

La taratura dei radiometri solari effettuata dal Laboratorio di Ottica di ARPA Piemonte: metodo e risultati

S.Saudino Fusette, S.Facta, A.Bonino, L.Anglesio, G.d'Amore
ARPA Piemonte, Via Jervis 30, 10015 Ivrea (TO), s.saudino@arpa.piemonte.it

Riassunto

L'indice UV è il parametro introdotto dall'Organizzazione Mondiale della Sanità per quantificare l'efficacia della radiazione ultravioletta solare nell'indurre l'eritema. Il monitoraggio dell'indice UV viene generalmente effettuato impiegando radiometri a banda larga aventi una curva di risposta prossima allo spettro ad azione eritemale. Questi radiometri consentono una misura in continuo dell'indice UV e alcune tipologie sono anche dotate di un canale aggiuntivo per la misura dell'irradianza UVA solare.

La taratura di tali strumenti richiede una prima caratterizzazione in laboratorio, volta alla misura della risposta spettrale e di quella angolare e quindi l'esposizione in esterno alla radiazione solare, in parallelo con uno spettroradiometro tarato, per la valutazione di un coefficiente di taratura assoluto. Il risultato della taratura è una matrice di coefficienti, funzione dell'ozono colonnare e dell'elevazione solare.

Il laboratorio di Ottica di Arpa Piemonte dispone della strumentazione e delle capacità metrologiche per effettuare questo tipo di taratura e ha avviato la procedura di accreditamento per certificare la taratura in conformità agli standard internazionali. In questo lavoro viene quindi presentato il risultato di un confronto tra le matrici di taratura di un radiometro solare UVS-AE-T, ottenute dal Laboratorio di Ottica di Arpa Piemonte e dal Centro di riferimento mondiale PMOD-WRC (Physikalisch Meteorologische Observatorium Davos, World Radiation Center) di Davos. Le differenze riscontrate, rientrando nelle incertezze sperimentali, evidenziano il buon esito del confronto.

INTRODUZIONE

Nel corso degli ultimi anni, gli sviluppi della strumentazione e delle metodologie impiegate per la misura della radiazione solare UV hanno portato a importanti miglioramenti in questo campo. Gli strumenti d'eccellenza per la misura della radiazione solare UV sono gli spettroradiometri, ma gli elevati costi e la necessità di costante manutenzione ne limitano l'utilizzo principalmente presso alcune stazioni dove costituiscono il riferimento per la taratura di radiometri a banda larga (Hulsen et al, 2007). Questi ultimi sono gli strumenti generalmente installati presso le stazioni di monitoraggio della radiazione UV solare. La loro risposta spettrale, ottenuta per mezzo di opportuni filtri, riproduce la sensibilità della pelle umana alla radiazione UV (CIE, 1998) e permette di ottenere una misura di irradianza efficace eritemale (UVE) o di Indice UV (UVI) (WHO, 2002). Alcune tipologie di radiometri, oltre alla misura dell'UVI, permettono di effettuare misure di irradianza solare UVA, tramite l'utilizzo di un secondo sensore opportunamente filtrato per rendere la risposta spettrale prossima allo spettro UVA ideale.

La non perfetta corrispondenza della risposta spettrale dei radiometri, sia quella relativa al canale UVA sia al canale UVE, con quella ideale, ha portato allo sviluppo di una procedura di taratura specifica per questi strumenti (Grobner et al, 2006). Tale procedura richiede che il radiometro venga caratterizzato in un primo momento in laboratorio al fine di misurarne la risposta spettrale e quella angolare e quindi che venga esposto alla radiazione solare, in parallelo con uno spettroradiometro tarato, per determinare il coefficiente di taratura assoluto. I risultati della caratterizzazione in laboratorio e dell'esposizione alla radiazione solare opportunamente elaborati, anche mediante l'impiego di un modello di trasporto radiativo, permettono di definire la matrice di taratura del radiometro ovvero una matrice di coefficienti moltiplicativi funzione dell'ozono colonnare e dell'angolo solare zenitale.

Il Laboratorio di Ottica di Arpa Piemonte dispone della strumentazione e delle capacità metrologiche per effettuare questa taratura e ha avviato la procedura di accreditamento per certificare la taratura agli standard internazionali. In questo lavoro verrà descritta la procedura di taratura. Inoltre al fine di dimostrare le capacità metrologiche del Laboratorio verrà presentato un confronto tra le matrici di taratura di un radiometro solare UVS-AE-T misurate dal Laboratorio stesse con quelle ottenute dal Centro di riferimento mondiale PMOD-WRC (Physikalisch Meteorologische Observatorium Davos, World Radiation Center) di Davos.

MATERIALI E METODI

La descrizione completa della procedura di taratura non può essere trattata in modo esaustivo in questo lavoro, per cui se ne descrivono le fasi principali rimandando alla bibliografia per approfondimenti (Grobner et al, 2006).

MISURA DELLA RISPOSTA SPETTRALE

La risposta spettrale del radiometro $SRF(\lambda)$ alla lunghezza d'onda λ è il rapporto tra la tensione del radiometro $V(\lambda)$ in risposta ad un segnale di potenza $P(\lambda)$ e il segnale stesso, ovvero:

$$SRF(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{P(\lambda)}$$

Il sistema sperimentale impiegato per la misura consiste in un doppio monocromatore Bentham DM 150 a cui è accoppiata una lampada allo Xenon da 150 W, tramite un opportuno sistema di lenti, avente anche lo scopo di massimizzare il segnale in uscita al doppio monocromatore stesso. In corrispondenza della fenditura di uscita del doppio monocromatore è posto un deviatore di fascio (beam splitter) per verificare la stabilità del segnale in uscita nel corso delle misure.

La caratterizzazione viene eseguita misurando alle varie lunghezze d'onda dell'intervallo 260-400 nm dapprima la potenza del segnale in uscita con un fotodiodo tarato Bentham SI-CAL-EX e quindi la tensione del radiometro. L'applicazione della formula sopra riportata consente di determinare la SRF.

Nel caso del canale UVE dei radiometri solari, spesso la caratterizzazione in lunghezza d'onda non riesce a coprire tutto l'intervallo spettrale sopra riportato, in quanto, rispetto al valore massimo, la sensibilità dei radiometri diminuisce di circa 4 ordini di grandezza a partire dalle lunghezze d'onda di 350-360nm e la tensione radiometrica diventa paragonabile al rumore strumentale.

MISURA DELLA RISPOSTA ANGOLARE

La misura della risposta angolare (ARF) viene effettuata irradiando il radiometro con una lampada allo Xe da 1000 W, per angoli di incidenza rispetto alla normale dell'area sensibile del radiometro compresi tra -90° e 90° . Il radiometro e lampada vengono posti sul banco ottico ad una distanza sufficiente (3 m) a rendere uniforme il campo incidente sull'area sensibile del radiometro (disuniformità stimata entro il 3%). Un filtro passa alto WG305, posto tra la lampada e lo strumento in taratura, elimina le lunghezze d'onda inferiori a 290 nm non presenti nello spettro solare. I differenti angoli di incidenza (da -90° a 90° , a passo di 5°) vengono ottenuti facendo ruotare il radiometro intorno all'asse verticale tangente all'area sensibile passante per il suo centro. La misura viene eseguita su due assi (Nord-Sud NS, Est-Ovest EO) ortogonali tra loro.

Per il generico angolo θ , la $ARF(\theta)$ è data da:

$$ARF(\theta) = \frac{V(\theta)}{V(0^\circ)}$$

dove $V(\theta)$ è la tensione del radiometro irradiato con angolo di incidenza pari a θ e $V(0^\circ)$ è la tensione del radiometro irradiato con angolo di incidenza pari a 0° .

MISURA DELLA COEFFICIENTE DI TARATURA ASSOLUTO E CALCOLO DELLA MATRICE

La determinazione del coefficiente di taratura assoluto del radiometro, k , viene effettuata in esterno tramite misure di irradianza solare in parallelo con uno spettroradiometro tarato.

Il coefficiente di taratura assoluto, k , viene definito come il rapporto tra l'irradianza solare $E(\lambda)$ incidente sulla superficie sensibile del radiometro ponderato per la sua risposta spettrale normalizzata, $SRF_n(\lambda)$ e la tensione radiometrica, V , in risposta a quello spettro solare. Tale rapporto deve essere poi corretto mediante l'introduzione dell'errore coseno globale del radiometro (α_θ) e quello dello spettroradiometro (α_{θ_s}) in quanto né la risposta angolare del radiometro né quella dell'ottica d'ingresso dello spettroradiometro sono perfettamente coseno, caratteristica strumentale necessaria per misure di irradianza. La determinazione di tali coefficienti viene

effettuata utilizzando un modello di trasposto radiativo (Libradtran), note la risposta angolare del radiometro e quella dello spettroradiometro (Grobner et al, 2006).

L'espressione di k risulta quindi:

$$k = \frac{(\sum E(\lambda) \times SRF_n(\lambda)) \times \alpha_{\theta_s}}{V \times \alpha_{\theta}}$$

La determinazione di k viene effettuata esponendo alla radiazione solare il radiometro e lo spettroradiometro tarato (OL 756 con ottica d'ingresso sfera integratrice). Le misure devono essere eseguite in condizioni di cielo sereno su più giorni per raccogliere un numero statisticamente significativo di spettri solari. Ad ogni spettro corrisponde un valore di k calcolato utilizzando la formula sopra riportata. I valori così determinati vengono mediati per ottenere un unico valore di k.

L'esposizione alla radiazione solare e la caratterizzazione in laboratorio insieme all'implementazione di un modello di trasporto radiativo consentono di determinare la matrice di taratura del radiometro. Tale matrice fornisce i coefficienti moltiplicativi per convertire la tensione radiometrica nell'irradianza UVE (e quindi nell'UVI) o nell'irradianza UVA, in funzione dell'ozono colonnare e dall'angolo solare zenitale (Grobner et al, 2006).

INTERCONFRONTO CON LABORATORIO PMOD - WRC

Vengono quindi riportati i risultati del confronto effettuato su un radiometro kipp&Zonen UVS-AE-T tra le matrici di taratura (UVE e UVA) misurate dal Laboratorio di Arpa Piemonte e quelle ottenute dal Centro di riferimento mondiale PMOD-WRC di Davos.

Il parametro utilizzato per valutare la bontà dell'accordo tra le tarature è l'indice di compatibilità IC, definito come:

$$IC_{SRF, ARF, K} = \left| \frac{SRF, ARF, m_{O_3, \theta_{Davos}} - SRF, ARF, m_{O_3, \theta_{Ivrea}}}{\sqrt{U_{SRF, ARF, m_{O_3, \theta_{Davos}}}^2 + U_{SRF, ARF, m_{O_3, \theta_{Ivrea}}}^2}} \right| \leq 1$$

dove SRF, ARF e $m_{O_3, \theta}$ indicano rispettivamente la SRF, la ARF e la matrice di taratura misurata dal Laboratorio la cui sede è specificata come pedice (Davos, Ivrea) e U è l'incertezza estesa ad esse associata. L'IC è stato calcolato sia per il canale UVA sia per quello UVE.

Si riportano i risultati.

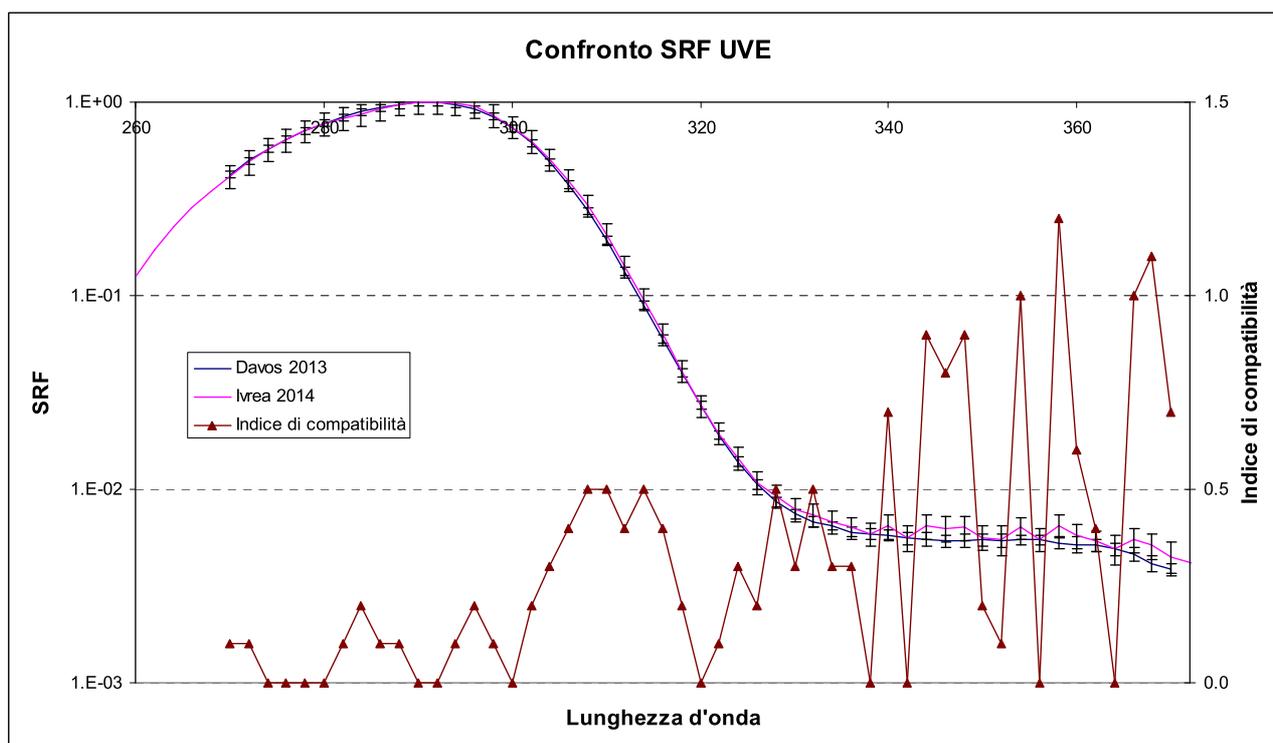
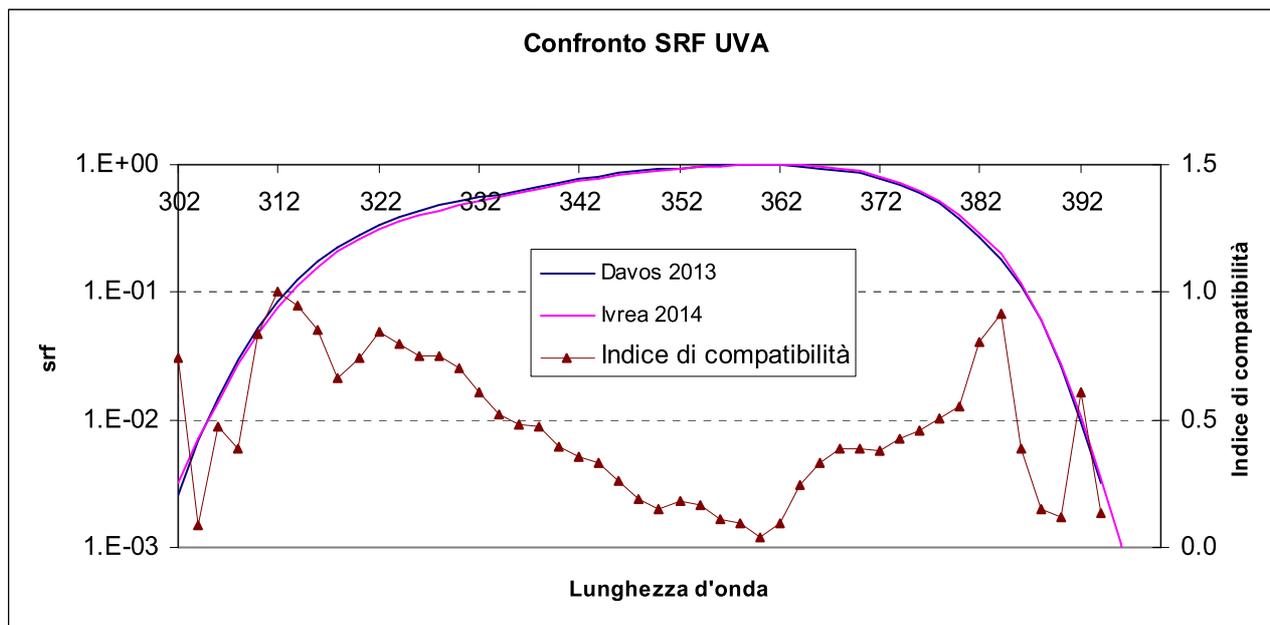
CONFRONTO SRF

Nei grafici sottostanti vengono presentati in scala logaritmica le SRF UVA e UVE misurate dai due laboratori, nell'intervallo spettrale comune, e l'IC.

Per quanto riguarda il canale UVA l'intervallo spettrale comune è [302-394]nm. L'IC_{SRF} è sempre inferiore ad 1.

Per quanto riguarda il canale UVE, l'intervallo spettrale comune è [270-370]nm. L'IC_{SRF} si mantiene sempre inferiore ad 1 ad eccezione di 2 punti situati all'estremo superiore dell'intervallo spettrale, caratterizzati da una SRF molto bassa del radiometro in taratura e quindi poco influenti nei valori assunti dalla matrice di taratura.

Figura 1. Confronto tra SRF

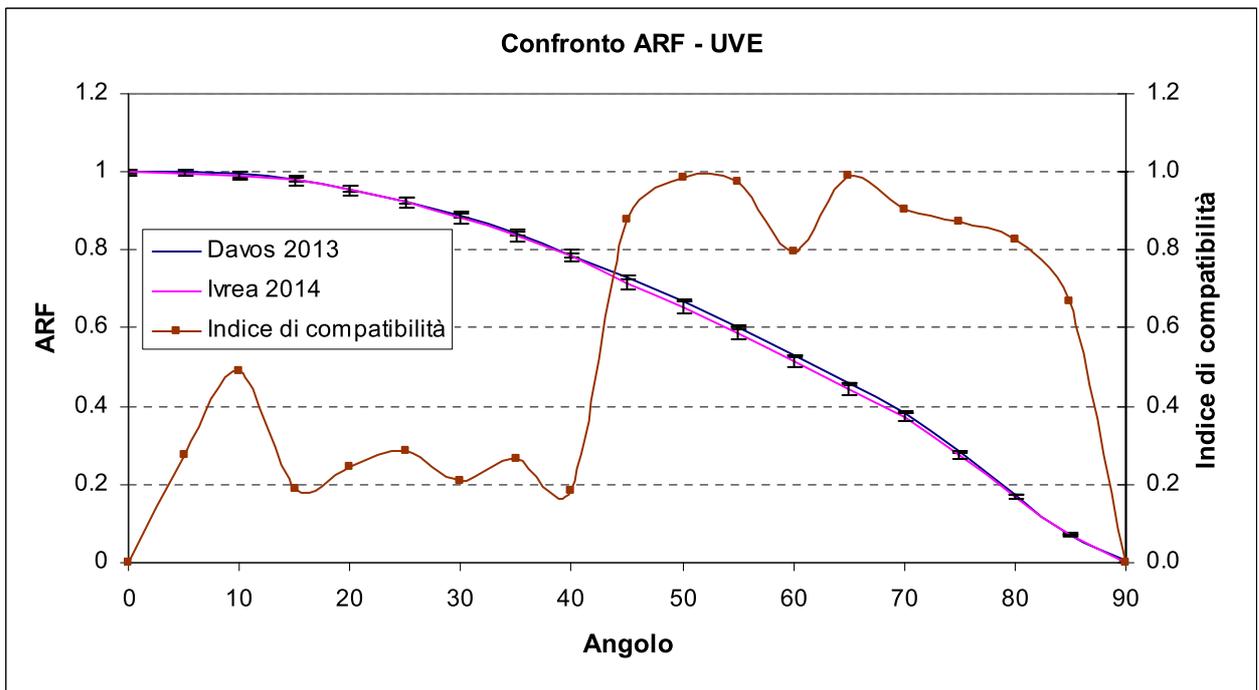
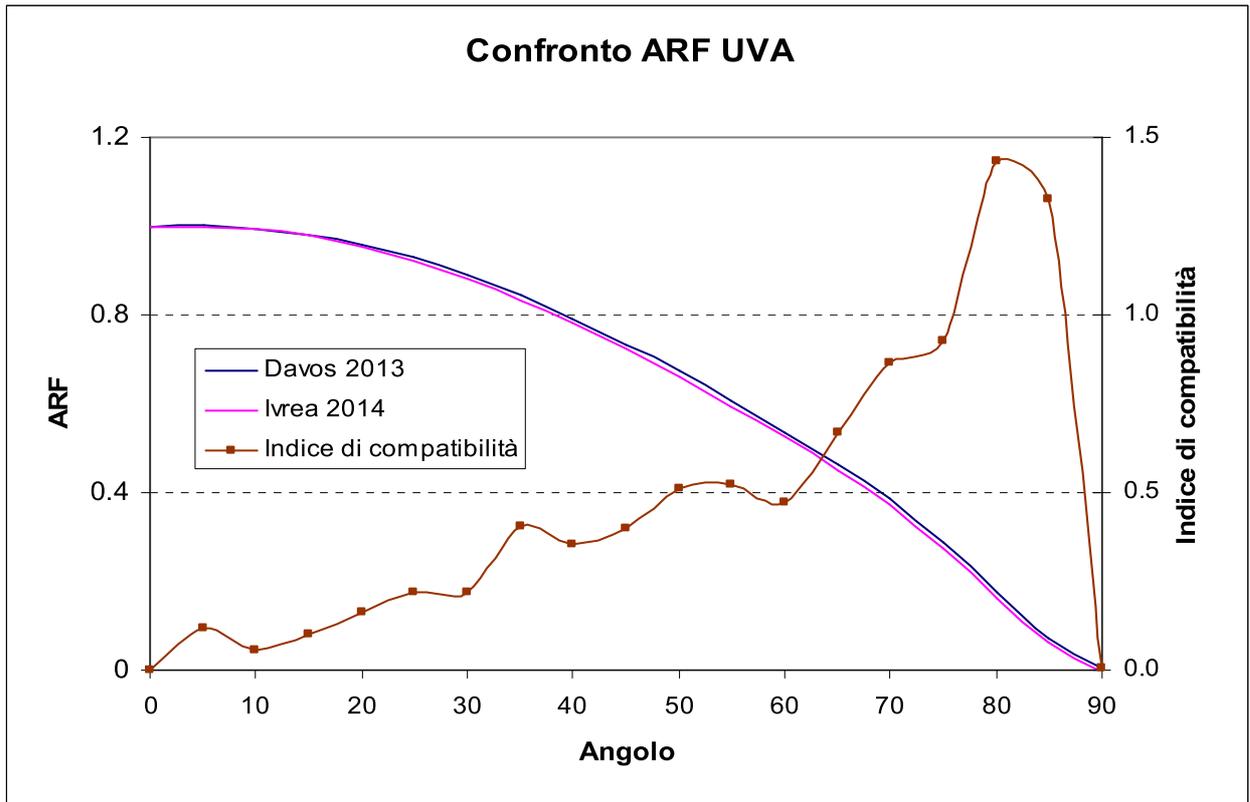


CONFRONTO ARF

Si riportano nel grafico sottostante, le ARF ottenute per entrambi i canali dai due laboratori e l'IC valutato per ogni angolo compreso tra 0° e 90° a passo di 5°.

L'IC del canale UVE è sempre inferiore ad 1 mentre quello relativo al canale UVA è superiore a 1 in due punti poco significativi a livello dell'esposizione e del calcolo della matrice.

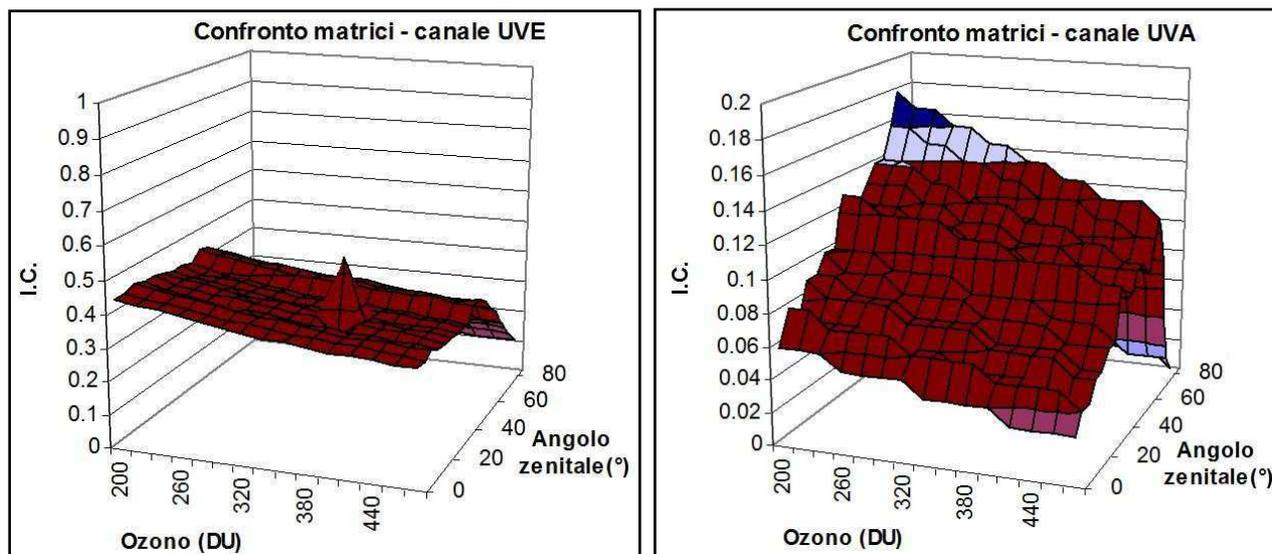
Figura 2. Confronto tra ARF



CONFRONTO MATRICI

Si riporta infine l'IC calcolato per le matrici UVA e UVE. Tale parametro è sempre inferiore di 1 e pertanto evidenzia il buon esito del confronto.

Figura 3. Confronto tra matrici



CONCLUSIONI

Essendo le caratteristiche di risposta dei radiometri UV solari attualmente in commercio ancora significativamente differenti da quelle ideali, il loro impiego per la misura della radiazione UV solare, in particolare quella UVE, richiede che vengano tarati seguendo una procedura piuttosto impegnativa in termini di tempo, strumentazione necessaria e capacità metrologiche. Il laboratorio di Ottica di Arpa Piemonte dispone della strumentazione e dei metodi per effettuare questo tipo di taratura e ha avviato la procedura di accreditamento per certificare la taratura in conformità agli standard internazionali.

Per valutare le capacità metrologiche del laboratorio di ottica di Arpa è stato effettuato un confronto con il Centro di riferimento mondiale PMOD-WRC (Physikalisch Meteorologische Observatorium Davos, World Radiation Center) relativo alla caratterizzazione in laboratorio e alla determinazione delle matrici di taratura di un radiometro solare UVS-AE-T. L'esito positivo del confronto relativamente a tutte le fasi della taratura dimostra la correttezza del metodo implementato e la riferibilità ai campioni internazionali.

Bibliografia

Grobner J, Schreder J, Kazadzis S, Bais AF, Blumthaler M, Gorts P, Tax R, Koskela T, Seckmeyer G, Webb AR, Rembges. *Traveling reference spectroradiometer for routine quality assurance of spectral solar ultraviolet irradiance measurements*. Applied Optics 2005

Grobner G, Hulsén G, Vuilleumier L, Blumthaler M, Vilaplana JM, Walker D, Gil JE. *Report of the PMOD/WRC-COST Calibration and intercomparison of erythemal radiometers*. 2006

Hulsén G., Grobner J, *Characterization and calibration of ultraviolet broadband radiometers measuring erythemally weighted irradiance*. Applied Optics, 2007

International Commission on Illumination (CIE). *Erythema reference action spectrum and standard erythema dose*. CIE S 007/E;1998.

World Health Organization. *Global solar UV-Index. A practical guide*. Disponibile su http://www.unep.org/PDF/Solar_Index_Guide.pdf; 2002