorare la percezione degli UV-C.¹⁵⁸

Rispetto alle lampade tradizionali, quelle a eccimeri contenente KrCl, con emissione a 222 nm, hanno mostrato la stessa capacità di abbattimento della carica di specie microbiche coinvolte in infezioni correlate all'assistenza e la possibilità di essere utilizzate in presenza, dal momento che la radiazione prodotta non è risultata dannosa per le cellule umane, avendo bassa capacità di penetrazione.¹⁵⁸⁻¹⁶¹

I sottoprodotti della radiazione UV-C e caratteristiche di pericolo

La disinfezione con radiazione UV-C è considerata generalmente vantaggiosa in quanto non lascia residui chimici. La formazione di eventuali sottoprodotti è legata alla presenza, nelle matrici sottoposte all'azione della radiazione UV-C, di contaminanti di natura organica, che possono portare alla formazione di alcuni sottoprodotti, principalmente appartenenti a specie reattive dell'ossigeno (Reactive Oxygen Species, ROS) e dell'azoto (Reactive Nitrogen Species, RNS), oppure di eventuali sostanze emesse dai materiali sottoposti alla radiazione fotochimica.

Ossigeno Singoletto – (1O_2) e **ione idrossile** (OH $^-$): la radiazione UV-C è in grado di generare, durante il processo di disinfezione, una forma eccitata dell'ossigeno molecolare; l'ossigeno singoletto è altamente reattivo e instabile, può danneggiare le molecole biologiche e quindi i microorganismi; tale caratteristica è utilizzata proprio ai fini della disinfezione. Può essere dannoso per organi e tessuti di organismi viventi, inclusi gli occhi e la pelle umani, se esposti per un periodo prolungato; può causare danni cellulari e reazioni infiammatorie.^{162,163} Gli ioni idrossile sono radicali liberi e come tali, a causa della loro reattività, possono essere coinvolti in varie reazioni chimiche che portano al danneggiamento delle molecole biologiche.

Ozono (O₃): in presenza di ossigeno, la radiazione UV-C può produrre ozono a lunghezza d'onda inferiore a 254 nm (il picco di emissione è a 185 nm). L'ozono è un gas altamente reattivo e, se presente in concentrazioni significative, può essere dannoso per la salute umana e l'ambiente. L'esposizione all'ozono può causare problemi di salute, in particolare irritazione delle alte e basse vie respiratorie. È importante controllare e limitare la formazione di ozono durante l'uso di lampade UV-C.¹⁶⁴

Emissioni da materiali irraggiati: la radiazione UV-C è in grado di rompere i legami chimici molecolari, questo porta al deterioramento dei materiali plastici con la conseguente possibile liberazione di sottoprodotti dalle superfici irradiate tra cui i composti organici volatili (COV).¹⁶⁵

Nelle acque ricche di nitrati, la radiazione UV-C, soprattutto se associata a elevate concentrazioni di H₂O₂, può indurre la produzione di nitriti attraverso diversi meccanismi: lo ione idrossile può indurre la formazione di specie chimiche disponibili per la formazione dei nitriti; attraverso la formazione di radicali liberi che contribuiscono alle reazioni di fotolisi dei nitrati oppure attraverso la generazione di elettroni che agiscono come agenti riducenti.¹⁶⁶

Gli effetti della radiazione UV-C variano a seconda delle condizioni specifiche, della lunghezza d'onda e della dose utilizzata, pertanto, è fondamentale considerare attentamente l'applicazione e le implicazioni relative alla produzione dei sottoprodotti. Oltre alle raccomandazioni di base,¹⁶¹ quando si utilizzano lampade UV-C bisognerebbe assicurarsi di avere una corretta ventilazione del locale, per ridurre l'eventuale accumulo di ozono o altri sottoprodotti. Per l'ozono in particolare, il DPCM 26.07.2022 suggerisce di rispettare, in ambienti scolastici e lavorativi, il valore guida di 100 µg/m³ (0,1 mg/m³) per otto ore, come indicato dall'Or-

ganizzazione Mondiale della Sanità. I processi di disinfezione delle acque ricche di nitrati che associano la radiazione UV-C e il perossido di idrogeno, dovrebbero essere normalmente seguite da una rimozione dei nitriti.¹⁶⁶⁻¹⁶⁸

Impatto ambientale dei sistemi a radiazione UV-C e confronto con i metodi di disinfezione chimica

I sistemi a radiazione UV-C presentano diversi vantaggi, in termini d'impatto ambientale, rispetto ai metodi di disinfezione chimica. Il rilascio di sottoprodotti, determinato dall'interazione con acqua, aria e sostanze in esse contenute, dipende dalle specifiche condizioni di utilizzo, dalla lunghezza d'onda e dalla dose utilizzata.¹⁶⁹

Vantaggi dei sistemi di radiazione UV-C:

- riduzione dell'uso di prodotti chimici: i sistemi di disinfezione UV-C non presuppongono l'utilizzo di prodotti chimici (es: derivati del cloro) e, in caso di uso combinato, consentono la riduzione delle quantità di prodotti chimici utilizzati. Ciò riduce o elimina i problemi legati al trasporto, all'immagazzinamento e allo smaltimento di prodotti potenzialmente pericolosi, riducendo costi e i rischi ambientali associati;¹⁶⁹
- assenza di residui chimici: a differenza dei disinfettanti chimici, la disinfezione mediante UV-C non determina il rilascio di residui chimici, che possono essere dannosi per gli ecosistemi acquatici;¹⁷⁰
- assenza di sottoprodotti dannosi della disinfezione (Disinfection by product, DBP): la disinfezione con i cloro-derivati può produrre DBP, come i trialometani (THM), che sono potenzialmente cancerogeni e con impatto ambientale negativo. La disinfezione mediante UV-C non produce sottoprodotti di questo genere;¹⁷⁰⁻¹⁷²
- efficienza energetica: i sistemi di radiazione UV-C sono alimentati mediante energia elettrica; se l'elettricità proviene da fonti di energia rinnovabile, l'impatto ambientale è ridotto.¹⁷³

Svantaggi dei sistemi di radiazione UV-C:

- radicali liberi: la radiazione UV-C può generare specie reattive dell'ossigeno (Reactive Oxygen Species, ROS) e dell'azoto (Reactive Nitrogen Species, RNS). I radicali liberi (ad es. l'idrossile, OH) possono reagire con sostanze organiche presenti nell'acqua o nell'aria;
- prodotti di decomposizione organica: se la radiazione UV-C è utilizzata per trattare acqua contenente composti organici ne possono derivare prodotti di decomposizione che possono includere acidi organici o aldeidi;¹⁷⁴
- prodotti di nitrificazione: se la radiazione UV-C interagisce con composti contenenti azoto, possono formarsi prodotti di nitrificazione;¹⁷⁵
- ozono (O₃): la radiazione UV-C, se prodotta a lunghezza d'onda inferiore ai 254 nm, può decomporre l'ossigeno molecolare (O₂) per formare ozono (O₃). Le lampade ultraviolette a bassa pressione emettono prevalentemente alla lunghezza d'onda 254 nm, ma sono caratterizzate da un secondo picco di emissione a 185 nm;
- mercurio nelle lampade che producono radiazione UV-C: il mercurio contenuto nelle lampade utilizzate per la produzione di radiazione UV-C è una sostanza tossica per gli

Position Paper multisocietario, GISIO-SITI/SIMPIOS, sull'utilizzo della radiazione ultravioletta nella disinfezione ambientale di aree critiche sanitarie

organismi acquatici con effetti di lunga durata (indicazione di pericolo H410). È necessaria una gestione attenta e lo smaltimento corretto di queste lampade per evitare contaminazione ambientale.¹⁷⁶

In generale, i sistemi di radiazione UV-C sono più ecologici rispetto ai metodi di disinfezione chimica, il loro utilizzo riduce l'impatto ambientale generato dall'uso di prodotti chimici e minimizza la produzione di sottoprodotti dannosi della disinfezione.

L'utilizzo dei sistemi di radiazione UV-C in confronto con altri metodi di disinfezione chimica deve comunque essere considerato in relazione all'applicazione specifica, alla gestione dei rifiuti, al tipo di fonte di energia utilizzata e alla sua sostenibilità.

Effetti a medio e lungo termine della radiazione UV-C sui materiali esposti

L'esposizione alla radiazione UV-C può determinare alterazioni delle caratteristiche fisiche e chimiche dei materiali, con un potenziale impatto sull'aspetto estetico e la funzionalità; tali alterazioni variano in base al tipo di materiale, alla dose utilizzata e al tempo di esposizione.¹⁷⁷⁻¹⁸⁰

Uno degli effetti più importanti legato all'esposizione a radiazione UV-C è la rottura dei legami covalenti, in quanto i fotoni ad alta energia sono in grado di promuovere il passaggio degli elettroni a un livello energetico più alto con la conseguente dissociazione dei legami covalenti; questo rende particolarmente suscettibili alla degradazione da parte della radiazione UV-C la maggior parte dei polimeri, le cui unità strutturali sono legate tramite legami covalenti, con conseguenze sull'integrità e la durata dei manufatti.¹⁷⁷⁻¹⁸¹ La degradazione foto-ossidativa dei polimeri determina anche il rilascio di sottoprodotti nocivi per l'uomo e l'ambiente.¹⁸²

Anche il legno tende a subire un processo di degradazione foto-ossidativa quando esposto alla radiazione UV, con scolorimento e cambiamento della struttura superficiale. Più resistenti sono la maggior parte dei metalli, grazie alla presenza di elettroni liberi che assorbono l'energia dei fotoni senza subire dissociazioni dei legami, e le ceramiche, che hanno gli elettroni strettamente legati. L'effetto sul vetro, con una riduzione della trasparenza, è legato alla presenza di impurità, come i metalli, inevitabilmente presenti nel vetro.^{177,178}

Sono stati approfonditi gli effetti della radiazione UV-C, emessa a lunghezza d'onda di 254 nm, a una dose di 36,8 mJ/cm², su diversi tipi di materiali utilizzati nelle strutture assistenziali, esposti in modo continuativo a tempi equivalenti a un trattamento delle superfici fino a sedici anni.¹⁷⁶ In particolare, sono stati valutati gli effetti su polimeri, legno, metallo e diversi tessuti, effettuando test colorimetrici, test di trazione e analisi della struttura delle superfici. In tutti i tipi di polimeri si osserva la tendenza all'ingiallimento, con una variabilità del momento di inizio del viraggio nei diversi tipi di polimeri. Nei tessuti la perdita dell'intensità del colore, con un viraggio verso il giallo o il bianco, dipende dal tipo di colore, con una maggiore sensibilità del colore rosso, rispetto al blu e verde. Anche il legno subisce lo scolorimento e la perdita di lucentezza, più evidente nel legno verniciato.

Nessun effetto si evidenzia sui metalli; tuttavia, una variazione di colore si osserva dopo il processo di ossidazione sperimentale. Un significativo cambiamento si riscontra nella microstruttura superficiale della maggior parte dei materiali, anche se questo non sembra influire sulle caratteristiche meccaniche e funzionali dei materiali.

Alterazioni significative associate alla fotodegradazione sono state osservate in un colonscopio flessibile, nella parte in elastomero esposta a radiazione UV-C con un aumento della rugosità e la comparsa di fissurazioni, associate a una maggiore adesione dei batteri.¹⁸⁰

La variazione del colore è certamente l'effetto più rilevante dell'esposizione dei materiali alla radiazione UV-C, anche se a lungo termine vi può essere un impatto sulle caratteristiche meccaniche, con una riduzione significativa del carico di rottura, in tutti i materiali, in particolare in quelli di cotone e poliestere.^{177,178,182}

Al fine di limitare gli effetti negativi della radiazione UV-C, in particolare sui materiali in plastica, sono stati sviluppati sistemi protettivi, come l'aggiunta di stabilizzanti UV o rivestimenti superficiali protettivi.^{178,181} Sono, inoltre, disponibili polimeri resistenti alle radiazioni UV-C, come i fluoro-polimeri, che presentano una elevata stabilità, grazie alla forza del legame carbonio-fluoro.¹⁸³

Raccomandazioni per il corretto utilizzo dei sistemi fissi o mobili di emissione della radiazione UV nelle aree critiche sanitarie

La disinfezione con radiazione UV-C può essere una valida strategia per l'implementazione della disinfezione nel controllo del rischio microbiologico ambientale in aree ad alta intensità di cura, caratterizzate da un alto volume di attività assistenziali, pazienti con il massimo grado di vulnerabilità e suscettibilità alle ICA e il cui trattamento richiede elevata complessità strumentale con dispositivi caratterizzati da superfici non lineari, pulsanti e display di controllo touch, materiali suscettibili all'azione chimica, raccordi corrugati, cavi ed altri elementi che presentano difficoltà per la sanificazione tradizionale.

Riferimenti normativi

L'esposizione alla radiazione ultravioletta nei luoghi di lavoro è normata:

- dal capo V del Titolo VIII del D.Lgs. 9 aprile 2008, n. 81, con i limiti di esposizione per le radiazioni ottiche non coerenti fissati nella tabella 1.1 dell'allegato XXXVII del D.Lgs. 81/08;
- dalla UNI EN ISO 15858 (2016) "Dispositivi UV-C - informazioni sulla sicurezza - limiti ammissibili per l'esposizione umana;
- dalla normazione volontaria sulle lampade che impiegano radiazione UV-C (norma CEI EN 62471, che recepisce la IEC 62471/2006 "Photobiological safety of lamps and lamp systems).

Riguardo ai singoli dispositivi, è disponibile una banca dati nel Portale Agenti Fisici, dove per le radiazioni ottiche

Position Paper multisocietario, GISIO-SITI/SIMPIOS, sull'utilizzo della radiazione ultravioletta nella disinfezione ambientale di aree critiche sanitarie

artificiali (ROA) sono riportati i dati di misura relativi alle lampade UV-C a LED portatili di recente immissione sul mercato, in accordo con CEI EN 62471 "Sicurezza fotobiologica di lampade e sistemi di lampade".

Vincoli organizzativi e criticità

Il principale ostacolo all'utilizzo dei sistemi di emissione di radiazione UV nelle aree critiche sanitarie è la necessità di assicurare che il loro funzionamento non comporti l'esposizione accidentale di operatori e pazienti o di superfici non compatibili. L'efficacia della disinfezione per irraggiamento è dipendente dall'accessibilità dei substrati biologici suscettibili all'azione della radiazione UV e, pertanto, favorita:

- dalla precedente pulizia delle superfici da trattare e dall'azione meccanica di rimozione dei substrati biologici e fisici su di esse depositati, come le polveri e le matrici organiche;
- dall'utilizzo di una combinazione di sistemi in continuo e strumentazioni mobili che, irradiando le superfici da diversi angoli, offrono una maggiore garanzia di esposizione completa ed efficace, sebbene possa aumentare il rischio di esposizione accidentale di persone o strumenti sensibili alla radiazione UV.

Per tali ragioni è necessaria l'adozione di misure organizzative e logistiche, che consentano di assicurare il coordinamento fra le attività assistenziali, le fasi di decontaminazione e di pulizia meccanica e la successiva attivazione dei sistemi di disinfezione a UV.

Raccomandazioni operative e logistiche

Le modalità della disinfezione UV dovranno essere programmate avendo a riferimento l'operatività dei setting interessati, distinguendo fra ambienti ad utilizzo programmato e discontinuo (laboratori, sale operatorie, blocco parto, ecc.) e ambienti ad utilizzo continuativo, come i reparti di terapia intensiva. Nel secondo caso la metodica andrà riservata alla disinfezione terminale in post-dimissione, sia nelle stanze di isolamento che nelle singole postazioni letto. In quest'ultimo caso, dovranno essere installate delle misure di barriera, per prevenire l'esposizione accidentale delle postazioni limitrofe (pannellature e schermi UV) o degli operatori sanitari in attività.

Tutti i locali possono essere dotati di sistemi di disinfezione UV in continuo dell'aria di ripresa, in particolare in caso di impianti a ricircolo.

In generale, è importante:

- far precedere la disinfezione UV dalle fasi di pulizia tradizionale previste per gli ambienti di rischio e dal ripristino nei locali delle dotazioni previste, oltre al rifacimento delle postazioni letto;
- predisporre gli ambienti e i sistemi a radiazione UV con dispositivi di blocco a rilevazione di movimento e, per i sistemi mobili, anche di sistemi d'interruzione dell'irraggiamento in emergenza a controllo remoto;
- spegnere tutte le apparecchiature elettroniche presenti nell'area in cui viene utilizzata la radiazione UV;
- rimuovere gli oggetti sensibili alla radiazione UV.

Altre raccomandazioni di natura organizzativa:

- la pianificazione della disinfezione UV deve tenere conto anche del tempo di ripristino, incluso quello da raffreddamento delle sorgenti di emissione, che dovrà essere compatibile con l'eventuale utilizzo in emergenza dei locali trattati;
- inserire il rischio specifico da radiazioni UV nel DVR e nella comunicazione del rischio per agli operatori (interni ed esternalizzati) incaricati di attività di supporto nell'area (pulizie, manutenzione tecnica, tecnologie sanitarie, ecc.);
- formazione specifica per gli operatori sanitari e non sanitari (interni, tirocinanti, esternalizzati) afferenti all'area per qualunque attività;
- predisporre un sistema di monitoraggio dell'efficacia attraverso idonee metodologie di validazione della procedura basate su controllo di risultati e di processo e su indicatori microbiologici specifici.

Certificazioni e dichiarazioni di conformità richieste nella scheda tecnica e nella scheda di sicurezza

Le certificazioni dei requisiti di efficacia microbica e di quelli per la sicurezza devono essere acquisite dal produttore di sistemi di disinfezione a radiazione UV, ottemperando a quanto richiesto dalle norme tecniche descritte nei sottocapitoli "Le norme per la certificazione dell'attività microbica" e "La sicurezza fotobiologica delle lampade UV-C (EN62471) e i requisiti minimi di sicurezza per coloro che utilizzano dispositivi con lampade UV-C (ISO 15858:2026)".

Il produttore nella valutazione dovrà tenere in considerazione alcuni parametri relativi all'ambiente, al fine di valutare i potenziali rischi associati all'utilizzo dei sistemi ed eventuali fattori in grado di interferire con l'efficacia microbica.

Nello specifico il produttore di un sistema a radiazione UV dovrà indicare il rispetto dei requisiti in relazione a:

- volume del locale;
- parametri microclimatici, che includano umidità relativa, temperatura e velocità dell'aria. A tale scopo può essere utile indicare la variazione dei requisiti in funzione del numero di ricambi d'aria (volumi/ora o litri/secondo/persona), ovvero in base alla capacità di ricambiare l'aria interna con aria esterna, o l'aria di ricircolo trattata non contenente particelle contaminanti;
- indicazioni sul corretto posizionamento del sistema prescelto nell'ambiente rispetto a finestre, balconi, porte e postazioni di lavoro;
- matrice da trattare;
- durata d'uso e attività di manutenzione (per esempio: sostituzione delle lampade);
- rischio fotobiologico, in termini di livelli di esposizione stimati per i volumi trattabili e livelli sicuri di esposizione;
- caratteristiche dei possibili sottoprodotti della disinfezione (per esempio: ozono).

Modalità operative e definizione delle figure professionali coinvolte nel loro utilizzo

Nel definire i profili professionali e i percorsi formativi del personale impegnato in attività di sanificazione è utile fare riferimento alla classificazione proposta da ESCO (European Skills, Competences, and Occupations) che identifica abilità, competenze e occupazioni coerenti con le opportunità offerte dal mercato del lavoro della Comunità Europea, oltre ad identificare i relativi percorsi formativi e di addestramento, tenendo conto delle interconnessioni esistenti fra i diversi elementi.

A sua volta la classificazione ESCO fa riferimento all'International Standard Classification of Occupations (ISCO) versione ISCO-08, elaborata dall'International Labour Organization (ILO). Questa prevede sotto il codice 9112 la figura professionale dell'operatore di pulizia e sanificazione, con eventuali competenze aggiuntive relative alla effettuazione di operazioni che prevedono l'impiego di macchine (operatore specializzato), e sotto il codice 5151 la figura di responsabile/supervisore delle operazioni di pulizia e sanificazione.

A livello nazionale la figura professionale dell'operatore addetto alla sanificazione è ricompresa sotto il codice ISTAT 6.1.5.1.0 - Operai addetti ai servizi di igiene e pulizia.

Nei locali a rischio di biocontaminazione l'operatore deve essere in grado di eseguire strettamente il protocollo di pulizia definito dal cliente, di controllare la sua prestazione, verificando il raggiungimento del livello di qualità richiesto e ne rende conto sui documenti di tracciabilità.

L'operatore deve acquisire le conoscenze per poter operare nel rispetto delle norme tecniche per l'impiego dei prodotti e dispositivi messi a disposizione per svolgere la sua mansione e per utilizzare correttamente i dispositivi di protezione individuale previsti. In particolare, per i sistemi che utilizzano la radiazione UV, deve osservare le indicazioni per l'utilizzo in sicurezza di queste macchine elettriche ed elettromeccaniche per la disinfezione degli ambienti. Dovrà, inoltre, applicare procedure di manutenzione ordinaria di queste macchine.

Percorsi formativi e titoli di studio collegati

Per l'utilizzo dei sistemi che emettono radiazione UV si devono rispettare le seguenti avvertenze per la sicurezza:

- il trattamento degli ambienti deve essere eseguito da personale formato e addestrato o qualificato sulle modalità d'uso e sui rischi associati ai sistemi e l'addestramento deve essere registrato;
- solo il personale formato e addestrato o qualificato può accedere negli ambienti trattati, al termine della sanificazione, per verificare che siano rispettate le condizioni per il rientro delle persone che normalmente li occupano.

La disinfezione tramite radiazione UV dovrebbe quindi essere effettuata esclusivamente da un operatore specializzato nei sistemi di sanificazione.

Il percorso formativo dell'operatore è attivabile nel rispetto della prassi di riferimento "Sanificazione degli ambienti indoor" UNI/PdR, 2024 oltre ad eventuali integrazioni normative successive a questa.

Indicazioni conclusive

L'utilizzo della radiazione UV, in particolare quella UV-C, non è una novità nello scenario della disinfezione ambientale, ma nuova è l'introduzione di sistemi automatizzati, sia fissi sia mobili, che facilitano l'utilizzo, ottimizzano la radiazione emessa e l'efficacia nell'inattivazione microbica. Nel corso della pandemia Covid-19, questi dispositivi hanno trovato largo utilizzo, ma le loro prestazioni non sono sempre state espresse con chiarezza e obiettività nelle istruzioni operative dei produttori.

Queste tecnologie possono essere un valido ausilio nell'implementazione dei protocolli di disinfezione ambientale, in particolare nelle aree critiche sanitarie, pur non sostituendosi ai protocolli standard di pulizia e disinfezione. La loro efficacia nella riduzione della contaminazione ambientale è ampiamente documentata in letteratura, ma ancora limitate sono le evidenze in merito alla riduzione delle ICA. Nell'adozione di queste tecnologie è necessario valutarne il costo-efficacia in base a metodi standardizzati, che consentano di definire in maniera oggettiva l'efficacia microbica in funzione della reale dose emessa sulla specifica tipologia di matrice. Nell'analisi vanno incluse le modalità di utilizzo, affinché siano compatibili con l'attività clinica, e la presenza di personale dedicato e formato, tenendo conto degli aspetti di sicurezza per gli operatori e di sostenibilità ambientale. ■

Bibliografia

1. World Health Organization. Guidelines on core components of infection prevention and control programmes at the national and acute health care facility level. World Health Organization, 2016.
2. Privitera G, Casini B, Mencaroni S, Sodano L, Pasquarella C, Agodi A. La sanificazione ambientale nelle strutture sanitarie e sociosanitarie. La Carta di Bergamo. GImPIOS 2019; 9: 75-77.
3. Draisci R, Attias L, Baldassarri L. Raccomandazioni ad interim sulla sanificazione di strutture non sanitarie nell'attuale emergenza COVID-19: superfici, ambienti interni e abbigliamento. Versione del 15 maggio 2020.
4. World Health Organization. Cleaning and disinfection of environmental surfaces in the context of COVID-19. Interim guidance, 15 maggio 2020.
5. Mohaghegh Montazeri M, Taghipour F. Operation of a high-flow UV-LED water treatment reactor with secondary effluent for stress testing. Chem Eng J 2023; 457: 141295.
6. Jarvis WR. The inanimate environment. In: Bennett JV, Brachman PS, eds. Hospital infections, 5th ed. Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins, 2007: 276-297.
7. Rhame FS. The inanimate environment. In: Bennett JV, Brachman PS, eds. Hospital infections, 3rd ed. Boston: Little, Brown and Company, 1998: 299-324.
8. Weber DJ, Rutala WA. The environment as a source of nosocomial infections. In: Wenzel RP, eds. Prevention and Control of Nosocomial Infections, 4th ed. Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins, 2003: 575-597.
9. Mitchell BG, Dancer SJ, Anderson M, Dehn E. Risk of organism acquisition from prior room occupants: a systematic review and meta-analysis. J Hosp Infect 2015; 91: 211-7.

Position Paper multisocietario, GISIO-SITI/SIMPIOS, sull'utilizzo della radiazione ultravioletta nella disinfezione ambientale di aree critiche sanitarie

10. Muzslay M, Moore G, Alhussaini N, Wilson APR. ESBL-producing Gram-negative organisms in the healthcare environment as a source of genetic material for resistance in human infections. *J Hosp Infect* 2017; 95: 59-64.
11. Maki DG, Alvarado CJ, Hassemer CA, Zilz MA. Relation of the inanimate hospital environment to endemic nosocomial infections. *N Engl J Med* 1982; 307: 1562.
12. Weber DJ, Anderson D, Rutala WA. The role of the surface environment in healthcare-associated infections. *Curr Opin Infect Dis* 2013; 26: 338-44.
13. Anderson DJ, Moehring RW, Weber DJ, et al. Effectiveness of targeted enhanced terminal room disinfection on hospital-wide acquisition and infection with multidrug-resistant organisms and *Clostridium difficile*: a secondary analysis of a multicenter cluster randomized controlled trial with crossover design (BETR Disinfection). *Lancet Infect Dis* 2018; 18: 845-53.
14. Weber DJ, Rutala WA. Vaccines for healthcare workers. In: Plotkin S, Orenstein W, eds. *Vaccines*, 3rd ed. Philadelphia: WB Saunders, 1999: 1107-1130.
15. Kainer MA, Jarvis WR. Outbreaks associated with the environment. *Semin Infect Control* 2001; 1: 124-38.
16. Wilson APR. The role of the environment in the spread of healthcare associated infections. *J Hosp Infect* 2018; 100: 363-4.
17. Mazzacane S, Frabetti A, Vandini A, Migliori D, Balboni P. L'igiene nei reparti ospedalieri: correlazioni tra le procedure di sanificazione ed i fattori di contaminazione. Conferenza Nazionale ANMDO – 12, 14 settembre 2007, Rimini – pubblicato sulla rivista L'Ospedale.
18. Finzi G, et al. Linea guida sulla valutazione del processo di sanificazione ambientale nelle strutture ospedaliere e territoriali per il controllo delle infezioni correlate all'assistenza (ICA). A cura di ANMDO (Associazione Nazionale dei Medici delle Direzioni Ospedaliere) e PSAF (Professionisti Sanitari Assicurativi e Forensi) 2019 - Tipografia Masi – Bologna.
19. Weber DJ, Rutala WA. Understanding and Preventing Transmission of Healthcare-Associated Pathogens Due to the Contaminated Hospital Environment. *Infect Control Hosp Epidemiol* 2013; 34: 449-52.
20. Flores-Vargas G. Environmental Biofilms as Reservoirs for Antimicrobial Resistance. *Front Microbiol* 2021; 12: 766242.
21. Moore D. From: Monroe D. Looking for Chinks in the Armor of Bacterial Biofilms. *PLoS Biology* 2007; 5: e307.
22. Mitchell BG, Hall L, White N, et al. An environmental cleaning bundle and health-care-associated infections in hospitals (RE-ACH): a multicentre, randomised trial. *Lancet Infect Dis* 2019; 19: 410-8.
23. Boyce JM. Environmental contamination makes an important contribution to hospital infection. *J Hosp Infect* 2007; 65 (Suppl 2): 50-4.
24. Weber DJ, Rutala WA. Role of environmental contamination in the transmission of Vancomycin-Resistant enterococci. *Infect Control Hosp Epidemiol* 1997; 18: 306-9.
25. Weber DJ, Rutala WA, Miller MB, Huslage K, Sickbert-Bennett E. Role of hospital surfaces in the transmission of emerging healthcare-associated pathogens: norovirus, *Clostridium difficile*, and *Acinetobacter* species. *Am J Infect Control* 2010; 38 (5 Suppl 1): S25-33.
26. Hota B. Contamination, disinfection, and cross-colonization: are hospital surfaces reservoirs for nosocomial infections? *Clin Infect Dis* 2004; 39: 1182-9.
27. Dancer SJ. Importance of the environment in meticillin-resistant *Staphylococcus aureus* acquisition: the case for hospital cleaning. *Lancet Infect Dis* 2008; 8: 101-13.
28. Otter JA, Yezli S, French GL. The role played by contaminated surfaces in the transmission of nosocomial pathogens. *Infect Control Hosp Epidemiol* 2011; 32: 687-99.
29. Knobling B, Franke G, Belmar Campos C, et al. Tolerance of clinical vancomycin-resistant *Enterococcus faecium* isolates against UV-C light from a mobile source. *Antimicrob Resist Infect Control* 2023; 12: 63.
30. Fickenscher MC, Stewart M, Helber R, et al. Operating room disinfection: operator-driven ultraviolet 'C' vs. chemical treatment. *Infect Prev Pract* 2023; 5: 100301.
31. Boyce JM. Modern technologies for improving cleaning and disinfection of environmental surfaces in hospitals. *Antimicrob Resist Infect Control* 2016; 5: 10.
32. Mahesh M, Siewerdsen JH. Ultraviolet germicidal irradiation of the inner bore of a CT gantry. *J Appl Clin Med Phys* 2020; 21: 325-8.
33. Zhang S, Liang X, Gadd GM, Zhao QI. Advanced titanium dioxide-polytetrafluoroethylene (TiO₂-PTFE) nanocomposite coatings on stainless steel surfaces with antibacterial and anti-corrosion properties. *Appl Surf Sci* 2019; 490: 231-41.
34. Wan Q, Wen G, Cao R, et al. Comparison of UV-LEDs and LPUV on inactivation and subsequent reactivation of waterborne fungal spores. *Water Res* 2020; 173: 115553.
35. Cadnum JL, Pearlmutter BS, Redmond SN, Jencson AL, Benner KJ, Donskey CJ. Ultraviolet-C (UV-C) monitoring made simple: colorimetric indicators to assess delivery of UV-C light by room decontamination devices. *Infect Control Hosp Epidemiol* 2022; 43: 306-11.
36. Casini B, Tuvo B, Cristina ML, et al. Evaluation of an Ultraviolet C (UVC) Light-Emitting Device for Disinfection of High Touch Surfaces in Hospital Critical Areas. *Int J Environ Res Public Health* 2019; 16: 3572.
37. Rutala WA, Boyce JM, Weber DJ. Disinfection, sterilization and antisepsis: an overview. *Am J Infect Control* 2023; 51: A3-A12.
38. Anderson DJ, Knelson LP, Moehring RW, et al. Implementation Lessons Learned from the Benefits of Enhanced Terminal Room (BETR) Disinfection Study: Process and Perceptions of Enhanced Disinfection with Ultraviolet Disinfection Devices. *Infect Control Hosp Epidemiol* 2018; 39: 157-63.
39. Anderson DJ, Gergen ME, Smathers DJ, et al. Decontamination of Targeted Pathogens from Patient Rooms Using an Automated Ultraviolet-C-Emitting Device. *Infect Control Hosp Epidemiol* 2013; 34: 466-71.
40. Kreitenberg A, Martinello RA. Perspectives and recommendations regarding standards for ultraviolet-C whole-room disinfection in healthcare. *J Res Natl Inst Stand Technol* 2021; 126: 126015.
41. Russotto V, Cortegiani A, Giarratano A, et al. No-touch methods of terminal cleaning in the intensive care unit: Results from the first large randomized trial with patient-centred outcomes. *Critical Care* 2017; 21: 117.
42. Brite J, Mc Millen T, Robilotti E, et al. Effectiveness of ultraviolet disinfection in reducing hospital-acquired *Clostridium difficile* and vancomycin-resistant *Enterococcus* on a bone marrow transplant unit. *Infect Control Hosp Epidemiol* 2018; 39: 1301-6.
43. Tuvo B, Paganini D, Belli F, Casini B. Luci e ombre sull'utilizzo della radiazione UV nella disinfezione ambientale. *Gimprios* 2021; 11: 111-20.
44. ASHRAE, Position Document on Filtration and Air Cleaning. Rev. 2021.
45. EPA. Ultraviolet Disinfection Guidance Manual for the Final Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule. EPA 815-R-06-007. November 2006.

Position Paper multisocietario, GISIO-SITI/SIMPIOS, sull'utilizzo della radiazione ultravioletta nella disinfezione ambientale di aree critiche sanitarie

46. Shang M, Kong Y, Yang Z, et al. Removal of virus aerosols by the combination of filtration and UV-C irradiation. *Front Environ Sci Eng* 2023; 17: 27.
47. Environmental Control for Tuberculosis: Basic Upper-Room Ultraviolet Germicidal Irradiation Guidelines for Healthcare Settings. CDC – NIOSH Department of Health and Human Services. Rev. 2009.
48. Ma B, Gundy PM, Gerba CP, Sobsey MD, Linden KG. UV Inactivation of SARS-CoV-2 across the UVC Spectrum: KrCl* Excimer, Mercury-Vapor, and Light-Emitting-Diode (LED) Sources. *Appl Environ Microbiol* 2021; 87: No. e0153221.
49. Linnes JC, Rudnick SN, Hunt GM, McDevitt JJ, Nardell EA. Eggcrate UV: a whole ceiling upper-room ultraviolet germicidal irradiation system for air disinfection in occupied rooms. *Indoor Air* 2014; 24: 116-24.
50. Andersen BM, Bånrud H, Bøe E, Bjordal O, Drangsholt F. Comparison of UV C light and chemicals for disinfection of surfaces in hospital isolation units. *Infect Control Hosp Epidemiol* 2006; 27: 729-34.
51. Livingston SH, Cadnum JL, Benner KJ, Donskey CJ. Efficacy of an ultraviolet. A lighting system for continuous decontamination of health care-associated pathogens on surfaces. *Am J Infect Control* 2020; 48: 33.
52. Amodeo D, Lucarelli V, De Palma I, et al. Efficacy of violet-blue light to inactive microbial growth. *Sci Rep* 2022; 12: 20179.
53. Mehta I, Hsueh HY, Taghipour S, Li W, Saeedi S. UV Disinfection Robots: A Review. *Rob Auton Syst* 2023; 161: 104332.
54. Gerchman Y, Mamane H, Friedman N, et al. UV-LED disinfection of Coronavirus: Wavelength effect. *J Photochem Photobiol B* 2020; 212: 112044.
55. Casini B, Tuvo B, Scarpaci M, et al. Implementation of an Environmental Cleaning Protocol in Hospital Critical Areas Using a UV-C Disinfection Robot. *Int J Environ Res Public Health* 2023; 20: 4284.
56. Nerandzic MM, Fisher CW, Donskey CJ. Sorting through the wealth of options: comparative evaluation of two ultraviolet disinfection systems. *PLoS One* 2014; 9: e107444.
57. Fuzszi A, Zatorska B, Van den Nest M, et al. The use of a UV-C disinfection robot in the routine cleaning process: a field study in an Academic hospital. *Antimicrob Resist Infect Control* 2021; 10: 84.
59. Yıldırım G, Kılıç H, Karakaş HM. The antimicrobial efficacy of shielded ultraviolet germicidal irradiation in CT rooms with intense human circulation. *Diagn Interv Radiol* 2021; 27: 293-301.
60. Morikane K, Suzuki S, Yoshioka J, Yakuwa J, Nakane M, Nemoto K. Clinical and microbiological effect of pulsed xenon ultraviolet disinfection to reduce multidrug-resistant organisms in the intensive care unit in a Japanese hospital: a before-after study. *BMC Infect Dis* 2020; 20: 82.
61. Lualdi M, Cavalleri A, Bianco A, et al. Ultraviolet C lamps for disinfection of surfaces potentially contaminated with SARS-CoV-2 in critical hospital settings: examples of their use and some practical advice. *BMC Infect Dis* 2021; 21: 594.
62. Masse V, Hartley MJ, Edmond MB, Diekema DJ. Comparing and optimizing ultraviolet germicidal irradiation systems use for patient room terminal disinfection: an exploratory study using radiometry and commercial test cards. *Antimicrob Resist Infect Control* 2018; 7: 29.
63. Demeersseman N, Saegeman V, Cossey V, Devriese H, Schuermans A. Shedding a light on ultraviolet-C technologies in the hospital environment. *J Hosp Infect* 2022; 132: 85-92.
64. Hijnen WA, Beerendonk EF, Medema GJ. Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water: a review. *Water Res* 2006; 40: 3-22.
65. Abkar L, Zimmermann K, Dixit F, Kheyrandish A, Mohseni M. COVID-19 pandemic lesson learned-critical parameters and research needs for UVC inactivation of viral aerosols. *J Hazard Mater Adv* 2022; 8: 100183.
66. McDevitt JJ, Rudnick SN, Radonovich LJ. Aerosol Susceptibility of Influenza Virus to UVC Light. *Appl Environ Micro* 2012; 78: 6.
67. Boyce JM, Farrel PA, Towle D, Fekieta R, Aniskiewicz M. Impact of room location on UV-C irradiance and UV-C dosage and antimicrobial effect delivered by a mobile UV-C light device. *Infect Control Hosp Epidemiol* 2016; 37: 667-72.
68. Vincent RL, Rudnick SN, McDevitt JJ, Wallach FR. Toward a Test Protocol for Surface Decontamination Using a Mobile Whole-room UVGI Device. *Photochem Photobiol* 2021; 97: 552-9.
69. Jelden KC, Gibbs SG, Smith PW, et al. Ultraviolet (UV)-reflective paint with ultraviolet germicidal irradiation (UVGI) improves decontamination of nosocomial bacteria on hospital room surfaces. *J Occup Environ Hyg* 2017; 14: 456-60.
70. Donskey CJ. Decontamination devices in health care facilities: practical issues and emerging applications. *Am J Infect Control* 2019; 47S: A23-A28.
71. Ali S, Muzslay M, Wilson PA. Novel Quantitative Sampling Technique for Detection and Monitoring of Clostridium difficile Contamination in the Clinical Environment. *J Clin Microbiol* 2015; 53: 2570-4.
72. Rutala WA, Gergen MF, Weber DJ. Room decontamination with UV radiation. *Infect Control Hosp Epidemiol* 2010; 31: 1025-10.
73. Kowalski W. Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook. Berlin/Heidelberg: Springer, 2009.
74. Sun Y, Wu Q, Liu J, Wang Q. Effectiveness of ultraviolet-C disinfection systems for reduction of multi-drug resistant organism infections in healthcare settings: A systematic review and meta-analysis. *Epidemiol Infect* 2023; 151: e149.
75. Chen JP, Yang L, Wang LK, Zhang B. Ultraviolet radiation for disinfection. In: Wang LK, Hung YT, Shammas NK, eds. Advanced physicochemical treatment processes. Handbook of environmental engineering. Totowa, NJ: Humana Press, 2006; 317e66.
76. Lofrano G, Ubaldi F, Albarano L, et al. Antimicrobial Effectiveness of Innovative Photocatalysts: A Review. *Nanomaterials (Basel)* 2022; 12: 2831.
77. Margarucci LM, Gianfranceschi G, Romano Spica V, et al. Photocatalytic Treatments for Personal Protective Equipment: Experimental Microbiological Investigations and Perspectives for the Enhancement of Antimicrobial Activity by Micrometric TiO₂. *Int J Environ Res Public Health* 2021; 18: 8662.
78. Centers for Disease Control and Prevention. Guideline for Disinfection and Sterilization in Healthcare Facilities, 2008, Update: May 2019.
79. European Centre for Disease Prevention and Control. An agency of the European Union. Heating, ventilation and air-conditioning systems in the context of COVID-19: first update. Update: November 2020.
80. European Centre for Disease Prevention and Control. An agency of the European Union. Disinfezione dei locali in ambienti sanitari e non sanitari potenzialmente contaminati da SARS-CoV-2. Update: March 2020.
81. ASHRAE. HVAC Design manual for hospitals and clinics, 2nd edition. 2013.

Position Paper multisocietario, GISIO-SITI/SIMPIOS, sull'utilizzo della radiazione ultravioletta nella disinfezione ambientale di aree critiche sanitarie

82. American Institute of Architects. Guidelines for design and construction of hospital and health care facilities, 2001. Washington, DC: American Institute of Architects Press, 2001.
83. Centers for Disease Control and Prevention. Guideline for Disinfection and Sterilization in Healthcare Facilities, 2003. Appendix B. Air.
84. Centers for Disease Control and Prevention. Guidelines for Environmental Infection Control in Health-Care Facilities, Update: April 2023.
85. Kowalski W. Ultraviolet germicidal irradiation handbook: UVGI for air and surface disinfection. Berlin: Springer, 2010.
86. Song K, Mohseni M, Taghipour F. Mechanisms investigation on bacterial inactivation through combinations of UV wavelengths. *Water Res* 2019; 163: 114875.
87. Begic A. Application of service robots for disinfection in medical institutions. *International Symposium on Innovative and Interdisciplinary Applications of Advanced Technologies* 2017; 28: 105665. Springer, Cham.
88. Masjoudi M, Mohseni M, Bolton JR. Sensitivity of bacteria, protozoa, viruses, and other microorganisms to ultraviolet radiation. *J Res Natl Inst Stand Technol* 2021; 126: 1e77.
89. Kreitenberg A, Martinello RA. Perspectives and recommendations regarding standards for ultraviolet-C whole-room disinfection in healthcare. *J Res Natl Inst Stand Technol* 2021; 126: 1e8.
90. Demeersseman N, Saegeman V, Cossey V, Devriese H, Schuermans A. Shedding a light on ultraviolet-C technologies in the hospital environment. *J Hosp Infect* 2023; 132: 85-92.
91. Luo H, Zhong L. Ultraviolet germicidal irradiation (UVGI) for in-duct airborne bioaerosol disinfection: Review and analysis of design factors. *Building and Environment* 2021; 197: 107852.
92. Zhang H, Jin X, Nunayon SS, Lai ACK. Disinfection by in-duct ultraviolet lamps under different environmental conditions in turbulent airflows. *Indoor Air* 2020; 30: 500-11.
93. Shin J-Y, Kim S-J, Kim D-K, Kang D-H. Fundamental characteristics of deep-UV light-emitting diodes and their application to control foodborne pathogens. *Appl Environ Microbiol* 2016; 82: 2-10.
94. Noakes CJ, Sleigh PA, Fletcher LA, Beggs CB. Use of CFD modeling to optimize the design of upper-room UVGI disinfection systems for ventilated rooms. *Indoor Built Environ* 2006; 15: 347-56.
95. Possas A, Valero A, García-Gimeno RA, Pérez-Rodríguez F, Mendes de Souza P. Influence of temperature on the inactivation kinetics of *Salmonella Enteritidis* by the application of UV-C technology in soymilk. *Food Control* 2018; 94: 132-9.
96. Menzies D, Popa J, Hanley JA, Rand T, Milton DK. Effect of ultraviolet germicidal lights installed in office ventilation systems on workers' health and wellbeing: Double-blind multiple crossover trial. *Lancet* 2003; 362: 1785-91.
97. Wen G, Wan Q, Deng X, et al. Reactivation of fungal spores in water following UV disinfection: effect of temperature, dark delay, and real water matrices. *Chemosphere* 2019; 237: 124490.
98. Loftus RW, Dexter F, Evans L, Robinson A, Odle A, Perlman S. Evidence-based intraoperative infection control measures plus feedback are associated with attenuation of severe acute respiratory syndrome coronavirus-2 detection in operating rooms. *Br J Anaesth* 2022; 129: e29-e32.
99. Cadnum JL, Jencson AL, Gestrich SA, et al. A comparison of the efficacy of multiple ultraviolet light room decontamination devices in a radiology procedure room. *Infect Control Hosp Epidemiol* 2019; 40: 158-63.
100. Dexter F, Parra MC, Brown JR, Loftus RW. Perioperative COVID-19 Defense: An Evidence-Based Approach for Optimization of Infection Control and Operating Room Management. *Anesth Analg* 2020; 131: 37-42.
101. World Health Organization. Models of transmission of virus COVID-19: implication for IPC precaution recommendation. Geneva: World Health Organization; 2020.
102. Somsen GA, Van Rijn C, Kooij S, et al. Small droplet aerosols in poorly ventilated spaces and SARS-CoV-2 transmission. *Lancet Respir Med* 2020; 8: 658-9.
103. Sun J, Zheng H, Xiang H, Fan J, Jiang H. The surface degradation and release of microplastics from plastic films studied by UV radiation and mechanical abrasion. *Sci Total Environ* 2022; 838: 156369.
104. Zhang S, Liang X, Gadd GM, Zhao QI. Advanced titanium dioxide-polytetrafluoroethylene (TiO₂-PTFE) nanocomposite coatings on stainless steel surfaces with antibacterial and anti-corrosion properties. *Appl Surf Sci* 2019; 490: 231-41.
105. Margarucci LM, Romano Spica V, Protano C, et al. Potential antimicrobial effects of photocatalytic nanotechnologies in hospital settings. *Ann Ig* 2019; 31: 461-73.
106. Ahmed OB, Alamro T. Evaluation of the antibacterial activities of face masks coated with titanium dioxide nanoparticles. *Sci Rep* 2022; 12: 18739.
107. Masjoudi M, Mohseni M, Bolton JR. Sensitivity of bacteria, protozoa, viruses, and other microorganisms to ultraviolet radiation. *J Res Natl Inst Stand Technol* 2021; 126: 1e77.
108. Burgener Jyl. Position Paper on the Use of Ultraviolet Lights in Biological Safety Cabinets. *Applied Biosafety* 2006; 11: 228-30.
109. Kreitenberg A, Martinello RA. Perspectives and recommendations regarding standards for ultraviolet-C whole-room disinfection in healthcare. *J Res Natl Inst Stand Technol* 2021; 126: 1e8.
110. Boyce JM, Donskey CJ. Understanding ultraviolet light surface decontamination in hospital rooms: a primer. *Infect Control Hosp Epidemiol* 2019; 40: 1030-5.
111. Quek PH, Hu JY, Chu XN, Feng YY, Tan XL. Photoreactivation of *Escherichia coli* following medium-pressure ultraviolet disinfection and its control using chloramination. *Water Sci Technol* 2006; 53: 123e9.
112. Lonnen J, Putt K, Kernick E, et al. The efficacy of *Acanthamoeba* cyst kill and effects upon contact lenses of a novel ultraviolet lens disinfection system. *Am J Ophthalmol* 2014; 158: 460e8.
113. Douki T, Sage E. Dewar valence isomers, the third type of environmentally relevant DNA photoproducts induced by solar radiation. *Photochem Photobiol Sci* 2016; 15: 24-30.
114. Banaś AK, Zgłobicki P, Kowalska E, Bażant A, Dziga D, Strzałka W. All you need is light. Photorepair of uv-induced pyrimidine dimers. *Genes* 2020; 11: 1-17.
115. Luze H, Nischwitz SP, Zalaudek I, Müllegger R, Kamolz LP. DNA repair enzymes in sunscreens and their impact on photoageing-A systematic review. *Photodermatol Photoimmunol Photomed* 2020; 36: 424-32.
116. Poepping C, Beck SE, Wright H, Linden KG. Evaluation of DNA damage reversal during medium-pressure UV disinfection. *Water Res* 2014; 56: 181-9.
117. Li XQ, Cai LM, Liu J, Ma Y-L, Kong Y-H, Li H, Jiang M. Liquiritin suppresses UVB-induced skin injury through prevention of inflammation, oxidative stress and apoptosis through the TLR4/MyD88/NF- κ B and MAPK/caspase signaling pathways. *Int J Mol Med* 2018; 42: 1445-59.
118. Hijnen WAM, Beerendonk EF, Medema GJ. Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water: a review. *Water Res* 2006; 40: 3-22.

Position Paper multisocietario, GISIO-SITI/SIMPIOS, sull'utilizzo della radiazione ultravioletta nella disinfezione ambientale di aree critiche sanitarie

- 119.Bohrerova Z, Linden KG. Standardizing photoreactivation: Comparison of DNA photorepair rate in *Escherichia coli* using four different fluorescent lamps. *Water Research* 2007; 41: 2832-8.
- 120.Ma D, Weir MH, Hull NM. Fluence-based QMRA model for bacterial photorepair and regrowth in drinking water after decentralized UV disinfection. *Water Res* 2023; 231: 119612.
- 121.Sinha RP, Häder D-P. UV-induced DNA damage and repair: a review. *Photochem Photobiol Sci* 2002; 1: 225-36.
- 122.Zimmer JL, Slawson RM. Potential repair of *Escherichia coli* DNA following exposure to UV radiation from both medium- and low-pressure UV sources used in drinking water treatment. *Appl Environ Microbiol* 2002; 68: 3293-9.
- 123.Zannier F, Portero LR, Douki T, Gärtner W, Fariás ME, Albaracín VH. Proteomic Signatures of Microbial Adaptation to the Highest Ultraviolet-Irradiation on Earth: Lessons from a Soil Actinobacterium. *Front Microbiol* 2022; 13: 791714.
- 124.Attia F, Whitener C, Mincemoier S, et al. The effect of pulsed xenon ultraviolet light disinfection on healthcare-associated *Clostridioides difficile* rates in a tertiary care hospital. *Am J Infect Control* 2020; 48: 1116-8.
- 125.Anderson DJ, Chen LF, Weber DJ, et al. Enhanced terminal room disinfection and acquisition and infection caused by multidrug-resistant organisms and *Clostridium difficile* (BETR study). *Lancet Infect Dis* 2017; 389: 805-14.
- 126.Anderson DJ, Moehring RW, Weber DJ, et al. Effectiveness of targeted enhanced terminal room disinfection on hospital-wide acquisition and infection with multidrug-resistant organisms and *Clostridium difficile*: a secondary analysis of a multicentre cluster randomised controlled trial with crossover design (BETR Disinfection). *Lancet Infect Dis* 2018; 18: 845-53.
- 127.Bearman G, Abbas S, Masroor N, et al. Impact of Discontinuing Contact Precautions for Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus* and Vancomycin-Resistant *Enterococcus*: An Interrupted Time Series Analysis. *Infect Control Hosp Epidemiol* 2018; 39: 676-82.
- 128.Brite J, McMillen T, Robilotti E, et al. Effectiveness of ultraviolet disinfection in reducing hospital-acquired *Clostridium difficile* and vancomycin-resistant *Enterococcus* on a bone marrow transplant unit. *Infect Control Hosp Epidemiol* 2018; 39: 1301-6.
- 129.Catalanotti A, Abbe D, Simmons S, Stibich M. Influence of pulsed-xenon ultraviolet light-based environmental disinfection on surgical site infections. *Am J Infect Control* 2016; 44: e99-e101.
- 130.Ethington T, Newsome S, Waugh J, Lee LD. Cleaning the air with ultraviolet germicidal irradiation lessened contact infections in a long-term acute care hospital. *Am J Infect Control* 2018; 46: 482-6.
- 131.Green C, Pamplin JC, Chafin KN, Murray CK, Yun HC. Pulsed-xenon ultraviolet light disinfection in a burn unit: Impact on environmental bioburden, multidrug-resistant organism acquisition and healthcare associated infections. *Burns* 2017; 43: 388-96.
- 132.Heredia-Rodríguez M, Álvarez-Fuente E, Bustamante-Munguira J, et al. Impact of an ultraviolet air sterilizer on cardiac surgery patients, a randomized clinical trial. *Med Clin (Barc)* 2018; 151: 299-307.
- 133.Kane DW, Finley C, Brown, D. UV-C light and infection rate in a longterm care ventilator unit. *Canadian Journal of Infection Control* 2018; 33: 44-8.
- 134.Kovach CR, Taneli Y, Neiman T, Dyer EM, Arzaga AJ, Kelber ST. Evaluation of an ultraviolet room disinfection protocol to decrease nursing home microbial burden, infection and hospitalization rates. *BMC Infect Dis* 2017; 17: 186.
- 135.Levin J, Riley LS, Parrish C, English D, Ahn S. The effect of portable pulsed xenon ultraviolet light after terminal cleaning on hospital-associated *Clostridium difficile* infection in a community hospital. *Am J Infect Control* 2013; 41: 746-8.
- 136.Miller R, Simmons S, Dale C, et al. Utilization and impact of a pulsed-xenon ultraviolet room disinfection system and multidisciplinary care team on *Clostridium difficile* in long-term acute care facility. *Am J Infect Control* 2015; 43: 1350-3.
- 137.Morikane K, Suzuki S, Yoshioka J, Yakuwa J, Nakane M, Nemoto K. Clinical and microbiological effect of pulsed xenon ultraviolet disinfection to reduce multidrug-resistant organisms in the intensive care unit in a Japanese hospital: a before-after study. *BMC Infect Dis* 2020; 20: 82.
- 138.Murphy P, Kang L, Fleming M, et al. Effect of ultraviolet-C light disinfection at terminal patient discharge on hospital-acquired infections in bone marrow transplant and oncology units. *Am J Infect Control* 2020; 48: 705-7.
- 139.Nagaraja A, Visintainer P, Haas JP, Menz J, Wormser GP, Montecalvo MA. *Clostridium difficile* infections before and during use of ultraviolet disinfection. *Am J Infect Control* 2015; 43: 940-5.
- 140.Napolitano NA, Mahapatra T, Tang W. The effectiveness of UV-C radiation for facility-wide environmental disinfection to reduce health care-acquired infections. *Am J Infect Control* 2015; 43: 1342-6.
- 141.Ochoa SA, Cruz-Córdova A, Mancilla-Rojano J, et al. Control of Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus* Strains Associated With a Hospital Outbreak Involving Contamination From Anesthesia Equipment Using UV-C. *Front Microbiol* 2020; 11: C7 - 600093.
- 142.Pegues DA, Han J, Gilmar C, McDonnell B, Gaynes S. Impact of Ultraviolet Germicidal Irradiation for No-Touch Terminal Room Disinfection on *Clostridium difficile* Infection Incidence Among Hematology-Oncology Patients. *Infect Control Hosp Epidemiol* 2017; 38: 39-44.
- 143.Raggi R, Archuleta K, Haag CW, Tang W. Clinical, operational, and financial impact of an ultraviolet-C terminal disinfection intervention at a community hospital. *Am J Infect Control* 2018; 46: 1224-9.
- 144.Rock C, Hsu YJ, Curless MS, et al. Ultraviolet-C Light Evaluation as Adjunct Disinfection to Remove Multidrug-Resistant Organisms. *Clin Infect Dis* 2022; 75: 35-40.
- 145.Rutala WA, Kanamori H, Gergen MF, et al. Enhanced disinfection leads to reduction of microbial contamination and a decrease in patient colonization and infection. *Infect Control Hosp Epidemiol* 2018; 39: 1118-21.
- 146.Sampathkumar P, Folkert C, Barth JE, et al. A trial of pulsed xenon ultraviolet disinfection to reduce *Clostridioides difficile* infection. *Am J Infect Control* 2019; 47: 406-8.
- 147.Steele M, Hurtado RR, Rychlik K, et al. Impact of an automated multiple emitter whole-room ultraviolet-C disinfection system on hospital acquired infections: A quasi-experimental study. *Am J Infect Control* 2021; 49: 1200-3.
- 148.Vianna PG, Dale CR Jr, Simmons S, Stibich M, Licitra CM. Impact of pulsed xenon ultraviolet light on hospital-acquired infection rates in a community hospital. *Am J Infect Control* 2016; 44: 299-303.
- 149.Ministero della Salute. Corretto utilizzo delle lampade germicide a raggi ultravioletti [https://www.pnrr.salute.gov.it/portale/news/p3_2_1_1.jsp?lingua=italiano&menu=notizie&p=dalministero&id=5753].
- 150.Istituto Superiore di Sanità. Raccomandazioni ad interim sulla sanificazione di strutture non sanitarie nell'attuale emergenza COVID-19: ambienti /superfici. Aggiornamento del Rapporto ISS COVID-19 n. 25/2020. Versione del 20 maggio 2021.

Position Paper multisocietario, GISIO-SITI/SIMPIOS, sull'utilizzo della radiazione ultravioletta nella disinfezione ambientale di aree critiche sanitarie

151. Gazzetta Ufficiale. Testo Unico sulla Salute e Sicurezza sul Lavoro. Decreto Legislativo n. 81 del 9 aprile 2008.
152. Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea. Direttiva 2006/25/UE del Parlamento e del Consiglio Europeo. 5 Aprile 2006.
153. Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks (SCHEER). UV-C-lamps: could something that kills bacteria and viruses also harm you? https://health.ec.europa.eu/document/download/96eaa465-265f-4f45-9b20-74746af36585_en?filename=citizens_uvc_en.pdf
154. Ko JK, Cho MR, Lee MJ, Kim JH. Analysis on IEC 62471 for The Introduction of Photobiological Safety of LED Lamp. Proceedings of the Safety Management and Science Conference 2012; 435-43.
155. Radiazioni Ottiche Artificiali (ROA): descrizione del rischio. Portale Agenti Fisici. https://www.portaleagentifisici.it/fo_ro_artificiali_index.php?lg=IT
156. Ploydaeng M, Rajatanavin N, Rattanakaemakorn P. UV-C light: A powerful technique for inactivating microorganisms and the related side effects to the skin. Photodermal Photoimmunol Photomed 2021; 37: 12-9.
157. Damonti L, Steiger W, Senn L, et al. Decontaminazione UV nelle strutture sanitarie. Swissnos Bulletin 2021/01: 1-7.
158. Ramos CCR, Roque JL A, Sarmiento DB, et al. Use of ultraviolet-C in environmental sterilization in hospitals: A systematic review on efficacy and safety. Int J Health Sci 2020; 14: 52-65.
159. Dunn AN, Vaisberg P, Fraser TG, et al. Perceptions of Patients, Health Care Workers, and Environmental Services Staff Regarding Ultraviolet Light Room Decontamination Devices. Am J Infect Control 2019; 47: 1290-3.
160. Casini B. La disinfezione con radiazione UVC: quali fattori considerare per operare in sicurezza. Infezioni Obiettivo Zero (rivista on line). 29 Novembre, 2021. <https://infezioniobiettivozero.info/9-infezione-control/131-disinfezione-con-radiazione-uv-quali-fattori-considerare-per-operare-in-sicurezza>
161. Matafonova GG, Batoev VB, Astakhova SA, Gómez M, Christofi N. Efficiency of KrCl excilamp (222 nm) for inactivation of bacteria in suspension. Lett Appl Microbiol 2008; 47: 508-13.
162. Narita K, Asano K, Naito K, et al. Ultraviolet C light with wavelength of 222 nm inactivates a wide spectrum of microbial pathogens. J Hosp Infect 2020; 105: 459-67.
163. Leung KC, Ko TC. Improper use of germicidal range ultraviolet lamp for household disinfection leading to phototoxicity in COVID-19 suspects. Cornea 2021; 40: 121-2.
164. Brickner PW, Vincent RL. Ultraviolet Germicidal Irradiation Safety Concerns: A Lesson from the Tuberculosis Ultraviolet Shelter Study Murphy's Law Affirmed. Photochem Photobiol 2013; 89: 819-21.
165. Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks SCHEER. Opinion on Biological effects of UV-C radiation relevant to health with particular reference to UV-C lamps, 2017. https://health.ec.europa.eu/system/files/2018-03/scheer_o_002_o.pdf
166. Graeffe F, Luo Y, Guo Y, Ehn M. Unwanted Indoor Air Quality Effects from Using Ultraviolet C Lamps for Disinfection. Environ Sci Technol Lett 2023; 10: 172-8.
167. Semitsoglou-Tsiapou S, Mous A, Templeton MR, Graham NJD, Hernandez Leal L, Kruithof JC. The role of natural organic matter in nitrite formation by LP-UV/H₂O₂ treatment of nitrate-rich water. Water Res 2016; 106: 3123-19.
168. Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 26 luglio 2022. Linee guida sulle specifiche tecniche in merito all'adozione di dispositivi mobili di purificazione e impianti fissi di aerazione e agli standard minimi di qualità dell'aria negli ambienti scolastici e in quelli confinati degli stessi edifici. (GU Serie Generale n.180 del 03-08-2022).
169. WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Executive summary. Geneva: World Health Organization; 2021. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
170. Pereira AR, Braga DFO, Vassal M, Gomes IB, Simões M. Ultraviolet C irradiation: a promising approach for the disinfection of public spaces? Sci Total Environ 2023; 879: 163007.
171. Kalita I, Kamilaris A, Havinga P, Reva I. Assessing the Health Impact of Disinfection Byproducts in Drinking Water. ACS ES T Water 2024; 4: 1564-78.
172. Absalan F, Hatam F, Prévost M, Barbeau B, Bichai F. Climate change and future water demand: Implications for chlorine and trihalomethanes management in water distribution systems. J Environ Management 2024; 355: 120470.
173. Yemmireddy V, Adhikari A, Moreira J. Effect of ultraviolet light treatment on microbiological safety and quality of fresh produce: An overview. Front Nutr 2022; 9: 871243.
174. Palma F, Baldelli G, Schiavano GF, Amagliani G, Aliano MP, Brandi G. Use of Eco-Friendly UV-C LEDs for Indoor Environment Sanitization: A Narrative Review. Atmosphere 2022; 13: 1411.
175. Zhao J, Payne EM, Liu B, et al. Making waves: Opportunities and challenges of applying far-UVC radiation in controlling micropollutants in water. Water Res 2023; 241: 120169.
176. Brienza M, Manasfi R, Chiron S. Relevance of N-nitrosation reactions for secondary amines in nitrate-rich wastewater under UV-C treatment. Water Res 2019; 162: 22-9.
177. Inventory of Mercury Supply, Use, and Trade in the United States – 2023 Report EPA. https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-12/2023-mercury-inventory-report_final.pdf
178. Mitxelena-Iribarren O, Mondragon B, Eva Pérez-Lorenzo E, et al. Evaluation of the degradation of materials by exposure to germicide UV-C light through colorimetry, tensile strength and surface microstructure analyses. Materials Today Communications 2022; 31: 103690.
179. UV solutions. UV Degradation Effects in Materials - An Elementary Overview. <https://uvsolutionsmag.com/articles/2019/uv-degradation-effects-in-materials-an-elementary-overview/>
180. UV solutions. Risks of Surface Damage to Polymeric (Plastic) Surfaces from UV-C Exposure. <https://uvsolutionsmag.com/articles/2020/risks-of-surface-damage-to-polymeric-plastic-surfaces-from-uv-c-exposure/>
181. Irving D, Lamprou DA, Maclean M, MacGregor SJ, Anderson JG, Grant MH. A comparison study of the degradative effects and safety implications of UVC and 405 nm germicidal light sources for endoscope storage. Polym Degrad Stab 2016; 133: 249-54.
182. Kauffman RE, Wolf JD. Study of the Degradation of Typical HVAC Materials, Filters, and Components Irradiated by UVC Energy-Part III: Manufactured Components. ASHRAE Trans 2013; 119: 203.
183. Recko M, Aladag M, Błaszczak U, Dzierzek K, Kurzydłowski KJ. Effect of UV-C long-time irradiation on mechanical properties of PMMA. Results in Materials 2024; 22: 100567.
184. Yousif E, Haddad R. Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review. Springer Plus 2013; 2: 398.