



Ricerca di Sistema elettrico

"Sensori circadiani per la caratterizzazione dell'illuminazione negli ambienti di lavoro"

Laura Bellia, Francesca Fragliasso, Emanuela Stefanizzi



SENSORI CIRCADIANI PER LA CARATTERIZZAZIONE DELL'ILLUMINAZIONE NEGLI AMBIENTI DI LAVORO

Laura Bellia, Francesca Fragliasso, Emanuela Stefanizzi
Università degli Studi di Napoli Federico II

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: D.5 "Innovazione tecnologica, funzionale e gestionale nella illuminazione pubblica ed in ambienti confinati"

Obiettivo: Human Centric Lighting

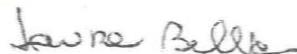
Responsabile del Progetto: Nicoletta Gozo ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sensori circadiani per la caratterizzazione dell'illuminazione negli ambienti di lavoro"

Responsabile scientifico ENEA: Ornella Li Rosi



Responsabile scientifico Università degli Studi di Napoli Federico II: Laura Bellia



Indice

1	INTRODUZIONE	4
2	DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1	INDIVIDUAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL SENSORE SPERIMENTALE	5
2.2	INDIVIDUAZIONE DELLA COLLOCAZIONE OTTIMALE DEL SENSORE SPERIMENTALE - LA CAMPAGNA DI MISURE	6
2.3	INDIVIDUAZIONE DELLA COLLOCAZIONE OTTIMALE DEL SENSORE SPERIMENTALE - LE SIMULAZIONI NUMERICHE	9
2.4	ANALISI DELLA COMPONENTISTICA SENSORIALE GIÀ PRESENTE SUL MERCATO	12
3	CONCLUSIONI.....	12
3.1	INDIVIDUAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL SENSORE SPERIMENTALE	12
3.2	INDIVIDUAZIONE DEL CORRETTO POSIZIONAMENTO DEL SENSORE - LA CAMPAGNA DI MISURE	16
3.3	INDIVIDUAZIONE DEL CORRETTO POSIZIONAMENTO DEL SENSORE - LE SIMULAZIONI NUMERICHE	30
3.4	ANALISI DELLA COMPONENTISTICA SENSORIALE GIÀ PRESENTE SUL MERCATO	36
4	RISULTATI NON RAGGIUNTI O DA PERFEZIONARE.....	36
5	CONCLUSIONI.....	37
6	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	39
7	CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	40

1 Introduzione

Numerose ricerche hanno dimostrato che la luce non solo consente la visione dell'ambiente che ci circonda ed è fondamentale nel determinare le performance del nostro sistema visivo, ma genera una serie di effetti sul nostro organismo, definiti risposte non visive o "non imaging formig effects". Essa è in grado di influenzare l'umore delle persone, aumentarne lo stato di allerta, accelerare il battito cardiaco, aumentare la temperatura corporea, ridurre i livelli di melatonina nel plasma [1-4]. Inoltre, la luce risulta essere uno dei principali regolatori del sistema circadiano [5, 6], una sorta di complesso orologio biologico che, sulla base di cicli che si ripetono circa ogni 24 ore, è in grado di gestire una serie di processi fisiologici come l'alternanza delle fasi di sonno e di veglia o la produzione di alcuni ormoni [7, 8].

L'impatto che la luce genera sul funzionamento del sistema circadiano dipende dall'intensità e dalla distribuzione spettrale della sorgente, dalla durata dell'esposizione allo stimolo luminoso e dal momento della giornata in cui tale stimolo viene somministrato [9].

Il meccanismo di regolazione dei ritmi circadiani si è sviluppato nel corso di millenni sulla base degli stimoli luminosi dovuti alla luce naturale. L'introduzione della luce elettrica, avvenuta circa un secolo fa, ha d'improvviso rivoluzionato il modo in cui l'uomo organizza la sua vita quotidiana. Oggi egli trascorre gran parte della giornata in luoghi confinati e può svolgere attività anche in momenti del giorno in cui la luce naturale è completamente assente. Ciò fa in modo che l'organismo venga differenzialmente stimolato rispetto al passato: l'esposizione alla luce naturale può, in alcuni casi, non essere sufficiente a garantire la sincronizzazione dell'orologio biologico, oppure, al contrario, è possibile che si verifichi una eccessiva stimolazione, qualora le ore di naturale buio vengano trascorse illuminati dalla luce artificiale [10]. Ciò può avere effetti sulla normale regolamentazione dei ritmi circadiani.

Tale problematica risulta particolarmente rilevante nel caso di individui che trascorrono la maggior parte della loro giornata in luoghi confinati, per motivi di lavoro o anche di salute. Questo è, ad esempio, il caso degli impiegati del settore terziario che svolgono prevalentemente lavoro d'ufficio, degli operai del settore industriale, dei degenti di ospedali e case di cura, degli studenti e del personale scolastico.

Nell'ambito della progettazione degli impianti di illuminazione, attualmente gli effetti non visivi della luce risultano prevalentemente trascurati. Essenzialmente il progettista è chiamato a concentrarsi su quei fattori in grado di garantire una corretta prestazione visiva e sul controllo dei relativi parametri individuati dalla normativa [11], quali l'illuminamento medio mantenuto e l'uniformità di illuminamento.

Tuttavia, una adeguata esposizione alla luce è basilare per definire la corretta regolamentazione del sistema circadiano e la sincronizzazione dei ritmi di 24 ore è fondamentale per assicurare al nostro organismo salute e benessere [12, 13]. Gli effetti non visivi della luce dovrebbero quindi entrare a far parte degli obiettivi del progetto illuminotecnico. Ciò significherebbe:

- Massimizzare lo sfruttamento di luce naturale, che come già anticipato è la sorgente rispetto alla quale il sistema circadiano si è adattato;
- Variare durante il corso della giornata la quantità e la qualità (in termini di spettro emesso) di luce somministrata all'individuo, tenendo conto che, a seconda del momento del giorno, lo stesso stimolo luminoso determina risposte non visive differenti.

Le tecnologie oggi esistenti consentono la progettazione di sistemi di illuminazione di tipo dinamico. L'avvento dei più moderni e sofisticati apparecchi LED ha consentito di ottenere sistemi che, secondo le più disparate esigenze, variano continuamente le caratteristiche della luce emessa, sia in termini di intensità che di distribuzione spettrale. Inoltre, il grande interesse posto sul risparmio energetico e di conseguenza sullo sfruttamento della luce naturale come sorgente di illuminazione a costo zero, ha dato impulso alla diffusione di sistemi di controllo automatici che consentono di regolare la quantità di luce elettrica in funzione di quella naturale disponibile in ambiente.

Il patrimonio delle tecnologie esistenti, dunque, rende possibile realizzare nel concreto gli obiettivi di un progetto illuminotecnico che sia basato sull'attenzione al confort degli utenti inteso in senso esteso e che valuti gli effetti sia visivi che non visivi sul benessere delle persone.

Sulla base delle considerazioni fin qui riportate è nata l'idea di progettare un sistema di gestione della luce innovativo che, grazie all'impiego delle nuove tecnologie, sia in grado di integrare luce naturale e artificiale, modificando continuamente le caratteristiche di quest'ultima, in termini di intensità e di spettro emesso, con lo scopo, non solo di massimizzare la prestazione visiva, ma anche di assicurare l'esposizione ad un'illuminazione, le cui caratteristiche siano studiate al fine di favorire la regolazione dei ritmi circadiani e migliorare così il benessere complessivo degli occupanti.

Studi precedenti [14] hanno proposto una metodologia volta alla definizione della valutazione della "luce circadiana". In tali studi la distribuzione spettrale della luce viene misurata in corrispondenza della posizione del volto di un osservatore, tramite l'uso di uno spettroradiometro. In seguito, l'impatto sul sistema circadiano dovuto agli stimoli luminosi viene valutato grazie all'applicazione dei modelli di calcolo consolidati [15]. Tali ricerche costituiscono il punto di partenza per definire il funzionamento del sistema di controllo sperimentale. La metodologia proposta non può essere esportata direttamente nella pratica progettuale comune come strumento di analisi, dati gli elevati costi della strumentazione necessaria e la complessità della fase di elaborazione dei dati rilevati dallo spettroradiometro. Inoltre, per passare dalla semplice analisi al controllo diretto dell'impianto è necessario avere uno strumento di misura semplice che monitori la "luce circadiana" e generi segnali in grado di controllare l'emissione della luce artificiale.

In qualunque sistema di controllo automatico, infatti, il cuore dell'impianto è rappresentato dai fotosensori e dagli algoritmi di calcolo in grado di settare le caratteristiche del sistema di illuminazione sulla base dei segnali generati dai fotosensori stessi. Il sistema di controllo sperimentale dovrà essere quindi dotato di un fotosensore in grado di "sostituirsi" allo spettroradiometro ed il suo funzionamento dovrà essere basato su algoritmi che automaticamente applicano i modelli di calcolo per la definizione dell'impatto della luce sulla regolazione dei ritmi circadiani.

In questa sezione si inquadra il lavoro svolto all'interno dell'Accordo di Programma (o eventualmente nel quadro dell'Accordo di collaborazione) e si mettono in evidenza motivazioni e finalità del lavoro senza tuttavia anticiparne le conclusioni. (stile Normale testo)

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

Le attività di ricerca sono organizzate secondo un programma triennale. Costituiscono l'oggetto del report i risultati delle attività svolte durante il primo anno. Tali attività sono state incentrate sulle fasi preliminari necessarie alla progettazione e alla realizzazione del sistema dotato di sensore innovativo. Nello specifico esse si sono articolate come di seguito:

- definizione dei parametri che dovranno caratterizzare il sensore sperimentale;
- definizione del corretto posizionamento del sensore tramite una campagna di misure e simulazioni numeriche;
- analisi della componentistica sensoriale già presente sul mercato.

2.1 Individuazione delle caratteristiche del sensore sperimentale

La definizione delle caratteristiche del sensore sperimentale parte dall'analisi di quelle dei sistemi attualmente presenti sul mercato. Essi possono essere divisi in due categorie: da un lato troviamo i sensori comunemente utilizzati nei daylight-linked controls (ossia i sistemi di controllo che sulla base della luce naturale disponibile in ambiente regolano l'emissione di luce naturale degli apparecchi) e dall'altro dei sistemi utilizzati per il monitoraggio della "luce circadiana", generalmente definiti dosimetri ed utilizzati per monitorare non l'ambiente ma il quantitativo di luce ricevuto da un individuo nell'arco della giornata. E'

stata quindi svolta un'analisi delle caratteristiche dei sistemi già presenti sul mercato in modo da definire i parametri che dovranno caratterizzare il sensore sperimentale.

2.2 Individuazione della collocazione ottimale del sensore sperimentale - La campagna di misure

Allo scopo di valutare quale sia la posizione più adeguata per il sensore sperimentale è stata condotta una campagna di misure di illuminamento. In un primo momento era stato stabilito di effettuare le misure in due differenti test-room, in modo da poter confrontare i dati relativi ad ambienti caratterizzati da finestre di dimensioni e orientamento differenti. Tuttavia, in seguito, si è reso disponibile per le misure un ufficio del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II" (latitudine 40°51' N, longitudine 14°14' E) dotato di due finestre di diverse dimensione ed esposte una a Sud ed una a Ovest. Anziché effettuare le misure in due stanze, si è preferito operare su questa, potendo collocare la strumentazione di misura senza interferire con le attività svolte negli altri uffici. Chiudendo infatti una finestra alla volta ed avendo a disposizione l'altra, si sono determinate le condizioni di illuminazione analoghe a quelle di due stanze con orientamenti diversi. In tal modo sono stati inoltre ridotti i tempi di smontaggio e reinstallazione del sistema di monitoraggio.

Una rete di luxmetri è stata collocata in ambiente in modo da valutare i rapporti Eeye/S per diverse possibili posizioni di sensore. Sebbene il sensore sperimentale non rileverà i lux fotopici, la scelta di utilizzare in questa fase preliminare di analisi luxmetri tradizionali è giustificata dai risultati di precedenti ricerche [14] le quali dimostrano che, nonostante le ampie oscillazioni che la luce naturale presenta all'esterno in termini di composizione spettrale e Temperatura di Colore, in ambiente interno tali oscillazioni sono molto più contenute.

La test-room, nella quale sono state effettuate le misure, è una stanza di circa 16 m² dotata di due ampie porte-finestre, quella di estensione inferiore volta a Sud e l'altra di estensione maggiore orientata a Ovest. La finestra Sud affaccia su un'ampia terrazza, mentre quella Ovest si apre su un balcone profondo circa 1.6 m ed è schermata da un oggetto di pari dimensioni.

Le misure sono state effettuate dal 21 aprile al 13 maggio oscurando la porta-finestra sud (Configurazione 1) e dal 26 maggio al 20 giugno oscurando la porta-finestra ovest (Configurazione 2).

Le Figure 1 e 2 mostrano una planimetria quotata e una foto dell'ufficio.

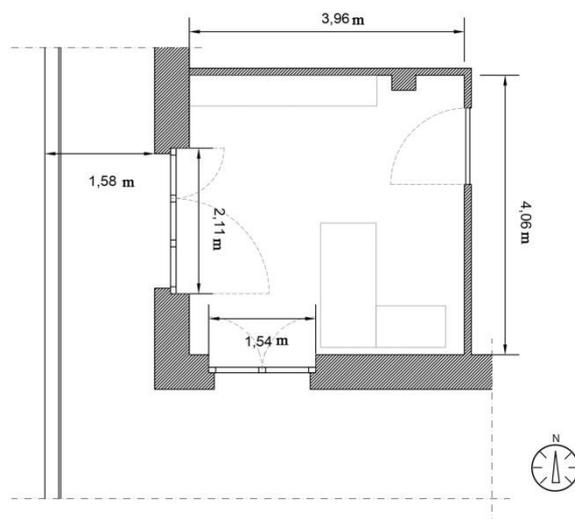


Figura 1: Pianta della test-room



Figura 2: Foto della test-room

In Figura 3, invece, sono riportate le caratteristiche ottiche delle superfici che compongono lo spazio architettonico. I fattori di riflessione spettrali (cfr. Figura 3a) sono stati misurati con uno spettrofotometro Konica Minolta CM-2600d, mentre i fattori di trasmissione spettrale del vetro delle porte-finestre (cfr. Figura 3b) sono stati ottenuti con uno spettroradiometro Konica Minolta CS 2000.

Caratteristiche ottiche delle superfici

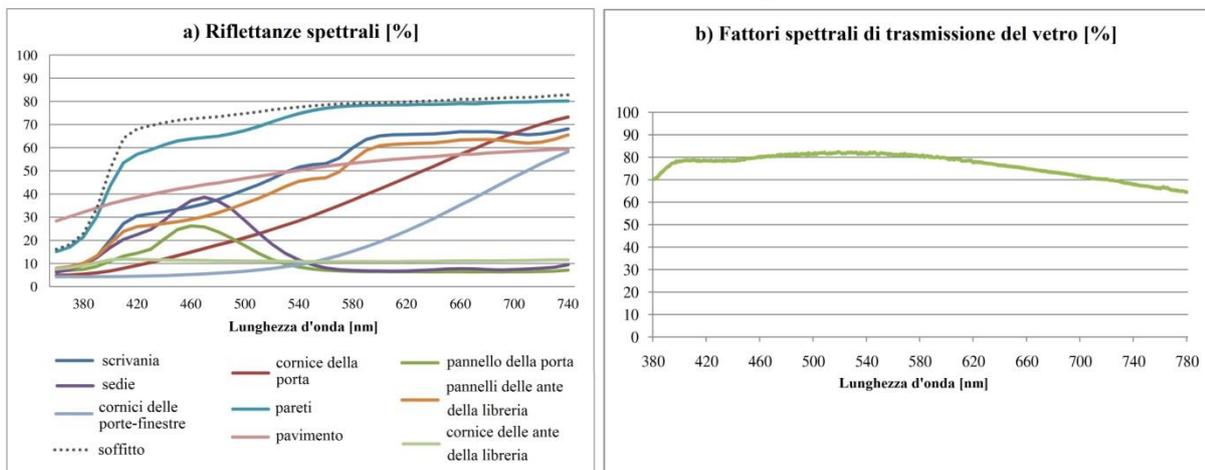


Figura 3: Caratteristiche ottiche delle superfici

Gli illuminamenti sono stati rilevati tramite un sistema di acquisizione RadioClimart di Lambda costituito da 11 luxmetri e due stazioni di rilevamento wireless. 2 luxmetri sono stati disposti all'esterno dell'edificio mentre gli altri 9 all'interno della stanza in posizioni differenti, così come è possibile desumere dalla Tabella 1 e dalla Figura 4. Come è stato anticipato, l'obiettivo della campagna di misure era quello di individuare la corretta localizzazione per il sensore sperimentale in modo che esso fosse in grado di rappresentare al meglio i livelli di luce percepiti dall'occhio. Per tale motivo, i luxmetri utilizzati nella sperimentazione sono stati disposti quasi tutti su piani verticali.

Tabella 1: Localizzazione dei sensori

Sensore di illuminamento	Localizzazione
S1	Disposto su piano verticale ad un'altezza da terra pari a 1.2 m, in corrispondenza del volto di un osservatore seduto alla scrivania che guarda dritto davanti a sé.
S2	Disposto su piano verticale ad un'altezza da terra pari a 1.4 m, fissato in corrispondenza di S1 alla parete posta alle spalle della scrivania,.
S3	Disposto su piano verticale ad un'altezza da terra pari a 1.3 m, fissato alla parete posta alle spalle della scrivania, a sinistra di S2 ad una distanza di circa 0.75 m.
S4	Disposto su piano verticale ad un'altezza da terra pari a 1.5 m, fissato alla parete posta alle spalle della scrivania, a destra di S2 ad una distanza di circa 0.75 m.
S5	Disposto su piano verticale ad un'altezza da terra pari a 1.4 m, fissato al centro della parete Sud.
S6	Disposto su piano verticale ad un'altezza da terra pari a 1.4 m, fissato al centro della finestra ovest.
S7	Disposto su piano verticale ad un'altezza da terra pari a 1.4 m, fissato al centro della libreria che occupa la parete nord.
S8	Disposto su piano orizzontale, fissato al soffitto in corrispondenza della scrivania.
S9	Disposto su piano orizzontale, al centro della scrivania.
S10	Disposto su piano orizzontale, al centro della terrazza alla quale si accede tramite la porta-finestra sud.
S11	Disposto su piano verticale ad un'altezza da terra pari ad 1.4 m fissato al muro esterno dell'edificio alla sinistra della porta-finestra ovest.



Figura 4: Localizzazione dei sensori

Le misure sono state effettuate in continuo, in un intervallo orario che va dalle 8:30 alle 17:30, ogni quarto d'ora.

Per ciascun intervallo orario sono stati calcolati i rapporti ES1/ESn, ossia i rapporti tra l'illuminamento registrato in corrispondenza dell'occhio (sensore S1) e ciascun degli altri sensori da S2 a S9. Viene riportato anche il rapporto tra illuminamento registrato in corrispondenza dell'occhio e del piano di lavoro (S9) a scopo illustrativo, anche se tale posizione non sarebbe adeguata alla collocazione del sensore sperimentale in quanto sarebbe facilmente schermato dalle persone in movimento attorno ad esso.

I rapporti ES1/ESn sono stati poi analizzati in funzione dell'orario di misura e delle condizioni di illuminazione esterne. Infine tramite un'analisi di regressione è stato possibile identificare tra quelle osservate la posizione più vantaggiosa per il sensore sperimentale.

2.3 Individuazione della collocazione ottimale del sensore sperimentale - Le simulazioni numeriche

In seguito alla campagna di misure, sono state effettuate delle simulazioni dinamiche di luce naturale in un ambiente simile alla stanza test e anche in questo caso sono stati calcolati i rapporti Eye/S per diverse posizioni di sensore, in modo da verificare la corrispondenza tra dati misurati e dati simulati.

Le simulazioni dinamiche di luce naturale sono state effettuate per due modelli di calcolo differenti.

Il primo modello è un ambiente le cui caratteristiche geometriche ed ottiche corrispondono a quelle dell'ufficio in cui sono state effettuate le misure di illuminamento, eccetto che per alcune semplificazioni:

- per quanto riguarda l'ambiente interno, la parte superiore della libreria è stata modellata come un parallelepipedo e gli è stato assegnato un fattore di riflessione medio (0.5);
- per quanto riguarda l'ambiente esterno, è stata considerata solo la prima cortina di edifici, modellata nel suo volume complessivo, senza aggiungere i dettagli della facciata. Anche in questo caso è stato assegnato alle superfici un fattore di riflessione medio (0.5).

Per questo primo modello è stata effettuata una simulazione per ciascuna delle due configurazioni (finestra sud schermata e ovest libera e viceversa). I risultati sono serviti a verificare la corrispondenza tra dati simulati e dati misurati.

Successivamente è stato modellato un ambiente più semplice: un ufficio di dimensioni 4m·4m, senza arredi e dotato di una finestra di dimensioni 2m·1.5m raffigurato in Figura 5.

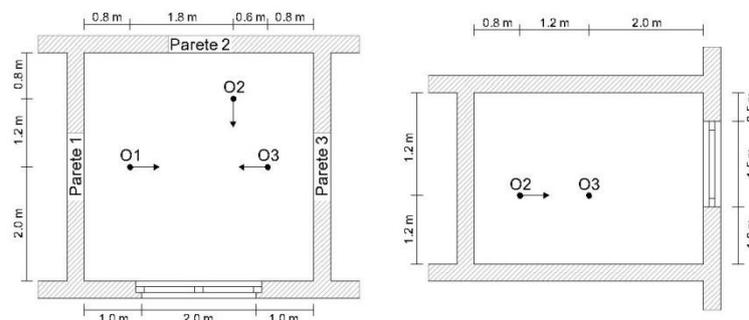


Figura 5: Pianta e sezione del modello di calcolo semplificato

Per quanto riguarda le ostruzioni esterne è stato considerato un caso generico: la stanza è stata localizzata al terzo piano di un edificio di 4 piani (altezza complessiva 14.2m). Di fronte a questo edificio, ad

una distanza di 15 m, è stato posto un altro edificio di dimensioni pari a quello principale come rappresentato in Figura 6.

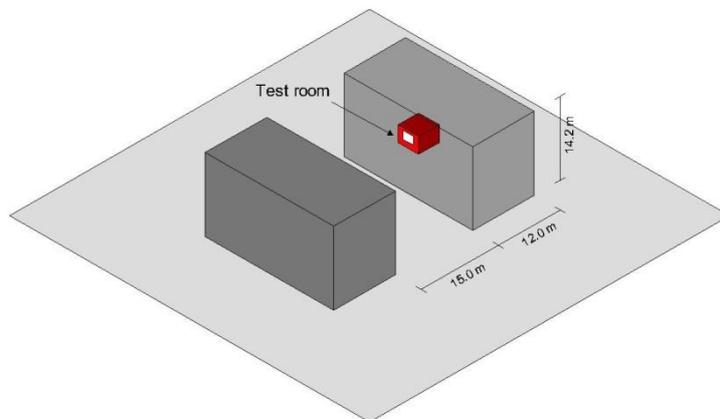


Figura 6: Schema delle ostruzioni esterne del modello di calcolo semplificato

Il modello è stato poi ruotato in modo da esporre la finestra secondo i quattro orientamenti principali (Est, Sud, Ovest, Nord). In tal modo è stato possibile verificare come varia il rapporto Eeye/S al variare dell’orientamento della superficie finestrata.

Nel primo modello sono stati calcolati gli illuminamenti negli stessi punti in cui erano stati disposti i luxmetri nell’ambiente reale (cfr. Tabella 1 e Figura 4). Nel secondo modello, invece, sono state predisposte quattro griglie di calcolo a maglia quadrata (dimensione del modulo della griglia 0.3m·0.3m), una in corrispondenza del soffitto e le altre tre ciascuna in corrispondenza di una delle pareti non finestate, a partire da un’altezza da terra di 1.4m (cfr. Figura 7). Per ciascun orientamento sono stati inoltre calcolati gli illuminamenti per tre punti differenti, O1, O2 e O3, collocati su piano verticale in corrispondenza dell’occhio di un osservatore seduto in tre diverse possibili postazione di lavoro (cfr. Figura 17).

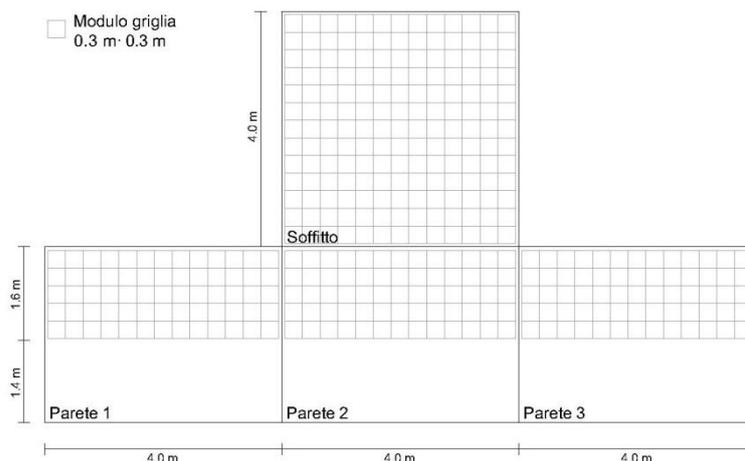


Figura 7: Griglie di calcolo utilizzate per l’analisi del modello di calcolo semplificato

Per entrambi i modelli, il file climatico utilizzato è stato il file IWEC [16] relativo alla città di Napoli e le simulazioni sono state effettuate con DIVA 3.0.0.6. [17], un plug-in di Rhinoceros.

I valori di illuminamento sono stati calcolati per l’intero anno ogni ora dalle 8:00 alle 17:00.

Le Tabelle 2, 3 e 4 riportano i parametri di calcolo utilizzati per le simulazioni e quelli relativi ai materiali per ciascuno dei due modelli.

Tabella 2: Parametri di calcolo di DIVA

Ambient Bounces	Ambient divisions	Ambient super samples	Ambient resolution	Ambient accuracy
7	1500	100	300	0.05

Tabella 3: Parametri di calcolo dei materiali del primo modello

Descrizione	Parametri di calcolo
Pareti interne	0 0 5 0.78 0.78 0.78 0 0
Soffitto	0 0 5 0.78 0.78 0.78 0 0
Pavimento interno	0 0 5 0.51 0.51 0.51 0.1 0
Infissi della finestra	0 0 5 0.11 0.11 0.11 0 0
Vetro della finestra	0 0 3 0.88 0.88 0.88
Scrivania	0 0 5 0.53 0.53 0.53 0 0
Parte inferiore del mobile libreria	0 0 5 0.47 0.47 0.47 0 0
Parte superiore del mobile libreria	0 0 5 0.5 0.5 0.5 0.15 0
Pavimento balconi	0 0 5 0.5 0.5 0.5 0 0
Facciate degli altri edifici	0 0 5 0.5 0.5 0.5 0 0
Suolo	0 0 5 0.2 0.2 0.2 0 0

Tabella 4: Parametri di calcolo dei materiali del secondo modello

Descrizione	Parametri di calcolo
Pareti interne	0 0 5 0.5 0.5 0.5 0 0
Soffitto	0 0 5 0.8 0.8 0.8 0 0
Pavimento interno	0 0 5 0.51 0.51 0.51 0.1 0
Infissi della finestra	0 0 5 0.11 0.11 0.11 0 0
Vetro della finestra	0 0

	3 0.88 0.88 0.88
Facciate degli altri edifici	0 0 5 0.35 0.35 0.35 0 0
Suolo	0 0 5 0.2 0.2 0.2 0 0

Per quanto riguarda il primo modello, dai risultati complessivi relativi all'intero anno, sono stati estratti i dati relativi al periodo in cui sono state effettuate le misure (aprile e maggio per la Configurazione 1 e maggio e giugno per la Configurazione 2). Sono stati poi valutati i valori medi assunti dai rapporti ES1/ESn, le deviazioni standard corrispondenti ed i valori dei coefficienti di correlazione R tra ESn e ES1. I dati così ottenuti sono stati confrontati con quelli desunti a partire dai dati misurati. Ciò ha permesso di valutare se una simulazione dinamica, basata sull'utilizzo di un file climatico e sulla modellazione di un ambiente semplificato, può essere utilizzata per individuare con buona approssimazione la più corretta localizzazione del sensore sperimentale.

Nel caso del secondo modello, invece, le analisi sono state effettuate su base annuale. Per ciascun orientamento sono stati valutati i coefficienti di correlazione R tra ciascun punto delle 4 griglie di calcolo e ciascuno dei tre punti di osservazione O1, O2 e O3, in modo da valutare quale fosse per ciascun caso analizzato la posizione ottimale per disporre il sensore sperimentale.

2.4 Analisi della componentistica sensoriale già presente sul mercato

Poiché sul mercato non sono disponibili sensori "ambientali" finalizzati alla misura della luce "circadiana" è stata effettuata un'analisi delle case produttrici di dosimetri in modo da definire le caratteristiche delle componenti sensoriali del dispositivo sperimentale.

3 Conclusioni

3.1 Individuazione delle caratteristiche del sensore sperimentale

Come anticipato le caratteristiche del sensore sperimentale sono state desunte a partire da quelle di dispositivi già presenti sul mercato.

Fotosensori di tipo tradizionale

Un sistema di controllo di tipo tradizionale, basato sull'integrazione di luce artificiale e naturale, ha come scopo principale quello di mantenere sul piano di lavoro un illuminamento medio pari a quello definito dalla normativa, erogando luce artificiale qualora quella naturale sia assente o scarsa [18]. In sintesi possiamo dire che un sistema di tal genere funziona nel modo seguente:

1. Un fotosensore posizionato in modo opportuno in ambiente esterno o interno rileva i livelli di luce su di esso incidenti;
2. I dati registrati sul sensore vengono elaborati sulla base di un algoritmo di calcolo;
3. L'algoritmo di calcolo consente di valutare la corrispondente quantità di luce incidente sul piano di lavoro, secondo un rapporto di correlazione tra luce incidente sul sensore e luce incidente sull'area del compito visivo osservato in fase di calibrazione;
4. Sulla base di tale rapporto vengono definite le azioni da compiere sull'impianto, ossia accensione, spegnimento o regolazione del flusso luminoso [19].

Un fotosensore è un componente elettronico in grado di regolare l'emissione di flusso luminoso degli apparecchi illuminanti, in funzione dei livelli di luce su di esso incidente.

Numerosi studi [20-24] hanno evidenziato come le caratteristiche del fotosensore abbiano un ruolo fondamentale nel determinare le performance dell'intero sistema di controllo. Per tale motivo, in fase di progettazione, è fondamentale scegliere la tipologia di sensore più adatto all'applicazione specifica, tenendo conto delle sue caratteristiche ed in particolare di:

- tipologia dei dati da acquisire;
- risposta spaziale;
- angolo di vista;
- risposta spettrale;
- range di risposta;
- tempo di acquisizione dei dati e tempo di risposta;
- collocazione in ambiente.

Un fotosensore può acquisire dati relativi alla sola luce naturale oppure sia alla luce naturale che a quella artificiale. Nel primo caso il sistema viene definito open-loop, nel secondo viene definito closed-loop [18]. I sensori di tipo open-loop sono generalmente montati all'esterno, e, se montati all'interno, sono schermati in modo che la luce artificiale non incida su di essi.

La risposta spaziale descrive la sensibilità del fotosensore alla radiazione incidente in funzione della sua direzione di provenienza. In altre parole rappresenta ciò che il fotosensore "vede". La risposta spaziale può essere paragonata al solido fotometrico caratteristico di un apparecchio illuminante, ma descrive la sensibilità della luce incidente, invece che l'intensità della luce erogata [25]. Essa può essere simmetrica o asimmetrica. I sensori caratterizzati da risposta spaziale simmetrica vengono utilizzati generalmente per applicazione d'esterni o sono montati a soffitto puntando verso il basso e, nello specifico, verso il piano di lavoro. I sensori del secondo tipo invece vengono generalmente montati a soffitto e puntano verso una finestra o verso un muro interno.

Altra caratteristica fondamentale del fotosensore è la dimensione dell'angolo di vista. I fotosensori con un angolo di vista stretto sono particolarmente adatti a controllare aree molto piccole ed in particolare una singola postazione di lavoro. Sono particolarmente sensibili alle variazioni di riflettenza dell'ambiente, ad esempio ai cambiamenti dovuti al movimento delle persone o all'incidenza della radiazione solare diretta. Al contrario, i sensori con un ampio angolo di vista sono più adatti a controllare ampie zone e sono meno sensibili alle piccole variazioni di riflettenza dell'ambiente.

La risposta spettrale di un fotosensore descrive la sua sensibilità nel percepire radiazioni di differenti lunghezze d'onda [25]. Le fotocellule, infatti, non sono sensibili solamente allo spettro visibile, ma anche ad una porzione di campo infrarosso ed ultravioletto. Per tale motivo sono generalmente provviste di un filtro necessario per rendere la loro risposta spettrale più vicina possibile alla $V(\lambda)$. Studi precedenti [26] hanno dimostrato che, nonostante tali filtri, la risposta spettrale di diversi fotosensori presenti sul mercato possono differire anche molto dalla $V(\lambda)$ e che i corrispondenti picchi di sensibilità variano tra 540.9 nm e 600.7 nm. Tuttavia la non perfetta risposta spettrale può essere corretta, tenendone conto in fase di elaborazione dell'algoritmo di controllo. Una risposta spettrale molto vicina alla curva di sensibilità fotopica è fondamentale per i sistemi di tipo closed-loop, poiché i sensori rilevano sia la luce elettrica che la luce naturale, caratterizzate, ovviamente, da diversi spettri.

Ciascun sensore è inoltre caratterizzato da un range di risposta, cioè un range limitato di segnali all'interno del quale misura accuratamente la luce. Questo range dipende sia dalle caratteristiche della fotocellula che da quelle dei componenti elettronici connessi ad essa. I range di risposta sono valutati in funzione della localizzazione del fotosensore e quindi sui livelli di luce che ci si aspetta incidano su di esso. Una fotocellula posta in esterno generalmente legge livelli di illuminamento compresi tra 1000 e 100000 lx, un fotosensore da interni tra 10 e 5000 lx, un fotosensore montato in atri o spazi illuminati da lucernai dovrebbe essere caratterizzato da un range di risposta di 100-10000 lx [25].

È necessario inoltre stabilire il tempo di acquisizione dei dati (ossia bisogna verificare ogni quanto tempo il sensore effettua il controllo dei livelli di luce in ambiente) e il tempo di risposta (ossia è necessario stabilire per quanto tempo il sensore deve verificare la stessa condizione, prima che l'azione corrispondente sia attivata dall'impianto). Poiché la luce naturale varia molto nel tempo, il segnale del fotosensore può essere soggetto a continue oscillazioni. Tali oscillazioni possono essere dovute a nuvole passeggere, ma anche al movimento degli utenti sotto il fotosensore. Per evitare che continue fluttuazioni del funzionamento dell'impianto di illuminazione distraggano o infastidiscano gli utenti, è necessario stabilire un ritardo tra il rilevamento della fotocellula e l'azione del controller. Più è lento il tempo di risposta, minori saranno le oscillazioni. Non bisogna però impostare tempi di risposta troppo lunghi per evitare che per ampi intervalli di tempo la luce sia scarsa. Alcuni sistemi consentono di settare tempi di risposta differenti a seconda se sia necessario incrementare o ridurre la luce emessa.

Infine il corretto posizionamento del fotosensore è fondamentale per garantire adeguate performance del sistema. Nei sistemi di tipo tradizionale, il segnale rilevato dal fotosensore dovrebbe essere rappresentativo dell'illuminamento registrato sul piano di lavoro. Ciò è particolarmente complicato, in quanto la distribuzione di luce naturale in ambiente interno può determinare consistenti gradienti tra un punto e l'altro. Il posizionamento del fotosensore deve essere scelto sulla base del rapporto E/S, ossia del rapporto tra l'illuminamento sul piano di lavoro (E) ed il segnale del fotosensore (S). Il rapporto E/S può essere considerato un criterio di performance dell'intero sistema [22]. Molti studi [21, 27-31] si sono soffermati sull'osservazione delle variazioni di tale rapporto nel tempo e hanno evidenziato come esse dipendano dalla risposta spaziale, dall'angolo di vista e dalla disponibilità di luce naturale all'esterno e della sua conseguente distribuzione in ambiente interno.

Sistemi per il monitoraggio della “luce circadiana”

Attualmente in commercio esistono diversi dispositivi atti a monitorare la “luce circadiana”. Vengono generalmente definiti dosimetri e sono utilizzati per quantificare l'esposizione alla luce di un singolo individuo. Hanno l'obiettivo di valutare quali sono le relazioni tra l'esposizione alla luce e la regolazione del ritmo circadiano di un determinato soggetto. Per questo motivo, si tratta di sistemi localizzati direttamente sulla persona e generalmente montati su occhiali, su braccialetti o spille ed in genere raccolgono anche i dati actigrafici relativi al movimento e alle fasi di sonno e di veglia del soggetto monitorato.

La capacità di questi sistemi di misurare la luce incidente dipende da tre caratteristiche fondamentali: la risposta spettrale, la risposta spaziale e la risposta dinamica.

Esattamente come già descritto nel paragrafo precedente, relativamente ai fotosensori utilizzati nei daylight-linked controls, la risposta spettrale e quella spaziale definiscono la sensibilità del dispositivo a captare la luce rispettivamente in funzione della lunghezza d'onda e della direzione della luce incidente.

Anche in questo caso, la risposta spettrale può variare molto da un dispositivo all'altro e avere degli andamenti significativamente differenti sia dalla $V(\lambda)$ che dalle curve di sensibilità spettrali dei fotorecettori del sistema visivo umano $N_{SC}(\lambda)$, $N_{MC}(\lambda)$, $N_{LC}(\lambda)$, $N_R(\lambda)$ e $N_M(\lambda)$.

Per quanto riguarda la risposta spaziale, mentre nel caso dei fotosensori tradizionali, come già detto, essa viene scelta in funzione della localizzazione del sensore e a ciò che esso “deve guardare”, nel caso dei dosimetri è bene che essa si avvicini a quella di un sensore corretto al coseno.

Il fotosensore sperimentale

Come è stato anticipato nei paragrafi precedenti, il nuovo sistema proposto ribalterà il concetto tradizionale di controllo della luce artificiale. Il suo scopo è quello di porre al centro il benessere dell'individuo e di progettare la luce in modo da tener conto anche degli effetti non visivi che essa determina nell'individuo.

I sistemi utilizzati per il monitoraggio della luce circadiana, come precedentemente osservato, sono pensati per essere indossati dalle persone. Il sensore sperimentale invece dovrà essere installato in ambiente e controllare non la persona, ma le caratteristiche ambientali; dovrà monitorare le condizioni di illuminazione dell'ambiente e verificare che esse siano idonee per assicurare la regolamentazione dei ritmi circadiani degli individui che lo occupano.

Inoltre il fotosensore sperimentale differirà da quelli tradizionali utilizzati nei sistemi di controllo della luce artificiale per i seguenti aspetti:

- a) i rilevamenti effettuati dovranno essere rappresentativi dei livelli di luce percepiti dall'osservatore (quindi misurabili in corrispondenza dell'occhio) e non delle condizioni di illuminazione del piano di lavoro;
- b) i dati rilevati dal sensore dovranno essere significativi della risposta non visiva dell'individuo e quindi tener conto della distribuzione spettrale della luce incidente;

Perché le misurazioni effettuate siano significative dei livelli di luce incidenti all'occhio dell'osservatore, il sensore dovrà essere di tipo closed-loop e monitorare continuamente sia la luce naturale che quella artificiale.

La risposta spaziale e l'angolo di vista dovranno essere tali da garantire che i dati ottenuti siano significativi dell'intero ambiente in cui il sensore è installato.

Per quanto riguarda la risposta spettrale va fatto un discorso più approfondito. La definizione della risposta non visiva dell'essere umano dipende dalla distribuzione spettrale della luce e, come già accennato, ricerche precedenti [14] hanno definito una metodologia per valutare tale risposta a partire dalle misure spettrali effettuate con uno spettroradiometro. Tuttavia, l'elaborazione dei dati spettrali è onerosa. E' possibile però definire le risposte non visive direttamente a partire dagli stimoli dei 5 fotorecettori caratteristici del sistema visivo umano.

Il sistema visivo umano, infatti, è basato su 5 tipi di fotorecettori (cfr. Tabella 5): i tre tipi di coni S, L, M, i bastoncelli e le cellule gangliari, queste ultime responsabili della regolazione dei ritmi circadiani.

Tabella 5: I 5 fotorecettori e le corrispondenti funzioni di sensibilità

Fotorecettore	Fotopigmento	Funzione di sensibilità spettrale	Unità di misura
Coni S	Opsina dei coni S	$N_{sc}(\lambda)$	Illuminamento cianopico
Coni M	Opsina dei coni M	$N_{mc}(\lambda)$	Illuminamento cloropico
Coni L	Opsina dei coni L	$N_{lc}(\lambda)$	Illuminamento eritropico
ipRGCs	Melanopsina	$N_z(\lambda)$	Illuminamento melanopico
Bastoncelli	Rodopsina	$N_r(\lambda)$	Illuminamento rodopico

Ognuno dei cinque fotorecettori è caratterizzato da una differente curva di sensibilità alla luce, come riportato in Figura 8.

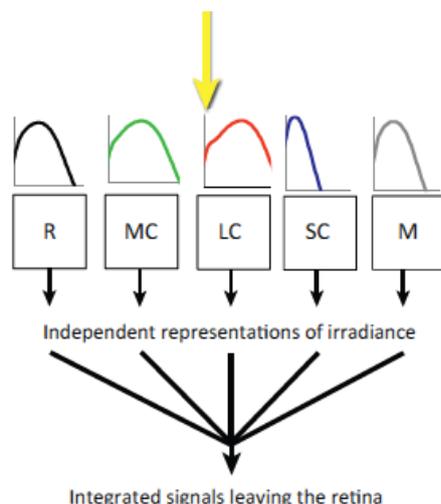


Figura 8: Le funzioni di sensibilità spettrale alla luce dei 5 fotorecettori

Il fotosensore sperimentale sarà costituito quindi da cinque fotocellule ciascuna equipaggiata con un apposito filtro passa banda studiato per seguire l'andamento di ognuna delle cinque curve di sensibilità. In tal modo sarà possibile desumere gli stimoli corrispondenti ai 5 fotorecettori e ottenere tutte le informazioni utili alla valutazione della risposta in termini di regolazioni del sistema circadiano, sulla base dei modelli di calcolo attualmente disponibili [15, 32].

Di conseguenza ognuna delle 5 fotocellule avrà una risposta spettrale differente da quella descritta dalla $V(\lambda)$, come per i sensori tradizionali, ma che riprodurrà rispettivamente l'andamento delle 5 funzioni $N_{SC}(\lambda)$, $N_{MC}(\lambda)$, $N_{LC}(\lambda)$, $N_R(\lambda)$ e $N_M(\lambda)$.

L'intervallo di risposta dovrà essere studiato per ciascuna fotocellula ed espresso non in termini di lux fotopici ma cianopici, cloropici, eritropici, melanopici e rodopici.

Considerando che il sistema dovrà tener conto anche di quanta luce viene somministrata nel tempo in modo cumulato, sarà necessario ottenere dati in continuo con tempi di acquisizione molto brevi.

Lo studio della corretta disposizione in ambiente del sensore richiede uno studio più approfondito. I risultati presenti in letteratura riguardano sistemi tradizionali in cui i dati rilevati dal sensore sono significativi della luce sul piano di lavoro. Il rapporto E/S va in questo caso reinterpretato e calcolato come E_{eye}/S , dove E_{eye} è l'illuminamento all'occhio e S è il segnale del fotosensore. Tale argomento viene approfondito nelle sezioni successive.

3.2 Individuazione del corretto posizionamento del sensore - La campagna di misure

Nelle Figure 9, 10, 11 e 12, per ciascuno dei sensori da S2 a S9, è riportato un grafico in cui sono rappresentati i trend degli illuminamenti misurati in corrispondenza dell'occhio (E_{S1}), quelli misurati in corrispondenza di ciascun sensore (E_{Sn}) ed il corrispondente rapporto E_{S1}/E_{Sn} . I dati sono relativi a due giorni rappresentativi per ciascuna delle due configurazioni considerate: in particolare il 26 aprile ed il 3 maggio per la Configurazione 1 ed il 26 maggio ed il 14 giugno per la Configurazione 2. La scelta di tali giorni è stata effettuata allo scopo di mostrare come i rapporti E_{S1}/E_{Sn} possono, in alcuni casi, subire oscillazioni consistenti durante la giornata ed, in altri, mantenersi più o meno costanti per tutto l'arco del giornata. In particolare le giornate che presentano andamenti dei rapporti oscillanti, sono giornate in cui le condizioni atmosferiche sono state molto variabili, mentre quelle per cui i rapporti si sono mantenuti pressoché costanti sono state giornate serene.

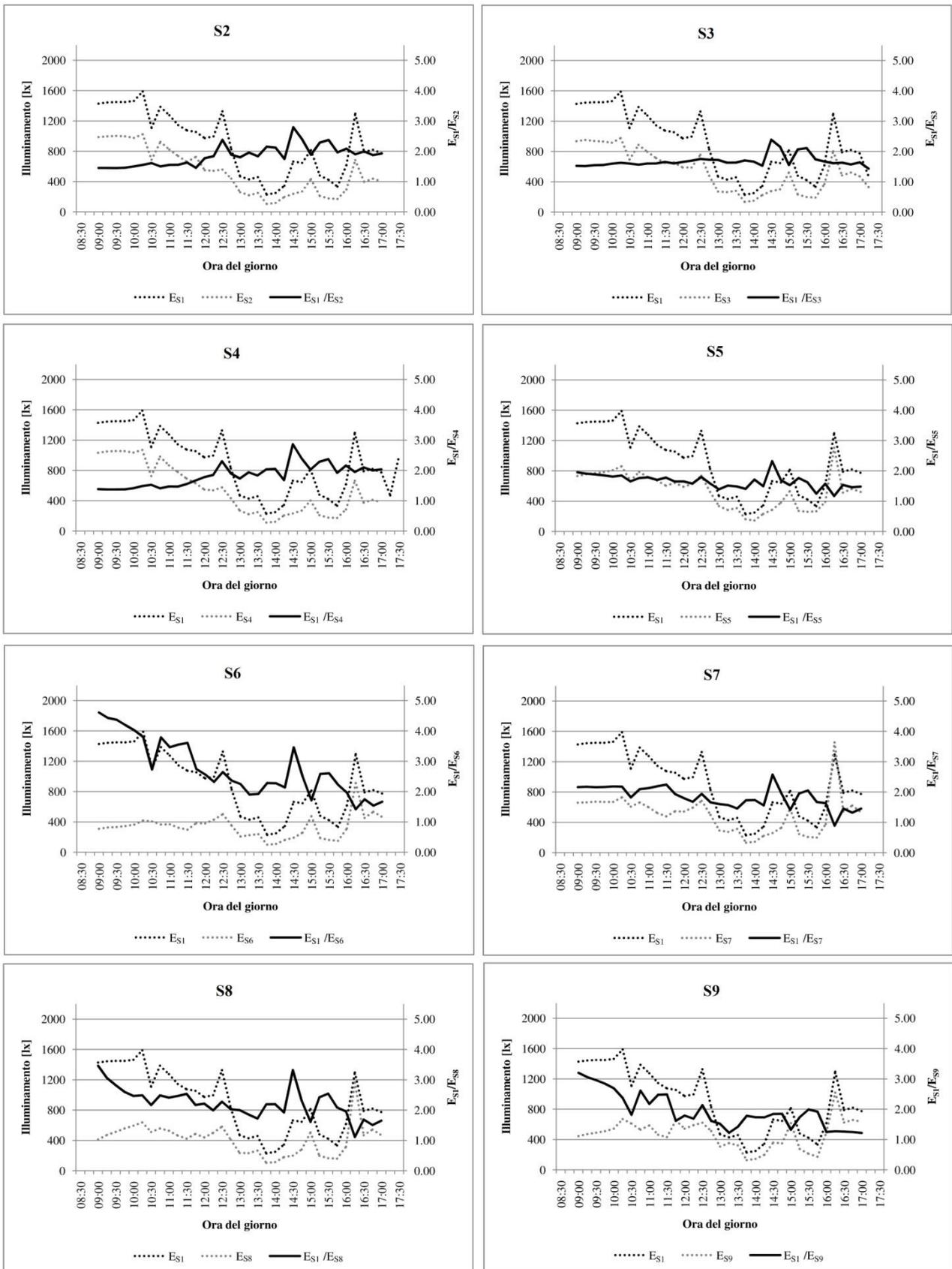


Figura 9: Configurazione 1 – 26 aprile – Illuminamenti misurati e rapporti ES1/ESn relativi a ciascun sensore

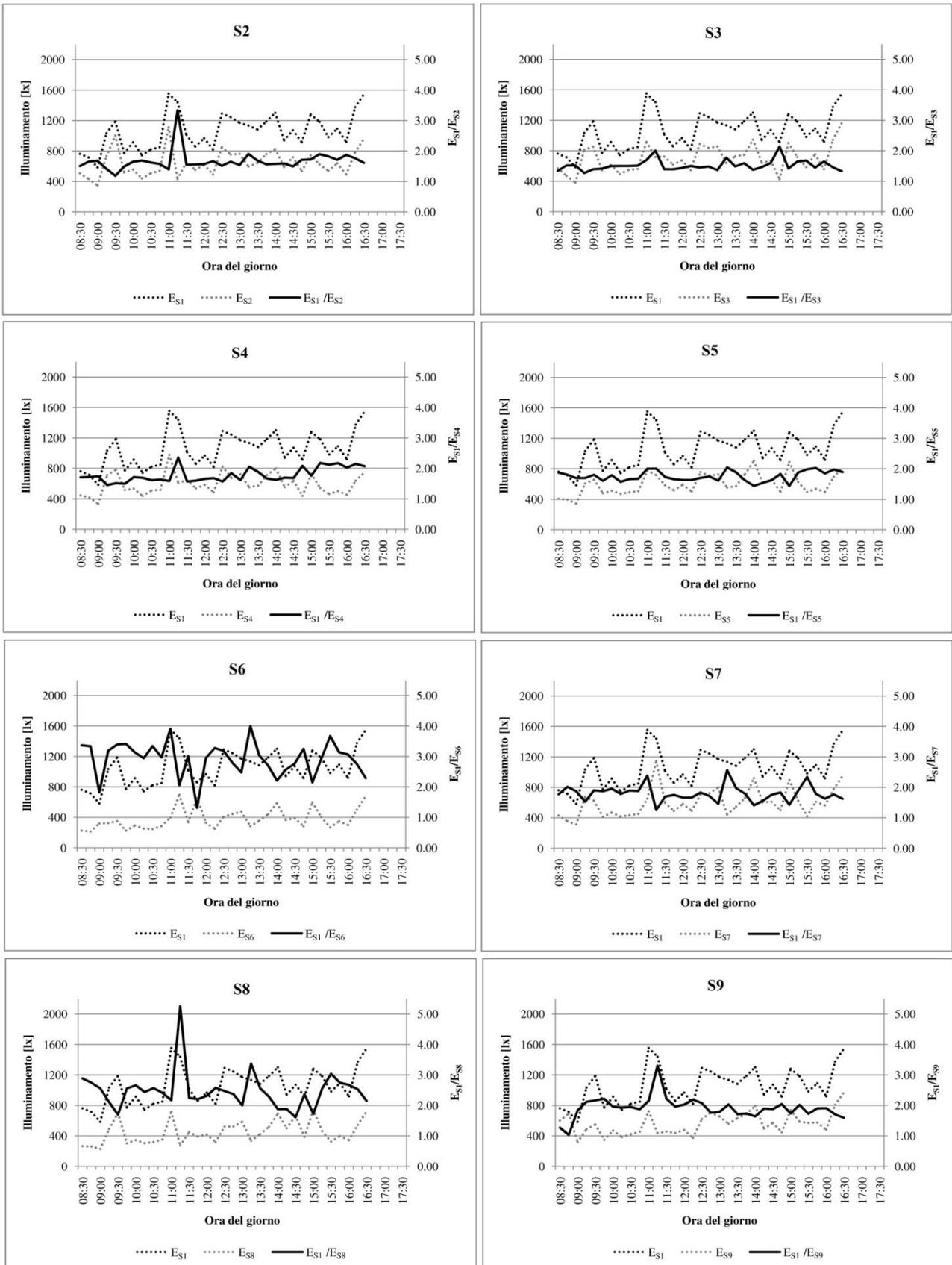


Figura 10: Configurazione 1 – 3 maggio – Illuminamenti misurati e rapporti E_{S1}/E_{Sn} relativi a ciascun sensore

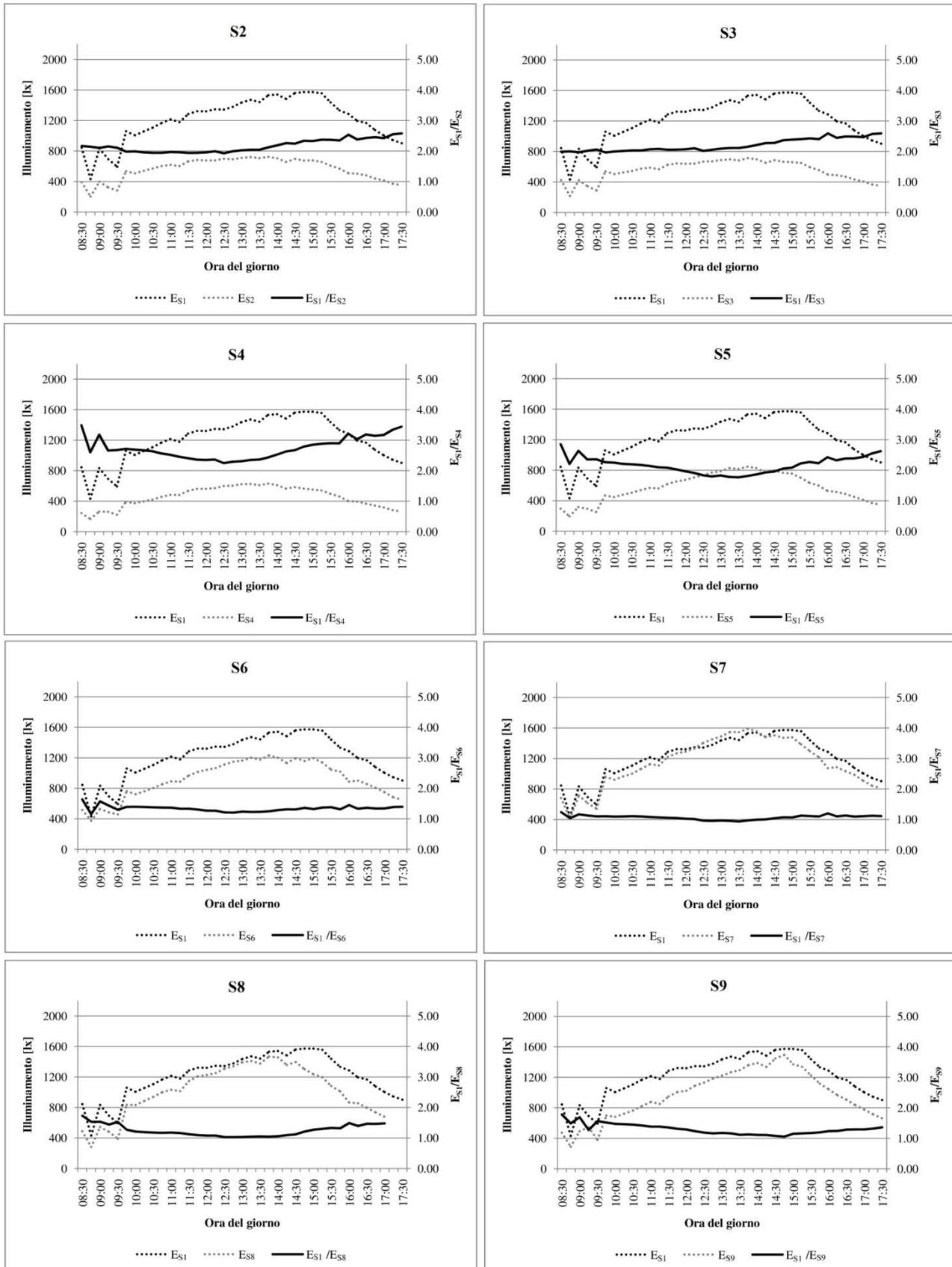


Figura 11: Configurazione 2 – 26 maggio – Illuminamenti misurati e rapporti E_{S1}/E_{Sn} relativi a ciascun sensore

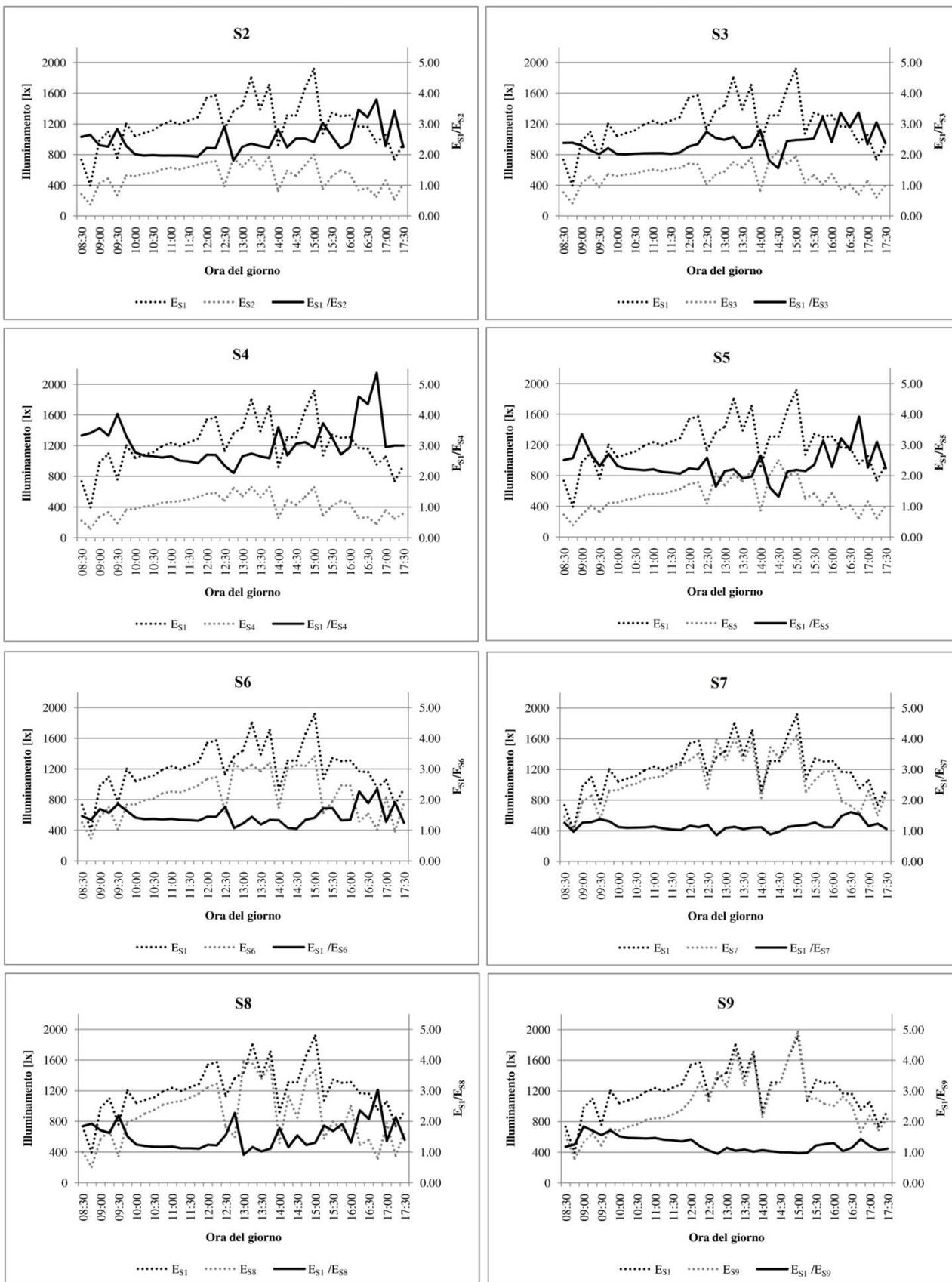


Figura 12: Configurazione 2 – 14 giugno – Illuminamenti misurati e rapporti ES1/ESn relativi a ciascun sensore

Per quanto riguarda la Configurazione 1, l'illuminamento misurato in corrispondenza dell'occhio è sempre risultato maggiore di quello misurato in corrispondenza di tutti gli altri sensori (ciò si verifica anche per i dati non riportati). I rapporti E_{S1}/E_{Sn} si sono rivelati molto oscillanti durante l'arco della giornata, tranne alcuni rari casi. Ciò accade, ad esempio, il 16 aprile per i sensori S2 ed S4 fino alle 11:00 e per il sensore S3 fino alle 13:30. In linea di massima si può dedurre che in corrispondenza di S2, S3 e S4, gli illuminamenti rilevati sono più prossimi a quelli registrati in corrispondenza dell'occhio rispetto agli altri sensori. Sia il 26 aprile che il 3 maggio, infatti, i rapporti E_{S1}/E_{Sn} sono quasi sempre contenuti tra 1.5 e 2.5 e caratterizzati da oscillazioni contenute in campi di variazione piccoli: il campo di variazione minore è, infatti, osservato per S5 il 26 aprile ed è pari a 0.6, mentre quello massimo è pari a 2.1 ed è registrato per S2 il 26 aprile. Al contrario, considerando i sensori da S6 a S9, il campo di variazione minimo è pari ad 1.4 (registrato per S7 il 3 maggio) ed il massimo è pari a 3.4 (registrato per S8 il 3 maggio).

Per quanto riguarda la Configurazione 2, considerando il 26 maggio, è possibile osservare che i rapporti E_{S1}/E_{Sn} assumono andamenti molto regolari. Nel caso dei sensori S2 e S3 essi si attestano per lo più intorno al valore 2 e iniziano a crescere, fino a un massimo rispettivamente di 2.5 e 2.6, a partire dalle 13:30. S4 e S5, escludendo piccole variazioni durante la prima parte della giornata, sono caratterizzati da rapporti E_{S1}/E_{Sn} leggermente decrescenti fino alle 13:00-13:30 per poi cominciare a crescere durante il resto della giornata. Oscillano comunque tra 2.2 e 3.5 nel caso di S4 e 1.8 e 2.9 nel caso di S5. Per quanto riguarda i sensori S6, S8 e S9, E_{S1}/E_{Sn} mostra un andamento qualitativamente simile a S4 e S5, ma oscilla in range più piccoli, tra 1 e 1.5. S7 è caratterizzato da un rapporto E_{S1}/E_{S7} quasi costante e uguale a 1 per tutta la giornata. Se consideriamo il 14 giugno, lo scenario cambia completamente. Le oscillazioni registrate per ciascun sensore nei rapporti E_{S1}/E_{Sn} sono continue e ampie; ad esempio, considerando S4, si osservano campi di variazione compresi tra 2.1 e 5.3. In ogni caso, anche per il 14 giugno, come per il 26 maggio, si può osservare che i valori di illuminamento registrati dai sensori da S6 a S9 sono più prossimi a quelli rilevati in corrispondenza dell'occhio.

In linea di massima, si evince che per ciascuna configurazione, nonostante le oscillazioni osservabili nei rapporti E_{S1}/E_{Sn} , è possibile individuare alcuni sensori che registrano livelli di illuminamento più prossimi a quelli registrati in corrispondenza dell'occhio. Nello specifico si tratta dei sensori S2, S3 ed S4 per la Configurazione 1 e dei sensori da S6 a S9 per la configurazione 2.

Nelle Figure 13 e 14 ogni grafico riporta, per ciascun sensore, il valore medio, il campo di variazione e la deviazione standard riferiti al rapporto E_{S1}/E_{Sn} espresso in funzione dell'ora del giorno.

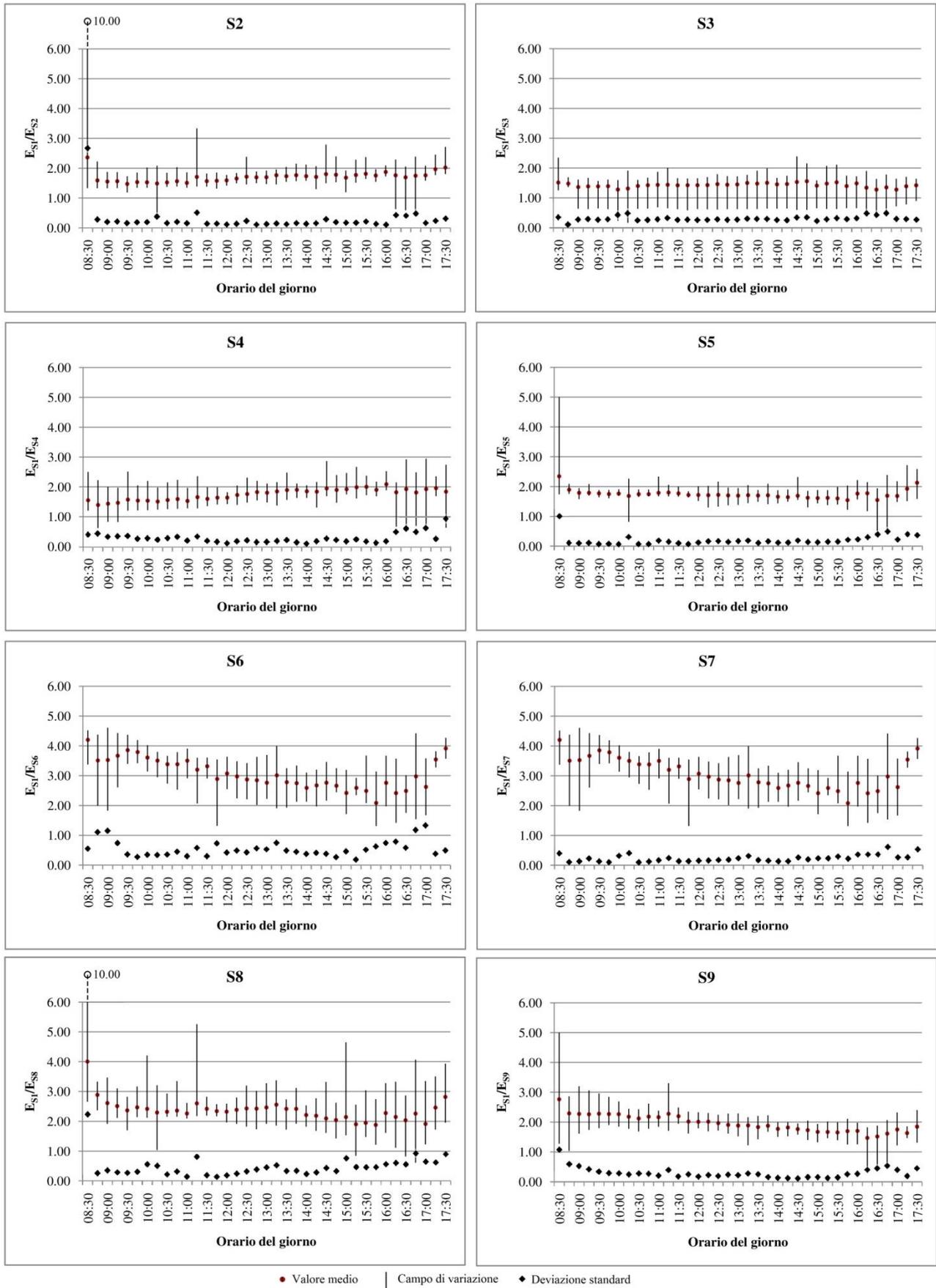


Figura 13: Configurazione 1 –ES1/ESn in funzione dell’orario del giorno

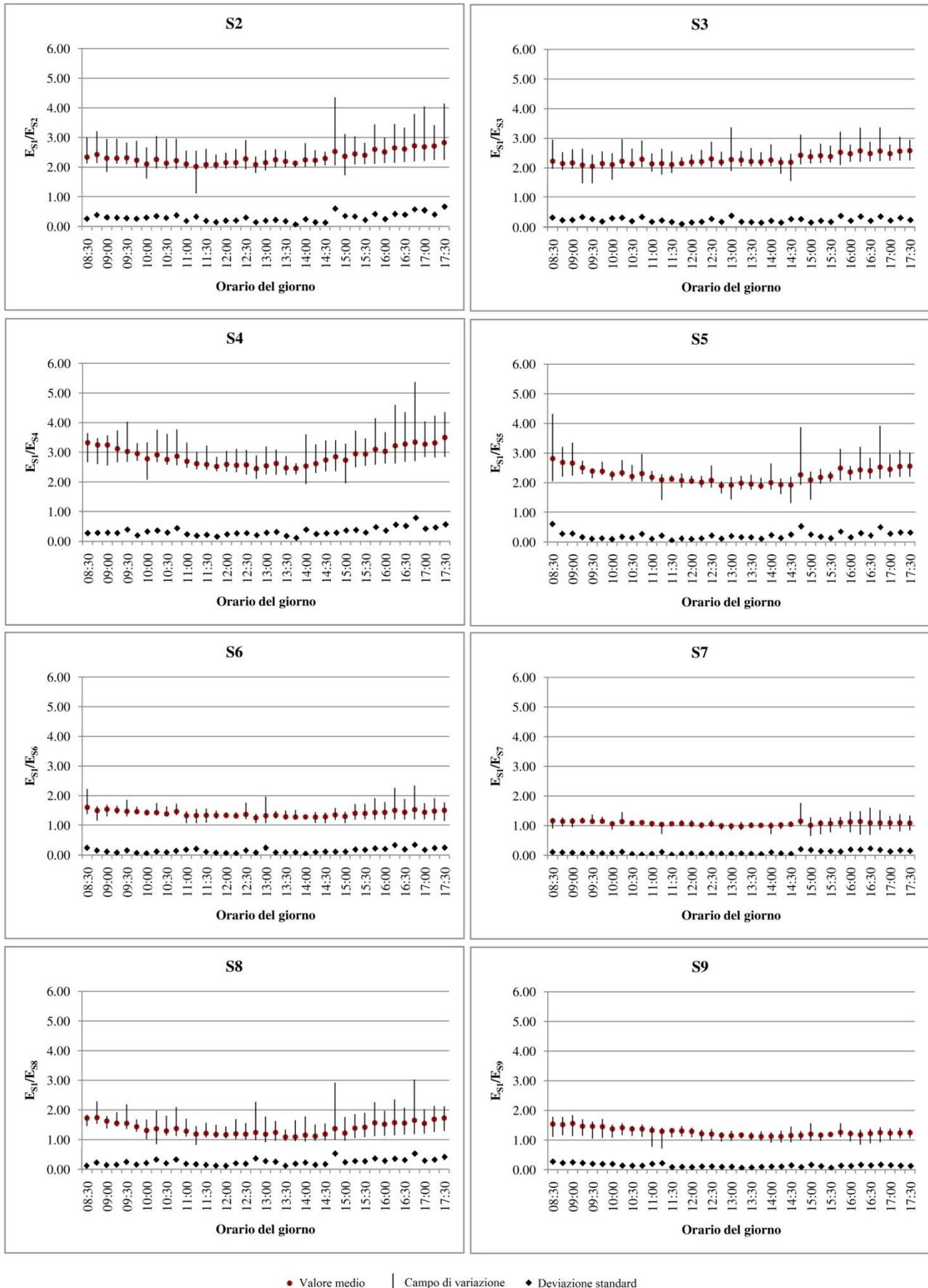


Figura 14: Configurazione 2 –E_{S1}/E_{Sn} in funzione dell'orario del giorno

Considerando la Configurazione 1, per quanto riguarda i sensori S2, S3, S4, S5 ed S9 le medie assumono valori molto simili per tutto l'arco della giornata, mentre oscillano maggiormente per gli altri sensori. A seconda del momento della giornata, i campi di variazione possono essere molto piccoli (0.2 nel caso di S5) o molto ampi (fino a 9.7 nel caso di S2 alle 8.30). Generalmente, le deviazioni standard sono piccole e solo raramente maggiori di 0.5. Considerando invece i sensori S6, S7 e S8, si osservano in linea generale maggiori oscillazioni dei valori medi durante la giornata, campi di variazione più ampi e deviazioni standard più elevate.

Per quanto riguarda la Configurazione 2 si osserva una distribuzione della luce più uniforme all'interno della stanza. I rapporti tra i vari punti dell'ambiente si mantengono infatti più o meno costanti per tutto l'arco della giornata. Sono particolarmente significativi a tal proposito i sensori S6, S7 ed S9, caratterizzati da campi di variazione molto piccoli (spesso pari a 0.2, 0.3). Per gli altri sensori, i campi di variazione sono maggiori (fino ad un massimo di 2.5 – cfr. S4 alle 16:45), ma comunque generalmente inferiori alla Configurazione 1. Le deviazioni standard sono sempre molto piccole e mai superiori a 0.8 per nessun sensore.

Le Figure 15 e 16 presentano i valori medi, i campi di variazione e le deviazioni standard dei rapporti E_{S1}/E_{Sn} riportati in funzione dei livelli di illuminamento orizzontale esterno registrati dal sensore S10. Nel caso della Configurazione 1, come si può vedere dal grafico, non sono presenti informazioni relative da 0 a 30 klx per S6 a causa di un guasto temporaneo del sensore.

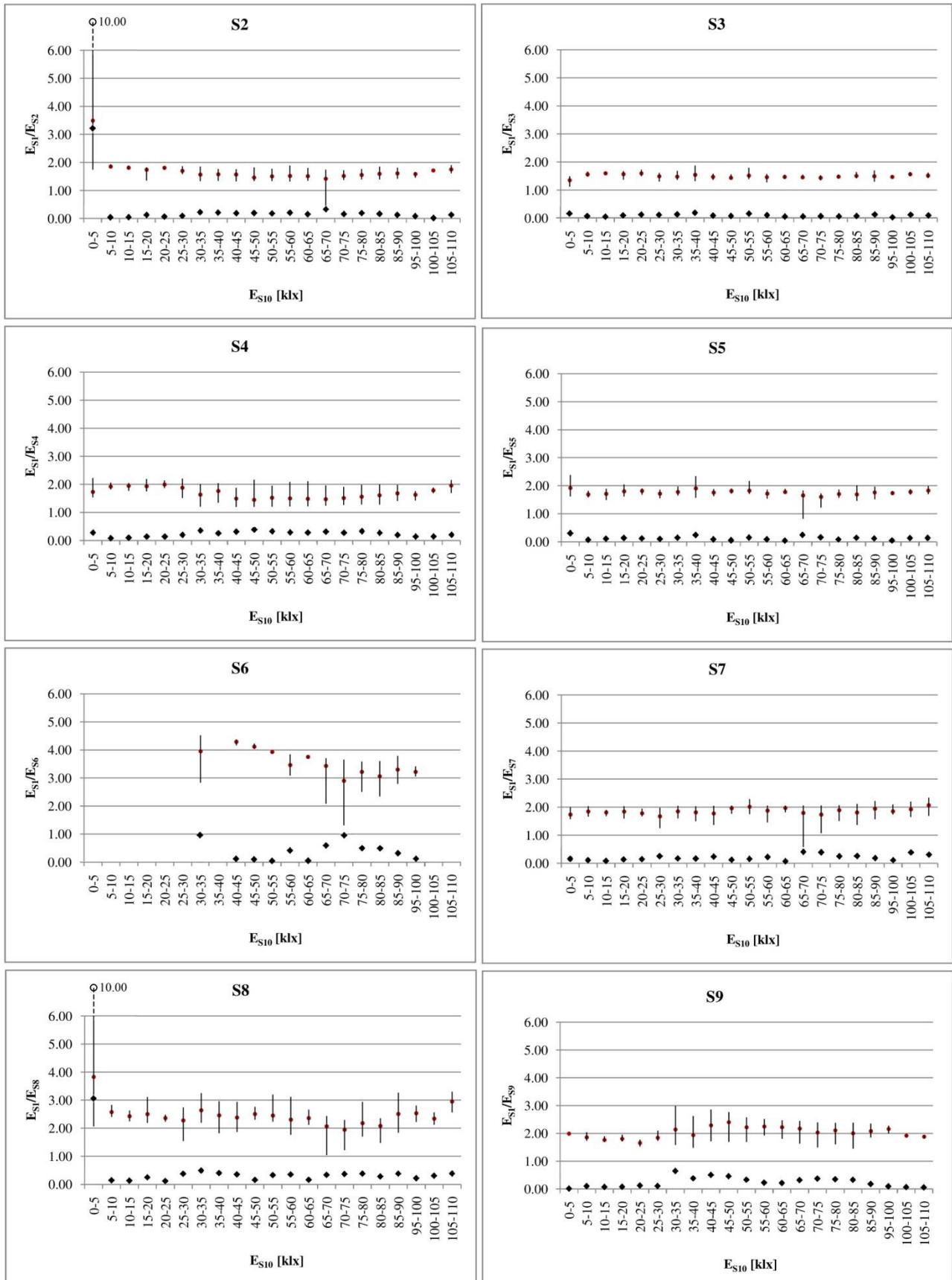


Figura 15: Configurazione 1 – E_{S1}/E_{Sn} in funzione dell'illuminamento esterno E_{S10}

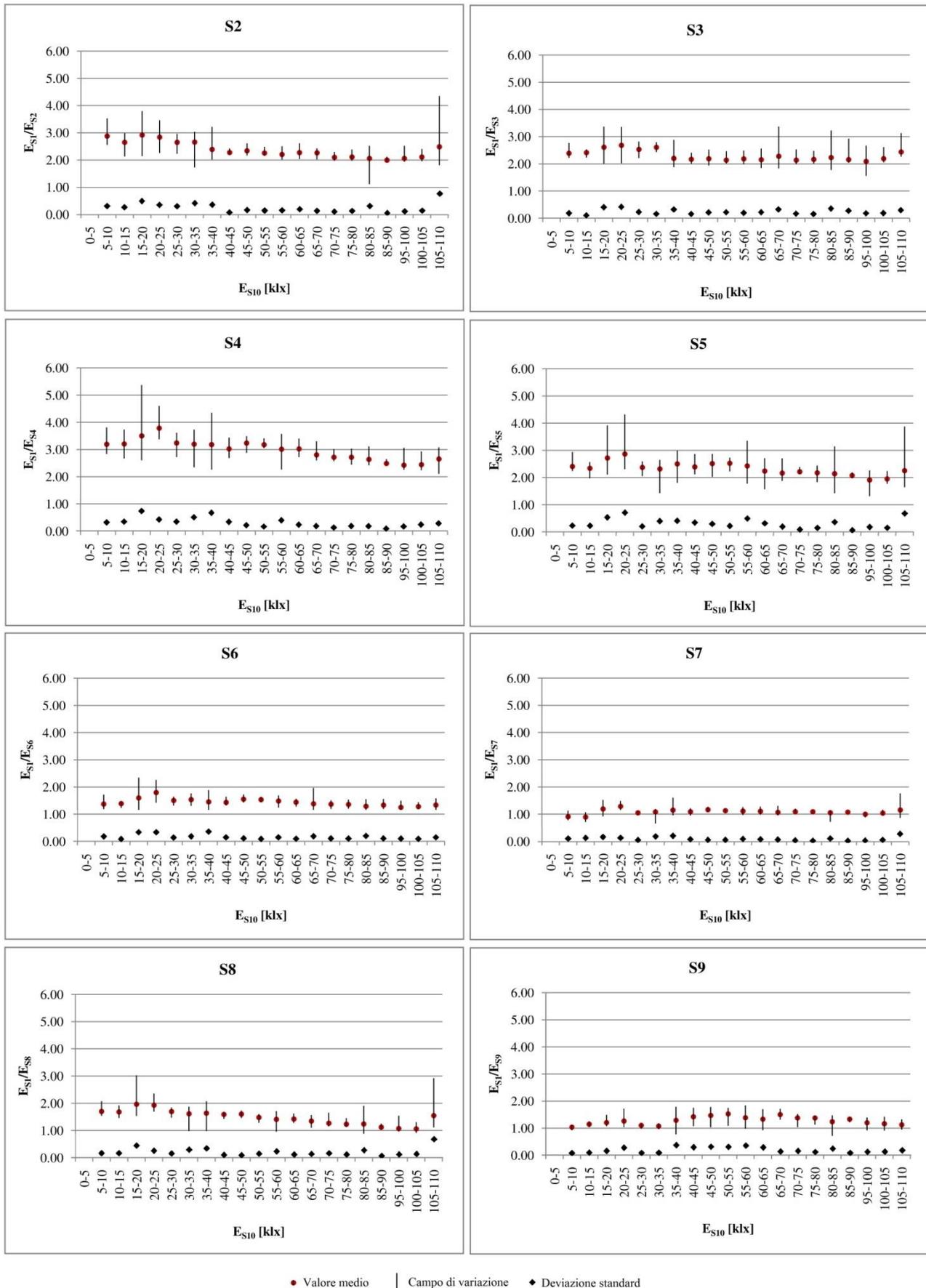


Figura 16: Configurazione 2 –ES1/ESn in funzione dell’illuminamento esterno ES10

Per entrambe le configurazioni si può osservare come i valori medi si mantengano per lo più costanti indipendentemente dalla variazione esterna di E_{S10} . Al contrario i campi di variazione assumono valori molto differenti a seconda del sensore e degli intervalli di illuminamento esterno. Nonostante ciò, però, le deviazioni standard sono comunque ridotte.

In sintesi, sulla base dei risultati fin qui riportati, si può concludere che, date le variazioni di disponibilità di luce naturale, i rapporti E_{S1}/E_{Sn} possono subire nell'arco della giornata molteplici oscillazioni. Nonostante ciò è possibile osservare che, per ciascun sensore, i valori medi di tali rapporti sono sempre contenuti in intervalli ben definibili e, in alcuni casi, si mantengono quasi costanti indipendentemente dal momento della giornata e dalle condizioni di illuminazione esterna. Inoltre, considerando che le deviazioni standard osservate sono sempre contenute, i valori medi di E_{S1}/E_{Sn} possono essere considerati rappresentativi per le molteplici condizioni di illuminazione naturale osservate. E' inoltre evidente che, assegnato un determinato ambiente, è possibile identificare al suo interno dei punti notevoli caratterizzati da condizioni di illuminazione molto vicine a quelle registrabili in corrispondenza dell'occhio. Tali punti sono i più adatti alla collocazione di un eventuale sensore per il controllo dell'impianto di illuminazione artificiale.

Per identificare la più adatta collocazione del sensore sperimentale è possibile effettuare per ciascun sensore, una analisi di regressione che metta in relazione E_{S1} ed E_{Sn} , come riportato nelle Figure 17, 18 e 19.

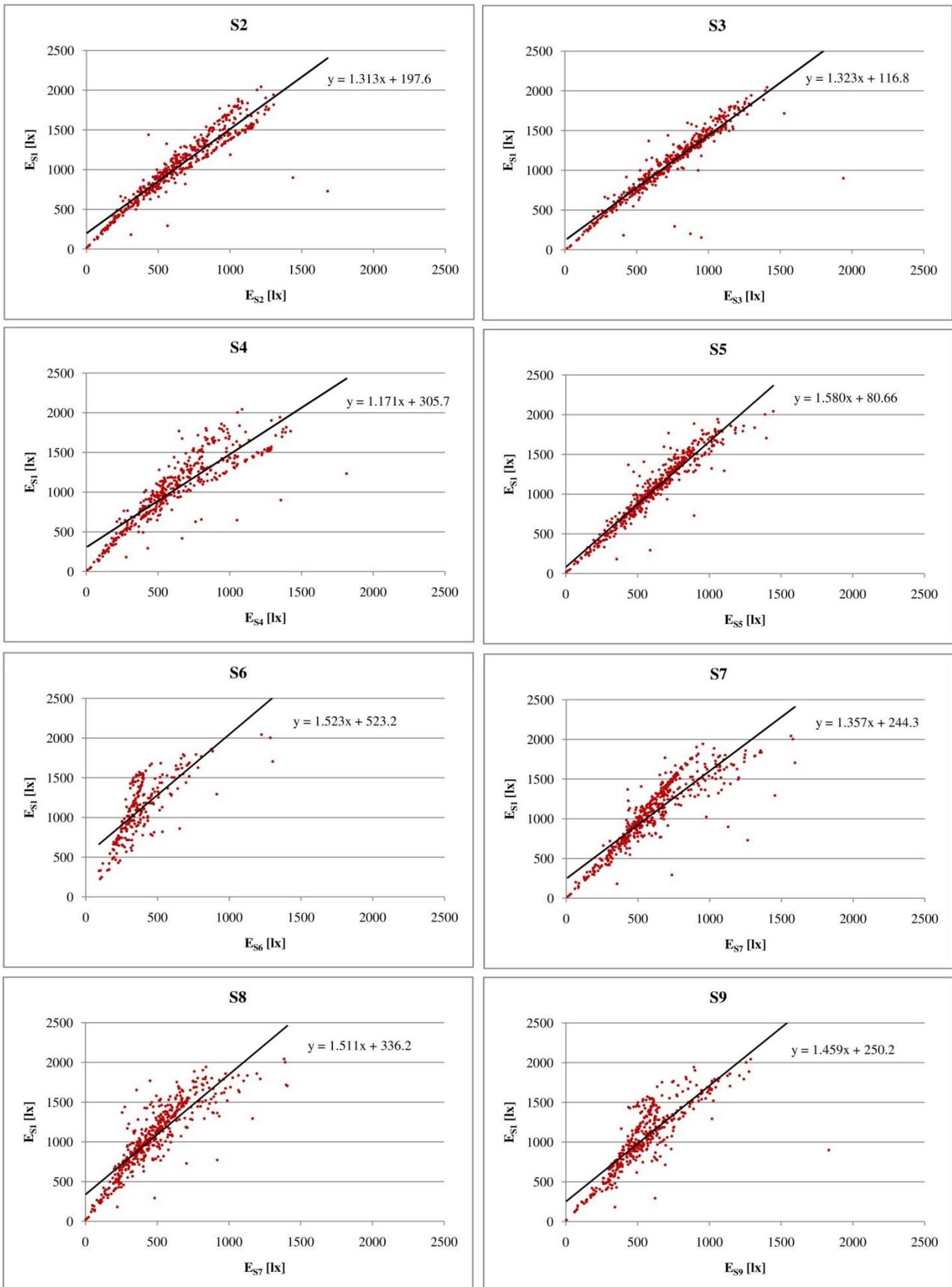


Figura 17: Configurazione 1 – Analisi di regressione

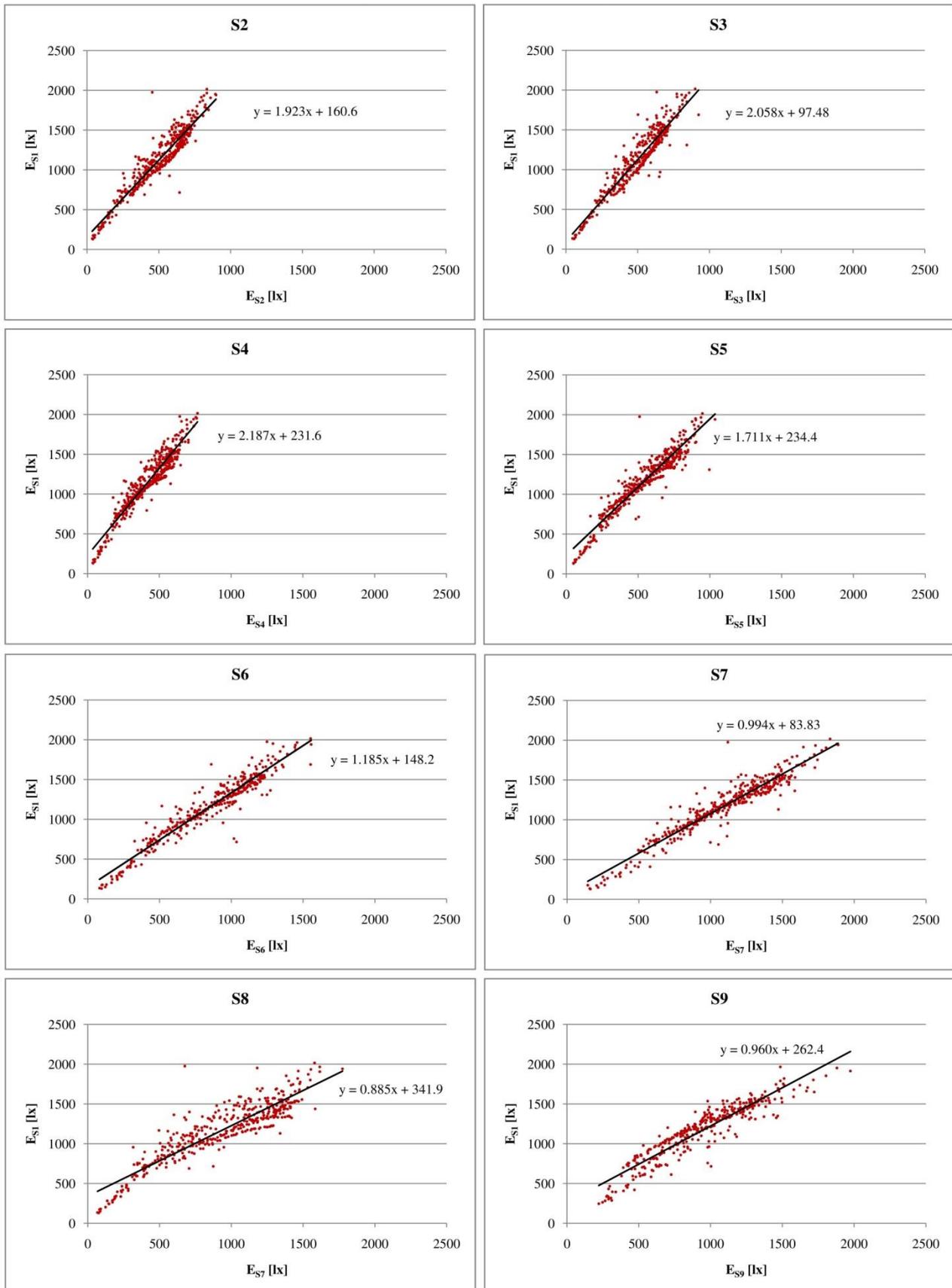


Figura 18: Configurazione 2 – Analisi di regressione

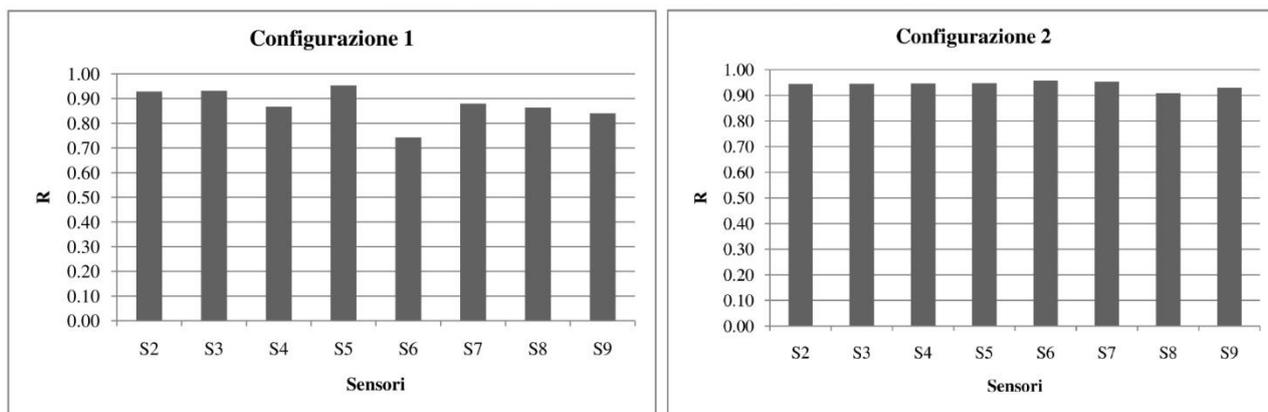


Figura 19: Coefficiente di correlazione R tra ES_n e ES1

Il sensore caratterizzato da un valore del coefficiente di correlazione R più prossimo a 1 sarà quello che rileva condizioni di illuminazione più simili a quelle misurabili in corrispondenza dell’occhio. Nello specifico, come è possibile osservare dalla Figura 19, il sensore più adatto sarebbe S5, mentre nel caso della Configurazione 2 è S6. Tuttavia, nel caso della Configurazione 2, come già precedentemente osservato, le condizioni di illuminazione all’interno della stanza sono più uniformi: infatti tutti i sensori sono caratterizzati da valori di R superiori a 0.9.

3.3 Individuazione del corretto posizionamento del sensore - Le simulazioni numeriche

La Figura 20 riporta per ciascuna delle due configurazioni il confronto tra i valori medi dei rapporti E_{S1}/E_{Sn} , le deviazioni standard corrispondenti e i valori dei coefficienti di correlazione R relativi ai dati misurati e simulati.

Soprattutto per la Configurazione 2 si osserva una buona corrispondenza tra i valori misurati e quelli simulati. Nel caso dei valori medi la differenza massima osservata è pari al 21% per S3, ma nel caso di S7, S8 e S9, la differenza è pari al 3-6%. Anche i valori di R sono molto simili con una differenza percentuale massima dell’8% circa sempre nel caso di S3. Le differenze maggiori si riscontrano per le deviazioni standard, ed in particolare, escludendo il caso di S6 ed S7 in cui i valori sono quasi uguali, in genere le simulazioni forniscono valori più bassi. Ciò significa che, nel caso delle simulazioni, sono registrati minori oscillazioni rispetto ai valori medi. Ciò è dovuto alle diverse condizioni climatiche riportate nel file climatico e al fatto che le giornate in cui sono state effettuate le misure sono state spesso variabili.

Per quanto riguarda la Configurazione 1 si riscontrano maggiori differenze. Ad esempio per quanto riguarda i valori medi, nel caso di S7 vi è una differenza percentuale del 55%, mentre per altri sensori si ottengono risultati quasi uguali, come ad esempio nel caso di S4. Anche in questo caso, escludendo S6, le deviazioni standard sono notevolmente più basse nel caso dei dati simulati. Per quanto riguarda R le differenze percentuali oscillano dal 4% al 26%.

Le Figure 21, 22, 23 e 24 sono riferite al modello di calcolo semplificato. Riportano per ciascun orientamento una mappa in falsi colori relativa ai coefficienti di correlazione R tra ciascun punto della griglia di calcolo e ciascun punto di osservazione. Ogni mappa è costituita da quattro settori relativi al soffitto (nella parte superiore) e alle tre pareti (una accanto all'altra nella parte inferiore), in modo da ricostruire lo sviluppo della stanza.

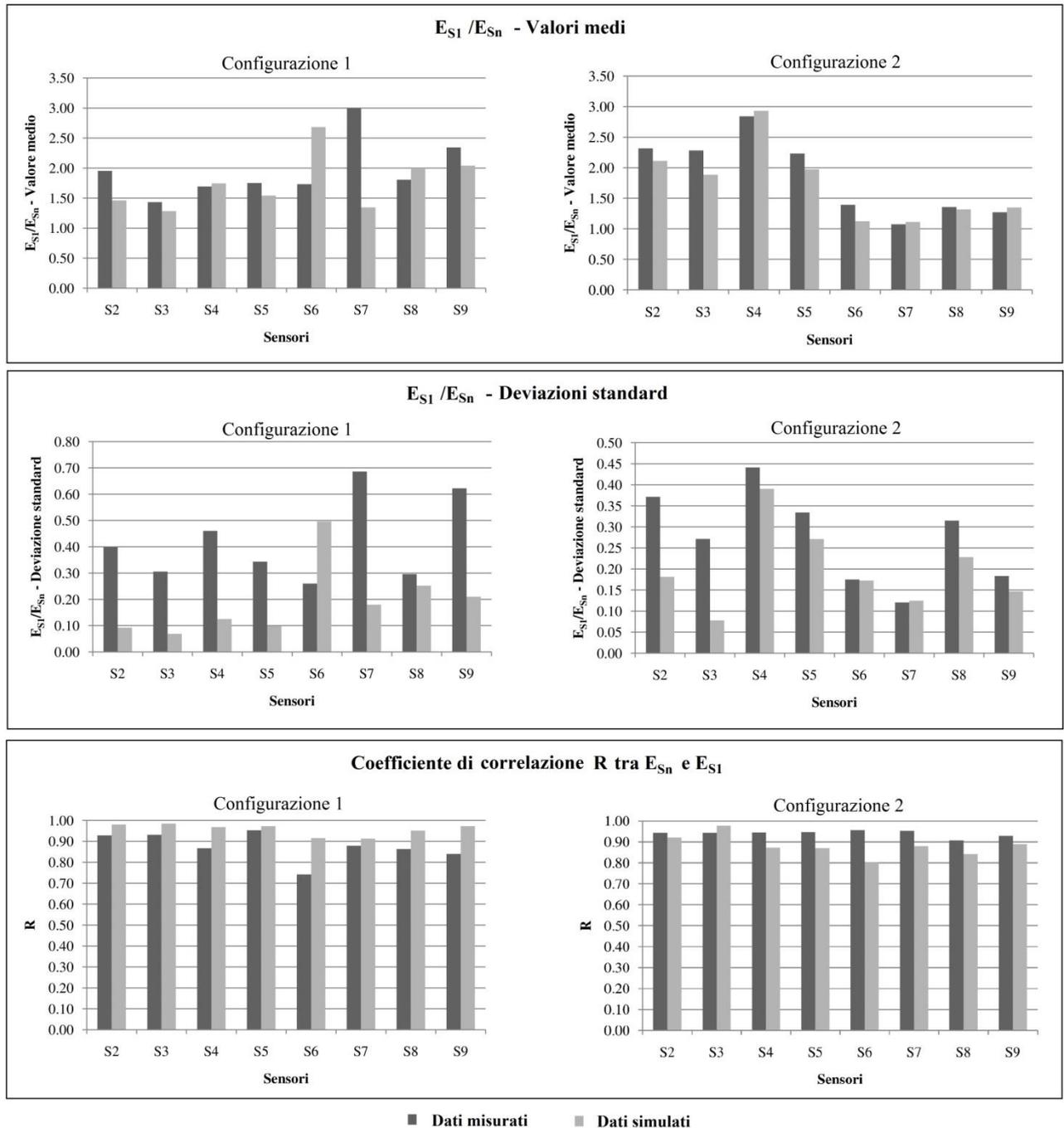


Figura 20: Confronto tra dati misurati e simulati

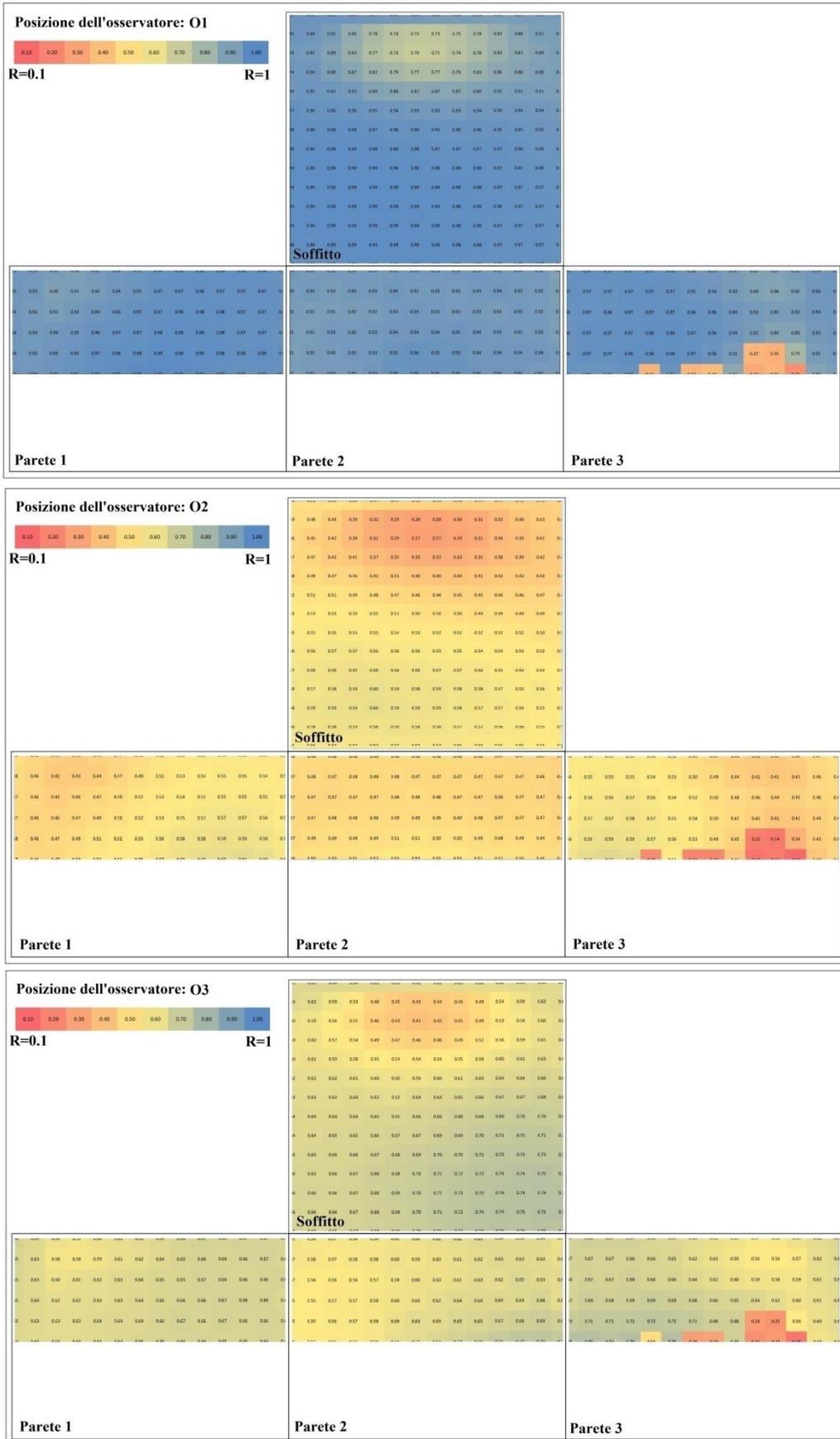


Figura 21:Mappe dei coefficienti di correlazione tra ciascun punto della griglia e ciascun punto di osservazione - Orientamento Est

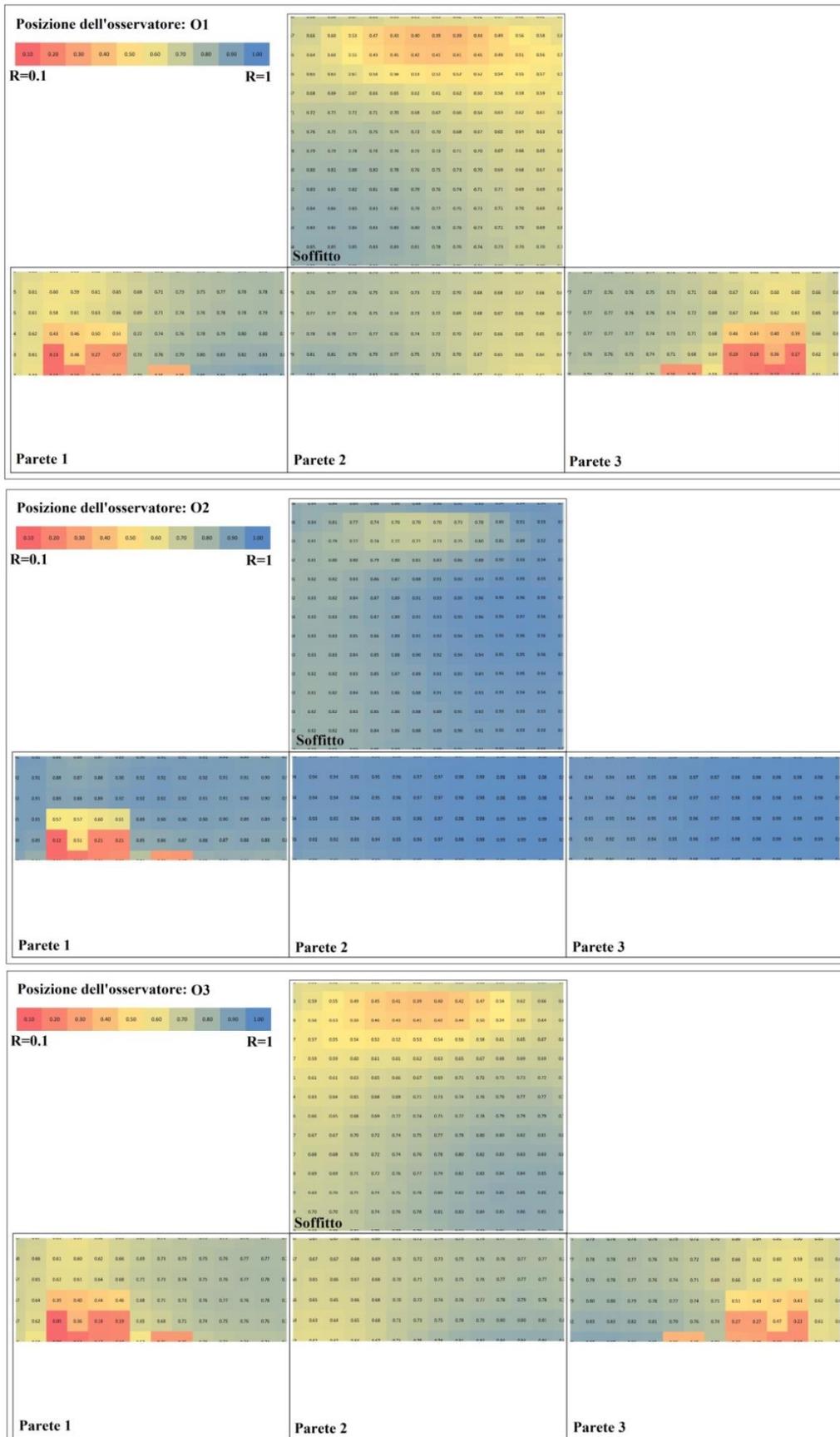


Figura 22:Mappe dei coefficienti di correlazione tra ciascun punto della griglia e ciascun punto di osservazione - Orientamento Sud

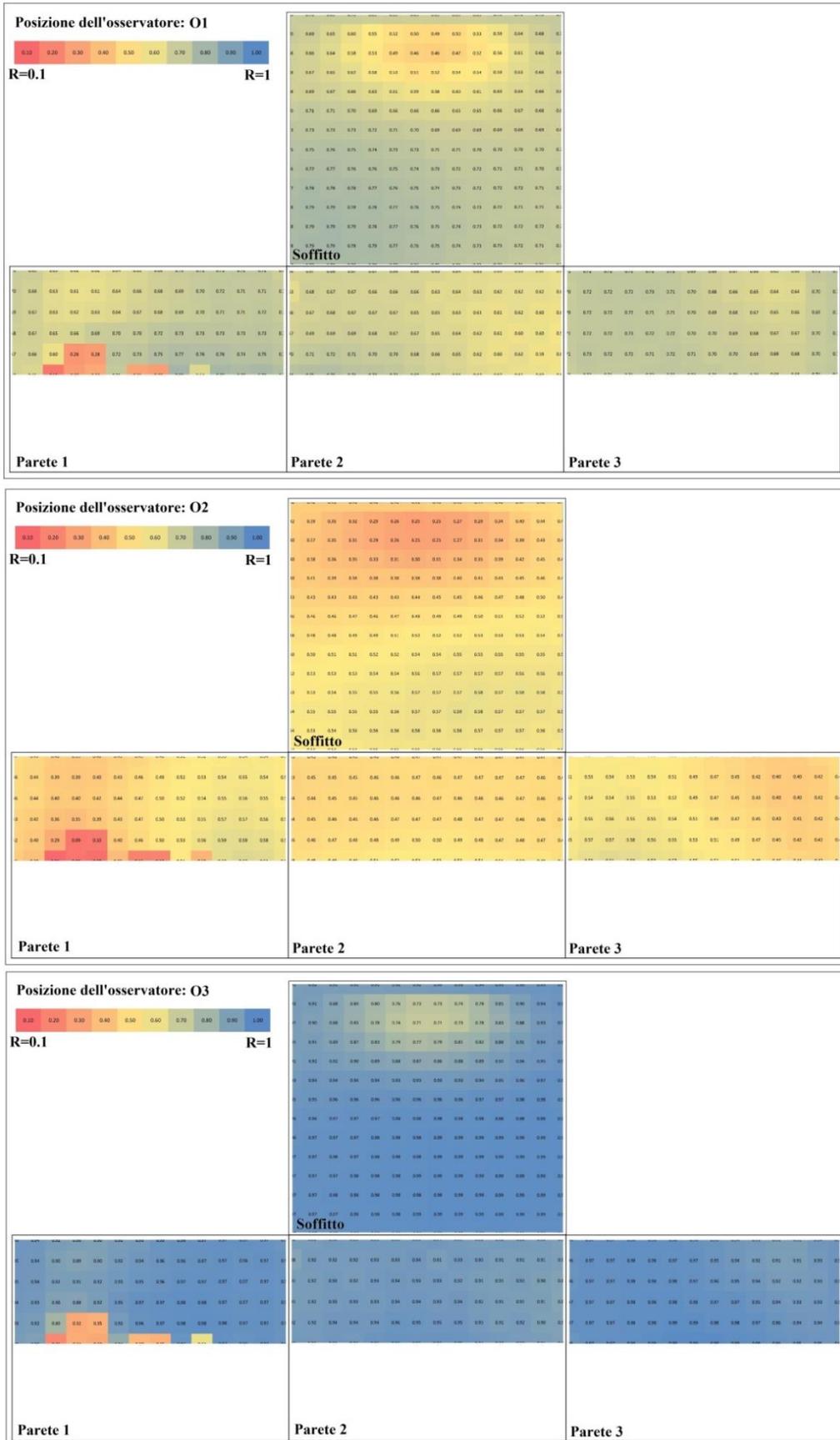


Figura 23:Mappe dei coefficienti di correlazione tra ciascun punto della griglia e ciascun punto di osservazione - Orientamento Ovest

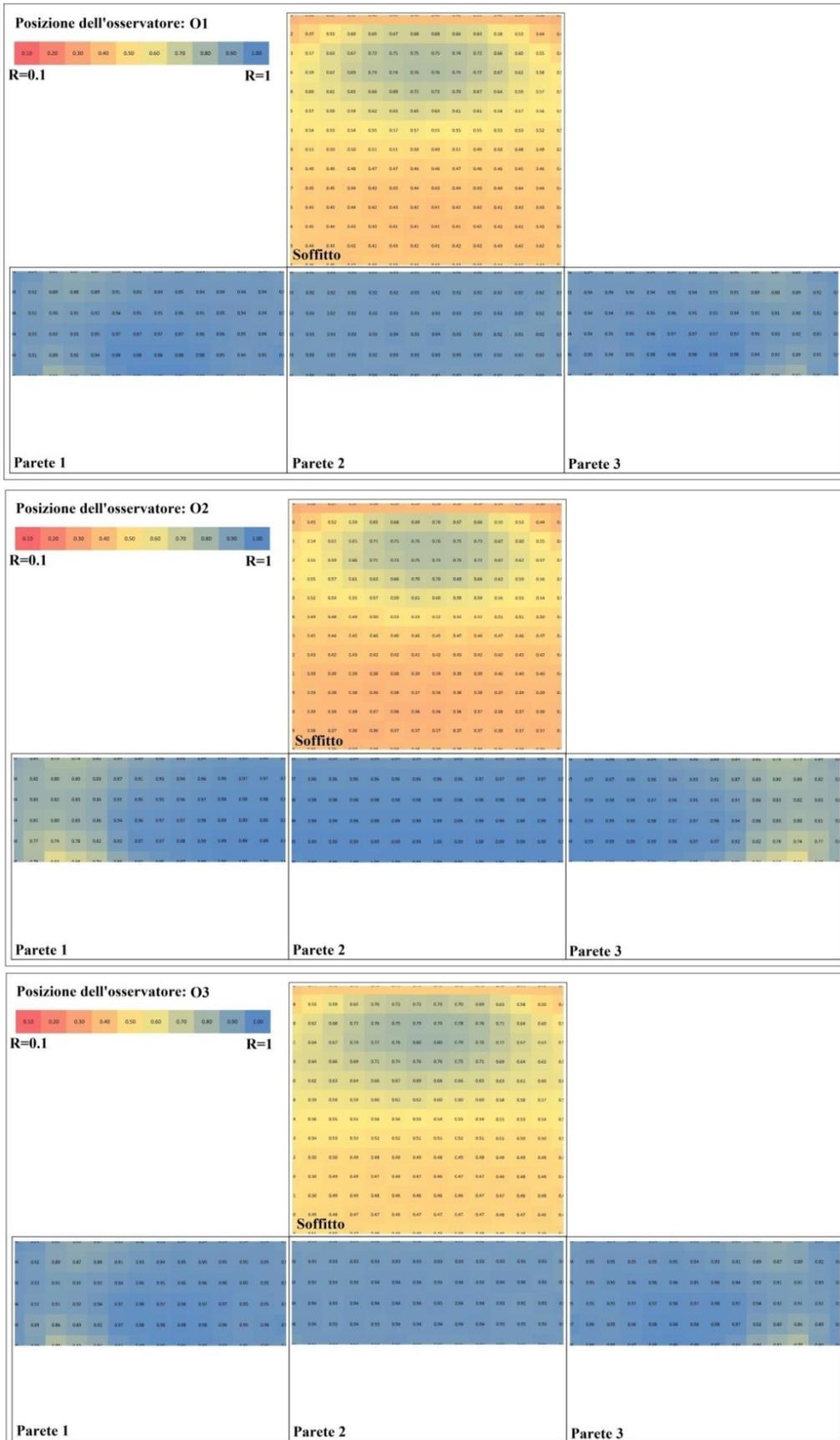


Figura 24: Mappe dei coefficienti di correlazione tra ciascun punto della griglia e ciascun punto di osservazione - Orientamento Nord

Dall'analisi delle immagini si può dedurre che a seconda dell'orientamento vi è un punto di osservazione privilegiato per il quale si verifica che il sensore potrebbe essere disposto in qualunque parte della stanza presentando sempre un'ottima correlazione tra gli illuminamenti da esso registrati e quelli registrati all'occhio. Per l'orientamento Est si tratta di O1, per l'orientamento Sud O2, per l'orientamento Ovest O3. Infine, per l'orientamento Nord, il soffitto presenta sempre coefficienti R più bassi delle pareti, mentre le pareti sono sempre caratterizzate da coefficienti R molto elevati, indipendentemente dal punto di osservazione. Osservando le mappe relative al soffitto, si può osservare che per gli orientamenti Est, Sud, Ovest, qualunque sia il punto di osservazione, si verifica sempre che, più ci si avvicina alla finestra, più si riducono i valori del coefficiente di correlazione. Per il Nord accade l'esatto contrario. La Parete 2, ossia quella posta di fronte alla finestra, indipendentemente dall'orientamento considerato presenta sempre una distribuzione piuttosto uniforme dei coefficienti R. Al contrario, per quanto riguarda le altre pareti (poste lateralmente rispetto alla finestra), escludendo l'orientamento Nord, presentano spesso delle aree localizzate a quota più bassa in cui i coefficienti R assumono valori significativamente più bassi rispetto al resto della superficie.

3.4 Analisi della componentistica sensoriale già presente sul mercato

Come in precedenza accennato il sensore sperimentale dovrà mutuare le proprie caratteristiche sia da quelle dei sensori tradizionali ambientali che da quelle dei dosimetri.

In linea di principio un fotosensore è costituito da una fotoresistenza (il componente fotosensibile che converte la luce in un segnale elettrico), un controller (che determina lo stato dell'impianto sulla base dei rilevamenti della fotocellula) e il sistema di alloggiamento della fotoresistenza. La fotoresistenza è dotata di un apposito filtro, dalle cui caratteristiche dipende la risposta spettrale del fotosensore stesso.

Come già anticipato, il fotosensore sperimentale sarà costituito da cinque fotoresistenze, ciascuna dotata del relativo filtro, caratterizzato da trasmittanza spettrale differente.

Il problema più complesso nella realizzazione del fotosensore è proprio quello di individuare i filtri adatti. I sistemi che più si avvicinano allo scopo sono quelli di piccolissime dimensioni prodotti per essere montati sugli actigrafi. Tra le aziende che producono tali sistemi sono state individuate:

- Linton Instrumentation (lintoninst.co.uk) - tale azienda fornisce i sensori per Philips
- Geneactiv (geneactiv.org)
- Camintech (Camintech.com)

Va inoltre segnalato che il "Light Research Center", di Troy (NY), produce dei sensori (sempre da indossare) con sensibilità prossima a quella individuata dal modello di Rea e basato sull'opponenza di diversi fotorecettori.

Tuttavia, la risposta spettrale di tale sistemi è perlopiù fotonica. La ricerca si è quindi orientata verso i produttori di componenti ottiche e nello specifico di filtri. Nonostante le aziende di tale settore siano numerose (tra queste si segnalano Edmund Optics - edmundoptics.com; Ecsma Optics - ecsmaoptics.com; Thor Labs - thorlabs.com) non è stato possibile identificare dei filtri utili allo scopo. Quelli disponibili sul mercato, infatti, sono tipicamente filtri a densità neutra o colorati, i cui fattori spettrali di trasmissione non sono compatibili con lo sviluppo del sensore.

4 Risultati non raggiunti o da perfezionare

Come risulta chiaro dai paragrafi precedenti, l'analisi della componentistica sensoriale già presente sul mercato non ha prodotto risultati utili all'immediata realizzazione del sensore e ha evidenziato la necessità di realizzare degli appositi filtri ottici "passabanda", studiati ad hoc per essere montati sulle 5

fotoresistenze che costituiranno il sensore sperimentale. A tal scopo si è intrapresa una collaborazione con l'unità ENEA di Portici, i cui ricercatori sono in grado, mediante tecniche di "sputtering" di ottenere vetri con particolari caratteristiche selettive. E' stata inoltre contattata l'azienda iGuzzini, per verificare le condizioni di implementazione del sensore innovativo in un sistema di controllo integrato dell'illuminazione. L'azienda ha manifestato interesse nei confronti della possibilità di avviare sperimentazioni condivise.

5 Conclusioni

La ricerca scientifica dimostra che la luce ha un ruolo fondamentale nel determinare le condizioni di benessere delle persone, influenzandone umore, stato di allerta, produttività, regolazione dei ritmi biologici. Il progetto degli impianti di illuminazione dovrebbe quindi aver cura non soltanto degli effetti sul comfort visivo degli utenti, ma tener conto anche delle risposte non visive dell'essere umano determinate dagli stimoli luminosi.

Le tecnologie attualmente disponibili consentono di progettare sistemi di illuminazione sempre più complessi, grazie ai quali è possibile modificare continuamente quantità e qualità della luce emessa dagli apparecchi illuminanti.

L'impiego di tali tecnologie, unito ai risultati delle moderne ricerche scientifiche, costituisce la base per mettere in campo nuove strategie di controllo dell'illuminazione, che consentano di assicurare all'utente condizioni di comfort in senso esteso, ossia tenendo conto anche degli effetti non visivi della luce.

Per far ciò è necessario ripensare le metodologie della progettazione, incentrarle sulle ampliate esigenze degli utenti e adattare le tecnologie esistenti, in modo da perseguire i nuovi obiettivi di progetto.

Da ciò nasce l'idea di realizzare il prototipo di un sistema di controllo sperimentale, che sia in grado di gestire l'illuminazione negli ambienti di lavoro, in modo da assicurare un'integrazione intelligente tra luce naturale ed artificiale e migliorare le prestazioni visive, incrementando contemporaneamente il comfort non visivo e favorendo la regolazione dei ritmi circadiani degli individui.

Il cuore di tale sistema, oggetto della presente ricerca, sarà un sensore sperimentale, che, diversamente da quelli attualmente presenti sul mercato, non dovrà monitorare la luce in termini di illuminamenti fotopici, ma definire gli stimoli che tale luce induce nei cinque fotorecettori del sistema visivo umano. Per far ciò, le registrazioni del sensore dovranno essere rappresentative della luce incidente al livello degli occhi dell'utente e non sul piano di lavoro.

Il corretto funzionamento dei sistemi di controllo dipende dalla qualità del sensore e dalle sue caratteristiche: tra queste è fondamentale il suo adeguato posizionamento in ambiente. A tal riguardo, il parametro che definisce le prestazioni del sensore è il rapporto tra il segnale che esso genera S , e l'illuminamento registrato in un punto rappresentativo: nel nostro caso l'illuminamento registrato in corrispondenza dell'occhio E_{eye} .

Una campagna di misure è stata effettuata per verificare come tale rapporto vari in funzione della disponibilità di luce naturale all'interno di un ambiente. Dai risultati è possibile dedurre le seguenti conclusioni:

- Indipendentemente dall'orientamento e dalle dimensioni delle finestre, dato un ambiente, i rapporti S/E_{eye} possono variare molto nell'arco della giornata, in funzione della posizione del sensore e della distribuzione di luce naturale. Tuttavia, quando le condizioni di luce naturale si mantengono stabili nell'arco della giornata, è possibile osservare che tali rapporti sono sempre contenuti in intervalli caratteristici (i cui estremi dipendono dalla posizione in ambiente del sensore) e, per alcune localizzazioni di sensore, si mantengono quasi costanti.

- Calcolando le medie dei valori di S/E_{eye} registrati in diverse giornate nello stesso orario, si è verificato che per alcune posizioni del sensore, si può osservare per tutta la giornata un andamento quasi costante del rapporto S/E_{eye} .
- Stessa cosa accade se i valori medi vengono calcolati in funzione degli illuminamenti orizzontali esterni: definiti degli intervalli di illuminamento orizzontale esterno, calcolando le medie tra tutti i valori di S/E_{eye} corrispondenti ad un determinato intervallo, al variare delle condizioni esterne, i valori medi di S/E_{eye} si mantengono costanti.
- I valori medi, sia che vengano calcolati in funzione dell'orario della giornata, sia che vengano definiti in funzione della disponibilità della luce naturale all'esterno, possono essere considerati significativi in quanto ad essi corrispondono sempre bassi valori di deviazioni standard, anche quando si osserva un campo di variazione molto ampio.
- Come era facile aspettarsi dai risultati precedenti le analisi di regressione hanno mostrato per alcuni sensori una correlazione lineare molto significativa tra S ed E_{eye} per diverse possibili posizioni di sensore.

L'impiego delle simulazioni dinamiche di luce naturale ha permesso, inoltre, di effettuare le seguenti considerazioni:

- C'è una buona corrispondenza tra il coefficiente di correlazione R tra S ed E_{eye} misurato nella test-room e quello calcolato tramite le simulazioni dinamiche.
- Studiando un modello ideale in cui sono state variati orientamento della finestra e punto di vista dell'osservatore, è stato confermato quanto dedotto dall'analisi dei risultati della campagna di misure: la correlazione tra registrazioni del sensore e illuminamento all'occhio è influenzata dalla posizione del punto di osservazione dell'utente, da quella del sensore, dalla disponibilità di luce naturale in ambiente interno e quindi da tutti quei parametri che la influenzano (condizioni meteorologiche, orientamento e dimensioni delle finestre, caratteristiche geometriche e ottiche dell'ambiente, ecc).
- Dato un punto di osservazione ed un determinato ambiente è possibile identificare sulle superfici che lo compongono (soffitto e pareti laterali) ampie aree in cui il sensore può essere disposto e funzionare in modo efficiente.
- Nel caso dell'ambiente osservato, se il sensore viene montato a soffitto la correlazione tra S ed E_{eye} peggiora avvicinandosi alla finestra e migliora allontanandosi da essa per tutti gli orientamenti tranne che a Nord; per questo orientamento succede l'esatto contrario. Per quanto riguarda la parete di fronte alla finestra, i valori dei coefficienti di correlazione risultano molto simili tra loro indipendentemente dalla posizione del sensore. Se si intende montare il sensore sulle pareti poste ai lati della finestra, al contrario, è necessaria una maggiore attenzione poiché esse sono caratterizzate da gradienti di R significativi per qualunque orientamento.
- I risultati sia della campagna di misure che delle simulazioni fanno supporre che variando ulteriormente i parametri ambientali del modello ideale osservato, ad esempio modificandone le dimensioni, le proprietà ottiche o la localizzazione geografica, si otterrebbero risultati differenti e quindi dal mappaggio delle superfici dell'ambiente si trarrebbero indicazioni differenti per la collocazione del sensore.

In sintesi, date le complessità legate all'identificazione della posizione ottimale del sensore, un mappaggio dell'ambiente, basato sulle simulazioni dinamiche come quello proposto, può essere molto utile

per fornire indicazioni per la progettazione del sistema. In fase di installazione sarà poi necessario, tramite delle misure in campo, fondamentali in qualsiasi fase di calibrazione, verificare il posizionamento ottimale, tra quelli suggeriti dai risultati proposti dai software di calcolo.

Le ricerche sulle tecnologie di sensori esistenti hanno inoltre consentito di definire quali dovrebbero essere le caratteristiche del sensore sperimentale ed hanno evidenziato la mancanza sul mercato di filtri “passabanda” adeguati per la realizzazione del prototipo e la necessità di realizzarli appositamente.

6 Riferimenti bibliografici

- [1] P. Badia, B. Myers, M. Boecker, J. Culpepper, J. Harsh, Bright light effects on body temperature, alertness, EEG and behavior, *Physiology & behavior* 50(3) (1991) 583-588.
- [2] P.R. Mills, S.C. Tomkins, L.J. Schlangen, The effect of high correlated colour temperature office lighting on employee wellbeing and work performance, *Journal of circadian rhythms* 5(1) (2007) 1.
- [3] A.U. Viola, L.M. James, L.J. Schlangen, D.-J. Dijk, Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality, *Scandinavian journal of work, environment & health* (2008) 297-306.
- [4] R.J. Lucas, S.N. Peirson, D.M. Berson, T.M. Brown, H.M. Cooper, C.A. Czeisler, M.G. Figueiro, P.D. Gamlin, S.W. Lockley, J.B. O’Hagan, Measuring and using light in the melanopsin age, *Trends in neurosciences* 37(1) (2014) 1-9.
- [5] J.F. Duffy, K.P. Wright, Entrainment of the human circadian system by light, *Journal of biological rhythms* 20(4) (2005) 326-338.
- [6] J.F. Duffy, C.A. Czeisler, Effect of light on human circadian physiology, *Sleep medicine clinics* 4(2) (2009) 165-177.
- [7] D.C. Klein, R.Y. Moore, S.M. Reppert, *Suprachiasmatic nucleus: the mind's clock*, Oxford University Press, USA1991.
- [8] T. Roenneberg, M. Mewes, The network of time: understanding the molecular circadian system, *Current Biology* 13(5) (2003) R198-R207.
- [9] J.J. Gooley, S.M. Rajaratnam, G.C. Brainard, R.E. Kronauer, C.A. Czeisler, S.W. Lockley, Spectral responses of the human circadian system depend on the irradiance and duration of exposure to light, *Science translational medicine* 2(31) (2010) 31ra33-31ra33.
- [10] J. Doljansky, H. Kannety, Y. Dagan, Working under daylight intensity lamp: an occupational risk for developing circadian rhythm sleep disorder?, *Chronobiology international* 22(3) (2005) 597-605.
- [11] A.A. Nazzari, A new evaluation method for daylight discomfort glare, *International Journal of Industrial Ergonomics* 35(4) (2005) 295-306.
- [12] R.G. Stevens, D.E. Blask, G.C. Brainard, J. Hansen, S.W. Lockley, I. Provencio, M.S. Rea, L. Reinlib, Meeting report: the role of environmental lighting and circadian disruption in cancer and other diseases, *Environmental health perspectives* (2007) 1357-1362.
- [13] S. Gery, H.P. Koeffler, Circadian rhythms and cancer, *Cell Cycle* 9(6) (2010) 1097-1103.
- [14] L. Bellia, A. Pedace, G. Barbato, Report RdS/PAR2014/031 - Caratterizzazione dell'illuminazione naturale negli ambienti di lavoro, 2014.
- [15] M.S. Rea, M.G. Figueiro, A. Bierman, R. Hamner, Modeling the spectral sensitivity of the human circadian system, *Lighting Research and Technology* (2011) 1477153511430474.
- [16] IES-LM-83-12. Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE), 2013.
- [17] DIVA Web Page. <<http://diva4rhino.com/>>, (accessed 13/07/2016.).
- [18] D.L.D. Laura, K.W. Houser, R.G. Mistrick, Chapter 16 - Lighting controls *The Lighting Handbook Tenth Edition Reference and Application*, Illuminating Engineering Society 2011.
- [19] C. Aghemo, A. Pellegrino, S. Cammarano, Report RSE/2009/11 - Sistemi di gestione e controllo della luce naturale e artificiale, 2009.
- [20] A. Bierman, K.M. Conway, Characterizing daylight photosensor system performance to help overcome market barriers, *Journal of the Illuminating Engineering Society* 29(1) (2000) 101-115.
- [21] S. Ranasinghe, R. Mistrick, A study of photosensor configuration and performance in a daylighted classroom space, *Journal of the Illuminating Engineering Society* 32(2) (2003) 3-20.
- [22] A.-S. Choi, K.-D. Song, Y.-S. Kim, The characteristics of photosensors and electronic dimming ballasts in daylight responsive dimming systems, *Building and Environment* 40(1) (2005) 39-50.

- [23] L. Doulos, A. Tsangrassoulis, F. Topalis, The impact of colored glazing and spectral response of photosensors in the estimation of daylighting energy savings, Proceedings of the 2nd PALENC Conference and the 28th AIVC Conference, 2007.
- [24] L. Doulos, A. Tsangrassoulis, F. Topalis, Multi-criteria decision analysis to select the optimum position and proper field of view of a photosensor, Energy Conversion and Management 86 (2014) 1069-1077.
- [25] NLPIP - National Lighting Product Information Photosensors Program, Dimming and Switching Systems for Daylight Harvesting, 2007.
- [26] L. Doulos, A. Tsangrassoulis, F. Topalis, The role of spectral response of photosensors in daylight responsive systems, Energy and Buildings 40(4) (2008) 588-599.
- [27] F. Rubinstein, G. Ward, R. Verderber, Improving the performance of photo-electrically controlled lighting systems, Journal of the Illuminating Engineering Society 18(1) (1989) 70-94.
- [28] R. Mistrick, J. Thongtipaya, Analysis of daylight photocell placement and view in a small office, Journal of the Illuminating Engineering Society 26(2) (1997) 150-160.
- [29] E.S. Lee, D. DiBartolomeo, S. Selkowitz, The effect of Venetian blinds on daylight photoelectric control performance, Journal of the Illuminating Engineering Society 28(1) (1999) 3-23.
- [30] R. Mistrick, C.-H. Chen, A. Bierman, D. Felts, A comparison of photosensor-controlled electronic dimming systems in a small office, Journal of the Illuminating Engineering Society 29(1) (2000) 66-80.
- [31] M. Chiogna, R. Albatici, A. Frattari, Electric lighting at the workplace in offices: Efficiency improvement margins of automation systems, Lighting Research and Technology 45(5) (2013) 550-567.
- [32] R.J. Lucas, S.N. Peirson, D.M. Berson, T.M. Brown, H.M. Cooper, C.A. Czeisler, M.G. Figueiro, P.D. Gamlin, S.W. Lockley, J.B. O'Hagan, L.L.A. Price, I. Provencio, D.J. Skene, G.C. Brainard, Irradiance toolbox. <<http://personalpages.manchester.ac.uk/staff/robert.lucas/Lucas%20et%20al%202014%20suppl%20text.pdf>>, 2013 (accessed 13/07/2016.).

7 Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Prof.ssa Laura Bellia. Dottore di ricerca e professore ordinario in Fisica Tecnica Ambientale presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II, è docente di corsi di Fisica Tecnica Ambientale ed Illuminotecnica presso corsi di Laurea in Ingegneria ed Architettura. Svolge attività di ricerca, testimoniata da oltre 100 pubblicazioni su riviste e convegni internazionali e nazionali, nei settori dell'energetica, della termofisica dell'edificio e dell'illuminotecnica. Con riferimento a quest'ultima si occupa di illuminazione per i beni culturali, effetti non visivi della luce, qualità dell'ambiente luminoso con sorgenti LED, utilizzo della luce naturale per il risparmio energetico ed il benessere, efficienza energetica nell'illuminazione. Svolge attività di "referee" per prestigiose riviste internazionali di settore e per convegni internazionali.

Arch. Francesca Fragliasso. Dottoranda al primo anno di studi presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. Svolge attività di ricerca nel campo dell'illuminotecnica con particolare attenzione ai temi dell'integrazione tra luce naturale ed artificiale per il risparmio energetico e il miglioramento del confort degli utenti, dell'efficienza energetica nell'illuminazione e della qualità dell'ambiente luminoso. E' autrice di diverse pubblicazioni su riviste scientifiche e convegni nazionali ed internazionali.

Arch. Emanuela Stefanizzi. Borsista di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Salerno. La sua attività di ricerca si svolge presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II e riguarda l'illuminazione per i beni culturali e la qualità dell'illuminazione negli ambienti interni, con particolare attenzione agli effetti sulla percezione del colore. E' autrice di diverse pubblicazioni su riviste scientifiche e convegni nazionali ed internazionali.