



Ricerca di Sistema elettrico

# Analisi dell'influenza dei fattori contestuali sulla resa cromatica delle sorgenti di luce

A. Rizzi, C. Bonanomi



## ANALISI DELL'INFLUENZA DEI FATTORI CONTESTUALI SULLA RESA CROMATICA DELLE SORGENTI DI LUCE

A. Rizzi, C. Bonanomi (Dipartimento di Informatica, Università degli Studi di Milano)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

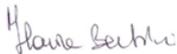
Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia

Progetto: Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi

Obiettivo: Sviluppo dei prodotti efficienti per l'illuminazione – Progettazione e sperimentazione di installazioni a LED

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione tra ENEA e Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Informatica, per una attività di ricerca dal titolo: "Analisi dell'influenza dei fattori contestuali sulla resa cromatica delle sorgenti di luce"

Responsabile scientifico ENEA: Laura Blaso



Responsabile scientifico Università degli Studi di Milano: prof. Alessandro Rizzi

## Indice

SOMMARIO.....	4
INTRODUZIONE.....	5
1 MISURARE LA RESA CROMATICA .....	5
2 APPARENZA CROMATICA ED EFFETTO DEL CONTESTO SULLA PERCEZIONE DEL COLORE .....	6
3 FASE SPERIMENTALE .....	6
3.1 LE PATCH .....	7
3.2 SETUP DELL'ESPERIMENTO .....	9
3.3 SVOLGIMENTO DELL'ESPERIMENTO .....	10
3.4 ANALISI DEI RISULTATI .....	11
3.5 CRITICITÀ RICONTRATE .....	16
3.6 NUOVI TEST .....	18
4 DISSEMINAZIONE DEI RISULTATI.....	21
5 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	22
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	22
7 CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	23

## Sommario

Questo report raccoglie il lavoro svolto per studiare approcci classici e alternativi all'indice di resa cromatica (CRI). Tale indice ha lo scopo di valutare la bontà nella resa cromatica di una sorgente di luce. Recentemente l'introduzione di nuove sorgenti illuminanti a LED, ha mostrato i limiti di tale metodo. Infatti, l'attuale CRI restituisce valori bassi per i nuovi illuminanti anche se questi sono caratterizzati da una buona resa cromatica. L'affidabilità di questo indice è quindi bassa per quanto riguarda una fascia di mercato in forte crescita come quello dei sistemi di illuminazione basati su LED. Questo ha portato molti gruppi di ricerca a studiare nuovi metodi per la valutazione delle sorgenti di luce.

Il report è così strutturato: dopo una breve introduzione sono descritti i limiti del metodo standard usato per calcolare l'indice di resa cromatica, inoltre sono citati molti dei nuovi indici recentemente introdotti per cercare di superare le criticità del CRI standard (sezione 1). Tuttavia anticipiamo che nessuno di tali indici considera il contesto, cioè ciò che circonda lo stimolo visivo considerato. Nella sezione 2 introduciamo il concetto di apparenza e commentiamo perché è importante tenerne conto nel calcolo del CRI. La sezione 3 è dedicata alla descrizione dell'esperimento svolto, dal protocollo ai risultati ottenuti, facendo particolare attenzione alle criticità riscontrate. Nella sezione 4 viene presentato brevemente il lavoro di disseminazione fatto quest'anno relativo ai risultati degli anni precedenti. Infine la sezione 5 racchiude le conclusioni e i possibili sviluppi futuri.

Il lavoro svolto quest'anno è il proseguo del lavoro dell'anno scorso, motivo per cui saranno presenti molti riferimenti al report dell'anno precedente.

## Introduzione

Con il lavoro di quest'anno prosegue lo studio ben avviato negli anni precedenti relativamente all'utilizzo di approcci classici ed alternativi per la valutazione dell'indice di resa cromatica (CRI).

Il Color Rendering Index (CRI), detto anche indice di resa cromatica, misura quanto una sorgente luminosa preservi l'apparenza cromatica degli oggetti osservati sotto di essa. Tuttavia le nuove tecnologie di illuminazione a LED, avendo uno spettro non continuo, hanno mostrato i limiti di tale formula.

Per ovviare a questo problema sono stati sviluppati nuovi indici, molti dei quali citati nelle sezioni successive, con l'intento di superare tali limiti. Un aspetto che si è cercato di semplificare in tutti questi indici è il peso e le modalità della visione umana e dell'interazione della luce con la materia, con quello che ne consegue: distribuzione spaziale della luce, effetto del contesto, effetto del contrasto, variazione dell'apparenza.

Nella prima parte di questo report, sono presentati in modo riassuntivo i principali limiti dell'indice di resa cromatica e a seguire una breve panoramica dei principali indici sviluppati per tentare di sopperire ai limiti del CRI standard.

Per valutare eventuali direzioni di miglioramento dell'indice di resa cromatica, in particolar modo per considerare il contesto nel calcolo del suo valore sono stati effettuati, in collaborazione con ENEA (Laboratorio Luce di Ispra, una serie di esperimenti con utenti. Questi esperimenti, descritti nella sezione 3 e continuazione del filone sperimentale iniziato l'anno precedente, aggiungono nuovi dati mediante una variante del primo esperimento, e nuove elaborazioni dei risultati ottenuti.

## 1 Misurare la resa cromatica

Questa sezione riassume i limiti del CRI, già ampiamente discussi nel report precedente (Report RdS/2013/108), e descrive alcuni degli approcci alternativi sviluppati da enti o centri di ricerca.

L'indice di resa cromatica è un numero che indica quanto una sorgente di luce conservi l'aspetto dei colori degli oggetti. L'International Lighting Vocabulary riporta che l'indice di resa cromatica è "[the] effect of an illuminant on the color appearance of objects by conscious or subconscious comparison with their color appearance under a reference illuminant." [1].

Questo indice viene utilizzato in pratica per valutare la qualità di una sorgente luminosa.

In generale, la maggior parte delle misure di indice di resa cromatica usano come input la distribuzione spettrale di potenza (SPD) della sorgente. Ne segue che, data la modalità di calcolo del CRI, le fonti a spettro non continuo tendono ad avere un valore inferiore di quelle a spettro continuo. Visivamente però questo non si traduce necessariamente in una resa cromatica più povera, come riportato da recenti esperimenti sulle sorgenti [2].

Segue una lista dei principali limiti del CRI:

- Basato unicamente sulla distribuzione spettrale di potenza della sorgente di luce.
- Utilizza un piccolo insieme di campioni di colore nella propria procedura.
- Utilizza una trasformazione di adattamento cromatico rappresentata con modelli estremamente semplificati del sistema visivo umano.
- È richiesta una sorgente di luce di riferimento con cui confrontare la sorgente test.
- La capacità dell'illuminante sotto test di mantenere l'apparenza di un generico colore è riassunta in un singolo valore

La procedura per il calcolo del CRI standard è datata 1965 a cui sono seguiti alcuni aggiustamenti minori [3]. Come già anticipato vari studi recenti hanno dimostrato che tale indice non è adatto a stimare la resa visiva delle nuove tecnologie di illuminazione a banda stretta, come alcune lampade fluorescenti o i led bianchi [2].

Davis e Ohno [4-5] propongono un Color Quality Scale (CQS), che tiene conto degli spostamenti di tinta e saturazione. Geisler-Moroder e Dur [6] hanno aggiornato la versione standard del CRI, utilizzando la stessa procedura, ma basandosi su equazioni diverse. Anche la CIE ha lavorato sull'ideazione di un nuovo indice di resa cromatica, denominato R96a e pubblicato nel 1999 ma mai divenuto uno standard [7]. Szabò e al. [8]

hanno ideato un indice basato sulla variazione dell'armonia dei colori tra sorgente di riferimento e sorgente test. Smet et al. [9-10] hanno ideato un metodo basato sulla memoria (MCRI: memory color rendering index). Da Pos et al. [11] delineano due nuovi indici di resa cromatica in cui non si fa riferimento allo spettro della sorgente di luce da analizzare ma all'influenza che la luce ha sulla percezione degli oggetti. Yaguchi [12] basa il suo lavoro sulla categorizzazione dei nomi dei colori. Li et al [13] aggiornano formule e spazi colore del CRI standard. Freyssinier-Nova e Rea [14] affiancano al classico CRI un indice di gamut area che riguarda la capacità di discriminare colori differenti. Oleari [15] propone due indici definiti sul color gamut teorico nello spazio OSA\_UCS (L, G, J). Bodrogi e altri [16-17] sviluppano l'RCRI (Rank-order based color rendering index): un indice di resa cromatica ricavato a partire da una serie di esperimenti psico-fisici. Whitehead e Mossman [18] suggeriscono di utilizzare un grandissimo numero di spettri di riflettanza generati con un metodo Monte Carlo, andando a simulare molti colori con varie proprietà. Hashimoto et al. [19] definiscono un indice FCI (Feeling of Contrast Index) da affiancare allo standard color rendering index, legato al concetto di chiara discriminazione tra i colori della superficie di vari oggetti sotto una certa sorgente di luce.

Il gran numero di indici sviluppati, all'interno della CIE o indipendentemente da essa, dimostra come l'argomento sia di estrema attualità e importanza.

Tuttavia nessuno tra i metodi sopra citati considera la distribuzione spaziale della scena percepita e la sua relazione con il cambio dell'illuminante.

## 2 Apparenza cromatica ed effetto del contesto sulla percezione del colore

La principale difficoltà della valutazione dell'indice di resa cromatica è il suo tentativo di misurare l'apparenza del colore più che il colore stesso e come noto l'apparenza dipende non solo dall'illuminante ma anche dal contesto in cui il colore viene osservato.

Lo studio degli stimoli all'interno di un contesto è un approccio piuttosto recente rispetto alla storia della colorimetria. Wyszecki fa la distinzione tra colorimetria di base e avanzata [20]. La colorimetria di base fornisce una misurazione dei colori osservati in condizioni di visualizzazione isolate (*aperture mode*). Tuttavia, nella vita di ogni giorno, i colori sono visti in scene complesse e in condizioni di illuminazione disparate. Pertanto, nasce la necessità di una colorimetria avanzata, in grado di specificare le caratteristiche di un colore osservato in un ambiente complesso. A partire dagli spazi colore CIELAB o CIELUV, ideati per affrontare l'uniformità percettiva, sono stati creati molti altri modelli in direzione dell'apparenza del colore, dal modello Retinex di Land e McCann [21], a quello di Hunt [22], a quello Nayatani et al. [23], fino ai più moderni CIECAM97s [24], CIECAM02 [25], iCAM [26].

L'indice di resa cromatica tenta di misurare quanto l'apparenza del colore degli oggetti venga mantenuta quando osservati sotto una sorgente test. In una scena reale i colori sono raramente visti in isolamento, su uno sfondo neutro, bensì circondati da altri colori, e questo può portare ad una alterazione dell'aspetto dei colori stessi. È quindi necessario considerare i colori nel loro contesto.

## 3 Fase sperimentale

Proseguendo il lavoro sperimentale dell'anno precedente, quest'anno sono stati raccolti nuovi dati ed eseguita una analisi approfondita dei risultati ottenuti finora.

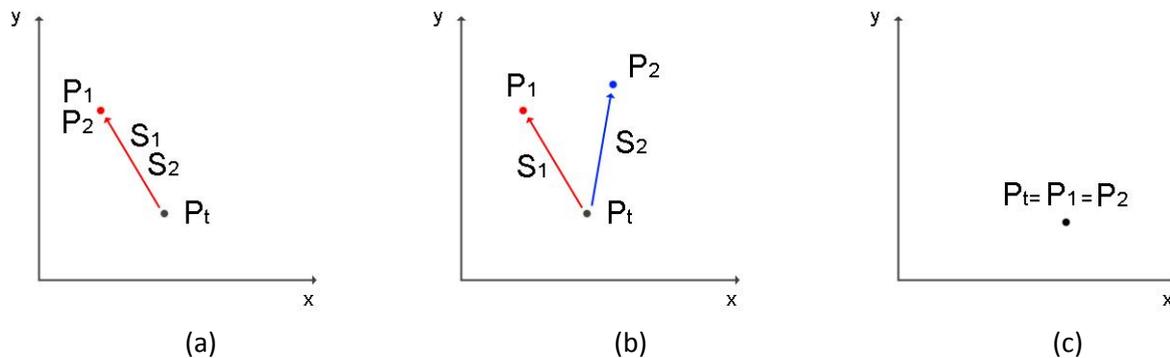
Riassumendo brevemente (per una descrizione estesa si veda la relazione dell'anno scorso - Report RdS/2013/108): scopo di questo esperimento è quello di testare in che misura i cambiamenti del contesto della scena possano alterare la stabilità della resa cromatica. Durante il test era chiesto agli osservatori di confrontare alcune patch target osservate nel contesto con un insieme di patch di riferimento, e cercare quella maggiormente somigliante. È stata utilizzata una nota configurazione visiva: il contrasto simultaneo di Albers [27] che produce ampie variazioni nell'apparenza di due patch identiche. In questo modo si vuole indagare se e in che misura l'effetto visivo di Albers cambia al variare della sorgente di luce. Sotto una certa

sorgente di luce, la configurazione dell'illusione di Albers produce uno spostamento (shift) misurabile dell'apparenza tra le due patch marroni identiche.

Nell'esperimento, la scena è uniformemente illuminata dalle sorgenti in prova. Scambiare le sorgenti di luce produce un cambiamento globale uniforme della distribuzione della luce della scena. Allo stesso modo, una misura standard dell'indice di resa cromatica descrive le variazioni di resa dei colori che sono considerati a livello globale nella scena.

Se l'utilizzo di una sorgente di luce diversa producesse una variazione globale della resa cromatica, lo shift dell'apparenza nelle due patch marroni dovrebbe rimanere costante sotto tutte le sorgenti di luce (fig. 1a:  $P_t$  è la cromaticità reale del target, gli shift  $S_1$  e  $S_2$  di due diverse sorgenti di luce sono rappresentati dalla freccia e in questo caso sono uguali,  $P_1$  e  $P_2$  rappresentano l'apparenza dei due punti). Al contrario, se variando la sorgente di luce, l'effetto della configurazione visiva cambia (fig. 1b,  $P_1$  e  $P_2$  hanno apparenza diversa), significa che il contesto dovrebbe essere preso in considerazione in qualche modo nelle successive generazioni di indici di resa cromatica.

Come condizione di controllo (fig. 1c), abbiamo scelto una configurazione neutra, posizionando le stesse patch, nelle stesse posizioni, su uno sfondo visivamente neutro [28]. In questo caso non dovrebbe esserci variazione dell'apparenza.



**Figura 1: il punto  $P_t$  rappresenta le coordinate del target in un ipotetico spazio  $xy$ . Caso a) variazione globale, legato alla configurazione visiva: gli shift  $S_1$  e  $S_2$  introdotti da due diverse sorgenti di luce sono uguali, i punti  $P_1$  e  $P_2$  rappresentano l'apparenza di  $P_t$  e si corrispondono. Caso b): variazione locale: gli shift di apparenza sono diversi a seconda della sorgente di luce. L'apparenza del target cambia. Caso c): configurazione di controllo, con target su sfondo neutro: l'apparenza non cambia,  $P_1$  e  $P_2$  appaiono uguali a  $P_t$ .**

L'insieme di patch di riferimento usata dagli osservatori è stato preparato con una risoluzione fine, in termini di differenze cromatiche lungo i tre assi principali (chiarezza e cromaticità). Per compensare possibili strategie personali degli osservatori nella scelta delle patch da queste scale di riferimento, ne sono state preparate due versioni: una composta da patch ordinate, in cui la variazione avveniva allontanandosi dal centro su un raggio, e l'altra con le patch posizionate casualmente sul foglio.

L'esperimento ha coinvolto 87 volontari, 47 donne e 40 uomini con un'età compresa tra i 10 e i 60 anni.

I dati sono stati raccolti durante l'Open Day del JRC di Ispra (4 Maggio 2013), e ha coinvolto sia volontari tra i visitatori esterni che impiegati dell'ENEA e del centro del JRC.

Di seguito riportiamo brevemente il protocollo sperimentale, soffermandoci maggiormente sulle criticità incontrate e sui risultati ottenuti.

### 3.1 Le patch

Per lo svolgimento dell'esperimento sono state usate quattro diverse stampe, due rappresentano i target, da confrontare con altre due su cui erano stampate una serie di campioni. In particolare le quattro stampe sono così caratterizzate (figura 2):

- La prima stampa di test ricreava una famosa illusione di Albers (copertina del libro "Interaction of Color", [27]). Sui rettangoli arancione e azzurro sono posizionati due quadrati di colore marrone. I

due quadrati hanno colore identico, ma a causa della configurazione spaziale appaiono differenti (fig. 2a).

- La seconda stampa, di controllo, è composta da due quadrati che hanno lo stesso colore della stampa di test. In questo caso l'effetto del contesto è identico su entrambe le patch, non causando la forte differenza percettiva del primo caso (fig. 2b).
- Una stampa composta da 19 patch, sistemate in modo che quella centrale abbia colore corrispondente a quelle dei test. Allontanandosi dal centro, il colore cambia. Per poter segnalare la patch corrispondente a quella di test, i campioni sono etichettati con dei numeri acromatici (fig. 2c).
- Una seconda stampa composta delle stesse patch ma disposte in ordine casuale e etichettate con lettere acromatiche (fig. 2d).

Le stampe hanno dimensione A4. Per poter svolgere l'esperimento contemporaneamente nei 4 box sono state stampate 4 copie di ogni foglio, dopo aver scaldato la stampante ed aver eliminato le prime copie, così da minimizzare la variabilità di ogni singola copia.

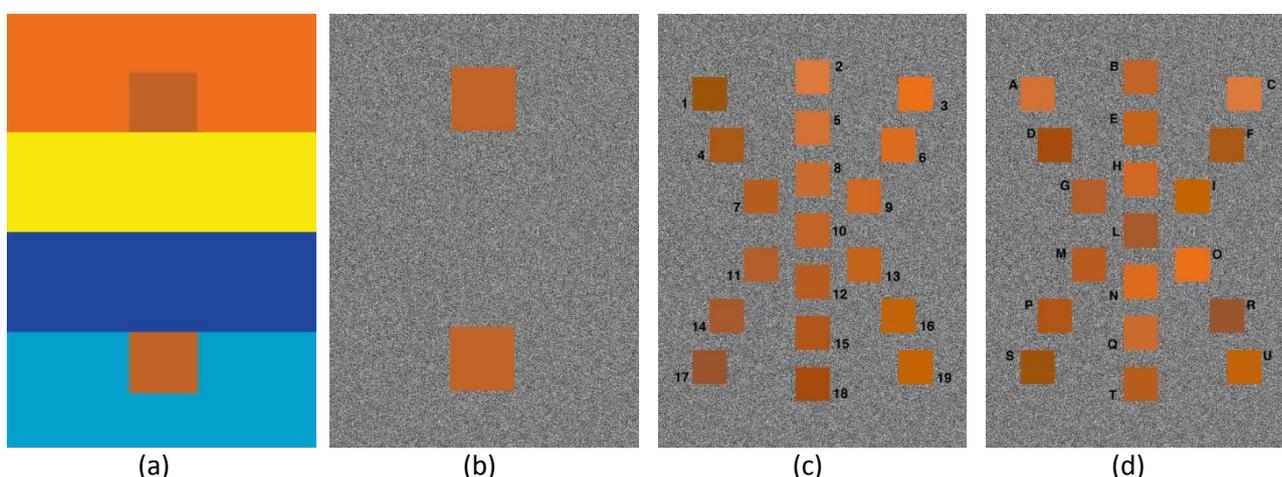


Figura 2: immagini usate durante l'esperimento: fogli di test (a), di validazione (b) e campioni per il confronto, etichettati da numeri (c) e da lettere (d)

Tabella 1: Valori Lab usati per la generazione dei campioni di riferimento.

L	a	b	Num.	Lett.
44	27	50	1	S
62	36	50	2	C
62	45	65	3	O
47	30	50	4	F
59	36	50	5	A
59	43	60	6	N
50	33	50	7	T
56	36	50	8	Q
56	39	55	9	H
53	36	50	10	B
50	33	45	11	G
50	36	50	12	M
53	36	55	13	E
47	30	40	14	L
47	36	50	15	P
53	36	60	16	U
44	27	35	17	R
44	36	50	18	D
53	36	62	19	I

In tabella 1 sono riportati i valori delle patch secondo lo schema di costruzione utilizzato nel programma di grafica per realizzare le patch. Le patch target di fig. 2a e 2b equivalgono alla patch 10/B (valori CIELAB: 53, 36, 50).

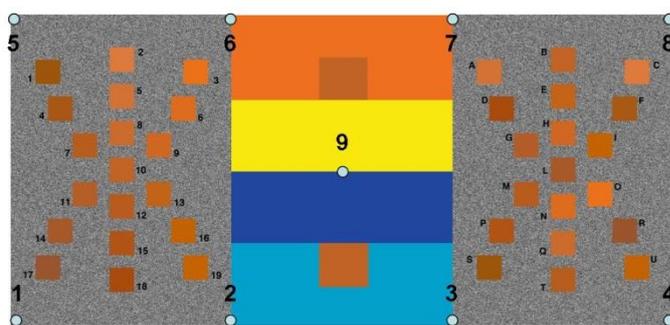
### 3.2 Setup dell'esperimento

Per lo svolgimento del test sono state costruite quattro cabine di luce (per permettere a quattro utenti di svolgere il test contemporaneamente) di dimensione 1m x 1m x 0.8 m. Le quattro cabine, denominate Box 1, Box 2, Box 3 e Box 4, sono disposte in modo che effettuando il test in una non sia possibile vedere l'apertura della cabina a fianco (figura 2 (b)).

Sono state testate sette sorgenti luminose (tab. 2), per cui l'esperimento è diviso in due fasi. Nei Box 1, 2 e 4 sono state posizionate due lampade, accese una alla volta, a seconda che si stesse testando la fase 1 o la fase 2. Nel box 3 sono state alloggiare due lampade identiche per garantire le stesse condizioni luminose (uniformità di illuminamento ed illuminamento medio) presenti negli altri box, quando una sola delle altre sorgenti luminose è accesa. La tabella 1 riassume le sorgenti di luce usate e alcune loro caratteristiche. La distribuzione di illuminamento all'interno delle cabine di luce è stata tenuta il più uniforme possibile (tab. 3). Per compensare una possibile non uniformità dei target, agli osservatori era permesso di muoversi liberamente variando la distanza e l'angolo di vista, senza poter muovere i target.

**Tabella 2: Tipo di lampada usata per ogni box e caratteristiche.**

Etichetta	Fase	Box	Tipo di sorgente	CCT (K)	Power (W)
B1S1	I	1	CFL-I	3030	11
B2S1	I	2	CFL-I	4391	11
B3S1	I	3	LED	4662	4
B4S1	I	4	CFL-I	7559	11
B1S2	II	1	LED rem. ph.	2947	12
B2S2	II	2	Halogen	2981	42
B4S2	II	4	LED	3441	8



(a)



(b)

**Figura 3: (a) Punti scelti per le misure di illuminamento, riportate in tabella 3. (b): Setup dell'esperimento. Al centro è visibile il foglio con l'illusione di Albers. Ai lati i fogli con i campioni necessari per il confronto.**

**Tabella 3: Valori di illuminamento misurati nei nove punti visibili in figura 2a.**

Punto	Box 1		Box 2		Box 3	Box 4	
	Source 1	Source 2	Source 1	Source 2	Source 1	Source 1	Source 2
	CFL -I	LED	CFL -I	HALO	LED	CFL -I	LED
1	373	535	376	307	526	406	237
2	430	581	395	305	579	436	345
3	459	562	369	296	588	410	402
4	437	480	323	298	520	352	324
5	429	616	428	362	554	474	279
6	486	661	415	370	616	501	408
7	513	647	426	335	618	485	473
8	512	568	406	377	539	404	387
9	486	652	409	315	640	466	470
E medio	458,3	589,1	394,1	329,4	575,6	437,1	369,4
Emin/Emax	0,73	0,73	0,75	0,79	0,81	0,70	0,50
Emax-Emin	140	181	105	81	120	149	236

### 3.3 Svolgimento dell'esperimento

L'esperimento descritto è stato svolto l'anno scorso. È esposto brevemente in questo report per completezza. Il lavoro di quest'anno ha riguardato principalmente l'analisi dei dati, l'indagine delle criticità riscontrate e lo studio delle correzioni da effettuare per avere risultati più attendibili.

Prima di iniziare l'esperimento, agli utenti sono state fornite le istruzioni relative alla compilazione del questionario con i dati personali ed è stato spiegato loro il compito da svolgere. È stato chiesto agli utenti di dare risposte spontanee in modo che la componente logica-mentale non fosse preponderante ma che prevalesse la prima impressione visiva.

L'esperimento è diviso in due parti: la fase di test e la fase di controllo. In entrambi i casi sono presenti all'interno di ciascun box tre fogli disposti nel seguente ordine (si veda fig. 2a e 2b):

- A sinistra: foglio con i campioni etichettati dai numeri (riferimenti).
- Al centro: foglio con i campioni target, oggetto del test
- A destra: foglio con i campioni etichettati da lettere.

Agli utenti è stato chiesto di osservare il target marrone, su sfondo arancione, posto nella parte alta del foglio centrale, e confrontarlo con i riferimenti posti a sinistra (identificati con un numero) cercando quello che si avvicinava di più come apparenza; quindi ripetere la stessa operazione con i riquadri di destra (identificati con lettere) e trascrivere la scelta sul questionario.

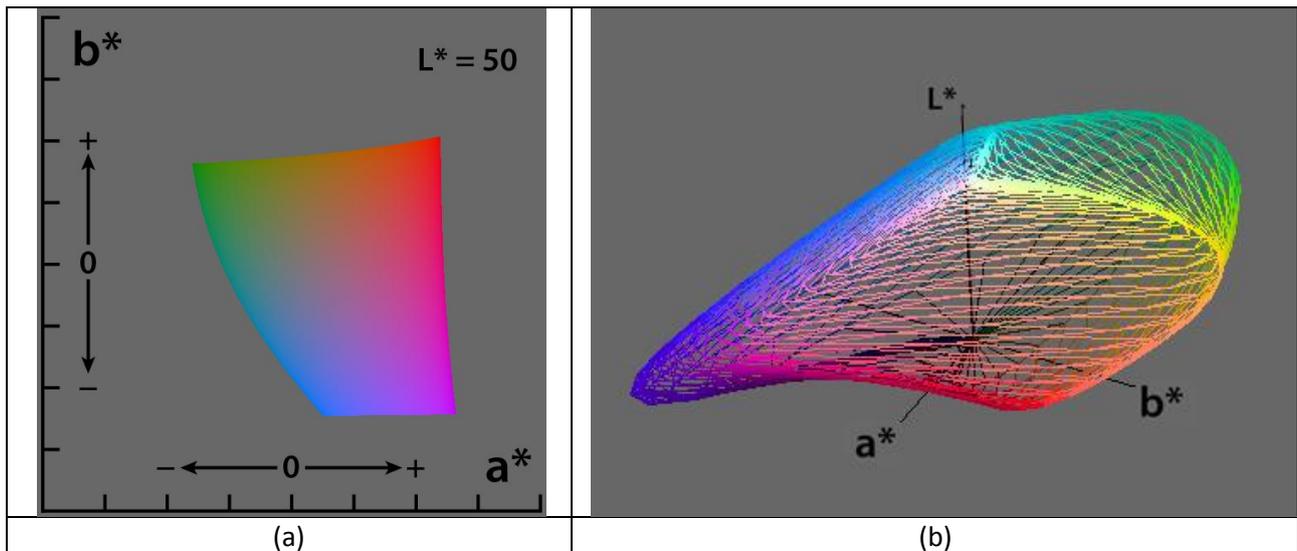
È stato poi chiesto di ripetere lo stesso task con il target marrone posto nella parte bassa del foglio rappresentante l'illusione (su sfondo azzurro) ed associargli un campione scelto dal foglio di sinistra e poi quello di destra.

Terminata la prima parte, il foglio centrale con l'illusione di Albers (fig. 2a) è stato sostituito con quello di controllo (fig. 2b) ed è stato chiesto di ripetere l'osservazione, con le stesse modalità di prima, confrontando i due riquadri di colore marrone su fondo grigio, con i fogli posti a sinistra ed a destra.

### 3.4 Analisi dei risultati

Presentiamo in questa sezione una analisi approfondita a partire dai dati ottenuti l'anno scorso. Come dichiarato, scopo dell'esperimento è testare se lo shift dell'apparenza resta costante al variare della sorgente di luce.

I risultati sono presentati nello spazio colore CIELAB. In questo spazio i colori sono rappresentati su assi opposti:  $L^*$  indica la chiarezza, 0 equivale a nero e 100 equivale a bianco,  $a^*$  e  $b^*$  indicano la cromaticità, in particolare  $a^*$  positivo indica il rosso/magenta mentre il negativo indica il verde/blu, mentre  $b^*$  positivo indica il giallo e il negativo il blu (fig. 4). I colori che hanno  $a^*$  e  $b^*$  entrambi pari a zero sono acromatici (grigi).



**Figura 4: spazio CIELAB: a) rappresenta una slice, per  $L^*=50$ , b) è una rappresentazione 3D**

Per ogni patch target è stato contato il numero di occorrenze delle patch scelte dall'osservatore. In questo modo è possibile calcolare gli shift sulle 3 coordinate Lab, che possono essere combinate in un vettore che rappresenta lo shift pesato (rispetto al numero di occorrenze) dell'apparenza rispetto alla patch target.

In figura 5a e 5b è rappresentato sugli assi  $a$  e  $b$ , lo shift, di tutte e 4 le patch target, osservate sotto tutte le 7 sorgenti luminose, considerando separatamente i riferimenti etichettati con i numeri e con le lettere. I cerchi dello stesso colore indicano gli shift delle 7 sorgenti di luce per un certo target.

Il grafico ci permette di affermare che le patch su sfondo arancione vengono percepite più verdi e più blu (effetto di contrasto simultaneo cromatico) di quello che realmente sono, mentre su sfondo blu sono percepite più rosse e più gialle.

Le patch di controllo, dovrebbero attestarsi intorno allo zero, tuttavia, c'è un leggero spostamento e vengono percepite leggermente più verdi e gialle.

Gli spostamenti sono riportati anche in forma di grafico a barre, nella figura 6, separatamente per i 3 assi  $L$ ,  $a$  e  $b$ .

Questo risultato è in linea con quanto noto sul fenomeno del contrasto di simultaneità. Il contrasto simultaneità è conosciuto principalmente nella sua rappresentazione acromatica: un quadrato grigio su sfondo nero appare più chiaro di un quadrato dello stesso grigio su sfondo bianco. Tuttavia l'effetto avviene anche nelle configurazioni cromatiche: uno sfondo rosso induce lo stimolo presentato su di esso ad avere una componente verdastra, mentre uno sfondo blu induce una componente giallastra. Vogliamo far notare che nel calcolo del CRI standard non si considerano modifiche all'apparenza dovute alla configurazione spaziale, anche se queste, in contesti naturali, sono situazioni quotidiane.

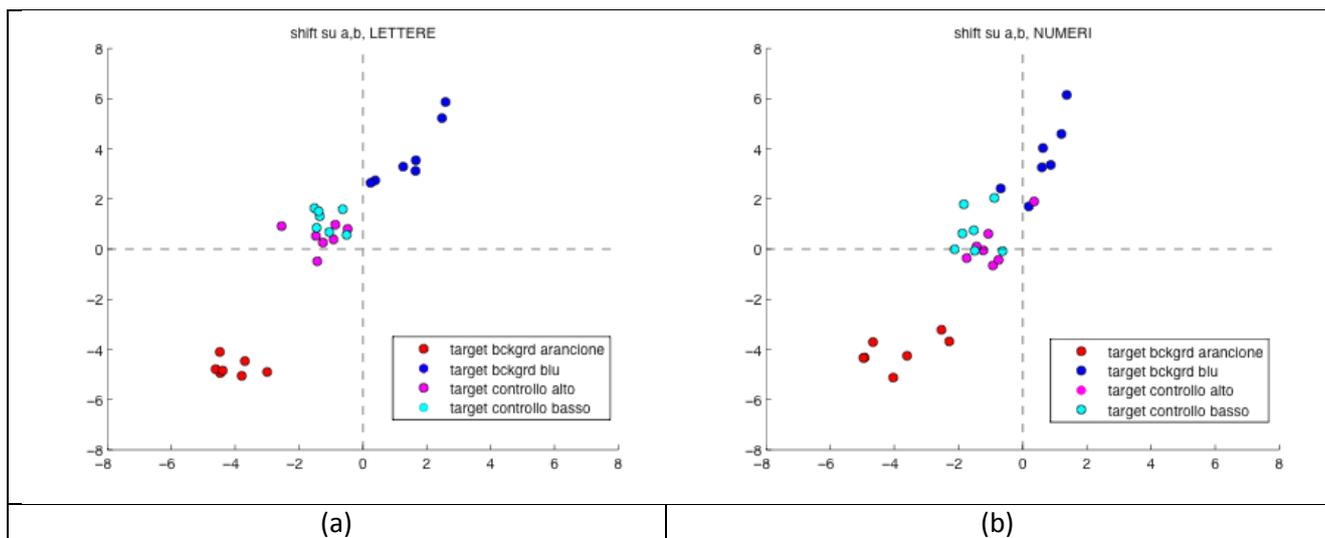
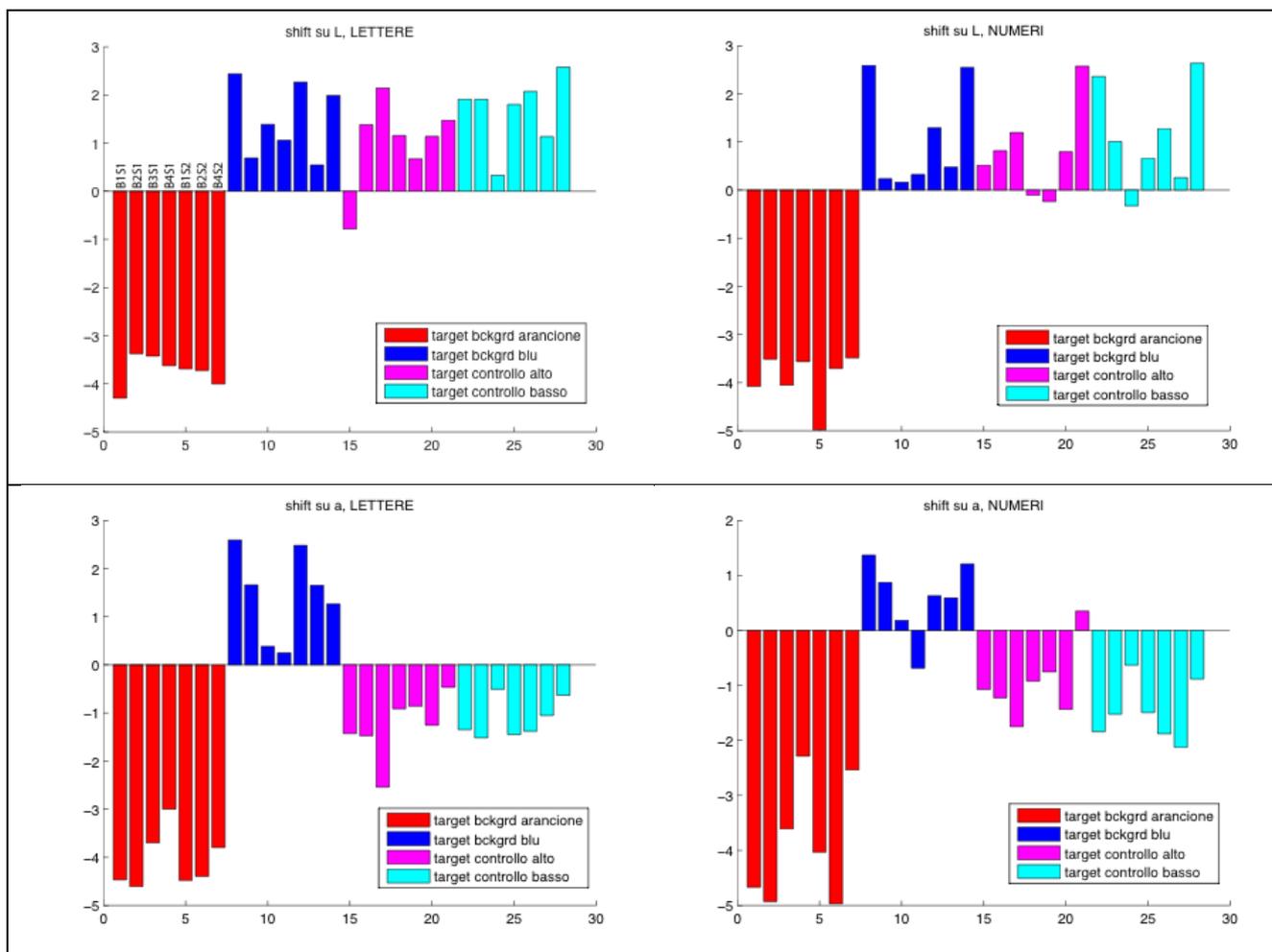
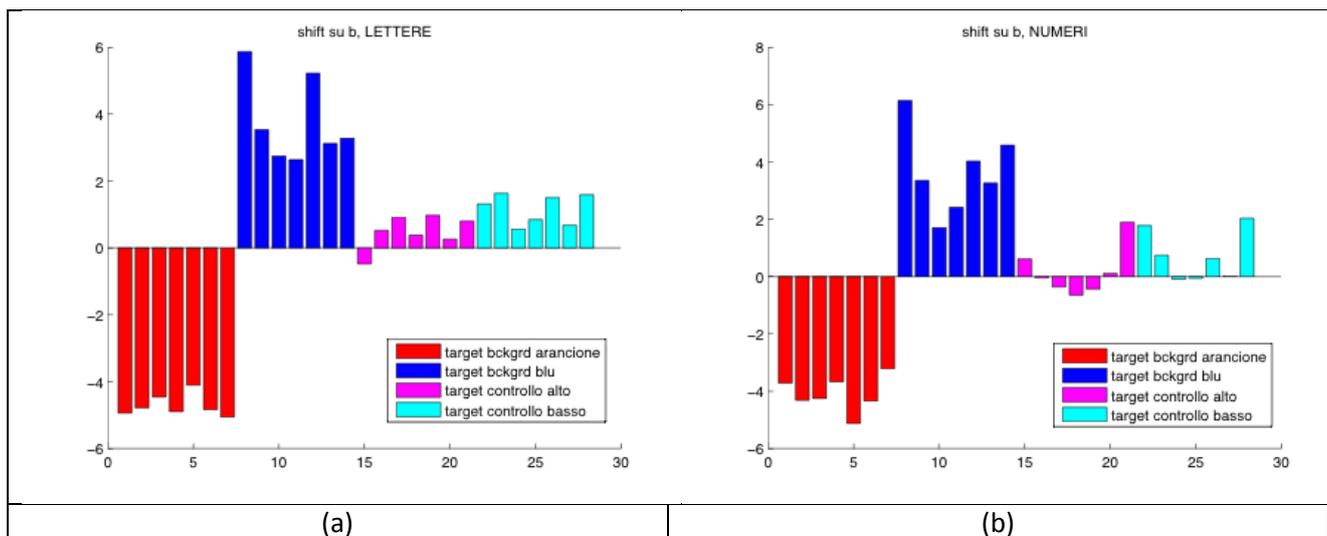


Figura 5: Shift della cromaticità delle patch target, sul diagramma a e b, rispetto le 7 sorgenti di luce, per quanto riguarda le patch di riferimento etichettate dalle lettere (a) e dai numeri (b) .





**Figura 6: Shift dell'apparenza su L, a e b per quanto riguarda le patch di riferimento etichettate dalle lettere (colonna a) e dai numeri (colonna b). I gruppi di barre rappresentano le 7 sorgenti di luce: B1S1, B2S1, B3S1, B4S1, B1S2, B2S2, B4S2.**

Ciò che più interessa è invece capire se e in che misura varia lo shift, cambiando la sorgente di luce. A partire dai dati relativi agli shift delle singole sorgenti di luce, sono state calcolate le coordinate dei quattro centroidi, delle quattro patch target (tabella 4 per il caso delle patch contrassegnate dalle lettere e 5 per i numeri). In pratica è stato calcolato il baricentro di ogni insieme di cerchi colorati, che rappresentano le 7 sorgenti di luce.

**Tabella 4: coordinate dei centroidi. Caso delle patch contrassegnate da lettere**

	Shift L	Shift a*	Shift b*
Background arancione	-3.73	-4.06	-4.72
Background blu	1.48	1.47	3.78
Controllo alto (top)	1.03	-1.28	0.48
Controllo basso (bottom)	1.68	-1.13	1.16

**Tabella 5: coordinate dei centroidi. Caso delle patch contrassegnate dai numeri.**

	Shift L	Shift a*	Shift b*
Background arancione	-3.91	-3.86	-4.09
Background blu	1.09	0.60	3.64
Controllo alto (top)	0.79	-0.97	0.16
Controllo basso (bottom)	1.12	-1.48	0.72

Per ogni sorgente di luce B1S1 - B4S2, sono state calcolate le distanze dal centroide di riferimento (tabelle 6 e 7) e calcolate le deviazioni standard delle distanze, per ognuna delle quattro patch target (ultima colonna delle tabelle 6 e 7). Le deviazioni standard dicono quanto si disperdono le misure, ovvero permettono di stimarne la variabilità. Una deviazione standard piccola significa che i dati sono raccolti intorno al baricentro, una deviazione standard alta significa che i dati sono più dispersi. Calcolare la deviazione standard quindi significa calcolare la dispersione dello shift dell'apparenza quando il target è osservato nel contesto o fuori dal contesto. L'ipotesi iniziale, cioè che a seconda della sorgente di luce, il contesto crea una differenza di apparenza che non resta costante, è verificata (fig. 1b). D'altra parte, un comportamento simile si ha anche nel caso delle patch di controllo, in cui invece si sarebbero dovuto trovare shift minimi e centrati sullo zero.

In generale si nota come la deviazione standard nel caso dei riferimenti etichettati con i numeri sia più alta che nel caso delle lettere (ricordiamo qui che le patch numerate sono disposte in maniera ordinata, fig. 2c, variando i valori a partire dal centro rispetto un certo raggio, mentre quelle etichettate con le lettere sono

disposte casualmente, fig. 2d), che significa che le scelte risultano più dispersive quando le patch sono disposte seguendo un ordine.

La deviazione standard più bassa si ha quando la patch è osservata su sfondo arancione, cioè quando l'effetto illusorio è maggiore (la patch agli osservatori appare piuttosto diversa da come è realmente). Ciò significa che sotto le 7 sorgenti di luce, la patch su sfondo arancione non ha shift troppo diversi nell'apparenza.

Al contrario, la patch osservata su sfondo azzurro-blu ha una deviazione standard piuttosto alta, il che significa che a seconda della sorgente sotto la quale la sto osservando, lo shift dell'apparenza cambia considerevolmente.

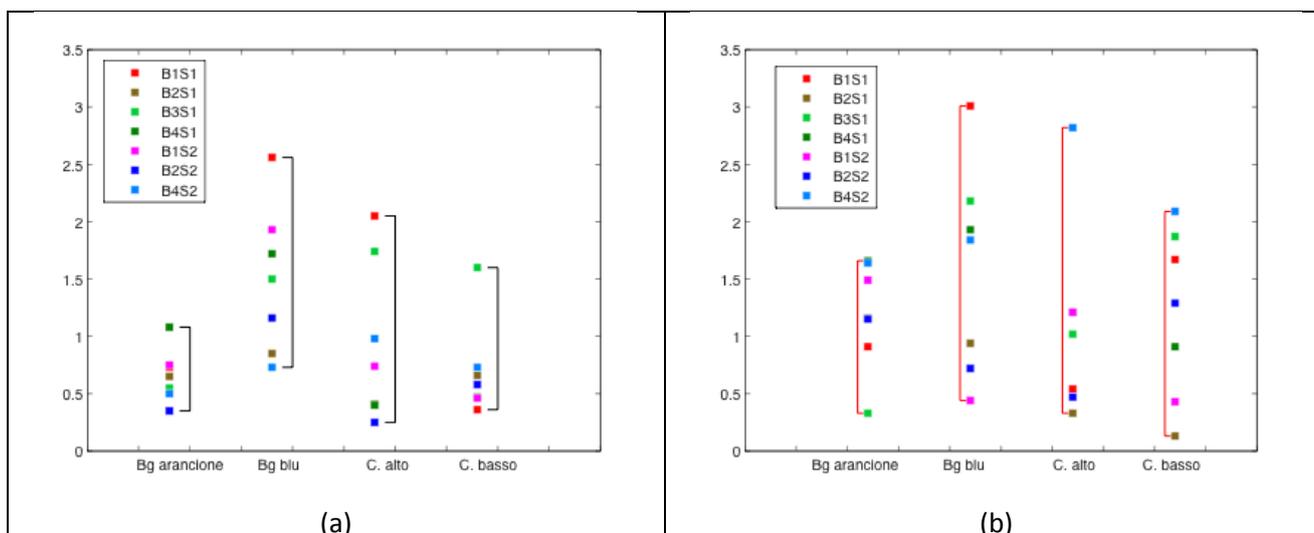
**Tabella 6: distanze dai centroidi calcolate per ogni sorgente di luce. L'ultima colonna riporta la deviazione standard delle distanze. La tabella si riferisce alle patch contrassegnate con le lettere.**

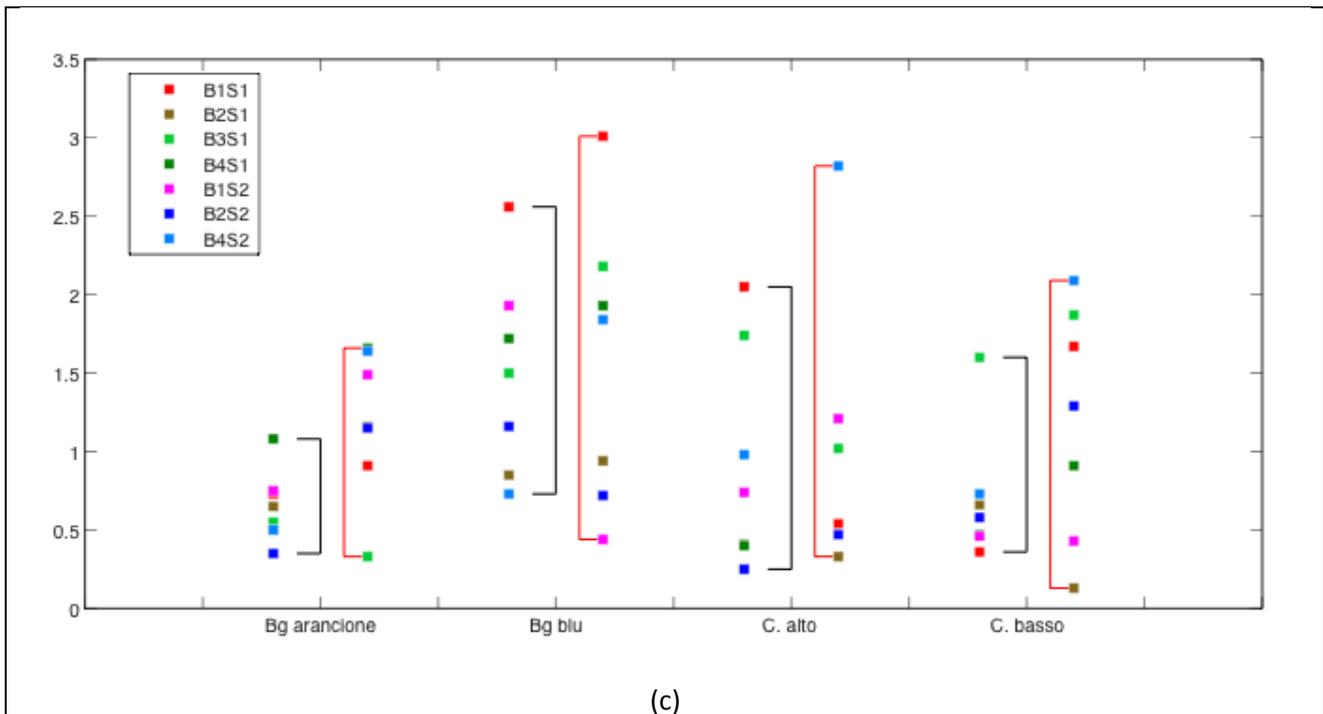
	B1S1	B2S1	B3S1	B4S1	B1S2	B2S2	B4S2	Dev. std
Background arancione	0.73	0.65	0.55	1.08	0.75	0.35	0.50	0.23
Background blu	2.56	0.85	1.50	1.72	1.93	1.16	0.73	0.65
Controllo alto (top)	2.05	0.41	1.74	0.40	0.74	0.25	0.98	0.70
Controllo basso (bottom)	0.36	0.66	1.60	0.47	0.46	0.58	0.73	0.43

**Tabella 7: distanze dai centroidi calcolate per ogni sorgente di luce, riferita alle patch contrassegnate dai numeri.**

	B1S1	B2S1	B3S1	B4S1	B1S2	B2S2	B4S2	Dev. std
Background arancione	0.91	1.16	0.33	1.66	1.49	1.15	1.64	0.47
Background blu	3.01	0.94	2.18	1.93	0.44	0.72	1.84	0.92
Controllo alto (top)	0.54	0.33	1.02	1.21	1.21	0.47	2.82	0.84
Controllo basso (bottom)	1.67	0.13	1.87	0.91	0.43	1.29	2.09	0.74

In figura 7 sono rappresentate le distanze dai centroidi, per ogni sorgente di luce (tab. 6-7), per ogni sfondo, sia nel caso dei riferimenti rappresentati da lettere (figura 7a) che da numeri (figura 7b).





**Figura 7: rappresentazione delle distanze dai centroidi di ogni sorgente di luce, per ogni sfondo (background arancione, blu, controllo alto, controllo basso). (a): caso delle lettere. (b): caso dei numeri. (c) nello stesso grafico lettere (barre nere) e numeri (barre rosse).**

I primi due grafici sono utili a mostrare le variazioni delle distanze delle sorgenti di luce dal baricentro, a seconda del background. Ad esempio, osservando i dati relativi ai riferimenti con le lettere, la sorgente B1S1 (quadratin rosso) nel caso del *background blu* e nel *controllo alto* è quella più lontana dal baricentro mentre nel caso del *controllo basso* è quella più vicina. Inoltre aiuta a capire come e quanto si disperdono le sorgenti di luce: ad esempio nel caso *controllo basso* (quadratin verde) tutte le sorgenti a parte B3S1 sono piuttosto vicine al centroide.

Nella figura 7c le distanze sono rappresentate nello stesso grafico, accostando i risultati relativi a lettere e numeri. In questo modo è possibile vedere come i risultati siano maggiormente dispersi nel caso dei numeri (linee rosse) rispetto alle lettere.

In tabella 8 invece sono state calcolate le deviazioni standard separatamente sui 3 assi Lab e poi è stata calcolata la media.

Inoltre è stata calcolata la deviazione standard considerando solo la cromaticità, escludendo dal conteggio l'asse L. Da questo ultimo calcolo emerge una differenza coerente nella deviazione standard considerando o meno il contesto illusorio. Questo dato è in linea con le ipotesi iniziali, ma visti i risultati nel loro complesso non ci sembra sufficiente a generalizzare le ipotesi su questi dati.

**Tabella 8: Medie delle deviazioni standard calcolate sui 3 assi L, a, b.**

	L, a, b		Cromaticità (a, b)	
	lettere	numeri	lettere	numeri
Background arancione	0.41	0.75	0.46	0.86
Background blu	0.98	1.08	1.09	1.07
Controllo alto (top)	0.69	0.83	0.58	0.77
Controllo basso (bottom)	0.53	0.83	0.43	0.71

Come illustrato di seguito, sono sorte una serie di criticità durante l’esperienza, che non permettono di trarre conclusioni definitive.

### 3.5 Criticità riscontrate

Per quanto si sia cercato di mantenere controllate tutte le fasi dell’esperienza, si sono riscontrate alcune criticità.

La prima riguarda la stampa delle patch. Lo spettro di tutte le patch è stato misurato con uno spettrofotometro Konica Minolta CM-2600d, e trasformate in CIELAB (tab. 9)

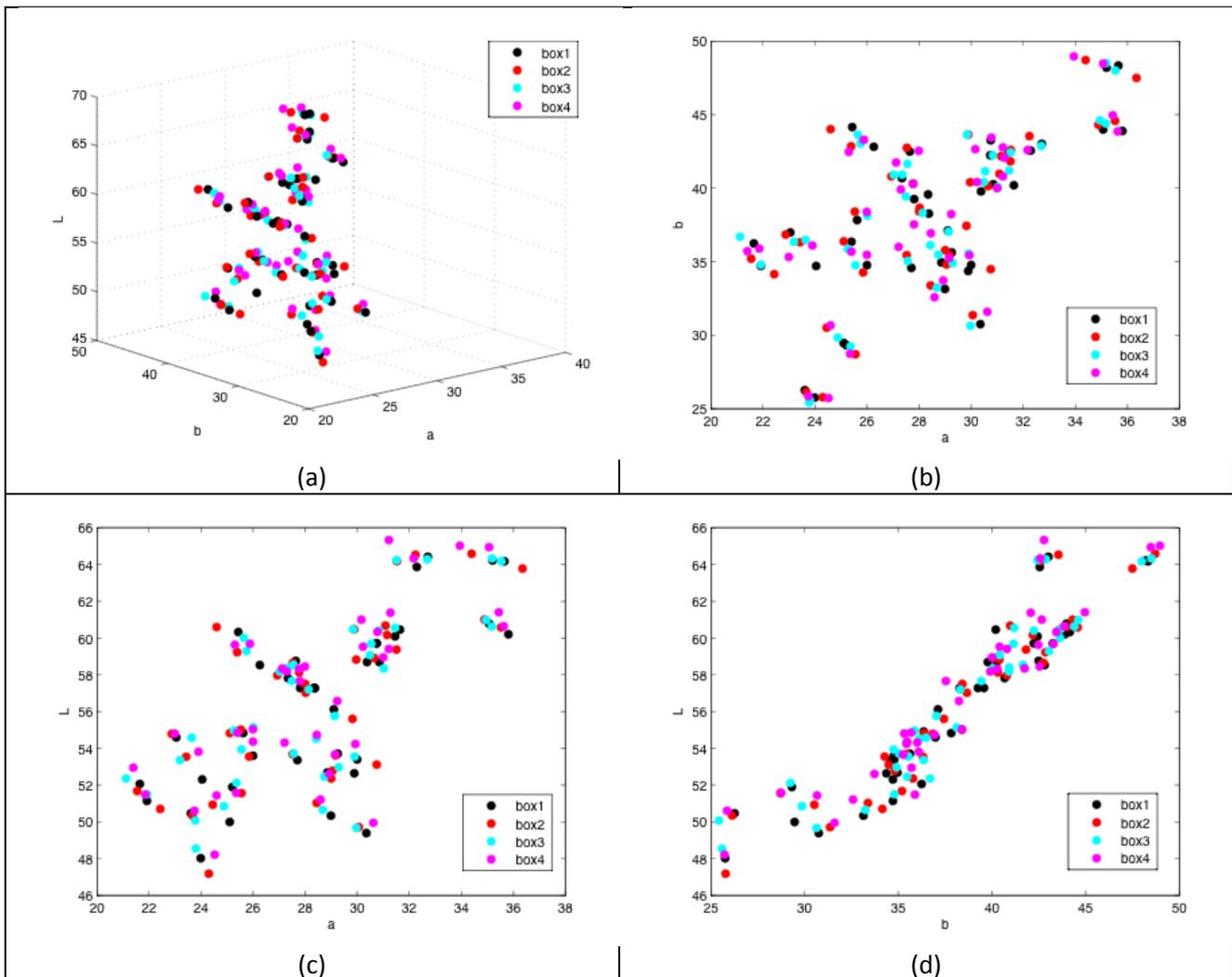
**Tabella 9: misure di tutte le patch dei 4 fogli posizionati nei 4 box. Evidenziate in azzurro le patch target e le patch di riferimento corrispondenti ai target.**

Box 1			Box 2			Box 3			Box 4		
L	a	b	L	a	b	L	a	b	L	a	b
55,86	30,15	36,96	55,85	30,12	38,04	56,07	29,52	37,42	56,89	28,46	38,25
56,99	28,96	36,27	57,73	28,03	37,18	57,10	28,45	37,72	56,91	28,84	37,17
62,64	39,83	47,40	62,89	38,74	48,12	63,72	37,29	47,97	64,04	37,01	47,11
88,68	-8,35	80,15	88,41	-7,80	79,01	88,51	-7,96	79,59	88,57	-7,89	79,55
45,17	-5,39	-29,62	44,67	-5,10	-29,53	44,14	-4,97	-29,31	44,27	-4,85	-29,40
52,28	-18,89	-35,48	51,86	-18,45	-35,42	52,50	-18,87	-35,81	51,81	-18,57	-33,95
56,20	29,70	37,78	54,98	29,74	37,58	54,95	30,76	38,05	55,74	29,24	37,92
55,00	30,57	37,38	55,48	30,08	37,63	56,09	28,94	37,62	55,07	30,01	37,49
60,09	31,45	42,43	60,17	31,15	42,18	60,41	30,83	42,23	61,00	30,16	42,65
57,28	28,37	38,27	57,51	28,00	38,42	57,20	28,14	38,31	57,66	27,80	37,54
64,42	32,71	43,01	64,53	32,24	43,54	64,29	32,69	42,87	65,33	31,22	42,77
50,34	28,99	33,14	51,03	28,44	33,38	50,65	28,68	33,24	51,22	28,59	32,59
57,29	28,34	39,57	58,13	27,77	40,31	58,40	27,35	40,92	58,18	27,30	39,91
54,60	23,05	36,98	54,79	22,87	36,84	54,58	23,64	36,48	54,81	22,99	35,32
54,92	25,40	36,35	54,84	25,11	36,38	54,97	25,26	35,87	54,85	25,40	35,68
59,71	30,73	42,23	59,37	31,51	41,82	59,69	30,54	41,15	59,41	31,22	40,80
60,33	25,43	44,15	60,60	24,60	44,00	60,01	25,64	43,63	59,64	25,30	42,47
51,90	25,20	29,32	51,57	25,56	28,71	52,13	25,36	29,24	51,58	25,35	28,74
53,71	29,25	35,63	53,63	29,17	35,46	54,53	28,43	36,12	54,74	28,45	36,93
60,21	35,81	43,88	60,58	35,53	44,57	60,63	35,17	44,39	60,65	35,63	43,86
64,17	35,65	48,33	64,59	34,40	48,70	64,33	35,18	48,50	65,03	33,94	48,96
52,69	28,85	34,95	52,37	29,00	35,78	52,46	28,74	35,47	52,61	28,93	33,73
58,70	30,85	40,26	58,92	30,65	40,14	59,07	30,49	40,41	58,95	31,00	40,00
50,47	23,61	26,26	50,35	23,67	26,13	50,08	23,78	25,43	50,61	23,75	25,86
51,15	21,92	34,71	50,71	22,43	34,15	51,51	21,92	34,79	51,49	21,86	35,89
53,36	27,70	34,58	53,69	27,52	35,44	53,71	27,56	35,05	54,32	27,21	36,01
57,82	27,34	40,68	57,97	26,93	40,80	58,18	27,03	40,91	58,35	27,12	41,74
52,07	21,65	36,24	51,68	21,55	35,20	52,36	21,12	36,69	52,95	21,40	35,71
63,87	32,29	42,55	64,17	31,52	42,60	64,24	31,51	42,43	64,33	32,17	42,58
64,22	35,20	48,19	63,78	36,35	47,49	64,18	35,54	47,99	64,95	35,07	48,47
52,31	24,04	34,71	53,55	23,43	36,32	53,36	23,19	36,35	53,82	23,90	36,10
60,46	31,64	40,20	60,68	31,09	40,97	60,56	31,45	41,19	61,38	31,27	42,07
60,78	35,07	43,98	61,01	34,89	44,30	60,99	34,95	44,60	61,41	35,44	44,95
54,84	25,62	37,83	55,02	25,53	38,40	55,14	26,01	38,12	55,03	25,99	38,39
58,70	30,38	39,78	58,83	29,96	40,40	58,35	31,02	40,06	59,53	30,22	40,41
59,71	30,75	43,25	60,48	29,89	43,64	60,48	29,84	43,64	60,34	30,78	43,43
56,12	29,10	37,11	55,61	29,82	37,43	55,76	29,13	37,04	56,58	29,23	38,24
53,60	26,00	34,76	53,56	25,85	34,27	53,94	25,56	34,75	54,37	26,00	35,46
53,40	30,00	34,78	53,12	30,75	34,49	53,56	29,90	35,54	54,24	29,93	35,45

57,29	27,81	39,25	57,03	28,02	38,66	57,66	27,49	39,43	58,31	27,76	40,29
50,00	25,10	29,47	50,94	24,45	30,52	50,86	24,88	29,85	51,45	24,60	30,67
52,65	29,89	34,37	52,79	29,05	34,81	52,98	29,29	34,91	53,67	29,15	35,26
58,53	26,26	42,81	59,23	25,39	42,85	59,30	25,75	43,04	59,69	25,88	43,29
48,03	23,99	25,76	47,19	24,30	25,79	48,55	23,80	25,60	48,22	24,52	25,73
49,40	30,35	30,75	49,72	30,06	31,36	49,68	29,97	30,64	49,96	30,62	31,60
58,76	27,64	42,49	58,66	27,53	42,74	58,55	27,55	41,65	58,45	27,99	42,54

Come è possibile vedere dalla tabella, patch che dovrebbero risultare uguali, hanno in alcuni casi differenze di colore considerevoli. In particolare le patch evidenziate in azzurro rappresentano le patch target e le corrispondenti patch di riferimento, i cui valori quindi dovrebbero essere identici. Una volta misurate, invece si sono trovati dei  $\Delta E_{76}$  che raggiungevano valori intorno al 3 (ad esempio le due patch evidenziate in azzurro più scuro, con un  $\Delta E_{76}$  pari a 3.02).

In figura 8 è possibile vedere rappresentata la distribuzione nello spazio CIELAB di tutte le patch di riferimento ((a): spazio Lab, (b): piano a-b, (c): piano a-L, (d): piano b-L).



**Figura 8: rappresentazione del sottospazio utilizzato per le patch di riferimento. I 4 diversi colori rappresentano le misure dei fogli nei 4 box. Le 4 figure mostrano lo stesso sottospazio da punti di vista diversi.**

I 4 cerchi di colore diverso dovrebbero sovrapporsi perfettamente a significare che le misure sono identiche nei 4 box, mentre ciò non avviene. Inoltre si è dovuto mappare su una superficie piana le variazioni di assi che definiscono uno spazio 3D (L, a, b). Questo si è tradotto nel dover scegliere in quale modo creare le patch di riferimento, variando una, due o tre coordinate. Compiere una scelta ne ha escluso altre, dovendo evitare di avere troppe patch da confrontare tra cui ricercare il target. Allo stesso modo creando un numero minore di patch con una risoluzione meno fine c'era il rischio di includere in un'unica classe un sottoinsieme di patch la cui differenza era invece importante ai fini dell'esperimento. Ad esempio le patch sono ben distribuite nel piano a-b (figura 8b) e nel piano a-L (figura 8c), mentre non lo sono altrettanto nello spazio b-L, poiché all'aumentare dei valori su un asse, aumentano anche quelli sull'altro.

La seconda principale criticità invece riguarda espressamente il task. Agli osservatori era chiesto di cercare la patch con l'apparenza visiva più vicina al target. La domanda era posta in modo da evitare ragionamenti cognitivi da parte dell'utente (ad esempio sul fatto che le patch potessero essere uguali), cercando di mantenere la valutazione dell'osservatore al più basso livello possibile.

Scopo dell'esperimento era quindi valutare la sensazione da parte dell'utente, piuttosto che la percezione. OSA definisce la sensazione come uno stato di funzionamento mentale direttamente associato alla stimolazione dell'organismo, a differenza della percezione, che è un processo in cui l'organismo è attivo, poiché rielabora sensazioni ed esperienze passate [29].

Quindi la sensazione di colore o apparenza, è un processo ad un livello più basso, differente della percezione, che lavora ad un livello più alto.

Inoltre il test è risultato impegnativo per l'utente, sia perché le patch da valutare sono molte (19) e si trovano in un sottospazio colore piuttosto ristretto, sia perché richiedeva un tempo abbastanza lungo, dovendo essere ripetuto 7 volte: una per ogni sorgente di luce da testare. Un altro fatto da considerare è la strategia di ricerca da parte degli utenti. Alcuni osservatori dopo il test hanno dichiarato che la ricerca della patch comincia partendo in alto a sinistra e seguendo il modo di lettura (scandendo da sinistra a destra, dal basso al basso) fino a trovare una patch che assomigli a quella che si sta cercando, spesso senza continuare la ricerca o facendolo con minore attenzione.

### 3.6 Nuovi test

Nel Luglio 2014 sono stati effettuati altri 27 test, con una lieve modifica al protocollo, con lo scopo di risolvere alcune delle criticità precedentemente descritte, in particolare quelle riguardanti le differenze tra le patch.

In questo caso l'utente utilizzava sempre lo stesso insieme di 4 fogli, che veniva di volta in volta spostato nei diversi box con le diverse lampade, in modo che non vi fosse differenza nelle patch.

Riportiamo di seguito i risultati ottenuti (divisi in due tabelle per ragioni di spazio, tab. 10 per le prime 4 sorgenti, e tab. 11 per le rimanenti 3)

**Tabella 10: risposte degli utenti, per le prime 4 sorgenti di luce**

Utente	BOX 1 - S1				BOX 2 - S1				BOX 3 - S1				BOX 4 - S1			
	fondo colorato		fondo grigio		fondo colorato		fondo grigio		fondo colorato		fondo grigio		fondo colorato		fondo grigio	
1	17	R	5	E	17	L	4	B	14	L	10	B	18	D	7	M
	19	C	11	B	12	M	8	M	10	T	8	M	13	B	10	U
2	14	L	8	H	4	R	9	E	18	L	13	U	11	L	8	H
	16	U	13	U	16	U	13	Q	19	Q	11	M	16	Q	13	U
3	17	R	13	H	17	R	10	I	14	D	10	Q	17	L	12	H
	13	Q	13	H	9	U	10	I	12	Q	10	Q	10	Q	12	H
4	14	G	8	H	9	E	10	A	10	G	7	I	7	D	13	H

	5	N	13	H	13	H	5	I	13	Q	13	M	13	Q	13	A
5	14	S	10	G	14	S	8	E	7	S	10	P	14	T	10	E
	9	N	12	E	8	Q	10	B	8	Q	10	Q	13	H	11	Q
6	14	P	11	M	14	P	11	M	15	P	11	M	15	P	11	M
	11	H	12	M	13	M	10	M	10	M	12	P	11	U	11	M
7	17	L	8	G	18	R	8	T	18	R	8	G	18	L	10	G
	13	N	8	Q	5	Q	10	M	8	Q	8	M	5	M	13	G
8	4	F	7	E	7	G	13	M	11	M	10	M	11	G	7	E
	19	G	13	M	13	Q	13	M	13	M	11	G	13	Q	10	M
9	4	D	8	E	18	R	8	P	17	R	8	H	17	D	10	H
	8	Q	10	Q	5	N	10	M	8	Q	11	T	11	Q	10	Q
10	4	B	8	C	4	F	8	H	1	D	5	E	4	F	5	C
	12	Q	12	O	14	P	12	Q	14	S	16	T	11	U	13	Q
11	14	L	12	H	14	D	10	B	14	R	10	G	7	M	10	G
	13	A	10	H	13	H	13	P	10	M	7	M	8	Q	8	Q
12	4	F	12	B	7	L	7	E	7	P	3	B	4	D	8	E
	13	Q	12	B	13	E	7	E	13	G	10	M	13	Q	10	U
13	14	L	8	H	17	L	12	Q	4	D	8	G	17	L	12	M
	10	H	10	G	8	R	5	B	9	H	13	Q	7	N	11	Q
14	14	D	7	M	17	R	7	M	18	D	7	G	14	G	4	G
	10	H	11	M	8	M	7	M	8	Q	11	M	9	I	7	M
15	9	A	7	E	6	E	7	E	6	E	5	B	6	A	7	E
	19	Q	16	U	19	N	16	T	13	U	13	U	16	N	13	Q
16	7	F	8	E	4	F	8	G	12	M	10	B	10	D	12	E
	10	H	10	G	9	Q	12	B	12	T	10	B	12	Q	10	Q
17	4	E	7	P	14	S	10	G	10	L	8	B	7	F	10	B
	13	T	13	M	9	G	13	G	13	Q	8	P	16	Q	8	Q
18	7	F	10	N	4	f	10	F	7	F	10	F	10	G	10	H
	10	N	10	N	10	H	10	F	12	Q	10	F	10	F	10	H
19	14	L	8	H	15	D	11	B	12	L	14	P	15	R	8	E
	19	Q	13	Q	19	T	11	P	15	P	13	Q	7	E	7	Q
20	1	R	7	B	14	D	7	B	4	D	8	M	4	D	7	M
	6	N	7	E	9	N	11	M	8	H	7	P	6	Q	8	P
21	14	F	7	E	1	P	10	G	7	F	10	M	1	D	8	H
	5	E	10	Q	13	Q	5	H	11	E	10	H	13	U	11	Q
22	4	F	7	F	10	G	10	G	10	L	10	D	12	H	12	H
	13	M	12	T	13	E	12	S	10	Q	19	U	12	Q	19	U
23	7	G	8	H	12	L	10	M	4	L	10	N	1	D	10	B
	16	Q	11	P	9	M	11	T	10	M	11	P	13	E	12	P
24	14	L	11	M	17	R	15	P	4	T	10	M	14	L	11	M
	14	Q	11	M	13	U	15	P	12	P	10	M	13	Q	11	M
25	7	E	5	A	6	D	5	H	7	G	5	E	7	F	10	A
	10	I	13	Q	7	U	19	U	10	G	12	U	8	P	9	M
26	4	L	7	P	13	F	4	L	5	G	7	L	7	H	4	H
	16	I	15	M	9	Q	10	M	12	T	14	P	12	M	18	S

27	12	D	13	P	14	D	15	B	17	R	1	B	14	D	12	Q
	12	M	12	U	13	U	15	B	14	U	10	Q	7	H	11	B

**Tabella 11: risposte degli utenti per le restanti 3 sorgenti di luce**

Utente	BOX 1 - S2				BOX 2 - S2				BOX 4 - S2			
	LED FOSFORO REM				ALOGENA				LED			
	fondo colorato		fondo grigio		fondo colorato		fondo grigio		fondo colorato		fondo grigio	
1	17	R	8	B	1	F	4	B	15	L	5	B
	9	E	11	M	8	F	16	T	19	H	10	Q
2	14	R	13	B	14	R	10	E	14	L	8	G
	16	U	19	P	13	Q	11	Q	6	Q	13	Q
3	1	L	10	I	14	D	10	E	14	L	10	Q
	13	Q	10	I	13	Q	10	E	10	Q	10	Q
4	7	D	13	U	10	Q	10	N	6	B	8	E
	9	E	19	Q	8	N	8	H	13	Q	13	U
5	4	R	8	U	7	F	10	M	10	D	8	M
	6	Q	13	B	8	Q	11	M	13	U	13	Q
6	4	P	11	P	15	P	7	M	12	P	10	M
	13	Q	7	P	13	H	7	P	10	P	11	M
7	1	L	8	B	18	R	7	M	4	D	10	M
	9	H	8	E	9	Q	10	M	10	E	13	P
8	7	D	10	G	7	G	10	M	7	P	7	G
	16	G	10	G	13	G	10	M	10	Q	10	M
9	4	D	5	B	1	L	8	E	18	D	10	E
	19	Q	16	Q	10	T	10	M	10	T	8	Q
10	4	F	7	E	1	D	8	E	1	F	5	B
	16	Q	15	T	15	U	11	U	16	U	13	Q
11	7	F	13	Q	14	D	10	Q	11	D	8	B
	9	Q	10	F	16	H	8	B	7	Q	13	E
12	1	F	13	B	7	S	12	U	11	M	8	U
	9	I	10	M	16	G	10	M	10	E	8	U
13	14	G	7	D	7	S	10	D	4	R	10	H
	8	P	11	P	6	D	9	N	11	E	12	P
14	14	D	8	G	11	G	10	G	15	P	13	M
	9	N	10	P	8	H	7	G	7	M	7	G
15	2	I	8	E	6	O	9	E	5	A	8	E
	16	U	19	U	16	Q	13	T	19	Q	13	U
16	11	G	8	B	10	M	10	M	4	P	8	M
	13	E	10	Q	10	Q	11	U	11	U	10	Q
17	7	D	10	G	11	D	7	G	8	G	8	M
	16	Q	13	T	16	Q	11	M	11	Q	13	M
18	4	D	5	E	4	D	8	E	7	D	8	E

	10	M	5	E	10	H	8	E	10	H	8	E
19	15	R	10	B	12	L	7	M	14	R	7	B
	8	Q	13	Q	13	Q	13	P	14	T	15	P
20	14	D	9	U	15	D	7	B	4	L	8	E
	19	Q	16	U	6	Q	13	U	13	U	13	M
21	15	P	9	Q	15	P	10	H	14	D	10	E
	9	Q	7	M	16	Q	13	Q	5	Q	6	Q
22	4	F	10	L	8	F	4	G	10	G	10	L
	3	I	15	T	5	Q	4	G	13	M	13	T
23	7	P	8	M	11	P	10	M	7	F	7	F
	9	Q	13	U	19	I	12	P	8	I	8	P
24	14	L	11	Q	15	S	10	Q	1	L	11	P
	13	Q	11	Q	10	P	10	Q	11	P	11	P
25	D	10	11	H	8	E	9	G	6	G	4	A
	6	M	10	Q	16	Q	15	T	13	Q	13	N
26	9	L	7	F	4	P	4	D	8	L	5	H
	10	Q	18	T	15	U	13	R	15	L	9	Q
27	18	L	10	I	12	P	13	B	15	L	10	Q
	13	H	10	G	13	H	13	Q	12	E	7	B

Per ragioni di tempo, non vi è stata la possibilità di analizzare approfonditamente i nuovi dati. È possibile comunque fare una prima considerazione sulla complessità del task osservando i dati sottolineati in azzurro. Tali dati si riferiscono alle due patch target su sfondi diversi, create per generare l'effetto illusorio di differenza. I casi sottolineati invece indicano che l'utente vede le due patch effettivamente uguali, eludendo l'illusione ottica. È possibile ipotizzare che l'utente compensi cognitivamente le differenze percettive, confermando così uno dei possibili fraintendimenti rispetto al task assegnato.

Per compiere valutazioni finali rispetto questi ultimi dati è necessario svolgere ulteriori indagini.

## 4 Disseminazione dei risultati

Quest'anno una parte consistente del lavoro è stata la prosecuzione della divulgazione dei risultati ottenuti negli anni precedenti. Siamo partiti dai primi esperimenti che valutavano il livello di coincidenza di alcuni tra i principali indici di resa cromatica, rispetto alla percezione del sistema visivo umano.

In Aprile, alla conferenza internazionale della CIE su *Lighting Quality & Energy Efficiency*, sono stati presentati i primi dati dell'esperimento svolto nel 2012, il cui scopo era valutare in che modo il sistema visivo umano preservasse l'apparenza dei colori, usando scene 2D e 3D [30].

La versione estesa dell'articolo, con una approfondita analisi dei dati e un confronto dei risultati derivanti da osservatori, con i principali indici di resa cromatica, è stata accettata e in via di pubblicazione sul *Journal of Modern Optics* (rivista internazionale con impact factor 1.16) [31]. In questa versione si è posta particolare attenzione alla scena con oggetti tridimensionali, che introducono ombre e inter-riflessioni nella scena, situazione che si riscontra nella vita di tutti i giorni. Anche in questo caso lo scopo era la valutazione dell'indice di resa cromatica in situazioni che potessero essere riportate al caso reale, piuttosto che l'osservazione di campioni osservati fuori da ogni contesto.

## 5 Conclusioni e sviluppi futuri

I lavori riguardano la diversa resa cromatica percepita in particolari configurazioni spaziali. Scopo dei lavori è valutare l'effetto dell'apparenza in riferimento a un possibile indice di resa cromatica, poiché i CRI sviluppati fino a ora considerano solo lo spettro della luce di test ma non la sua distribuzione spaziale nella scena.

Sensazione e percezione del colore sono fenomeni che avvengono durante un complesso percorso che va dall'occhio al cervello. Una delle proprietà che guidano la nostra visione è il concetto di località: il colore è percepito in base al contesto in cui viene osservato. Il sistema visivo umano non registra in maniera oggettiva la realtà, ma la percepisce in maniera diversa a seconda delle condizioni di illuminazione e della configurazione spaziale della scena.

Nel presente documento abbiamo descritto le criticità e complessità degli esperimenti effettuati. Alla luce di quanto emerso da questo report, risulta chiaro che la direzione verso la quale si sta indagando è interessante e potenzialmente ricca di risultati. Tuttavia al momento è prematuro ricavare conclusioni significative e definitive su possibili CRI alternativi.

Una delle possibili direzioni da seguire per risolvere alcune delle criticità presentate, e avere un confronto con i dati ottenuti finora, è quello di progettare un esperimento su web, che permetta a un più alto numero di utenti di effettuare esperimenti simili a quelli qui descritti.

Si intende inoltre proseguire anche con esperimenti fisici per ultimare la serie di esperimenti finora presentati.

## 6 Riferimenti bibliografici

1. CIE 17.4-1987 "International Lighting Vocabulary", ISBN 978 3 900734 07 7.
2. S. Brueckner, P. Bodrogi, T. Q. Khanh, "Colour Rendering of new white LED light sources – visual tests," Proceedings of Lux Europa, Istanbul, 2009, pp. 397-404.
3. C. Oleari (a cura di), "Misurare il colore", Hoepli, 1998.
4. W. Davis, Y. Ohno, "Toward an improved color rendering metric," Proceedings of SPIE 5941, I.T. Ferguson, J.C. Carrano, T. Taguchi, and I.E. Ashdown, eds., San Diego: 2005.
5. W. Davis, Y. Ohno, "Development of a Color Quality Scale," Proceedings of Light and Color in Lighting Research Office Symposium, 2006.
6. D. Geisler-Moroder, A. Dur, "Color-rendering indices in global illumination methods," Journal of Electronic Imaging, vol. 18, 2009, pp. 043015-12.
7. CIE, Colour Rendering, TC 1-33 closing remarks, CIE Pubbl. No. 135/2, 1999.
8. F. Szabó, I. Zilizi, P. Bodrogi, J. Schanda, "Visual experiments on colour harmony: a formula and a rendering index", CIE 2007 Session. Beijing, China, 2007.
9. K. Smet, W.R. Ryckaert, S. Forment, W. Hertog, G. Deconinck, P. Hanselaer, "Colour rendering: an object based approach," CIE Light and Lighting Conference with special emphasis on LEDs and Solid State Lighting, Budapest, Hungary: 2009.
10. K. Smet, S. Jost-Boissard, W. R. Ryckaert, G. Deconinck, P. Hanselaer, "Validation of a colour rendering index based on memory colours," in CIE Lighting Quality & Energy Efficiency, Vienna, 2010, pp. 136–142.
11. O. da Pos, M. L. Pietto, "Evaluation of light sources through the unique hues and a new multisensory semantic differential", Atti della VII conferenza Nazionale del Colore, Roma, 15-16 Settembre 2011.
12. H. Yaguchi, Y. Takahashi, S. Shioiri, "A proposal of color rendering index based on categorical color names". Internat. Lighting Congress, Istanbul 2001.
13. Li, C., Ronnier Luo, M., Li, C. and Cui, G. (2012), "The CRI-CAM02UCS colour rendering index", Color Res. Appl., 37, pp. 160–167.

14. J. P. Freyssinier-Nova, M. S. Rea, "A two-metric proposal to specify the color-rendering properties of light sources for retail lighting, in Tenth International Conference of Solid-State Lighting, Proceedings of SPIE (San Diego, CA, 2010).
15. C. Oleari, "Colour Rendering Quality of a Light Source and Perceived Colour Gamut as the MacAdam Limit of the Adapted Observer CIE 31 by Perfect Colour-Constancy Actuation in a Colour-Vision Model Based on the OSA-UCS System", published in Atti della VII conferenza Nazionale del Colore, Roma, 15-16 Settembre 2011.
16. P. Bodrogi, S. Brückner, T.Q. Khanh, "Ordinal scale based description of colour rendering", 2011, Color Res. Appl., 36, pp. 272–285.
17. P. Bodrogi, S. Brückner, T. Q. Khanh, "Re-defining the colour rendering index," CIE Proceedings 2009.
18. L. A. Whitehead, M. A. Mossman, "A Monte Carlo method for assessing color rendering quality with possible application to color rendering standards", 2012, Color Res. Appl., 37, pp.13–22.
19. K. Hashimoto, T. Yano, M. Shimizu, Y. Nayatani, "New method for specifying color-rendering properties of light sources based on feeling of contrast", 2007, Color Res. Appl., 32, pp. 361–371.
20. G. Wyszecki, "Current developments in colorimetry", AIC Color, 1973.
21. E. Land and J. McCann, "Lightness and Retinex Theory", J. Opt. Soc. Am. 61(1), 1–11 (1971).
22. R. W. G. Hunt, "A model of colour vision for predicting colour appearance", Color Res. Appl. 7, 1982.
23. Y. Nayatani, K. Hashimoto, K. Takahama, H. Sobagaki, "A nonlinear color-appearance model using Estevez-Hunt-Pointer primaries", Color Res. Appl. 12, 1987.
24. CIE, "The CIE 1997 Interim Colour Appearance Model (Simple Version), CIECAM97s", CIE Pub. 131, 1998.
25. N. Moroney, M. D. Fairchild, R.W.G. Hunt, C. Li, M. R. Luo, T. Newman, "The CIECAM02 color appearance model", Scottsdale, IS&T/SID 10<sup>th</sup> Color Imaging Conference 2002.
26. M.D Fairchild, G. M. Johnson, "Image appearance modeling", Proc. SPIE/IS&T Electronic Imaging Conference, 2003.
27. J. Albers, "Interaction of color", 1975
28. A. Rizzi, C. Gatta, D. Marini, "YACCD: Yet Another Color Constancy Database", Proceedings of Color Imaging VIII, IS&T/SPIE's International Symposium on Electronic Imaging, 2003.
29. OSA Committee on Colorimetry, "The science of Color", DC: Optical Society of America 373, 1953.
30. A. Rizzi, C. Bonanomi, S. Fumagalli, "A test of color rendering evaluation" in CIE 2014 Lighting Quality & Energy Efficiency, April, 23-26,2014, Kuala Lumpur, Malaysia.
31. S. Fumagalli, C. Bonanomi, A. Rizzi, "Experimental assessment of color rendering indices and color appearance under varying setups", in pubblicazione su Journal of Modern Optics, 2014, <http://dx.doi.org/10.1080/09500340.2014.952694>

## 7 Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Il gruppo di ricerca fa capo a due laboratori del Dipartimento di Informatica dell'Università degli Studi di Milano, il laboratorio di Percezione, Fattori Umani e Tecnologie ed il laboratorio di Eidomatica. Entrambi i laboratori, con taglio diverso ma complementare si occupano di colore, percezione ed immagini digitali. Ai laboratori afferiscono due professori associati (Alessandro Rizzi e Daniele Marini), un ricercatore (Davide Gadia) e due collaboratori di ricerca (Cristian Bonanomi e Barbara Barricelli).

Alessandro Rizzi è professore associato al Dipartimento di Informatica all'Università degli Studi di Milano. Insegna fondamenti di imaging digitale, informatica multimediale video, interazione uomo-macchina 1. Ricerca nel campo dell'imaging digitale e della visione dal 1990. È particolarmente interessato agli argomenti legati alla percezione applicata alle immagini digitali. È uno dei fondatori del gruppo italiano

Gruppo del Colore. È autore di più di 200 articoli scientifici e ha recentemente pubblicato un libro scritto assieme a John McCann dal titolo “The Art and Science of HDR Imaging”.

Cristian Bonanomi è collaboratore di ricerca al dipartimento di Informatica dell’Università degli Studi di Milano. Ha ricevuto il suo diploma di dottorato in Informatica nel 2011. È autori di articoli riguardanti l’apparenza del colore, l’elaborazione di immagini, la percezione in ambienti tridimensionali e proprietà di resa visiva dei sistemi di illuminazione.