

Università degli Studi di Napoli “Federico II”

Scuola Politecnica e delle Scienze di Base
Area Didattica di Scienze Matematiche Fisiche e
Naturali

Dipartimento di Fisica “Ettore Pancini”



Laurea triennale in Ottica e Optometria

Discromatopsia: “Un difetto visivo” Utilizzo di lenti EnChroma

Relatori:

Prof. Michele Gagliardi

Candidato:

Francesco Dedalo
Matricola M44/623

A.A. 2022/2023

*Ai miei genitori,
a voi devo tutto.*

*A mia sorella Simona,
sarò sempre ad un passo da te.*

*A me stesso,
dopo tanti ostacoli,
ho raggiunto il traguardo.*

INDICE

INTRODUZIONE	pag. 5
CAPITOLO 1: LA PERCEZIONE DEI COLORI	pag. 7
1.1 Occhio: Sistema fisiologico ed ottico.....	pag. 7
1.2 Aspetti fisici della luce.....	pag. 10
1.3 Spettro elettromagnetico della luce.....	pag. 10
1.4 Visione cromatica.....	pag. 11
1.4.1 Teoria tricromatica e Teoria del processo opponente.....	pag. 11
1.4.2 Teoria disco di Newton.....	pag. 12
1.5 Discriminazione del colore.....	pag. 13
1.6 Diagramma di C.I.E. di cromaticità.....	pag. 13
1.7 Modelli: Sintesi additiva (RGB) e sintesi Sottrattiva (CMYK).....	pag. 15
CAPITOLO 2: DEFICIT DELLA VISIONE CROMATICA	pag. 17
2.1 Deficit congeniti della visione cromatica.....	pag. 18
2.2 Deficit acquisiti della visione cromatica.....	pag. 21
2.3 Test diagnostici.....	pag. 21
2.3.1 Test delle lanterne di Farnsworth / Holmes-Wright.....	pag. 22
2.3.2 Tavole pseudoisocromatiche. Test di Ishihara.....	pag. 22
2.3.3 Anomaloscopia di Nagel.....	pag. 23
2.3.4 Test HRR.....	pag. 24
2.3.5 Test di Farnsworth-Munsell.....	pag. 24
2.3.6 The City University Colour Test.....	pag. 26
2.3.7 Test di Holmgren.....	pag. 26
CAPITOLO 3: LO STUDIO SPERIMENTALE	pag. 27
3.1 Efficacia delle lenti EnChroma ed altri studi.....	pag. 27
3.2 Candidati e metodo.....	pag. 29
3.3 L'indagine effettuata.....	pag. 30
3.4 Utilizzo di lenti EnChroma nell'indagine.....	pag. 33
CONCLUSIONI	pag. 35
Bibliografia.....	pag. 36
Sitografia.....	pag. 36

INTRODUZIONE

La visione dei colori è fondamentale per l'essere umano poiché permette di riconoscere, distinguere ed interpretare oggetti che fanno parte di ogni azione quotidiana. La visione cromatica, e quindi la percezione dei colori, influenza anche la sfera emotiva, culturale, psicologica e decisionale. I colori possono rievocare alla mente, momenti passati legati ad emozioni, o semplicemente suscitare, ad esempio, passioni come il Rosso, purezza come il Bianco, gelosia come il Giallo o speranza come il Verde. Ogni cultura attribuisce un significato diverso ai colori, le diverse popolazioni che si sono susseguite hanno elaborato nel corso degli anni un personale codice cromatico che presenta, però, similitudini con gli altri. Anticamente i greci, non identificavano i colori tramite dei nomi propri ma venivano classificati in base alla loro limpidezza o tenebrosità. Con il termine *xanthos* potevano indicare tanto il rosso vivo del fuoco quanto il giallo lucente del sole. Nell'antichità i colori fondamentali erano considerati due, il nero e il bianco, uno simbolo di oscurità e malvagità, l'altro simbolo di purezza e chiarezza, dove il miscuglio dei due, dava poi vita a tutti i colori visibili. Tale pensiero, rimase fino all'età medievale. Lo studioso e filosofo Platone, oltre al bianco e nero come colori primari volle aggiungere anche il rosso splendente, quest'ultimo era simbolo di vita e fuoco, ovvero stava a rappresentare vita e morte, creatore e distruttore; il nero era il colore definito misterioso e inquietante, il bianco, da sempre e tutt'oggi associato al simbolo di purezza, il colore di Dio. Nell'epoca Rinascimentale invece, Leonardo Da Vinci, ipotizzava che il Bianco e il Nero fossero gli estremi di uno spot cromatico, iniziando così ad avvicinarsi al mondo del cromatismo e studiando la distinzione delle cromie prodotte dalla luce. Nell'Ottocento Goethe ipotizzò che non era la luce a produrre i colori, ma che quest'ultimi fossero dati da un complesso fenomeno scaturito dall'interazione di due poli naturali: la luce ed il buio.

Fin dall'antichità, i coloranti venivano ottenuti da un miscuglio di elementi presenti in natura, come oli, fango, uovo etc. Il primo colorante di tipo sintetico fu scoperto da William Henry Perkin nel 1856 circa, che produsse il colorante viola.

Fin dall'età infantile, ci insegnano a catalogare i colori e suddividerli in scale cromatiche sempre più complesse, infatti possiamo distinguere l'azzurro dal celeste o il beige dall'ocra e così via. Questo ha portato nel corso degli anni

all'affermazione di una nuova e diversa corrente cromatica, che prende il nome di Relativismo Sociale, ovvero, ogni popolazione ha la capacità di definire una propria scala cromatica. Ricordando che il ruolo fondamentale del colore è quello di creare, associare e classificare codici in modo da distinguere i vari individui e gruppi, l'essere umano, dopo aver accostato un colore ad un materiale, tende ad associarlo anche in condizioni di diversa illuminazione, altresì quando questo apparirà in modo diverso. Svariati sono i fattori che possono influenzare o determinare il colore di un oggetto: la luce incidente sul materiale, che può variare il colore dell' oggetto, cambiando la fonte di illuminazione; la distanza tra oggetto e punto di osservazione; la luce riflessa dal materiale illuminato; l'ambiente circostante.

Possiamo dire che l'occhio umano si limita a rispondere ad una stimolazione delle diverse lunghezze d'onda, ma ciò che elabora l'informazione, definisce il colore che già risiede nella nostra mente: è il cervello.

CAPITOLO 1

LA PERCEZIONE DEI COLORI

La percezione dei colori non è altro che l'evoluzione della luminosità, con lo scopo di poter evidenziare però, i contrasti. Ciò è dovuto alla capacità di distinguere le diverse lunghezze d'onda della luce riflessa dagli oggetti e dalla capacità di analisi di un oggetto rispetto allo sfondo. Bisogna comunque ricordare che, la visione è un complesso insieme di processi fisici, fisiologici, chimici e psicologici proprio perché il segnale luminoso recepito dal nostro cervello, può avere una notevole influenza sulla nostra psiche. Il modo in cui percepiamo ed associamo i colori, non è altro che un'esperienza soggettiva. Diventa quindi fondamentale, spiegare e trattare l'anatomia e la fisiologia dell'organo predisposto alla visione: l'occhio.

1.1 Occhio: Sistema fisiologico, psichico ed ottico.

Per poter comprendere al meglio il complesso meccanismo della visione è necessario illustrare l'organo preposto alla percezione e trasmissione del segnale luminoso in stimolo nervoso: l'occhio.

L'occhio umano, come in figura 1, è un bulbo circa sferico, con un diametro che si aggira intorno ai 24mm, è un organo sensoriale molto complesso che converte energia luminosa quindi elettromagnetica, in segnali elettrici che, vengono poi elaborati al cervello. Dal punto di vista anatomico e fisiologico, il bulbo è un organo formato dalla sovrapposizione di tre tonache, dallo strato più esterno ¹:

- ❖ La tonaca fibrosa
- ❖ La tonaca vascolare o Uvea
- ❖ La tonaca nervosa o Retina

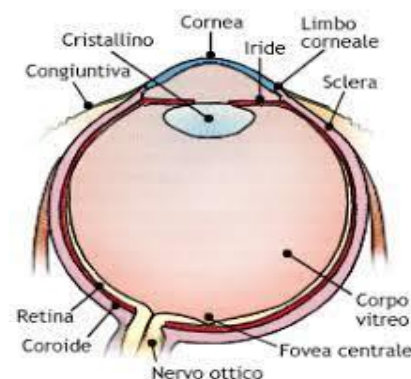


Figura 1: Struttura Occhio

La tonaca fibrosa, presenta una zona posteriore, sclera, e una anteriore, cornea.

La sclera è costituita da fasci di fibre collagene di tipo I che si estendono in diverse direzioni e parallele alla superficie; Nella parte anteriore della tonaca fibrosa, si trova la cornea, leggermente più spessa della sclera.

¹ A.Calligaro, R.Colombo, A. De Pol, L.Guidotti, R.Millo, N.M.Maraldi, P.Narducci, V.Tessitore, L.Roncali, R.Rana, G.Sica, F.G.Urzi, "Citologia e Istologia funzionale" Edi-ermes.

La cornea è uno dei mezzi diottrici dell'occhio, insieme al cristallino, l'umor acqueo e corpo vitreo. Il suo potere di rifrazione è in funzione della sua struttura e del raggio di curvatura, in media di 43 Diottrie. È priva di vasi sanguigni e riceve nutrimento dall'umor acqueo e dal film lacrimale. Lo strato intermedio, la tonaca vascolare, è formato da corioide, corpo ciliare e iride.

La corioide è una membrana, di colorito bruno, morbida e sottile, costituisce la prima porzione dell'uvea; È costituita da tessuto connettivo in cui si trovano lamelle di fibre elastiche trasparenti e fibroblasti; il suo aspetto brunoastro è dovuto alla presenza di melanociti e macrofagi. Il corpo ciliare è un organo addetto alla produzione dell'umor acqueo, posto immediatamente i muscoli ciliari e circolarmente ad essi.

L'iride regola, in diverse condizioni di illuminazione, la quantità di luce che penetra attraverso il suo foro: la pupilla. La sua funzione, è pari a quella di un diaframma regolabile per la presenza di due muscoli lisci: il muscolo sfintere della pupilla, sottilissimo, la cui contrazione restringe il suo diametro dando luogo alla miosi ovvero, restringimento della pupilla, e muscolo dilatatore della pupilla, costituito da elementi mioepiteliali disposti a raggiera tra lo strato vascolare e l'epitelio pigmentato che determina la midriasi, ovvero la dilatazione della pupilla, sotto l'azione dei neuroni post gangliari del sistema nervoso simpatico.

Con la miosi, in condizioni di forte intensità luminosa, la profondità di fuoco dei mezzi aumenta e le aberrazioni vengono minimizzate.

Il cristallino, come in figura 2, è una lente trasparente, biconvessa, flessibile con un potere diottrico statico di circa 17 Diottrie, posizionato dietro la pupilla e sospeso dalle fibre della zonula dello

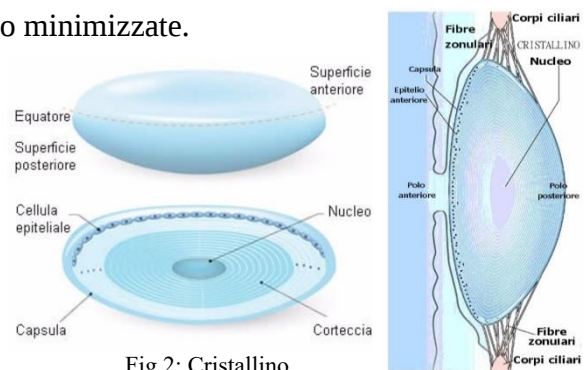


Fig.2: Cristallino

Zinn a loro volta collegate ai muscoli ciliari. La sua elasticità si perde con l'età, comportando una diminuzione dell'ampiezza accomodativa fino a giungere ad una situazione di presbiopia in cui risulta inefficace la focalizzazione da vicino.

La tonaca nervosa o anche detta Retina, è lo strato più interno. La retina propriamente detta ², è distinta in due porzioni: una anteriore, poco differenziata, che rappresenta la parte cieca della retina, e una posteriore, altamente specializzata, in cui si trovano i fotorecettori. La fovea, si presenta come un piccolo incavo per la presenza di cellule gangliari, ma soprattutto per la presenza dei coni adibiti alla visione cromatica e distinta.

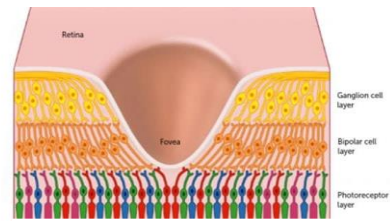


Fig.3: Struttura della Retina

Nella retina, come in figura 3, si organizzano dieci strati cellulari paralleli che, dall'esterno verso l'interno della tonaca sono:

- ❖ Epitelio pigmentato
- ❖ Strato dei coni e bastoncelli
- ❖ Membrana limitante esterna
- ❖ Strato dei granuli esterni
- ❖ Strato plessiforme
- ❖ Strato dei granuli interni
- ❖ Strato plessiforme interno
- ❖ Strato delle cellule multipolari / Gangliari
- ❖ Strato degli assoni del nervo ottico / Fibre nervose
- ❖ Membrana limitante interna

I coni e bastoncelli, figura 4, sono i fotorecettori: i coni sono adibiti alla visione fotopica e cromatica, mentre i bastoncelli sono adibiti alla visione mesopica e scotopica.

I coni sono esclusivamente presenti nella fovea e diminuiscono man mano che ci si allontana dalla stessa, mentre aumentano i bastoncelli. Entrambe le cellule fotorecetttrici constano di un segmento esterno, conico nei coni e cilindrico nei bastoncelli.

Nei bastoncelli, circa 100 milioni ³, il pigmento con quantità maggiore rispetto ai coni, con un massimo di assorbimento di

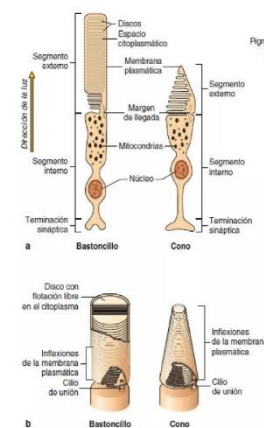


Fig.4: Fotorecettori e fototrasduzione.

². A.Caporossi, T.Salgarello, C.Manganelli, "Oftalmologia" Piccin.

³ Zeri F., Rossetti A., Fossetti A., Calossi A., "Ottica Visuale." Seu.

circa 500nm è la rodopsina, formato da una proteina, l'opsina e dal retinale, che in assenza di luce si trova come isomero 11-cis-retinale.

Nei coni, circa 4 milioni, il pigmento è la iodopsina, in minor quantità rispetto al pigmento dei bastoncelli, ma sono presenti tre tipi di fotopigmenti che presentano, per ognuno, un massimo assorbimento:

- ❖ Coni Rossi, il 64% dei coni totali, sono anche detti coni L, ovvero sensibili alle lunghezze d'onda Lunghe, quelle del rosso, circa 558 nm, il pigmento è l'Eritrolabio.
- ❖ Coni Verdi, il 32% dei coni totali, sono anche detti coni M, ovvero sensibili alle lunghezze d'onda Medie, quelle del verde, circa 529 nm, il pigmento è il Clorolabio.
- ❖ Coni Blu, 2 - 7 % dei coni totali, sono anche detti coni S, ovvero sensibili alle lunghezze d'onda Corte, quelle del blu, circa 420 nm, il pigmento è il Cianolabio.

1.2 Aspetti fisici della Luce.

La luce ha duplice natura: Ondulatoria (onde) elaborata da Christiaan Huygens, che proponeva di trattare la luce come un'onda; Corpuscolare (fotoni), Isaac Newton propose un modello che materializzava la luce in piccoli corpuscoli che si propagavano in linea retta. In seguito, James Clerk Maxwell riuscì a dimostrare che la luce era una un'onda di natura elettromagnetica, di tipo trasversale, ossia con oscillazioni perpendicolari alla direzione di propagazione come in figura 5.

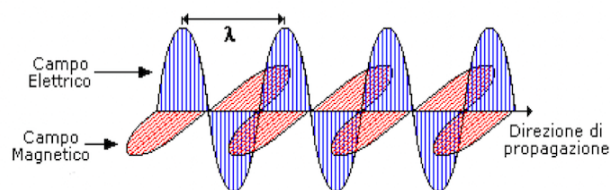


Fig.5: Campo Elettromagnetico

La Luce è dunque, un fenomeno ondulatorio di natura elettromagnetica, attraverso il quale, l'energia elettromagnetica può trasferirsi da luogo a luogo per propagazione ed è composta da un campo elettrico e da un campo magnetico oscillanti variabili nel tempo, che si propagano nel vuoto ad una velocità di $3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Tale velocità chiamata c viene definita "velocità della luce"⁴.

⁴ J.W.Jewett, R.A.Serway, "Principi di fisica" Edises

1.3 Spettro elettromagnetico della Luce.

Lo Spettro elettromagnetico, figura 6, indica l'insieme di tutte le possibili frequenze delle radiazioni elettromagnetiche. Lo Spettro del Visibile è quella parte dello spettro elettromagnetico che comprende l'insieme delle lunghezze d'onda a cui l'occhio umano è sensibile, e che sono alla base della percezione dei colori. Esso è situato tra i 390/400 nm ed i 700/760 nm, dove alla lunghezza d'onda minore corrisponde al gamma cromatica del violetto, alla lunghezza d'onda maggiore corrisponde quella del rosso. La radiazione elettromagnetica è usata nella scienza dei materiali per vari motivi: per individuare la presenza di determinati elementi chimici in una struttura, il grado di cristallinità, etc. L'insieme di queste tecniche d'indagine tramite radiazione prende il nome di spettroscopia ⁵.

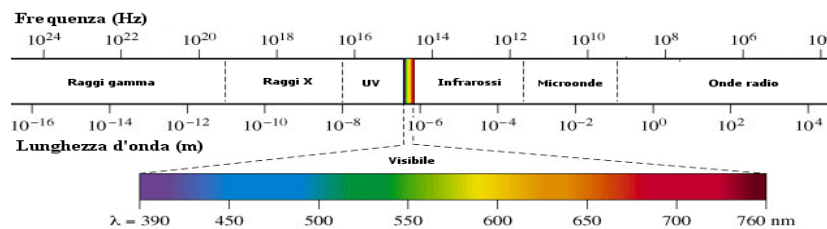


Fig.6:Componenti dello Spettro Elettromagnetico

1.4 Visione Cromatica.

Nel corso degli anni, molti studiosi e fisici hanno cercato di spiegare, prima in modo empirico e poi scientifico, il fenomeno del colore. Le interpretazioni sono state le più disparate, partendo da Pitagora con il distacco delle particelle di oggetti che arrivavano agli occhi; a Platone il quale, invece, sosteneva che dalla pupilla partiva un fascio di luce che colpiva l'oggetto e rimbalzando, tornava all'occhio con il colore colpito.

Infine, i fisici, matematici come Newton, Goethe, Hering, Young, Itten, diedero le più importanti teorie sui colori ⁶.



Fig.7: Evoluzione temporale della Teoria Cromatica.

⁵ F.Catalano, "Elementi di ottica generale" Zanichelli

⁶ F.Catalano, "Fondamenti di ottica della visione" Piccin.

1.4.1 Teoria Tricromatica e Teoria del Processo opponente.

Nel 1800, Thomas Young propose una teoria del colore definita come teoria tricromatica, in cui sosteneva la presenza di tre tipi di recettori, in grado di percepire una determinata lunghezza d'onda. Con la possibilità di poter ottenere tutti gli altri colori tramite la sovrapposizione degli stimoli provenienti da questi tre recettori. Young, indicò come colori primari le tre lunghezze d'onda a cui erano sensibili i recettori, ossia il rosso, il verde e il blu, capaci di generare tramite la loro combinazione la percezione di tutto lo spettro visibile. La teoria si basa sulla combinazione di questi tre tipi di coni e non esistono al di fuori di questi, recettori specifici per ogni singola lunghezza d'onda

⁷. I tre tipi di coni sono definiti: L, M e S, figura 8. Questi ultimi, sono composti da tre tipi di recettori, e distribuiti in proporzioni differenti: il rosso 64%, il verde 32% e il blu 2%. Inoltre, i coni S sono situati all'esterno

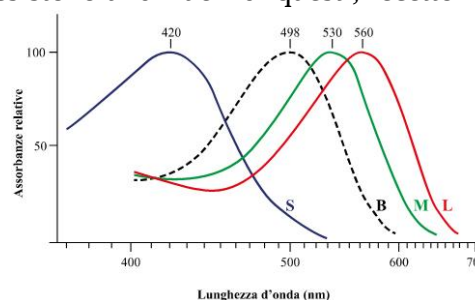


Fig.8: Spettro di assorbimento dei tre tipi di coni.

della porzione centrale della retina, al contrario dei coni M e L, la loro sensibilità è maggiore rispetto al rosso e al verde. Per questo motivo possono esserci percezioni differenti di blu, sia perché sono posti fuori dalla zona di massima acuità visiva, la fovea, sia perché l'indice di rifrazione del blu è differente dal rosso e dal verde e possono crearsi sfocature durante la messa a fuoco, dovute all'aberrazione cromatica. Verso la fine del 1800, Ewald Hering propose una nuova teoria definita opponenza cromatica, come in figura 9, attraverso la quale sostiene che la retina comprende tre tipi di fotorecettori opposti tra loro, che rispondono a rosso-verde, giallo-blu e bianco-nero e che tutti i colori dipendano dalla risposta di questi tre fotorecettori. Questa teoria si basa su fattori empirici, mostrando la possibilità di avere un rosso giallastro, un rosso bluastro, ma non può esserci un rosso verdastro, in quanto sono opposti tra loro. La teoria prende il nome di teoria dei quattro colori. Hering spiega perché l'essere umano percepisce il blu e il verde come turchese, il rosso e il giallo come arancione, e così via; non percepisce il rosso con

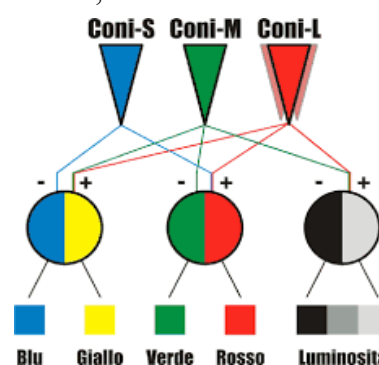


Fig.9 : Opponenza Cromatica di Hering.

⁷ A. Rossetti, P. Gheller, "Manuale di optometria e contattologia." Zanichelli.

il verde o il blu con il giallo nello stesso posto e nello stesso istante. Con il tempo si è arrivati alla conclusione che, le teorie proposte da Young ed Hering siano giuste, ma che avvengano in momenti diversi.

1.4.2 Teoria disco di Newton.

Grazie a Newton è possibile avere il primo modello di rappresentazione del colore, figura 10. È costituito da un cerchio con centro bianco, lungo la circonferenza, ordinatamente disposti, i colori scomposti dal prisma. I sette colori principali in questo modello sono: Rosso, Arancione, Giallo, Verde, Azzurro, Indaco, Violetto. I colori presenti lungo la circonferenza del cerchio di Newton sono detti colori

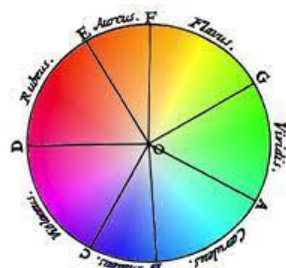


Fig.10: Disco di Newton.

spettrali, cioè che essi sono componenti identificabili dallo spettro cromatico. Essi sono ottenuti grazie all'interpretazione di un fascio di luce bianca con un prisma e di conseguenza sono associabili ad ogni singola lunghezza d'onda. Esistono altri colori visibili non presenti in questo modello, ovvero colori non spettrali che si ottengono dalla mescolanza di due o più colori spettrali. Newton affermò che, il colore non era una qualità di corpi, ma qualità della luce stessa, ed in particolare, frutto della radiazione riflessa da un oggetto. Quando la luce colpisce un oggetto viene parzialmente assorbita a seconda della lunghezza d'onda, mentre la parte non assorbita viene riflessa e trasmessa ai recettori cromatici all'interno dell'occhio. Un oggetto che assorbe tutte le onde elettromagnetiche viene visto nero, mentre uno che riflette tutte le onde elettromagnetiche viene visto bianco. Succede però che, quando un oggetto assorbe tutte le lunghezze d'onda tranne una parte, questo viene visto proprio del colore relativo a quella lunghezza d'onda riflessa ⁸.

1.5 Discriminazione del colore.

Le tre variabili nella visione dei colori: tonalità, saturazione e luminosità, hanno origini fisiche e dipendono tutte dalla lunghezza d'onda. Gli esperimenti di discriminazione del colore ci consentono di sapere quanto deve essere la variazione di lunghezza d'onda ($\Delta\lambda$) necessaria per rilevare una differenza di tonalità, saturazione e luminosità ⁹.

⁸ F.Giudice, "Lo spettro di Newton, la rivelazione della luce e dei colori." Donzelli Editore.

⁹ A.Rossetti, P.Gheller, "Manuale di optometria e contattologia." Zanichelli.

- ❖ Tonalità: si riferisce al colore effettivo. Ad esempio, per luce blu e rossa è necessario un grande cambiamento di lunghezza d'onda per rilevare un cambiamento di tonalità.
- ❖ Saturazione: descrive il grado di pallore del colore. La saturazione è legata alla purezza colorimetrica e non contiene parti di nero o bianco.
- ❖ Luminosità: descrive la quantità di nero o bianco presente nel colore percepito.



Fig.11:Grafico Tonalità, Luminosità e Saturazione

1.6 Diagramma C.I.E di cromaticità.

Il modello C.I.E. (Commissione Internazionale per l'illuminazione) del 1931 è un diagramma colorimetrico attraverso il quale è possibile identificare in modo estremamente preciso un colore. A differenza dei metodi RGB e CMYK, utilizzati rispettivamente nella sintesi additiva e sottrattiva, il diagramma, come in figura 12, si basa su di un principio di osservazione standard e sull'utilizzo dei tre colori primari immaginari che vengono opportunamente descritti da tre parametri: X, Y, Z, posti su un piano di coordinate x, y; dove X corrisponde ad un rosso violaceo ipersaturo, Y corrisponde ad un verde ipersaturo e Z ad un blu ipersaturo. Il diagramma contiene tutte le lunghezze

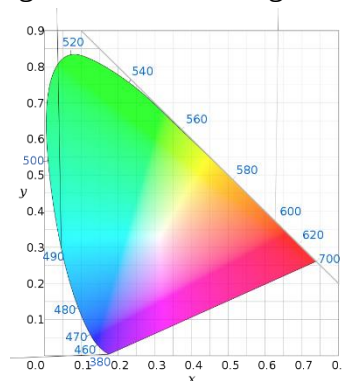


Fig.12: Diagramma di cromaticità C.I.E.

d'onda visibili dall'occhio umano ed i colori si trovano all'interno di un triangolo avente vertici in $(x=0, y=0)$, $(x=1, y=0)$, $(x=0, y=1)$. I colori spettrali puri che corrispondono ad una precisa lunghezza d'onda si trovano sulla curva esterna a forma di campana; alla base del diagramma, la chiusura è caratterizzata dal "porpora puro" che non rappresenta un colore spettrale. Tutti i punti interni al diagramma sono colori non spettrali, ottenuti combinando tra loro i tre colori spettrali. Il punto indicato con W al centro del diagramma rappresenta il colore bianco, definito anche punto acromatico, il quale rappresenta il punto più insaturo ed ha coordinate $(x=1/3, y=1/3, z=1/3)$. Preso un qualsiasi colore spettrale sulla

curva del diagramma, tracciando una linea retta da questo punto a W (colore bianco)

si trovano su questa retta tutte le tinte di questo colore, dal punto di massima saturazione (il punto sulla curva) a quello a saturazione nulla (il punto di colore bianco W). Prolungando questa retta fino a intersecare la curva dal lato opposto, si individua il suo colore complementare, cioè quello ottenuto sottraendo dal bianco il colore di partenza. Per non ricorrere a un diagramma tridimensionale è possibile normalizzare le tinte facendo in modo che

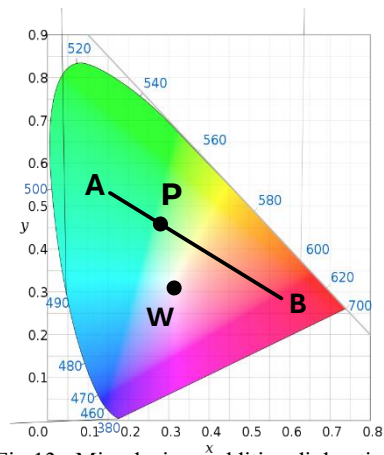


Fig.13 : Miscelazione additiva di due tinte

la loro somma sia sempre pari ad uno. Se X, Y, e Z sono i tre valori che identificano un colore e $X+Y+Z$ la loro somma, ponendo: $x = X/(X+Y+Z)$ $y = Y/(X+Y+Z)$ $z = Z/(X+Y+Z)$ risulta che $x+y+z$ è sempre uguale ad 1 per qualsiasi valore originario di X, Y e Z. Da questo si ricava che: $z = 1-x-y$. È dunque possibile utilizzare due sole coordinate cromatiche (x e y, ad esempio) per identificare un colore, essendo la terza (z, in questo caso) ricavabile sottraendo all'unità le altre due. Il vantaggio è evidente: normalizzando i colori col meccanismo della somma costante è possibile utilizzare un grafico bidimensionale per catalogare qualitativamente (e non quantitativamente) tutte le tinte reali. Prese due tinte A e B, sul segmento che li unisce, è possibile trovare tutte le mescolanze additive di questi due colori e preso un generico punto P lungo il segmento, è possibile ricavare le percentuali di saturazione delle due tinte. Nel baricentro del segmento si trovano percentuali del 50% dovute al primo colore e percentuali del 50% dovute al secondo colore. Se il segmento passa per il punto W allora le due tinte, possiamo definirle

“complementari”, e se W cade nel baricentro del segmento le due tinte hanno anche la stessa saturazione quindi la loro somma forma perfettamente il bianco. Inoltre, una caratteristica fondamentale di questo diagramma è che presi tre colori all'interno della campana (A, B, C), tutti i possibili colori risultanti dalla mescolanza di queste tre tinte, si trovano all'interno di un triangolo che ha per vertici proprio i tre punti considerati. Questi tre punti saranno i colori primari

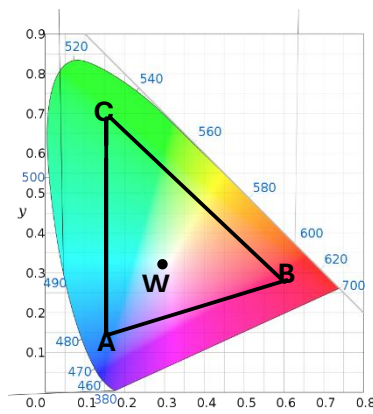


Fig.14 : Triangolo dei tre colori primari.

per tutte le tinte interne al triangolo. I punti all'interno del diagramma ma esterni a questo triangolo, avranno bisogno di altri primari per essere creati.

1.7 Modelli: Sintesi Additiva (RGB) e Sintesi Sottrattiva (CMYK).

Esistono due metodi fondamentali per produrre stimoli cromatici: La sintesi additiva e la sintesi sottrattiva. Il modello *RGB* deriva dalle iniziali dei tre colori che vengono utilizzati per poter ottenere tutti gli altri; in particolare RGB è l'acronimo di *Red*, *Green*, *Blue*. E' un tipo di modello additivo, in quanto, unendo i tre colori primari alla loro intensità massima, si ottiene il bianco. Per le sue caratteristiche, è un modello particolarmente adatto per la visualizzazione di immagini in dispositivi elettronici. Infatti, viene applicato su uno sfondo nero, e grazie ai raggi di luce, vengono generati i colori per le TV. Modificando l'intensità dei singoli punti, è possibile produrre diversi colori, sommando additivamente i colori a coppie, si ricava la triade sottrattiva:

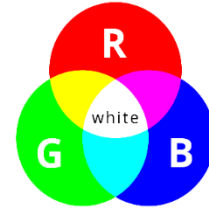


Fig.15: Sintesi additiva.

- ❖ $R+G = \text{giallo}$
- ❖ $R+B = \text{magenta}$
- ❖ $G+B = \text{ciano}$

Il modello *CMYK* è un modello a sintesi sottrattiva, il quale, comporta l'assorbimento selettivo delle lunghezze d'onda, chiamato quadricromia, perché composto da quattro canali colore: *Ciano*, *Magenta*, *Yellow*, *Black*; in cui, i primi tre colori sono considerati i primari sottrattivi. La somma dei tre colori primari sottrattivi dà il Bistrot, ovvero un colore simile al marrone, per questo motivo è stato aggiunto il nero. La sovrapposizione di più coloranti di diversa concentrazione l'uno sull'altro cambierà il colore della luce trasmessa. Dalla sintesi sottrattiva a coppie, di tali colori, si ricava la sintesi additiva:

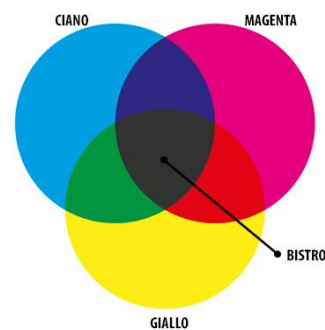


Fig.16: Sintesi sottrattiva.

$Y+C = \text{verde}$

$Y+M = \text{rosso}$

$C+M = \text{blu}$

Grazie agli studi portati avanti nel corso degli anni sul senso cromatico circa la capacità dell'occhio di distinguere i colori, è possibile risalire ai deficit del sistema visivo nella visione cromatica.

CAPITOLO 2

DEFICIT DELLA VISIONE CROMATICA

La percezione cromatica si verifica grazie ai fotorecettori presenti sulla retina, sensibili alle lunghezze d'onda della luce visibile. Le risposte date dai fotorecettori arrivano al sistema nervoso centrale e vengono interpretate come sensazioni di colore. Un uomo su dieci vede il colore in modo diverso rispetto al resto della popolazione. Questi ultimi presentano difficoltà visive che prendono il nome di discromatopsie ovvero alterazioni nella percezione dei colori. Il termine daltonismo piuttosto diffuso deriva dal chimico-fisico John Dalton che nel 1794 tramite un articolo intitolato “Fatti straordinari relativi alla visione dei colori” fu il primo a evidenziare tali tipi di difficoltà visive.

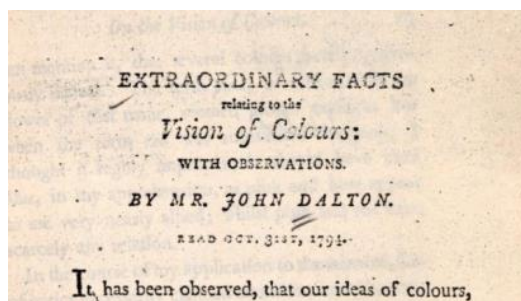


Fig.17: Pubblicazione scientifica del 1794 di Mr. John Dalton.

Egli, infatti, vedeva correttamente solo le parti blu, viola e gialle dello spettro, scoprendo poi lo stesso problema nel fratello. Per questo motivo, Dalton, suppose che il suo umor vitreo fosse colorato di blu, assorbendo selettivamente lunghezze d'onda più lunghe. Prima di morire ordinò che in seguito alla sua morte i suoi occhi fossero esaminati per smentire o affermare la sua tesi. L'esame rilevò che il vitreo era perfettamente chiaro e negli esperimenti avvenuti nei secoli successivi, il DNA estratto dal tessuto oculare conservato, ha mostrato che Dalton era un deuteranope, privo del fotopigmento a onde medie della retina. Il deficit della visione dei colori è un disturbo abbastanza comune della vista e può dipendere da fattori: congeniti o acquisiti. La percezione dei colori deriva soprattutto da esperienze soggettive. Nel corso degli anni, le donne sono risultate più abili nel distinguere diverse gradazioni e tonalità di colore rispetto agli uomini, ed in particolare, per la tonalità del verde e del giallo¹⁰. Gli uomini invece, si sono mostrati meno abili nel riuscire a distinguere le varie sfumature di colore che si trovano nella parte ciano-giallo dello spettro del

¹⁰ J.Niewiadomska-Kaplar, “Meccanismi della visione dei colori e discromatopsie” Aracne.

visibile. Sembra infatti che gli uomini abbiano bisogno di lunghezze d'onda più lunghe per percepire le stesse tonalità delle donne ⁽¹²⁾.

Se i coni presentano disfunzioni nella fisiologia si riscontra:

- ❖ Distrofia: riduzione di acuità visiva.
- ❖ Nistagmo: ovvero, movimenti involontari dell'occhio.
- ❖ Fotofobia: intolleranza alla luce e poca o nessuna percezione dei colori.

In caso di distrofia dei bastoncelli, si ha una lenta e progressiva perdita della visione periferica, fino alla cecità notturna. Secondo l'Aise, l'agenzia internazionale stampa estera: “Su una popolazione di circa 7,5 miliardi, circa 300 milioni di persone sono affette da discromatopsie.”

2.1 Deficit Congeniti della visione cromatica.

I deficit congeniti sono la causa più frequente e rappresentano un'alterazione ereditaria dei fotorecettori. I soggetti aventi tali deficit si trovano in una situazione di svantaggio quando svolgono determinati compiti visivi; per questo motivo sono stati esclusi da particolari occupazioni come, ad esempio, il trasporto, forze armate, artigianato, in cui è richiesto il riconoscimento del colore. In molti paesi, le persone con discromatopsie non possono guidare poiché alcune potrebbero non distinguere i diversi colori dei semafori e dei segnali stradali. Tale deficit è solitamente il risultato di mutazioni genetiche che influenzano l'espressione del fotorecettore a cono di lunghezza d'onda lunga (L) o di lunghezza d'onda media (M). Entrambi i fotopigmenti rossi e verdi sono codificati sul cromosoma X ¹¹. La prevalenza del deficit della visione dei colori rosso-verde si manifesta sia per sesso che per etnia. In media è dell'8% negli uomini e dello 0,5% nelle donne, poiché gli uomini possiedono solo un cromosoma X mentre le donne ne hanno due. Geograficamente, il deficit rosso-verde risulta essere molto più frequente in Europa, piuttosto che in Africa o in Asia. Uno dei modelli di base dell'ereditarietà dei geni è chiamato ereditarietà recessiva legata all'X; con ciò si intende che il gene origine del disturbo è situato sul cromosoma X. Gli uomini hanno un solo cromosoma X donato dalla madre ed un cromosoma Y. Affinché un uomo sia discromatope, il gene per tale difficoltà deve apparire solo sul proprio cromosoma X. Le donne hanno due

¹¹ A.Calligaro, R.Colombo, A. De Pol, L.Guidotti, R.Millo, N.M.Maraldi, P.Narducci, V.Tessitore, L.Roncali, R.Rana, G.Sica, F.G.Urzi, “*Citologia e Istologia funzionale*” Edi-ermes.

cromosomi X, provenienti da entrambi i genitori. Perché si presenti discromatopsia in una donna, entrambi i cromosomi X devono avere il gene per tale disturbo. Se una donna ha un solo gene discromatope essa sarà riconosciuta come portatrice, ma non manifesterà il problema visivo. Per tali motivi, la percentuale di soggetti di sesso maschile affetti da deficit della visione cromatica risulta essere maggiore rispetto a quella di sesso femminile. I deficit della visione dei colori sono generalmente classificati in base alla gravità e possono essere ulteriormente classificati in base al tipo o ai tipi di coni interessati ¹².

TRICROMATISMO ANOMALO

Il tricromatismo anomalo si manifesta quando uno dei tre tipi di coni presenti nella retina, manifesta un'alterazione nella sua sensibilità spettrale; quest'ultimo, essere classificato in relazione al cono che presenta l'anomalia.

- ❖ Protanomalia: è un'anomalia dei coni lunghi (L) e si ha una ridotta sensibilità nel percepire il rosso. Qualsiasi colore tendente al rosso viene visto più debolmente in termini di saturazione e tonalità, rispetto ad un soggetto normale.
- ❖ Deuteranomalia: è un'anomalia dei coni medi (M) e si ha una ridotta sensibilità nel percepire il verde. Rappresenta il disturbo più comune tra i tre tipi di deficit.
- ❖ Tritanomalia: è un'anomalia dei coni corti (S) e si ha una ridotta sensibilità nel percepire il blu. È una forma rara che colpisce circa lo 0,01% delle persone e si manifesta generalmente con una difficoltà nel distinguere tra giallo e blu.



Fig.18: Forme di Tricromatismo anomalo.

¹² A.Caporossi, T.Salgarello, C.Manganelli, "Oftalmologia" Piccin.

DICROMATISMO

Il dicromatismo è causato dall'assenza di uno dei fotopigmenti, ossia, solo due dei tre tipi di coni sono in grado di percepire la luce; può essere classificato in base al tipo di cono affetto dalla patologia: protanopia, deuteranopia o tritanopia. Ciò, è causa di un'assoluta cecità verso la lunghezza d'onda in oggetto:

- ❖ Protanopia: mediante i coni lunghi (L) non si ha sensibilità e quindi si ha mancata percezione della lunghezza d'onda del rosso.
- ❖ Deuteranopia: mediante i coni medi (M) non si ha sensibilità e quindi si ha mancata percezione del colore verde e si confondono rosso, giallo e verde.
- ❖ Tritanopia: mediante i coni corti (S) non si ha sensibilità e quindi si ha mancata percezione della lunghezza d'onda del blu.

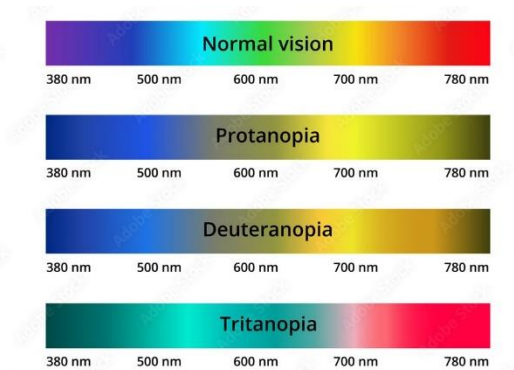


Fig.19: Dicromatismo.

ACROMATOPSIA

Le forme più gravi di deficit congenito della visione dei colori danno luogo all'acromatopsia, dove la discriminazione dei colori è assente. È un difetto genetico della vista molto raro ma non degenerativo, e consiste in una totale cecità ai colori, ossia una visione monocromatica (in bianco e nero). Può essere suddivisa in:

- ❖ Acromatopsia completa: in cui vi è una disfunzione totale o quasi dei coni e la funzione visiva è dominata dai bastoncelli, responsabili della visione scotopica in una retina normale.
- ❖ Acromatopsia incompleta: dovuta ad una funzione residua dei coni. Una minima parte dei coni è presente.
- ❖ Monocromatismo dei coni blu: deriva da un'assenza dei coni rossi e verdi e la visione dipende dai coni blu e dai bastoncelli. I soggetti affetti da tale monocromatismo presentano una scarsa acuità visiva, fotofobia e una sensibilità ridotta per lunghezze d'onda lunghe. I soggetti affetti dalle diverse

discromatopsie presentano percezione dei colori, o nei casi limite mancanza totale di percezione.

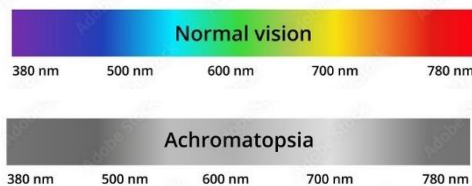


Fig.20: Acromatopsia.

2.2 Deficit Acquisiti della visione cromatica.

Le discromatopsie acquisite, generalmente colpiscono tutte e tre le classi di coni, anche se non necessariamente in parti uguali; tendendo a degenerare nel tempo, ma restando meno frequenti rispetto ai deficit congeniti. Queste, possono essere causate da diversi fattori come malattie vascolari, metaboliche, traumi o per effetti tossici derivanti dai farmaci. Una causa di tossicità può essere dovuta all'esposizione ad etambutolo (principio attivo usato per trattare la tubercolosi), ai farmaci per trattamento dell'ipertensione e ai solventi utilizzati nell'industria delle materie plastiche. La perdita della visione dei colori è associata a malattie sistemiche come: sclerosi multipla, diabete, morbo di Alzheimer, morbo di Parkinson ed a malattie oculari dovute a danni alla retina e al nervo ottico come il glaucoma e la neuropatia ottica.

Nel 1993 il filosofo e psicologo norvegese Birch, classificò le forme di deficit acquisite in:

- ❖ TIPO 1 (rosso-verde): Simile alla forma protan congenita, il picco della curva di efficienza luminosa è spostato verso le lunghezze d'onda brevi.
Causa: distrofia dei coni o dell'epitelio retinico pigmentato.
- ❖ TIPO 2 (rosso-verde): Simile alla forma deutan congenita ma con maggiori riduzioni della sensibilità spettrale a lunghezze d'onda brevi.
Causa: neurite ottica.
- ❖ TIPO 3 (blu-forma A): Simile alla forma tritan congenita, ma con picco della curva di efficienza luminosa spostato verso le lunghezze d'onda brevi.
Causa: degenerazione maculare.
- ❖ TIPO 3 (blu-forma B): Simile alla forma tritan congenita.
Causa: distrofia di coni o bastoncelli, disordini vascolari retinici a causa di diabete, glaucoma.

2.3 Test diagnostici.

Esistono vari tipi di test per la diagnosi di problemi legati alla visione dei colori i quali, vengono effettuati in bambini, in soggetti che si avvicinano per la prima volta ad un esame visivo o ancora in soggetti che presentano chiare difficoltà nella percezione cromatica. Tali test sono effettuati al termine dell'esame visivo, solitamente in maniera binoculare, poiché i difetti sono spesso di tipo congenito. Nel caso in cui dovesse essere di tipo acquisito, allora si potrebbe lavorare in monoculare. Spesso, i test si basano sull'appaiamento dei tre colori che possono essere differenziati o confusi e la sorgente di illuminazione deve prevedere un illuminamento di ≥ 200 lux.

2.3.1 Test delle lanterne di Farnsworth / Holmes-Wright.

Il test delle lanterne fu sviluppato dal Dr. Dean Farnsworth per identificare le luci in visione notturna. Nel 1954 fu poi utilizzato come test standard per esaminare la capacità di discriminare dei colori da parte dei marinai, trasportatori, piloti. Il test consiste nel mostrare coppie di luci orientate verticalmente, le cui combinazioni, possono essere rosso, verde o giallo; dopodiché, viene chiesto al soggetto di riconoscerle. Ogni Stato, utilizza questo metodo con tipi di lanterna differenti, infatti si parlerà di lanterne di Holmes-Wright nel Regno Unito, lanterne di Farnsworth negli Stati Uniti d'America mentre lanterne di Beyne in Francia.

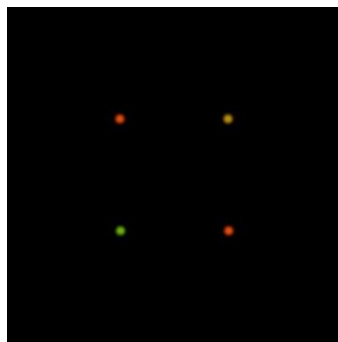


Fig.21: Test delle lanterne

2.3.2 Tavole pseudoisocromatiche. Test di Ishihara.

Il test di Ishihara è costituito da 38 tavole colorate, ognuna delle quali mostra un numero o un percorso composti da cerchi colorati a mosaico, che tendono a confondersi e mescolarsi con lo sfondo. Il test deve essere effettuato ad una distanza di circa 40-45 cm, con inclinazione di circa 45° rispetto al piano d'appoggio, in una stanza ben illuminata e con la correzione per vicino laddove

necessaria. Il test viene eseguito in visione binoculare nel caso di difetti congeniti, in visione monoculare nel caso di difetti acquisiti.

La prima tavola contiene il numero 12, che non essendo pseudoisocromatica, serve solo a dimostrare il funzionamento del test, viene perciò letta anche da chi non percepisce i colori.

Dalla tavola 2 alla tavola 17, i numeri vengono letti male se il soggetto presenta un'anomalia nella visione del rosso-verde.

Dalla tavola 18 alla tavola 21, non sono presenti numeri, questi però, vengono letti da soggetti che non percepiscono il rosso-verde.

Dalla tavola 22 alla tavola 25, è possibile evidenziare la cecità per un colore dalla cecità parziale.

Dalla tavola 26 alla tavola 38, non sono presenti numeri, ma percorsi per persone analfabete, o bambini.

Il test non consente di evidenziare e valutare soggetti tritan, ovvero con deficit giallo-blu.

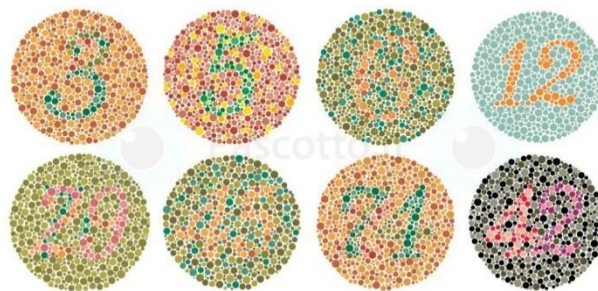


Fig.22: Tavole di Ishihara

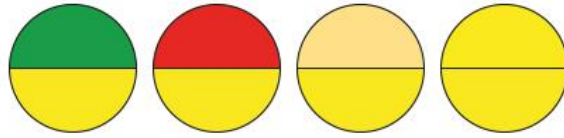
2.3.3 Anomaloscopia di Nagel

Lo strumento è stato sviluppato ad inizio del 1900 , e si presenta formato da un tubo con tre fessure attraverso le quali vi è il passaggio di tre luci: gialla, verde e rossa. Quest'ultime si proiettano su di una figura circolare, divisa in due parti avente colorazione differente. L'Anomaloscopia, viene utilizzato per una valutazione clinica di soggetti con una visione dei colori alterata; l'esecuzione avviene dopo aver presentato al soggetto le tavole isocromatiche. Il test, ci permette di esaminare la sensibilità ai colori, infatti, il soggetto deve unire il rosso ed il verde tentando di accoppiarne tonalità e luminosità al giallo.

Lo scopo del test è quello di eguagliare il colore dei due semi campi variando l'intensità della luce gialla oppure variando il rapporto di miscelazione della

luce rossa e verde. Il risultato ci permette di determinare i difetti cromatici riguardo la visione del rosso e del verde.

Fig.23: Anomaloscopio di Nagel.



2.3.4 Test HRR

Negli ultimi decenni si è diffuso l'utilizzo del test HRR, questo, prende il nome dalle iniziali dei cognomi dei suoi ideatori Hardy, Rand e Rittler che offre il vantaggio di diagnosticare non solo le anomalie relative all'asse rosso-verde, ma anche all'asse blu-giallo. È necessario eseguire il test, in un ambiente adeguatamente illuminato, ma non solo, il soggetto deve tenere la schiena e il capo dritti durante l'esame.

Il test ha gli stessi principi delle tavole pseudoisocromatiche con la differenza che dalla matrice di punti fuoriescono figure geometriche e non numeri, che un soggetto con normale visione cromatica riconosce facilmente.



Fig.24: Test HRR.

2.3.5 Test di Farnsworth - Munsell

Lo scopo principale di questi test è quello di disporre in modo ordinato le varie pastiglie colorate in base alla loro tonalità. Attraverso l'uso di questa procedura, abbiamo possibilità di poter diagnosticare i difetti protan, deutan, tritan e la loro severità, inoltre è utile anche negli screening per le anomalie acquisite. Sono presenti due versioni del test di Farnsworth: il D-15, utilizzato nella pratica clinica e il test dei 100 toni, utilizzati nella ricerca.

Il test di Farnsworth D-15 è un test dicotomico, il cui principio consiste nel classificare in modo ordinato 15 dischi o pastiglie, aventi tonalità differenti,



Fig.25: Test di Farnsworth D-15

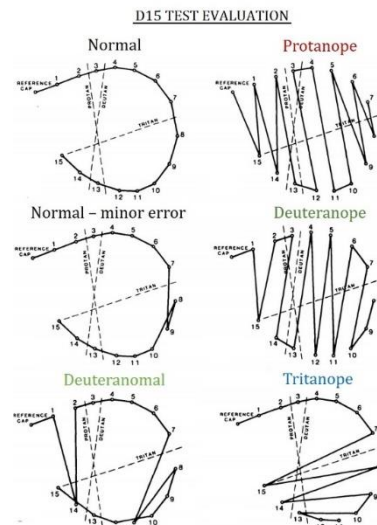


Fig.26: Risultati del test di Farnsworth D-15

partendo dal disco di riferimento. I soggetti con difetti della visione del colore sono incapaci di discriminare certe tonalità e quindi li posizionano fuori ordine. La sequenza corretta è rilevata grazie al numero riportato dietro ogni disco in modo tale che i numeri della successione, ordinata dal paziente, vengano trascritti su un grafico prestampato⁽¹⁶⁾. Unendo tutti i punti corrispondenti a tali numeri, si avrà uno schema che esprimerà, per confronto con quella della successione standard, il senso cromatico del soggetto. Nell'ordine corretto, le linee che uniscono i numeri dall'1 al 15 ritracciano il cerchio di tonalità. Un esempio di errore minore potrebbe essere l'inversione dell'ordine dei dischi 5 e 6. Si verifica un errore grave quando i dischi distanti, ad esempio 3 e 12, sono posizionati uno accanto all'altro. I soggetti con normale visione dei colori fanno al massimo solo uno o due errori minori. Occasionalmente una singola linea che attraversa il cerchio può verificarsi quando l'osservatore inverte parte della serie. I dicromati e i tricromati anomali estremi fanno più crossover (da 6 a 12), formando una serie di linee quasi parallele. L'asse delle linee di crossover è caratteristico del tipo di difetto; gli assi corrispondenti ai difetti protan, deutan e tritan sono indicati sul foglio di punteggio. Nel test di Farnsworth-Munsell dei 100 toni, vengono utilizzate 85 pastiglie colorate. Lo svolgimento è lo stesso del test precedente e dura all'incirca 20-30 minuti, ma purtroppo non identifica la tricromia anomala.

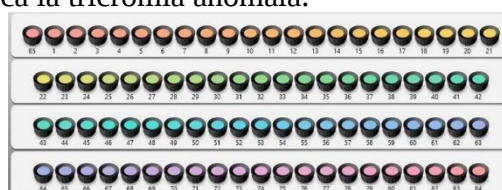


Fig.27: Test di Farnsworth-Munsell.

2.3.6 The City University Colour Test

Il professor John L. Barbur della City University di Londra, noto per le sue ricerche nel campo della visione dei colori e del daltonismo, con il suo gruppo ha sviluppato un test denominato City University Colour Test (CUCT) che deriva dal test di Fransworth D-15 ma, con una sensibilità maggiore per le forme acquisite e la tricromia anomala. La versione più utilizzata è la terza edizione, costituita da due sezioni che possono essere usate in sequenza o separatamente. La prima sezione, è costituita da quattro pagine all'interno delle quali, sono presenti quattro linee verticali, contenenti ciascuna tre cerchi colorati. Il soggetto, deve rilevarne le differenze. Questo, viene utilizzato principalmente come test di screening, ma non distingue la separazione fra protan e deutan. La seconda parte è invece costituita da pagine in cui quattro punti colorati circondano un punto centrale; Il soggetto in questo caso, deve scegliere un punto che corrisponda maggiormente al colore centrale. Questa seconda parte dà informazioni più precise sul tipo e sulla gravità del difetto cromatico.



Fig.28: The City University colour vision test, terza edizione.

2.3.7 Test di Holmgren

Per poter eseguire questo tipo di test è necessario l'utilizzo di tre matassine come riferimento, individuate da "A" per il verde, "B" per il viola e "C" per il rosso. Le matassine hanno un disco numerato da 1 a 40. Il test va preparato disponendo le 40 matassine con il numero coperto ed il soggetto esaminato, dovrà poi scegliere le dieci matassine che, a suo parere, somigliano maggiormente a quella contrassegnata dalla lettera "A"; Successivamente, dovrà scegliere le cinque simili alla "C" e altre cinque simili alla "B". Infine, il soggetto, dovrà ordinare ciascuno dei tre insiemi ponendo le matassine in ordine degradante di colori partendo da quella di riferimento. L'esaminatore congiuntamente al soggetto verificherà i numeri che in precedenza sono stati coperti.



Fig.29: Matassine utilizzate per il Test di Holmgren.

CAPITOLO 3

LO STUDIO SPERIMENTALE

L'ultimo capitolo è dedicato allo studio sperimentale su cui si basano gli argomenti trattati nei capitoli precedenti, ovvero, cercare e verificare deficit cromatici attraverso uno studio effettuato su campioni di persone casuali, diverse per genere ed età. Lo scopo finale è quello di constatare il tasso di discromatopsia, i rapporti tra uomo e donna legati al deficit, ed infine tramite l'utilizzo di lenti "per daltonici" tentare di risolvere questo difetto. Nel corso dello studio, mediante l'Università "Federico II", ho ricevuto ed utilizzato delle "lenti per daltonici EnChroma". Queste, sono state inventate casualmente da Donald McPherson mentre cercava di sviluppare lenti per proteggere e aiutare i chirurghi durante le operazioni laser. EnChroma è un'azienda indipendente con sede a Berkeley, California, che sviluppa una tecnologia di lenti brevettate per migliorare la vita delle persone con deficit di visione dei colori. EnChroma ha ricevuto una sovvenzione *SBIR* dal *National Institutes of Health (NIH)* e ha vinto il *Tibbets Award 2016* dalla *US Small Business Administration* in riconoscimento sull'impatto innovativo dell'azienda, sull'esperienza umana attraverso la tecnologia.

Le lenti si concentrano sul difetto più comune della visione dei colori, causato dai coni R e G. Per eliminare delle determinate lunghezze d'onda della luce, esiste un materiale ottico chiamato filtro *notch*, il quale, è in grado di rimuovere le esatte lunghezze d'onda della luce nel punto in cui si sovrappone, ottenendo quindi una differenziazione semplificata dei colori. Il produttore sostiene che gli occhiali blocchino lunghezze d'onda specifiche per creare una separazione più chiara dei diversi segnali di colore in modo che gli stessi possano essere calcolati meglio dal cervello; ma non solo, afferma anche che la separazione dei segnali consente alla maggior parte delle persone daltoniche di distinguere i colori. Nonostante ciò, però, a seguito dei vari studi è stato riscontrato un effetto minimo o nullo sul 20% delle persone daltoniche che soffrono di gravi disturbi del colore. Sono stati concessi però numerosi brevetti basati su questa tecnologia.

3.1 Efficacia delle lenti EnChroma ed altri studi

Per quanto riguarda l'efficacia degli occhiali per la correzione del colore in generale, l'*American Optometric Association* riferisce che "L'uso di occhiali appositamente

colorati, può aumentare la capacità di alcune persone di distinguere i colori, sebbene nulla possa far loro vedere veramente il colore carente”.

Uno studio del 2017 che ha coinvolto 23 uomini di età compresa tra 20 e 25 anni con una normale visione dei colori tricromatica, ha mostrato che la lente EnChroma Cx-14 intacca la regione blu e viola dello spettro visibile. Ciò ha indotto i partecipanti con una visione dei colori normale a sperimentare il difetto del tritan quando indossavano la lente. In uno studio successivo che ha coinvolto dieci individui con carenze ereditarie (nove uomini e una donna di età compresa tra 19 e 52 anni), i filtri EnChroma Cx-14 non hanno influenzato in modo significativo la visione dei soggetti daltonici e "hanno migliorato il punteggio di errore solo in due soggetti".

Un articolo del 2018 pubblicato da Phys.org , “Gli scienziati sfatano l'efficacia degli occhiali EnChroma per le persone daltoniche”, riportava uno studio sulle lenti EnChroma condotto da una rivista scientifica sottoposta a revisione paritaria *Optics Express* . Lo stesso, “ha sfatato l'efficacia di questi occhiali per la carenza di visione dei colori (CVD), dimostrando che gli occhiali EnChroma non rendono la visione delle persone daltoniche paragonabili a quella delle persone senza daltonismo”. Si continuava riferendo che “una persona daltonica che utilizza gli occhiali EnChroma non percepirà nuovi colori, ma vedrà piuttosto gli stessi colori in modo diverso. Ciò rende possibile ad alcuni individui che utilizzano questi occhiali di distinguere alcuni colori, ma a discapito degli altri, che ora saranno confusi. Anche se un filtro colorato come quello utilizzato dagli occhiali EnChroma può modificare l'aspetto dei colori, non renderà mai la visione dei colori più simile alla visione di un normale osservatore”. I ricercatori, hanno scoperto che l'effetto dell'utilizzo degli occhiali EnChroma è simile a quello degli occhiali in cui l'uso di filtri colorati cambia la percezione dell'utente e aumenta il contrasto tra i colori; stabilendo però che nonostante l'uso degli stessi, non si riscontrano poi effettivi miglioramenti nei test di Ishihara e nel test della tonalità di Farnsworth-Munsell 100 . Il rapporto concludeva che “gli occhiali specificatamente utilizzati in questo studio non conferiscono alcun miglioramento nei test di riconoscimento o disposizione del daltonismo. Pertanto, gli occhiali non possono migliorare i punteggi nei test di screening professionali, contrariamente a quanto affermato dall'azienda sul suo sito web”.

Un articolo del 2021 pubblicato dall' American Academy of Ophthalmology riportava che gli occhiali per daltonici “cambiano ciò che vedono le persone che li indossano, migliorando la distinzione tra rosso e verde, ma l’esperienza varierà ampiamente da individuo a individuo, e questi occhiali non lo fanno”. L'A.A.O. afferma inoltre che "gli effetti positivi degli occhiali durano solo finché vengono indossati". e che gli occhiali EnChroma “non modificano in alcun modo i fotorecettori, i nervi ottici o la corteccia visiva di una persona per correggere il daltonismo”.

3.2 Candidati e metodo

I candidati sottoposti allo studio sperimentale sono stati 50, nel dettaglio, 25 uomini (50%) e 25 donne (50%) , con un’età compresa tra 18 e 28 anni. Non vi è discriminazione in merito ai candidati, ovvero, oltre ai portatori di occhiali oftalmici, vi sono candidati emmetropi. La ricerca è stata svolta presso il laboratorio tecnico di Optometria dell’università, ed è stata eseguita di giorno con buona illuminazione. Come strumento di indagine è stato utilizzato il Test di Ishihara e gli occhiali EnChroma, sottoponendo ogni candidato ad osservare le tavole isocromatiche in visione monoculare, alternando i due occhi durante il test, per poi procedere in binoculare. I candidati hanno utilizzato la loro correzione abituale per evitare l’alterazione del test.

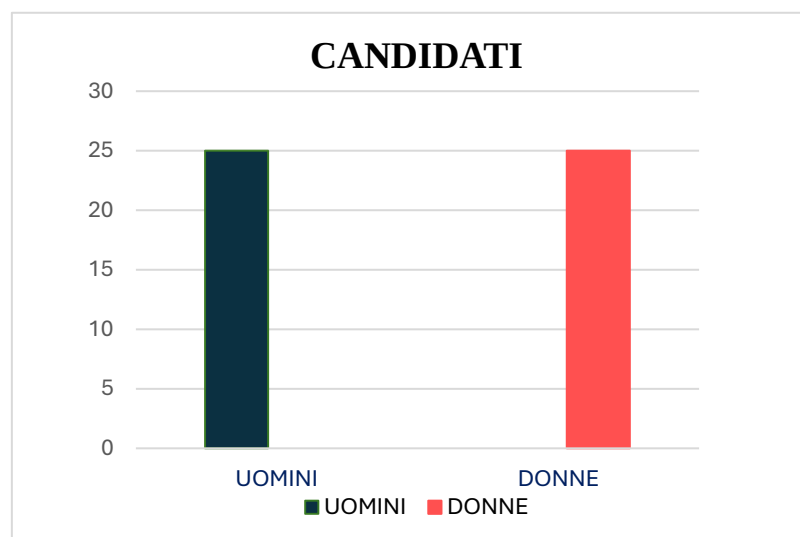


Grafico 1: *Soggetti sottoposti al Test*

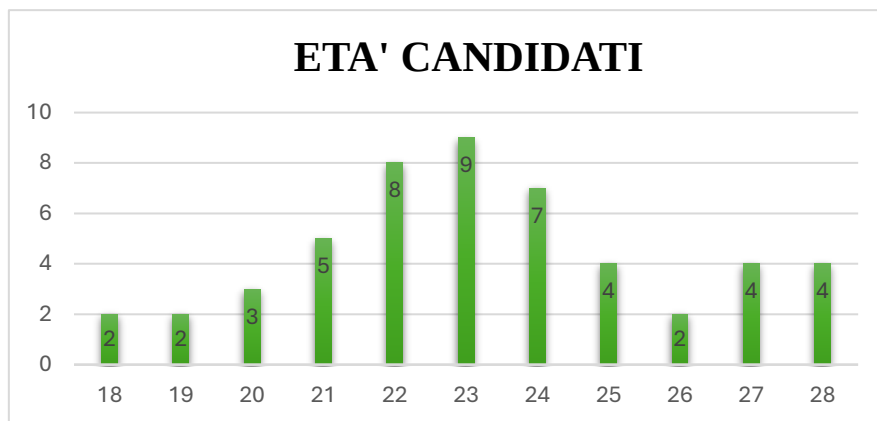


Grafico 2: Età dei candidati sottoposti al Test. Media di età: 23,24

3.3 L'indagine effettuata

Di seguito, la tabella con valori oftalmici di tutti i candidati sottoposti al test.

SOGGETTO	OD	SPH	CYL	AX°	OS	SPH	CYL	AX°
1		-0,25	-2,00	170		-0,25	-2,00	177
2		+3,50	/	/		+3,50	/	/
3		/	/	/		/	/	/
4		/	/	/		/	/	/
5		/	/	/		/	/	/
6		-2,75	-1,50	171		-3,50	-1,00	177
7		-3,75	-0,50	0		-4,25	-0,50	34
8		/	/	/		/	/	/
9		/	/	/		/	/	/
10		/	/	/		/	/	/
11		/	/	/		/	/	/
12		/	/	/		/	/	/
13		/	/	/		/	/	/
14		/	/	/		/	/	/
15		-1,50	-0,75	180		-1,50	-0,75	170
16		/	/	/		/	/	/
17		-0,75	/	/		0,50	/	/
18		+3,50	+1,75	180		+3,25	+1,50	180
19		-1,75	/	/		-2,75	/	/
20		/	/	/		/	/	/
21		-0,50	/	/		-0,75	/	/
22		/	/	/		/	/	/
23		/	/	/		/	/	/
24		/	/	/		/	/	/
25		-0,50	/	/		-0,50	/	/
26		-4,50	-2,00	180		-4,50	-2,00	180
27		/	/	/		/	/	/
28		/	/	/		/	/	/
29		/	/	/		/	/	/
30		/	/	/		/	/	/
31		-1,00	-0,50	30		-1,00	-0,50	0

32		/	/	/		/	/	/
33		/	/	/		/	/	/
34		-2,50	/	/		-3,50	/	/
35		-1,00	-0,50	92		-1,00	-0,50	89
36		/	/	/		/	/	/
37		-1,00	/	/		-0,50	/	/
38		+0,50	/	/		+0,50	/	/
39		/	/	/		/	/	/
40		/	/	/		/	/	/
41		-1,50	-1,00	170		-1,50	-1,00	170
42		/	/	/		/	/	/
43		/	+0,50	90		/	+0,25	90
44		/	/	/		/	/	/
45		/	/	/		/	/	/
46		/	/	/		/	/	/
47		+1,25	+0,75	115		+1,00	+0,25	99
48		/	/	/		/	/	/
49		/	/	/		/	/	/
50		-1,50	-1,50	78		-1,50	-1,50	80

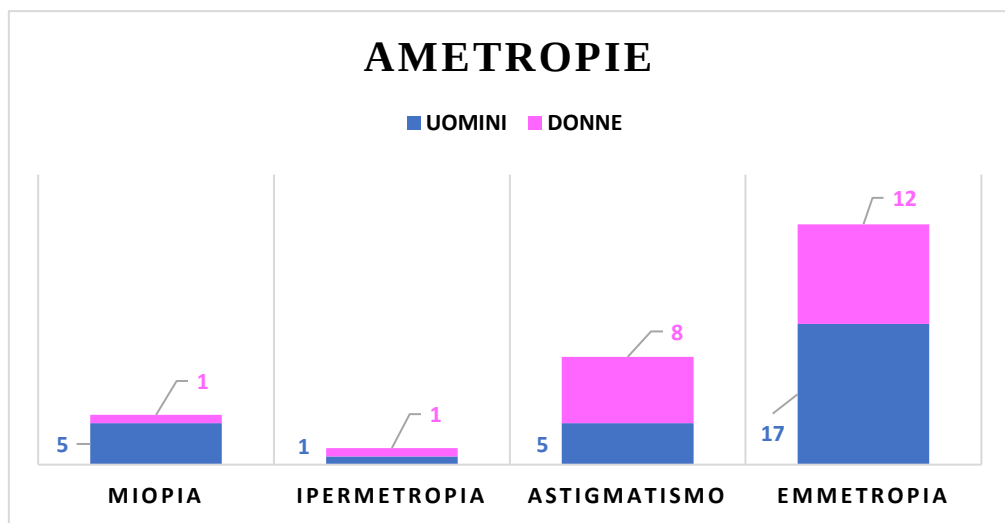


Grafico 3: Ametropie dei candidati, distribuzione a seconda di sesso e tipo di difetto visivo

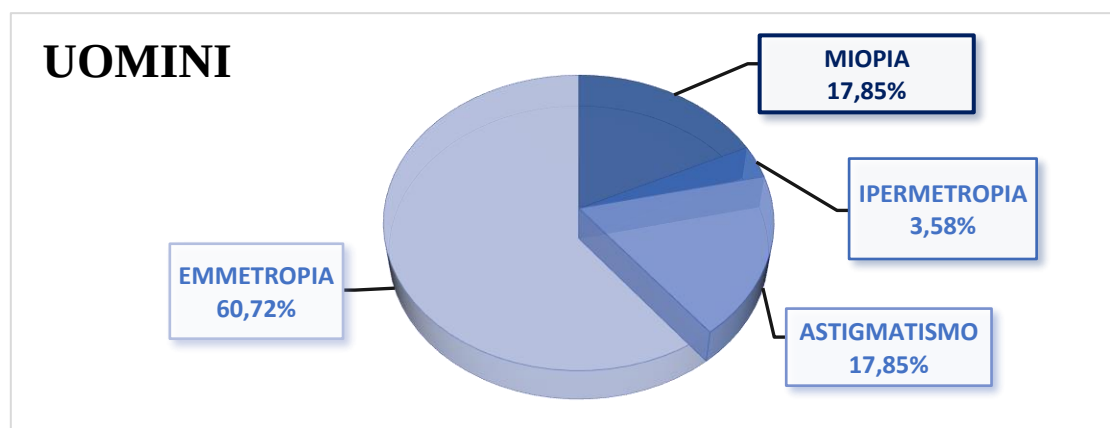


Grafico 4: Percentuale Uomini sottoposti al test con distinzione di Ametropie

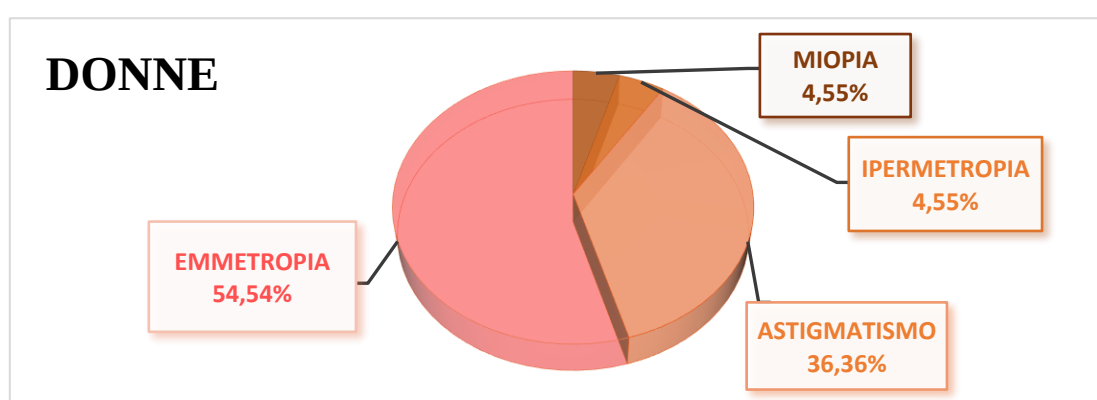


Grafico 4: Percentuale Donne sottoposte al test con distinzione di Ametropie

L'analisi ha riportato la presenza di 1 candidato con deficit cromatico, in particolare con deficit nella percezione del rosso-verde. Quest'ultimo possiede una correzione:

SOGGETTO	OD: SPH CYL AX	OS: SPH CYL AX	ETA'	SESSO	DISCROMATOPSIA
F.I.	+3,50 +1,75 180	+3,25 +1,50 180	19	M	PROTANOMALIA DEUTERANOMALIA

Su un totale di 50 candidati, solo l'1%, presenta deficit cromatici, mentre il restante 99% possiede una normale visione cromatica. Il candidato affetto da deficit cromatico, mostra un astigmatismo ipermetropico. È stato eseguito il test di Ishihara prima in visione monoculare, poi in binoculare, ed è emerso che dalla tavola 2 alla tavola 9, il candidato ha letto i numeri tipici di chi ha carenze su rosso-verde, in ordine: 3,5,70,35,2,5,17,21 al posto dei numeri che sono rappresentati nelle tavole in ordine: 8,6,29,57,5,3,15,74. Dalla tavola 10 alla tavola 17, il candidato non ha letto nessun numero. Dalla tavola 18 alla tavola 21, le quali risultano prive di numeri, il candidato ha letto i seguenti numeri in ordine:

5,2,45,73, tipico della protanomalia. Dalla tavola 22 alla tavola 25 il candidato ha letto i seguenti numeri in ordine: 2,4,3,9 al posto dei numeri nelle tavole, in ordine: 26,42,35,96 confermando così una forma lieve di deuteranomalia.

3.4 Utilizzo di lenti EnChroma nell'indagine

Dopo il primo utilizzo delle lenti, è stato eseguito il Test di Ishihara, evidenziando in rosso le tabelle lette in modo errato ed in verde le tabelle lette in modo corretto. Il risultato è stato il seguente:

N° TAVOLA VIS. NORM. LETT. SOGG.

1	12	12
2	8	3
3	6	5
4	29	70
5	57	35
6	5	2
7	3	5
8	15	17
9	74	21
10	2	X
11	6	X
12	97	X

13	45	X
14	5	X
15	7	X
16	16	X
17	73	X
18	X	5
19	X	2
20	X	45
21	X	73
22	26	2
23	42	4
24	35	3
25	96	9

Non riscontrando un buon risultato nel primo utilizzo, dopo l'uso continuo di lenti per 15gg, è stato eseguito nuovamente il Test di Ishihara, ottenendo:

1	12	12
2	8	8
3	6	5
4	29	70
5	57	35
6	5	5
7	3	5
8	15	17
9	74	24
10	2	2
11	6	X
12	97	X

13	45	X
14	5	X
15	7	7
16	16	X
17	73	X
18	X	5
19	X	2
20	X	X
21	X	24
22	26	X
23	42	X
24	35	X
25	96	X

È stato riscontrato un leggero miglioramento grazie al filtro colorato, facendo così leggere in modo corretto, 5 tabelle su 25. È comunque, di notevole importanza ricordare che, durante l'esame, il candidato lamentava bassa illuminazione anche se la stanza era molto illuminata.

Successivamente, il candidato è stato invitato a continuare il porto per altri 15gg per poi effettuare, per l'ultima volta il Test di Ishihara. I risultati sono i seguenti:

1	12	12
2	8	8
3	6	5
4	29	70
5	57	57
6	5	5
7	3	X
8	15	17
9	74	21
10	2	X
11	6	6
12	97	X

13	45	X
14	5	5
15	7	X
16	16	X
17	73	73
18	X	5
19	X	8
20	X	X
21	X	X
22	26	X
23	42	X
24	35	X
25	96	X

Non si è notato un miglioramento rispetto ai precedenti 15gg, ma è possibile, anzi, evidenziare un maggiore deficit nel riconoscere altre tabelle che prima, erano visibili al candidato; come dalla tabella 22 alla tabella 25 o la tabella 20 e 21.

CONCLUSIONI

Possiamo dire che, in base al numero di candidati esaminati, solo l'1% ha presentato difficoltà nella percezione dei colori. La connessione tra ametropia e deficit del colore è relativamente bassa, anche se non del tutto nulla, poiché non esistono studi precisi che possano smentire o confermare il dualismo. Possiamo però confermare che il difetto visivo è molto distante dalla sensibilità che un cono può avere rispetto alla stimolazione della luce di diverse lunghezze d'onda.

Abbiamo notato, attraverso questo studio sperimentale che le discromatopsie sono in una quantità minore di soggetti e soprattutto in uomini. L'utilizzo di filtri colorati per persone affette da deficit cromatici è sicuramente importante, ma in questo studio abbiamo potuto constatare che le lenti EnChroma, in alcuni casi hanno migliorato il contrasto sulla banda rosso-verde, ma a discapito di una totale percezione cromatica, non ottenendo quindi il risultato sperato. Possiamo dire che, i colori hanno avuto da sempre una grossa importanza nella vita degli uomini in quanto grazie ad essi è possibile comunicare emozioni e sensazioni. Nel corso degli anni sono stati diversi gli studi effettuati ponendo attenzione a come i colori possano influenzare ogni minima scelta dell'essere umano. Molto spesso il non riuscire a percepire i colori risulta per l'individuo un vero e proprio handicap che può portare ad isolarsi fin dall'età infantile ed a diventare poi, un adulto insicuro. È comunque vero che l'utilizzo in alcuni casi, di filtri colorati possano comunque migliorare la percezione del colore e favorire un benessere al soggetto.

Tuttavia, nel corso del tempo, molte attività lavorative hanno modificato alcuni processi, specie produttivi, per evitare la cattiva interpretazione dei colori e il diagramma CIE ha consentito di identificare le diverse lunghezze d'onda in maniera univoca, mediante codificazione numerica degli stessi colori.

Bibliografia

- ❖ A.Calligaro, R.Colombo, A. De Pol, L.Guidotti, R.Millo, N.M.Maraldi, P.Narducci, V.Tessitore, L.Roncali, R.Rana, G.Sica, F.G.Urzi, “*Citologia e Istologia funzionale*” Edimermes
- ❖ A.Caporossi, T.Salgarello, C.Manganelli, “*Oftalmologia*” Piccin.
- ❖ Zeri F., Rossetti A., Fossetti A., Calossi A., “*Ottica Visuale.*” Seu.
- ❖ J.W.Jewett, R.A.Serway, “*Principi di fisica*” Edises
- ❖ F.Catalano, “*Elementi di ottica generale*” Zanichelli
- ❖ F.Catalano, “*Fondamenti di ottica della visione*” Piccin.
- ❖ A.Rossetti, P.Gheller, “*Manuale di optometria e contattologia.*” Zanichelli.
- ❖ F.Giudice, “*Lo spettro di Newton, la rivelazione della luce e dei colori.*” Donzelli Editore.
- ❖ J.Niewiadomska-Kaplar, “*Meccanismi della visione dei colori e discromatopsie*” Aracne.

Sitografia

- ❖ <https://occhio.it/anomaloscopio-di-nagel/>
- ❖ <https://www.salute-nella-scienza.it/salute/esami/test-daltonismo.htm>
- ❖ <https://www.college-optometrists.org/john-dalton-a-visual-error.html>
- ❖ <https://www.colourblindawareness.org/colour-blindness/inherited-colour-vision-deficiency/>
- ❖ <https://fabishoes.it/blog/storia-colore-dallantichita-ad-oggi/>
- ❖ <https://www.antrodichirone.com/index.php/it/2017/01/18/percezione-visiva-qual-e-il-vero-colore-della-realta/>
- ❖ <https://claudiotroisi.it/psicologia-del-colore/>
- ❖ <https://best5.it/post/i-colori-e-le-principali-teorie-per-conoscerli/>
- ❖ <https://www.oculistaitaliano.it/articoli/differenze-nella-visione-uomini-donne-le-basi-genetiche-fisiologiche/>
- ❖ <http://www.zeiss.it>
- ❖ <https://www.enchroma.com>