



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Psicologia Generale

**Corso di laurea Magistrale in Neuroscienze e Riabilitazione
Neuropsicologica**

Tesi di laurea Magistrale

**La Risonanza Stocastica come strumento per ottimizzare
il Perceptual Learning nella riabilitazione neurovisiva:
Uno studio esplorativo**

**Stochastic Resonance as a tool to optimize Perceptual Learning in
neurovisual rehabilitation: An exploratory study.**

Relatore

Prof. Luca Battaglini

Laureando: Enrico Pitocco

Matricola: 2050579

Anno Accademico: 2022/2023

INDICE

ABSTRACT	3
CAPITOLO 1: L'APPRENDIMENTO PERCETTIVO E LA RIABILITAZIONE NEUROVISIVA	5
1.1. Apprendimento percettivo: definizione e caratteristiche	5
1.1.1. Specificità vs Generalizzazione	6
1.2. Perceptual Learning Visivo: plasticità e apprendimento	9
1.2.1. Meccanismi dell'Apprendimento Percettivo	9
1.2.2. Modelli Rappresentazionali del PL.....	11
1.2.3. Modelli di "Reweighting".....	13
1.2.4. Ruolo dei processi top-down	14
1.3. Neuroanatomia del sistema visivo e deficit visivi	16
1.3.1. La via Genicolo-Striata	16
1.3.2. La Corteccia Visiva Primaria.....	18
1.3.3. Conseguenze di una lesione delle vie visive.....	19
1.3.4. Conseguenze di una lesione alla corteccia striata.....	21
1.4. Perceptual Learning (PL) e Riabilitazione visiva: potenzialità e limiti	22
1.4.1. PL e Riabilitazione dell'Ambliopia	23
1.4.2. PL e Riabilitazione della Degenerazione Maculare.....	24
1.4.3. Cecità Corticale: caratteristiche e ruolo della riabilitazione	25
1.4.4. PL e Trattamenti Restitutivi dell'Emianopsia Omonima.....	26
1.4.5. Limiti della riabilitazione tramite PL.....	28
CAPITOLO 2: IL RUMORE NELLA PERCEZIONE E LA RISONANZA STOCASTICA	31
2.1. Variabilità e Rumore: lo stato dell'arte	31
2.2. Rumore interno o endogeno	34
2.2.1. Rumore Neurale e Variabilità: ruolo nel processamento delle informazioni.....	36
2.3. Rumore esterno	38
2.3.1. Rumore esterno: buono o cattivo?	39
2.4. La Risonanza Stocastica: una definizione	40
2.5. SR nei sistemi sensoriali e nella percezione	43
2.5.1. La SR nel cervello.....	47
2.6. La SR nella clinica: applicazioni pratiche	50
2.6.1. SR nella Riabilitazione Visiva: possibile ruolo	51
2.7. Obiettivi e ipotesi sperimentali	53
CAPITOLO 3: LA RICERCA	56
3.1. Studio 1: metodo	56
3.1.1. Partecipanti	56
3.1.2. Apparato e stimoli.....	56
3.1.3. Descrizione del compito	57
3.1.4. Procedura	60
3.2. Studio 1: Risultati	61
3.3. Studio 1: Discussione	64
3.4. Studio 2. Metodo	66

3.4.1.	Partecipanti	66
3.4.2.	Apparato e stimoli.....	66
3.4.3.	Descrizione del compito	66
3.4.4.	Procedura	68
3.5.	Studio 2: Risultati.....	68
3.6.	Studio 2: Discussione.....	70
3.7.	Studio 3: Metodo.....	71
3.7.1.	Partecipanti	71
3.7.2.	Apparato e stimoli.....	71
3.7.3.	Descrizione del compito	71
3.7.4.	Procedura	71
3.8.	Risultati.....	72
<i>CAPITOLO 4: DISCUSSIONE GENERALE.....</i>		73
4.1.	Limiti della ricerca e prospettive future.....	79
<i>CAPITOLO 5: CONCLUSIONI.....</i>		81
<i>BIBLIOGRAFIA.....</i>		82

ABSTRACT

La ricerca pilota descritta in questo elaborato aveva come obiettivo l'esplorazione del fenomeno controintuitivo del miglioramento percettivo indotto dal rumore nella percezione visiva umana. Questo fenomeno, noto come Risonanza Stocastica, potrebbe risultare particolarmente utile per ottimizzare l'Apprendimento Percettivo Visivo, su cui si basano diversi protocolli di riabilitazione visiva. Difatti, è noto che l'Apprendimento Percettivo richiede un consistente numero di prove prima che si possa osservare un miglioramento delle abilità visive compromesse, rendendo i paradigmi di riabilitazione molto lunghi. Pertanto, un primo obiettivo della ricerca presente era la produzione di ulteriori evidenze della Risonanza Stocastica nella percezione visiva umana. In particolare, la ricerca mirava ad indagare se livelli ottimali di rumore visivo aggiunto agli stimoli potessero potenziare la prestazione dei partecipanti. In secondo luogo, la ricerca presente si è posta un obiettivo di natura clinica, ovvero indagare se questo fenomeno potesse essere utilizzato nella riabilitazione visiva basata sull'apprendimento percettivo. In particolare, la ricerca ha esplorato se il rumore visivo potesse avere un ruolo in un compito utilizzato da un protocollo di riabilitazione visiva chiamato *Neural Restoration Training* (NRT - Casco et al., 2018). A questo scopo, sono stati condotti tre studi comportamentali con partecipanti normo-vedenti in cui sono stati manipolati i livelli di intensità di rumore visivo, aggiunto in maniera casuale agli stimoli visivi, in un compito di discriminazione temporale (2-IFC) di stimoli Gabor Patches. Il primo studio comprendeva dieci condizioni diverse tra loro per intensità di rumore aggiunto nelle porzioni interne degli stimoli, proporzionale al valore di luminanza di ogni pixel dello stimolo. Nel secondo e nel terzo studio il rumore era aggiunto in maniera casuale al 50% dei pixel del riquadro di presentazione degli stimoli, ovvero allo sfondo, per un totale di sei condizioni e cinque condizioni, rispettivamente. I risultati dei tre studi non hanno mostrato alcun fenomeno di risonanza stocastica. In particolare, nel primo studio il rumore non aveva alcun effetto sulla prestazione, mentre vi era un effetto della posizione dello stimolo. Nel secondo studio la prestazione dei partecipanti era inversamente proporzionale ai livelli di intensità del rumore. Pertanto, il rumore aveva un effetto negativo sulla sensibilità percettiva. Infine, nel terzo studio non è stato osservato alcun effetto del rumore sulle prestazioni. Complessivamente, questi risultati suggeriscono che

il metodo psicofisico adattivo delle staircase impiegato dal protocollo NRT non porta alla manifestazione della SR. Di conseguenza, questo fenomeno psicofisico potrebbe non essere utilizzabile nei protocolli riabilitativi visivi basati sull'Apprendimento Percettivo.

CAPITOLO 1: L'APPRENDIMENTO PERCETTIVO E LA RIABILITAZIONE NEUROVISIVA

1.1. Apprendimento percettivo: definizione e caratteristiche

La pratica può migliorare in modo consistente la nostra capacità di rilevare, discriminare o identificare stimoli visivi. Esempi di questa abilità sono osservabili in moltissime attività quotidiane che coinvolgono capacità percettive sempre più sofisticate, dallo sport, all'aviazione e alla pratica clinica. Un esempio lampante è riscontrabile nei radiologi, i quali necessitano di molti anni di esperienza e di allenamento con esposizione a migliaia di immagini radiologiche per poter raffinare le loro abilità percettive e divenire esperti. Per poter riconoscere ed interpretare i risultati di una radiografia è necessario discriminare sottili differenze di luce e oscurità e riconoscere l'anatomia umana in seguito alle trasformazioni dovute allo strumento di misurazione, così da ottenere informazioni rilevanti e poter giungere a delle conclusioni (Seitz, 2017). Attraverso l'esperienza, i radiologi potenziano le loro capacità di discriminazione e costruiscono un inventario mentale di caratteristiche delle immagini, che gli permettono di distinguere tra condizione normale e patologia (Seitz, 2017). Questa abilità, conosciuta come “*Apprendimento Percettivo*” (Perceptual Learning, PL), si riferisce ad un miglioramento duraturo delle abilità percettive grazie all'allenamento sistematico, fondamentale per lo sviluppo e per l'acquisizione di expertise percettivo nonché per la riabilitazione in seguito a deficit sensoriali dovuti a lesioni cerebrali (Maniglia & Seitz, 2018). L'Apprendimento Percettivo, quindi, implica un cambiamento relativamente permanente nella percezione come risultato dell'esperienza associato a fenomeni di plasticità neurale, che si distingue da altre modificazioni più transitorie, come la sensibilizzazione¹, l'abituazione² e il priming³ (Fahle, 2004). Inoltre, non vi è tipicamente esperienza cosciente di tale miglioramento, che risulta automatico, denotandone la natura implicita o procedurale. Fahle e Daum (2002) hanno mostrato che l'apprendimento percettivo è preservato anche

¹ Aumento transitorio della sensibilità in seguito a stimolazione.

² Uno spostamento della sensibilità verso livelli inferiori, come nel caso di una risposta riflessa meno pronunciata dopo una stimolazione prolungata (opposto della sensibilizzazione).

³ L'effetto di uno stimolo precedente sulla ricezione e percezione di un altro stimolo

in pazienti amnesici: questi miglioravano in un compito di acuità di Vernier e il miglioramento si manteneva fino ad una settimana dopo la sessione di allenamento (Fahle & Daum, 2002). Inoltre, l'apprendimento percettivo è stato documentato virtualmente in tutti i tipi di compiti e in tutte le modalità sensoriali (Fahle, 2005). Nella modalità visiva si parla di “*Apprendimento Percettivo Visivo*” (*Visual Perceptual Learning, VPL*), definito come un miglioramento a lungo termine nella prestazione in compiti visivi in seguito ad esperienza visiva (Fahle & Poggio, 2002). Tale fenomeno è stato osservato sia in compiti visivi con stimoli semplici, quali la detezione e la discriminazione di graticoli (Fiorentini & Berardi, 1997), l'iperacuità (Fahle, 2004; Fahle & Daum, 2002), la discriminazione di tessiture⁴ (Karni & Sagi, 1991), l'identificazione della direzione del movimento (Lu et al., 2006), la discriminazione dell'orientazione di stimoli semplici (Doshier & Lu, 1998), che in compiti percettivi con stimoli complessi, come il riconoscimento dei volti (Hussain et al., 2009b). Complessivamente, l'esistenza dell'apprendimento percettivo è stata sistematicamente comprovata e, in 40 anni di ricerca in questo ambito, ne sono state messe in luce le caratteristiche e ne sono stati studiati approfonditamente i meccanismi sottostanti e le applicazioni pratiche.

1.1.1. Specificità vs Generalizzazione

Un risultato comune emerso dagli studi sull'Apprendimento Percettivo è che questo fenomeno è riscontrabile in diverse abilità visive, ma si osserva una particolare selettività nell'acquisizione delle competenze. La specificità dell'apprendimento percettivo visivo, per cui il miglioramento raggiunto decade quando è modificato il compito o il tipo di stimolo, rappresenta una delle caratteristiche distintive sistematicamente osservate (Doshier & Lu, 2017). In particolare, molti studi hanno rilevato che il miglioramento associato all'allenamento è tipicamente ristretto alle caratteristiche di base dello stimolo allenato, come orientazione, posizione retinica e occhio di presentazione, e al compito svolto, senza alcun trasferimento tra compiti simili (Fahle, 1997, 2005; Fiorentini & Berardi, 1997; Karni & Sagi, 1991). Ad esempio, Karni e Sagi (1991) hanno osservato che i partecipanti impegnati in un compito di discriminazione di tessiture mostravano un

⁴ Rilevare una porzione di linee orientate in modo diverso all'interno di un insieme di linee orientate verticalmente.

miglioramento nella prestazione per il compito, ma solo per l'occhio allenato e per le posizioni in cui gli stimoli venivano presentati durante la fase di addestramento. Ciò ha portato gli autori ad ipotizzare che l'apprendimento sia associato alla plasticità neurale delle aree primarie del sistema visivo dove l'input visivo è organizzato retinotopicamente e per dominanza oculare (Karni & Sagi, 1991). Sulla stessa linea Fahle e colleghi hanno osservato una certa specificità dell'apprendimento in compiti di acuità di Vernier⁵ (Fahle, 2004). In particolare, è stato osservato che il miglioramento conseguente ad un training in compiti di acuità di Vernier si perdeva se lo stimolo era ruotato di 10° rispetto all'orientazione che aveva nella fase di allenamento (Fahle & Edelman, 1993). Un risultato simile è stato osservato circa la posizione retinica dello stimolo e per l'occhio di presentazione, per cui la prestazione nel compito decadeva quando gli stimoli erano presentati in nuove posizioni nel campo visivo e quando il compito era svolto con l'occhio che era stato bendato durante la fase di allenamento (Fahle, 2004). Infine, è stato osservato che l'apprendimento non si trasferiva tra compiti simili (Fahle, 1997). Tuttavia, studi successivi hanno messo in luce che, in determinate condizioni, l'apprendimento percettivo può generalizzarsi a compiti ed orientazioni diverse (McGovern et al., 2012; Zhang et al., 2010). Ad esempio, McGovern e colleghi (2012) hanno investigato il grado di trasferimento dell'apprendimento percettivo tra tre compiti relati tra loro⁶, che teoricamente dovrebbero condividere lo stesso tipo di processi percettivi di base⁷. La prestazione dei partecipanti migliorava non solo per il compito in cui si erano allenati ma anche negli altri due compiti, anche se il trasferimento era maggiore tra i compiti che presentavano un livello di complessità simile (McGovern et al., 2012). Similmente, Zhang e colleghi (2010), hanno sviluppato un particolare protocollo chiamato allenamento-più-esposizione (TPE), che prevedeva l'allenamento attivo di discriminazione di un'orientazione e l'esposizione passiva simultanea o successiva a nuove orientazioni. Gli autori hanno mostrato che la procedura era associata a miglioramenti sia per l'orientazione specifica allenata che per un'altra orientazione a cui i partecipanti erano stati esposti passivamente, in un compito in cui questa caratteristica

⁵ *Discriminare una piccola discrepanza di posizione tra due linee adiacenti.*

⁶ *I tre compiti previsti da McGovern e colleghi (2012): discriminazione di orientazione e della curvatura di linee e discriminazione della forma globale di Gabor patches.*

⁷ *Detezione dell'orientazione.*

era irrilevante (Zhang et al., 2010). Altre evidenze di generalizzazione dei risultati dell'allenamento provengono dagli studi su popolazioni cliniche, come l'ambliopia: ad esempio, è stato osservato trasferimento dell'apprendimento percettivo ottenuto in un compito visivo ad altre abilità visive non specificamente allenate, come l'acuità visiva⁸ e la sensibilità al contrasto⁹ che risultano deficitarie in questa popolazione di pazienti (Barollo et al., 2017; Polat, 2009; Polat et al., 2004). La generalizzabilità dell'apprendimento svolge un ruolo fondamentale per l'applicazione dell'apprendimento percettivo nella pratica riabilitativa di disturbi visivi (Doshier & Lu, 2017). Difatti, la riabilitazione può essere considerata efficace se i miglioramenti ottenuti in un compito allenato si trasferiscono ad abilità e compiti nuovi, potenzialmente utili nella vita quotidiana. Di conseguenza, numerosi studi hanno investigato le condizioni che favoriscono la generalizzazione dei risultati dell'allenamento, riscontrando che il grado relativo di specificità e trasferimento dipende da molti fattori, tra cui la difficoltà o la precisione del compito (Jeter et al., 2009; Merav Ahissar & Shaul Hochstein, 1997), l'entità dell'addestramento (Jeter et al., 2010) lo stato di adattamento del sistema (Harris et al., 2012), l'attenzione (Hung & Carrasco, 2021), l'incertezza sensoriale delle caratteristiche dello stimolo (o l'affidabilità delle rappresentazioni sensoriali) (Yashar & Denison, 2017), l'addestramento con un doppio compito (Xiao et al., 2008; Zhang et al., 2010) e così via. Tuttavia, l'apprendimento percettivo è un fenomeno graduale, con una certa specificità ed una certa generalizzabilità dei miglioramenti per diverse caratteristiche e compiti (Doshier & Lu, 2017). A partire da questi studi, recentemente sono stati sviluppati dei protocolli riabilitativi per il trattamento di condizioni visive, come l'ipovisione, l'ambliopia, la cecità corticale e l'emianopsia omonima laterale (Barollo et al., 2017; Casco et al., 2018; Huxlin et al., 2009; Maniglia, Pavan, et al., 2016; Polat, 2009), che saranno discussi nei prossimi paragrafi, dopo una trattazione dei meccanismi sottostanti l'apprendimento percettivo.

⁸ *Visione fine dei dettagli.*

⁹ *Abilità di discriminare tra sfumature di grigio.*

1.2. Perceptual Learning Visivo: plasticità e apprendimento

Il cervello umano possiede la capacità di modificarsi in funzione dell'esperienza durante tutto l'arco della vita, una proprietà conosciuta come plasticità. La plasticità neurale consiste in un processo di riorganizzazione strutturale e funzionale dei circuiti neurali (Denes, 2016). Nonostante i primi studi suggerissero che il sistema visivo fosse altamente specializzato, e pertanto che i fenomeni di plasticità fossero limitati all'interno di una specifica finestra temporale nota come "periodo critico" (Hubel & Wiesel, 1970), una grande mole di ricerche successive ha mostrato che tutto il sistema visivo, comprese le aree visive primarie, conserva la capacità di modificarsi in funzione dell'esperienza visiva anche durante l'età adulta (Gilbert et al., 1996). Questi cambiamenti costituiscono i meccanismi sottostanti l'apprendimento percettivo sia nella visione normale che nel recupero delle funzioni in seguito a lesioni del sistema nervoso centrale (Gilbert et al., 2009). In particolare, l'apprendimento percettivo visivo riflette fenomeni di plasticità funzionale non solo nel sistema visivo ma anche in una rete costituita da diversi substrati neurali distribuiti nel cervello. Questi cambiamenti includono modificazioni durature delle proprietà funzionali dei neuroni e dei circuiti sottostanti tali cambiamenti, che si verificano in seguito all'esperienza (Gilbert et al., 2009).

1.2.1. Meccanismi dell'Apprendimento Percettivo

In generale, l'apprendimento percettivo visivo non avviene attraverso un unico processo, bensì le evidenze fin ora raccolte indicano che ve ne sono molteplici. Infatti, i compiti visivi, compresi i più semplici di detezione o di discriminazione di stimoli, coinvolgono una vasta rete di meccanismi cognitivi e computazionali e regioni neurali che supportano l'elaborazione sensoriale, la decisione, i meccanismi attentivi, la selezione dell'azione e l'elaborazione del feedback e della ricompensa (Maniglia & Seitz, 2018). Tuttavia, questa concezione multifattoriale dell'apprendimento percettivo è il risultato di 40 anni di ricerca, poiché inizialmente una prospettiva abbracciata da molti considerava tale fenomeno come associato singolarmente al miglioramento o ottimizzazione di rappresentazioni visive (Karni & Sagi, 1991). In una revisione della letteratura, Goldstone (1998) ha sostenuto che il Perceptual Learning è mediato da modificazioni di rappresentazioni nelle aree visive primarie, ed ha conseguentemente proposto quattro

potenziali meccanismi sottostanti l'apprendimento percettivo: la modulazione dell'attenzione, l'imprinting, la differenziazione e l'unificazione (Goldstone, 1998). Secondo questa prospettiva, l'allenamento farebbe quindi sì che l'osservatore presti più attenzione a stimoli e caratteristiche rilevanti per il compito a discapito di quelle irrilevanti, che si sviluppino recettori specializzati per stimoli o parti degli stessi, che stimoli una volta indistinguibili diventano psicologicamente separati, e che parti degli stimoli vengano integrati in un'unità¹⁰ (Goldstone, 1998). Tuttavia, studi più recenti di psicofisica hanno investigato il modo in cui l'apprendimento percettivo modifica l'analisi del segnale e del rumore. Il rapporto segnale-rumore¹¹ (SNR) rappresenta una misura del livello di un segnale in relazione al livello del rumore di fondo, ovvero è il parametro che misura la nostra capacità di distinguere l'immagine desiderata dal rumore in cui è immersa (Strum & Fenigstein, 2014). Le capacità di detezione, discriminazione o identificazione visive dipendono dall'abilità di estrarre il segnale appropriato e dal rumore intrinseco nel sistema¹² e dal rumore degli stimoli¹³ (Doshier & Lu, 2017). Indipendentemente dal compito, l'apprendimento percettivo riflette un miglioramento nel rapporto segnale-rumore nell'elaborazione percettiva e ciò potrebbe avvenire attraverso un miglioramento nell'estrazione del segnale o la riduzione del rumore, o entrambi (Doshier & Lu, 1998). Per studiare ciò, è stato misurato l'apprendimento percettivo visivo con stimoli con livelli di rumore sistematico variabile e sono stati sviluppati modelli dell'osservatore ispirati alle proprietà del sistema visivo, come ad esempio il Modello del Template Percettivo (PTM), che modella l'osservatore come un rilevatore ideale caratterizzato da inefficienze e limiti nella codifica e nell'analisi percettiva (Doshier & Lu, 1998). Secondo il PTM vi sarebbero tre sorgenti di rumore: il rumore esterno aggiunto allo stimolo, il rumore additivo e il rumore moltiplicativo, ambedue interni all'osservatore (Doshier & Lu, 1998). Il potenziamento del segnale dello stimolo che riduce il rumore additivo interno, l'esclusione del rumore esterno e la riduzione del rumore moltiplicativo interno

¹⁰ *I quattro processi proposti da Goldstone (1998): modulazione dell'attenzione, imprinting, differenziazione e unificazione, rispettivamente.*

¹¹ *Rapporto tra le informazioni desiderate o la potenza di un segnale e il segnale indesiderato o la potenza del rumore di fondo.*

¹² *La variabilità stocastica nelle risposte neurali ad uno stimolo.*

¹³ *Variabilità intrinseca negli stimoli fisici.*

rappresentano potenziali meccanismi sottostanti il miglioramento della prestazione in seguito ad allenamento (Doshier & Lu, 2017). Tuttavia, due meccanismi indipendenti, ovvero il potenziamento dello stimolo e l'esclusione del rumore esterno, hanno spiegato in modo esaustivo i dati ottenuti da molti studi e pertanto supportano l'apprendimento percettivo in diversi compiti (Doshier & Lu, 1998). Contrariamente a Goldstone (1998), queste evidenze supportano il ruolo delle aree superiori implicate nei processi decisionali alla base del Perceptual Learning, e pertanto quei modelli che sostengono che tale fenomeno sia mediato dalla plasticità che coinvolge le connessioni tra canali visivi di base e processi decisionali (Doshier & Lu, 1998; Doshier & Lu, 2017).

1.2.2. Modelli Rappresentazionali del PL

In generale, i meccanismi comportamentali e i processi neurali sottostanti l'apprendimento percettivo visivo sono ancora molto dibattuti e non compresi fino in fondo. Negli anni sono stati proposti molti modelli diversi con lo scopo di accomodare le evidenze comportamentali raccolte negli studi sull'apprendimento percettivo visivo. Due approcci contrapposti hanno dominato la ricerca: uno che sostiene che l'apprendimento percettivo è dovuto all'ottimizzazione di rappresentazioni visive, e un altro che invece supporta l'idea per cui il miglioramento avvenga a seguito di un potenziamento dell'abilità di aree superiori, coinvolte nei processi decisionali, nell'assegnare maggiore importanza o peso alle diverse fonti di informazioni sensoriali (Maniglia & Seitz, 2018). Secondo la prima prospettiva, detto anche approccio Rappresentazionale del Perceptual Learning, esso riflette il miglioramento delle rappresentazioni e dell'elaborazione dell'input visivo in specifiche aree del sistema visivo. Una versione forte di questa prospettiva sostiene che ciò avviene nelle aree primarie dell'analisi visiva (Karni & Sagi, 1991; Schwartz et al., 2002). A supporto di questa visione vi sono le evidenze circa la peculiare specificità dell'apprendimento percettivo, che hanno spinto molti autori ad ipotizzare che l'apprendimento percettivo fosse il risultato di fenomeni di plasticità nelle aree visive primarie come V1, caratterizzate da neuroni con campi recettivi piccoli che rispondono selettivamente ad orientazione, posizione e occhio di presentazione degli stimoli (Maniglia & Seitz, 2018). Quindi l'apprendimento percettivo visivo rispecchierebbe il miglioramento o la rifinitura della rappresentazione neurale di una caratteristica visiva presentata durante l'allenamento (Karni & Sagi, 1991). Studi di

neuroimmagine e di elettrofisiologia hanno messo in luce fenomeni di plasticità neurale a livello della corteccia visiva primaria (V1) a seguito dell'allenamento. Ad esempio, Schwartz et al. (2002) hanno misurato l'attività neurale attraverso l'fMRI 24 ore dopo una sessione intensiva di allenamento monoculare in un compito di discriminazione di tessiture (TDT), e hanno osservato un incremento nell'attivazione delle aree visive primarie specifica per la tessitura e per l'occhio allenato (Schwartz et al., 2002). Similmente, Pourtois et al. (2007) hanno fatto allenare dei partecipanti in un compito di discriminazione di tessiture e hanno osservato che il miglioramento nel compito visibile 24 ore dopo l'allenamento era associato ad una ridotta ampiezza della componente C1, che riflette l'attività dell'area V1 (Pourtois et al., 2008). Tuttavia, altri studi di neuroimmagine hanno mostrato un'associazione tra apprendimento percettivo e cambiamenti nelle rappresentazioni neurali di aree di livello intermedio o superiore nell'analisi visiva. Difatti, vi sono ulteriori aree oltre V1 che rispondono selettivamente ad alcune caratteristiche degli stimoli, come l'area MT per l'analisi del movimento, l'area V4 per l'analisi dei colori e della curvatura, l'Area Fusiforme per i volti (FFA) (Maniglia & Seitz, 2018). Ad esempio, Shibata e colleghi (2016) hanno osservato due tipologie diverse di plasticità in aree neurali differenti in seguito ad apprendimento percettivo: nella V3A, la modificazione funzionale nella risposta dopo l'allenamento era specifica per il movimento allenato, sia quando il movimento era rilevante per il compito di addestramento che quando i partecipanti erano esposti passivamente a tale movimento¹⁴; in V1 e nel Solco Intraparietale, il cambiamento nella risposta era specifico invece per il compito svolto con il movimento allenato¹⁵ (Shibata et al., 2016). Questi risultati hanno messo in luce che l'apprendimento percettivo è associato a fenomeni di plasticità anche in aree neurali ad un superiore livello di analisi rispetto a V1¹⁶ e sono stati interpretati come evidenza di un duplice meccanismo di plasticità alla base dell'apprendimento percettivo visivo (Shibata et al., 2011, 2016).

¹⁴ Plasticità cerebrale dipendente dalle caratteristiche.

¹⁵ Plasticità cerebrale dipendente dal compito.

¹⁶ V3A, deputata all'analisi del movimento.

1.2.3. Modelli di “Reweighting”

I modelli che suggeriscono che l'apprendimento percettivo sia il risultato di alterazioni selettive nelle rappresentazioni a livello primario di analisi sono in linea con le evidenze discusse nei paragrafi precedenti, per cui il miglioramento è specifico per occhio di presentazione, compito allenato, posizione retinica e caratteristiche dello stimolo. Tuttavia, non sono in grado di spiegare il trasferimento dell'apprendimento percettivo a nuove condizioni (Doshier et al., 2013). Inoltre, non risulta necessario ipotizzare plasticità nelle rappresentazioni visive di base per poter spiegare la specificità dell'apprendimento (Doshier & Lu, 2017). Sono state pertanto proposte teorie alternative che assegnano un ruolo maggiore ad aree di livello superiore che sottendono meccanismi decisionali, attentivi ed elaborazione di feedback. L'allenamento visivo ottimizzerebbe la lettura degli input visivi, la selezione e la modulazione attentiva verso caratteristiche rilevanti da parte di aree di alto livello (Doshier et al., 2013; Zhang et al., 2010). Secondo una serie di modelli, le rappresentazioni delle aree visive a seguito di allenamento si mantengono stabili, mentre migliora la capacità di interpretazione di input visivi da parte di aree di livello superiore (Integrated Reweighting theory - Doshier et al., 2013; Doshier & Lu, 1998; Rule-Based Learning Model - Zhang et al., 2010). In altre parole, l'Apprendimento Percettivo riflette il potenziamento della capacità delle aree di livello superiore nell'interpretare le informazioni sensoriali rilevanti per le decisioni legate all'attività in corso, che praticamente avviene tramite un'ottimizzazione delle connessioni tra aree decisionali di alto livello e aree sensoriali di basso livello (Zhang et al., 2010). Su questa linea, Law e Gold (2008) hanno trovato che il miglioramento nella capacità di discriminare stimoli in movimento nelle scimmie addestrate era legato a cambiamenti nelle risposte dell'area sensori-motoria (*area intra-parietale laterale o LIP*), ma non nell'area visiva specializzata nell'analisi del movimento, come l'area MT (*medio-temporale o V5*) (Law & Gold, 2008). I miglioramenti percettivi corrispondevano potenzialmente ad una lettura sempre più selettiva dei neuroni altamente sensibili dell'area MT attraverso un processo decisionale, rappresentato in LIP, che guidava la risposta comportamentale. Questo risultato costituisce una chiara evidenza che non è richiesto ipotizzare la plasticità in V1 per spiegare la specificità dell'apprendimento (Law & Gold, 2008) Per spiegare la trasferibilità dell'apprendimento, Doshier e colleghi (2013) hanno sviluppato un modello, chiamato *Integrated Reweighting Theory* (Doshier et al.,

2013). Secondo questo modello, una combinazione di rappresentazioni specifiche per la posizione retinica e per le rappresentazioni invarianti, aspecifiche per la posizione retinica, permette di spiegare sia la specificità che il trasferimento dell'apprendimento a nuove posizioni retiniche e caratteristiche degli stimoli (Doshier et al., 2013). Altri autori hanno invece ipotizzato che ciò che viene appreso sono regole o euristiche per svolgere un compito visivo efficientemente. In particolare, il miglioramento in un compito avviene tramite l'apprendimento di regole di ritaratura degli input visivi in V1 da parte di unità decisionali situate in regioni cerebrali di livello superiore (Zhang et al., 2010). In altre parole, aree cerebrali deputate a processi decisionali apprendono, attraverso l'allenamento, delle strategie per interpretare le informazioni sensoriali e prendere decisioni sulla base di queste (Zhang et al., 2010). In generale, questi modelli sostengono che non vi sia necessità di cambiamenti delle rappresentazioni propriamente visive per spiegare l'apprendimento percettivo e le sue caratteristiche, bensì i miglioramenti sono dovuti ad un'ottimizzazione nell'interpretazione di input visivi da aree decisionali (Maniglia & Seitz, 2018).

1.2.4. Ruolo dei processi top-down

Un'altra linea di ricerca si è concentrata invece sul ruolo di processi top-down di modulazione dell'attenzione, suggerendo che questi possano spiegare alcune caratteristiche dell'apprendimento percettivo. Secondo alcuni studiosi, la specificità dell'apprendimento percettivo può essere spiegata prendendo in considerazione le influenze di regioni di alto livello su regioni di basso livello. Secondo Ahissar e Hochstein (1993), i meccanismi di controllo dall'alto verso il basso associati al compito influenzano i meccanismi di basso livello guidati dallo stimolo che vengono modificati in risposta all'allenamento (Ahissar & Hochstein, 1993). Secondo altri, l'apprendimento percettivo visivo di una specifica caratteristica o di un compito occorre quando i segnali di basso livello da questi generati sono potenziati dall'attenzione (Sasaki et al., 2010). Pertanto, l'attenzione focalizzata sulle caratteristiche rilevanti o la procedura del compito sono necessarie affinché queste vengano apprese Sasaki et al., 2010. Ad esempio, Bays e colleghi (2015) hanno osservato che l'allenamento era associato a migliori capacità di focalizzazione delle risorse attentive verso lo stimolo presentato (Bays et al., 2015). Tuttavia, è stato rilevato che l'apprendimento avviene anche in assenza di attenzione, ad

esempio per stimoli sottosoglia e irrilevanti per il compito da svolgere, a cui i partecipanti sono stati esposti ripetutamente (Watanabe et al., 2001). Altri studi hanno investigato il ruolo del feedback nell'apprendimento percettivo, ma i risultati sono misti. È stato riscontrato che l'apprendimento può verificarsi in assenza di feedback in alcune condizioni, ma risulta importante quando il compito è difficile e la prestazione iniziale è scarsa (Fahle & Edelman, 1993; Herzog & Fahle, 1997; Liu et al., 2010). Inoltre, un feedback dato alla fine di ogni trial è più efficace di un feedback a blocchi, e un feedback inaccurato può interrompere l'apprendimento (Doshier & Lu, 2017). Pertanto, il feedback può influenzare in modo significativo la velocità e l'entità dell'apprendimento visivo, indicando che diverse influenze dall'alto verso il basso, non solo l'attenzione, devono svolgere un ruolo importante in questo tipo di apprendimento (Fahle, 2004).

Nel complesso, la letteratura discussa suggerisce una crescente complessità nelle conoscenze riguardanti i meccanismi e i potenziali substrati neurali dell'apprendimento percettivo. Contrariamente ad una prospettiva classica che considera il Perceptual Learning come un processo unitario che riflette cambiamenti nelle rappresentazioni delle aree sensoriali di basso livello (Karni & Sagi, 1991) il campo sta riconoscendo sempre più che l'apprendimento percettivo coinvolge fenomeni di plasticità distribuiti e molteplici meccanismi sottostanti (Maniglia & Seitz, 2018). In sostanza, le evidenze discusse dimostrano che l'apprendimento percettivo non può essere attribuito ad un unico processo generato da un singolo sistema di apprendimento. Secondo Maniglia e Seitz (2018), sono necessari nuovi modelli che tengano conto di come l'apprendimento sia congiuntamente dovuto alla plasticità di più sistemi cerebrali. Inoltre, gli autori sostengono che la distribuzione di questo apprendimento in tutto il sistema è probabilmente mediata da diverse condizioni di allenamento e moderata dalle caratteristiche degli individui in fase di addestramento (Maniglia & Seitz, 2018). Infine, nonostante la divergenza delle evidenze, è un fatto indiscutibile che l'apprendimento percettivo favorisca l'acquisizione di nuove competenze e rivesta un ruolo essenziale nella riabilitazione in seguito a lesioni cerebrali (Maniglia & Seitz, 2018).

1.3. Neuroanatomia del sistema visivo e deficit visivi

Prima di passare ad una trattazione delle applicazioni riabilitative dell'apprendimento percettivo, utilizzato per potenziare e riabilitare le abilità visive in pazienti con difetti della visione, sarà discussa brevemente la topografia neuroanatomica del sistema visivo e i deficit visivi più comuni conseguenti a danni del sistema.

1.3.1. La via Genicolo-Striata

Gran parte delle concezioni che sviluppiamo riguardo al mondo circostante e dei ricordi che preserviamo sono fondamentalmente plasmate dalla percezione visiva. Una notevole porzione della corteccia cerebrale è dedicata all'analisi delle informazioni provenienti dalla vista (Kandel et al., 2014). L'analisi visiva ha origine nelle due retine, in cui la comparsa di uno stimolo luminoso stimola i fotorecettori, ovvero i coni e i bastoncelli, e dà il via ad una cascata di eventi biochimici (Kandel et al., 2014). A seguire, i segnali nervosi si generano a livello delle cellule bipolari che causano una depolarizzazione con conseguente generazione di impulsi nervosi, che inviano segnali eccitatori e inibitori alle cellule gangliari (Bear et al., 2016). Le cellule gangliari della retina sono i neuroni di proiezione della stessa e i cui assoni formano i nervi ottici, i quali si estendono fino al chiasma ottico, una struttura a forma di X alla base del cervello, che rappresenta il punto di incontro dei due nervi ottici destro e sinistro. A livello del chiasma ottico, le fibre provenienti dalle emiretine nasali si incrociano, dando luogo ad un fenomeno denominato decussazione, per cui queste fibre procedono verso l'emisfero opposto¹⁷. Le fibre che provengono dalle emiretine temporali procedono verso l'emisfero sullo stesso lato¹⁸ (Kandel et al., 2014). Dato che l'emiretina temporale di un occhio vede la stessa metà del campo visivo dell'emiretina nasale dell'altro, quando le fibre nervose si incrociano parzialmente al livello del chiasma ottico, tutte le informazioni da ciascuna metà del campo visivo vengono elaborate dalla parte del cervello controlaterale (**Fig. 1.1**).

¹⁷ *Controlaterale.*

¹⁸ *Ipsilaterale.*

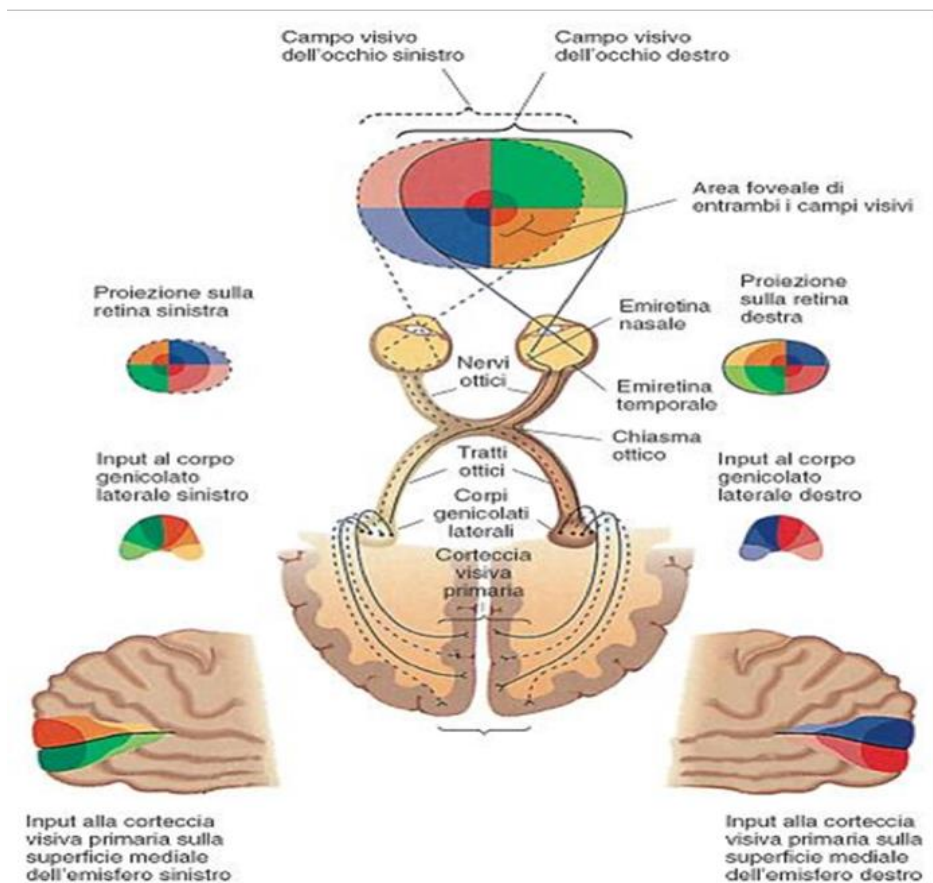


Figura 1.1. - Organizzazione del sistema visivo (Pinel, 2007)

Dopo il punto di incrocio al chiasma ottico, le fibre nervose provenienti dalle parti temporali e nasali della retina, che portano le informazioni da metà del campo visivo, si uniscono nel tratto ottico. Questo tratto arriva al nucleo genicolato laterale (NGL) nel talamo. Il nucleo genicolato laterale (NGL) è una struttura laminare composta da sei strati, di cui quattro strati parvocellulari e composti di cellule piccole, e due strati magnocellulari, dotati di cellule grandi. Il nucleo riceve afferenze dall'emiretina nasale dell'occhio del lato opposto e dall'emiretina temporale dell'occhio dello stesso lato (Kandel et al., 2014). Sono distinguibili due vie parallele che attraversano gli strati del NGL: una via parvocellulare e una via magnocellulare. I coni, che sono in numero maggiore nella fovea¹⁹ e che garantiscono una percezione a colori e ad alto livello di acuità, proiettano alla maggior parte degli strati P, i cui neuroni sono pertanto maggiormente responsivi a caratteristiche visive come colore, dettagli e stimoli statici o

¹⁹ Regione centrale della retina, responsabile della visione più nitida e dettagliata.

in movimento lento. Invece gli strati M ricevono più input dai bastoncelli e pertanto i neuroni magnocellulari sono maggiormente responsivi al movimento (Pinel & Barnes, 2018). Le informazioni retiniche sono successivamente inviate dai neuroni del talamo alla corteccia visiva primaria (V1), tramite una via nota come radiazione ottica. Le fibre afferenti che compongono questa via generano una mappa nervosa dettagliata del campo visivo contralaterale nella corteccia striata o V1. In particolare, le fibre dorsali rappresentano i quadranti retinici superiori, e pertanto proiettano le informazioni circa la parte inferiore del campo visivo; le fibre ventrali (i.e. ansa di Meyer) rappresentano i quadranti retinici inferiori, e proiettano informazioni circa la parte superiore del campo visivo (Kandel et al., 2014). La via visiva primaria è denominata via genicolo-striata, dato il coinvolgimento del nucleo genicolato laterale e dell'area visiva primaria o corteccia striata, denominata così poiché presenta una striatura centrale data da una striscia ricca di mielina.

1.3.2. La Corteccia Visiva Primaria

Nella corteccia visiva primaria (V1), la superficie è funzionalmente organizzata come una sorta di mappa del campo visivo, e la disposizione spaziale delle afferenze provenienti dalla retina è conservata, fenomeno denominato retinotopia. Ciò vuol dire che due stimoli presentati in posizioni della retina adiacenti stimolano neuroni a loro volta adiacenti, a tutti i livelli del sistema (Pinel & Barnes, 2018). Inoltre, la corteccia visiva è strutturata in colonne di neuroni altamente specializzati. Le colonne neurali di V1 si estendono dalla superficie corticale fino alla sostanza bianca e sono suddivise per funzione, per cui neuroni che condividono proprietà funzionali simili sono localizzate insieme. Le colonne riflettono il ruolo svolto dalle aree corticali nella funzione visiva: esse si specializzano in particolari proprietà, tra cui la capacità di distinguere orientamenti specifici e di combinare le informazioni provenienti da entrambi gli occhi (Kandel et al., 2014). Infatti, i neuroni dei circuiti corticali visivi primari, compresa la corteccia visiva primaria o V1, hanno campi recettivi piccoli, presentano selettività per gli attributi degli stimoli e sono organizzati per dominanza oculare (Maunsell & Newsome, 1987). Al di là della corteccia striata si estendono le aree dette extrastriate, che formano un gruppo di aree visive di ordine superiore organizzate anch'esse come mappe nervose del campo visivo (Pinel & Barnes, 2018). Infatti, la corteccia visiva primaria rappresenta una prima stazione di

analisi dell'input visivo, da cui si diramano almeno due vie visive: una via dorsale, denominata via del "where", che procede dall'area visiva primaria verso regioni parietali, ed è deputata all'elaborazione circa la localizzazione dello stimolo nello spazio; una via ventrale, denominata via del "what", che si estende nel lobo temporale ed è deputata all'analisi di informazioni circa l'identità degli oggetti, permettendone il riconoscimento (Ungerleider & Haxby, 1994).

1.3.3. Conseguenze di una lesione delle vie visive

Quando le strutture lungo le vie visive vengono danneggiate, la visione è persa in porzioni del campo visivo che corrispondono retinotopicamente al tessuto danneggiato. La regione cieca, chiamata scotoma o campo cieco, varia nella localizzazione e nella dimensione a seconda del luogo e dell'estensione della lesione (Bola et al., 2013). Le lesioni prechiasmatiche, che colpiscono la retina o il nervo ottico, comportano in qualche misura un difetto del campo visivo ipsilaterale (Swienton & Thomas, 2014). Tipicamente, una lesione unilaterale che coinvolge il nervo ottico causata da neurite ottica²⁰, da neuropatia ischemica ottica²¹ e da neuropatia ottica da compressione²² (Swienton & Thomas, 2014), determina la perdita completa della visione dell'occhio ipsilaterale la lesione. Le lesioni nella regione del chiasma ottico invece sono associate alla perdita di visione di metà temporale di ciascun emicampo visivo, condizione conosciuta come emianopsia bitemporale (Kandel et al., 2014). I danni a carico di strutture successive al chiasma nelle vie visive, che interessano ad esempio i tratti ottici, il nucleo genicolato laterale (LGN), le radiazioni ottiche o la corteccia visiva primaria (V1), producono difetti del campo visivo omolaterali (Swienton & Thomas, 2014). Questa condizione, denominata emianopsia omonima, origina da lesioni unilaterali retro-chiasmatiche ed è caratterizzata dalla perdita della visione dell'emicampo visivo controlaterale. La causa più comune è di origine vascolare, ma può derivare anche da tumori, traumi o interventi chirurgici (Clarke et al., 2009).

²⁰ *Infiammazione del nervo ottico.*

²¹ *Danno del nervo ottico causato dall'ostruzione della relativa irrorazione sanguigna.*

²² *Danno che si verifica in seguito alla compressione del nervo ottico da parte di una massa (di solito un tumore).*

producono emianopsia omonima controlaterale e solitamente completa. Il difetto tuttavia può essere incompleto, non congruo e limitato ai quadranti superiori (Clarke et al., 2009). Le fibre parietali (o superiori) contengono informazioni circa il campo visivo inferiore mentre le fibre temporali (o inferiori) contengono informazioni circa il campo visivo superiore. Lesioni alle fibre superiori causano una quadrantopsia inferiore controlaterale o un'emianopsia omonima incompleta limitata al campo visivo inferiore (Swienton & Thomas, 2014), mentre lesioni che coinvolgono le fibre inferiori determinano uno scotoma nel quadrante superiore dell'emicampo visivo controlaterale di entrambi gli occhi, (detto anche "pie in the sky") (Kandel et al., 2014).

1.3.4. Conseguenze di una lesione alla corteccia striata

Lesioni incomplete della corteccia visiva primaria determinano deficit in alcune porzioni dell'emicampo visivo opposto (Swienton & Thomas, 2014). In generale, lesioni del lobo occipitale rappresentano la causa più comune di emianopsia omonima, tipicamente caratterizzata da risparmio maculare, per cui l'area del campo visivo centrale è risparmiata dalla lesione (Swienton & Thomas, 2014). La corteccia visiva primaria è situata sulla superficie mediale dei lobi occipitali, sia sopra che sotto la scissura calcarina e, come già anticipato, contiene una mappa anatomica del campo visivo (Pinel & Barnes, 2018). La parte di corteccia situata al di sopra della scissura calcarina rappresenta il campo visivo inferiore e viceversa. Lesioni parziali, della porzione superiore o inferiore del margine della scissura calcarina, determinano una quadrantopsia omonima inferiore o superiore, rispettivamente (Kandel et al., 2014). La parte più caudale della corteccia visiva primaria, che si estende fino ai poli occipitali, rappresenta la fovea, mentre le porzioni più rostrali (anteriori) della corteccia visiva rappresentano regioni periferiche del campo visivo. Lesioni unilaterali del polo occipitale sono associate ad emianopsia omonima completa e congrua²³, mentre lesioni più anteriori coinvolgono in modo crescente le porzioni periferiche del campo visivo (Swienton & Thomas, 2014). Danni bilaterali al lobo occipitale possono avvenire simultaneamente o consecutivamente e tipicamente esitano in un'emianopsia omonima bilaterale con o senza risparmio maculare. Lesioni bilaterali alla corteccia striata possono esitare anche in perdita di

²³ *Simmetria del difetto visivo nei due emicampi.*

visione completa, una condizione nota come cecità corticale (Fraser et al., 2011). Danni che avvengono successivamente alla corteccia striata, coinvolgendo le aree associative extrastriate denominate V2-V3-V4-V5, possono manifestarsi con sintomi visivi indistinti, come visione offuscata o difficoltà nella percezione visiva, senza ulteriori problemi nel riconoscimento di oggetti, volti o colori. Nella tabella seguente sono descritti sommariamente i disturbi specifici più comunemente associati alle lesioni nelle aree extra-striate.

V1	<i>Sindrome di Anton; Blindsight; Fenomeno di Riddoch; Acromatopsia transitoria; Atassia Visiva</i>
V2 e V3	<i>Quadrantopsia omonima</i>
V4	<i>Acromatopsia cerebrale</i>
V5	<i>Akinetopsia</i>
Via visiva dorsale (o del “where”)	<i>Sindrome di Balint-Holmes; Neglect</i>
Via visiva ventrale (o del “what”)	<i>Alessia Pura, Anomia per i colori; Anomia per gli oggetti; Prosopagnosia; Agnosie; Amnesia Visiva; Ipoemozionalità visiva</i>

Tabella 1.1 - Sindromi dovute a lesioni delle aree visive corticali (Da Gerkin et al.)

1.4. Perceptual Learning (PL) e Riabilitazione visiva: potenzialità e limiti

Solo recentemente l'apprendimento percettivo è stato riconosciuto come un potente strumento per migliorare le abilità visive nella popolazione clinica di pazienti con disturbi visivi (Campana & Maniglia, 2015). Come già anticipato, questo ritardo è dovuto probabilmente alla specificità dell'apprendimento percettivo per le caratteristiche dello stimolo, per la posizione retinica e per il compito allenato, riscontrata negli studi degli ultimi 40 anni di ricerca in questo ambito, che lo rendeva poco pratico per scopi riabilitativi (Karni & Sagi, 1991; Sagi, 2011). Una riabilitazione efficace richiede infatti

che i risultati ottenuti con l'allenamento non siano ristretti al compito specifico allenato, ma che si trasferiscano a compiti diversi, nuovi stimoli e nuove condizioni, così da migliorare anche altre abilità visive che possono risultare deficitarie in seguito ad una lesione o ad un difetto visivo congenito. Tuttavia, come già descritto nei paragrafi precedenti, successivamente è divenuto chiaro che l'apprendimento percettivo si possa generalizzare a diversi compiti, nuove posizioni retiniche e occhio di allenamento con alcune condizioni di allenamento (McGovern et al., 2012). A partire da queste evidenze, è stato riconosciuto che molte popolazioni cliniche hanno la possibilità di beneficiare dell'apprendimento percettivo.

1.4.1. PL e Riabilitazione dell'Ambliopia

I primi approcci riabilitativi sistematici basati sull'apprendimento percettivo sono stati sviluppati come trattamento per adulti con ambliopia, un disturbo visivo dello sviluppo caratterizzato da anomalie nella visione spaziale, tra cui ridotta acuità visiva (VA), funzione di sensibilità al contrasto (CSF) ed acuità di Vernier nonché dalla presenza di sovrappollamento foveale²⁴ ed anomalie nelle interazioni spaziali tra i neuroni visivi (Maniglia & Seitz, 2018; Polat et al., 2004). È stato osservato che l'allenamento sistematico monoculare dell'occhio ambliope in compiti di detezione di Gabor patches²⁵ a contrasto variabile, di discriminazione dell'orientamento di Gabor patch e di iperacuità, migliora la prestazione in quell'occhio nel compito addestrato, con trasferimento anche ad altre abilità visive (Barollo et al., 2017; Polat, 2009; Polat et al., 2004). Il protocollo riabilitativo proposto da Polat (2004) consisteva in un paradigma di mascheramento laterale in cui i pazienti si allenavano in un compito detezione di Gabor a contrasto variabile presentate con fianchi collineari²⁶ di Gabor ad alto contrasto. L'obiettivo principale del training era di promuovere le interazioni spaziali tra i neuroni visivi (Polat et al., 2004). L'allenamento è risultato efficace nel migliorare la funzione di sensibilità al contrasto (CSF) e l'acuità visiva (VA) a frequenze spaziali sempre più elevate, e ciò era in linea con una modulazione delle interazioni laterali dei neuroni corticali visivi primari, anomale nei pazienti ambliopi (Polat, 2004; 2009). Similmente, Barollo e colleghi (2017)

²⁴ *L'interferenza nella discriminazione di un target dovuta alla presenza di elementi vicini.*

²⁵ *Una variazione sinusoidale di luminanza moltiplicata per una funzione gaussiana.*

²⁶ *Stimoli laterali interferenti.*

hanno osservato che l'allenamento in un compito di detezione di Gabor a contrasto variabile, presentate con fianchi collineari di Gabor ad alto contrasto, era associato alla riduzione delle soglie di contrasto nel compito specifico, ma anche a migliore acuità visiva, funzione di sensibilità al contrasto e ridotto sovraffollamento foveale (Barollo et al., 2017).

1.4.2. PL e Riabilitazione della Degenerazione Maculare

La degenerazione maculare (AMD) è una patologia visiva caratterizzata dal danneggiamento dei fotorecettori nel centro del campo visivo, con conseguente perdita di visione centrale, il che a sua volta ha effetti dannosi sulle attività quotidiane come la navigazione, la lettura e il riconoscimento dei volti (Maniglia et al., 2021). Tipicamente, l'apprendimento percettivo per la riabilitazione di questa condizione mira ad allenare la visione periferica così da ottimizzare l'uso del punto di fissazione spontaneamente acquisito (PRL), la regione retinica periferica utilizzata in sostituzione della fovea, compromessa dalla lesione. Tra i protocolli riabilitativi per il trattamento della degenerazione maculare sono stati testati un paradigma di Presentazione Visiva Seriale Rapida (RSVP)²⁷ con parole, che in due studi si è rivelato efficace sia nel migliorare la prestazione nel compito specifico, che altre abilità visive come l'acuità visiva nella lettura e la velocità di lettura (Chung, 2011; Tarita-Nistor et al., 2014). Un ulteriore protocollo proposto più recentemente è invece basato sul mascheramento laterale, simile a quello utilizzato per il trattamento dell'ambliopia (Polat et al., 2004), per cui la presenza di fianchi collineari, costituiti da Gabor orientati nello stesso modo rispetto al target, aumentano la sensibilità del soggetto, indicata da una riduzione delle soglie di contrasto (Maniglia, Cottureau, et al., 2016; Maniglia et al., 2020, 2021; Maniglia, Pavan et al., 2016). Similmente a ciò che avviene nei pazienti ambliopi, il training con i fianchi collineari ad alto contrasto produce un effetto di facilitazione delle interazioni laterali (Maniglia et al., 2016). In particolare, ciò avviene quando i fianchi si trovano ad una distanza superiore al doppio della lunghezza d'onda della Gabor patch da rilevare (Maniglia et al., 2021). Inoltre, il paradigma si è dimostrato efficace nel migliorare abilità visive non allenate, come la funzione di sensibilità al contrasto e l'acuità visiva (Maniglia

²⁷ *Compito di identificazione di stimoli visivi presentati brevemente sullo schermo.*

et al., 2021; Maniglia, Pavan, et al., 2016), in particolar modo quando associato ad un allenamento oculomotorio per migliorare la stabilità della fissazione²⁸ (Maniglia, Cottureau, et al., 2016). Tuttavia, sebbene promettenti, fino ad oggi i paradigmi di apprendimento percettivo hanno mostrato solo un'efficacia moderata nella degenerazione maculare, in particolare nella produzione di generalizzazione dell'apprendimento, che rappresenta un risultato fondamentale per interventi clinicamente rilevanti (Maniglia & Seitz, 2018).

1.4.3. Cecità Corticale: caratteristiche e ruolo della riabilitazione

Danni a carico dell'area visiva primaria o delle afferenze post-chiasmatiche causano cecità per porzioni del campo visivo opposto (Swienton & Thomas, 2014). Lo scotoma può coinvolgere la maggior parte del campo visivo contro lesionale, una condizione denominata emianopsia omonima (Huxlin, 2008). Nonostante la cecità per il campo visivo a seguito di lesione in V1 risulti molto densa, poiché è la principale fonte di trasmissione delle informazioni visive verso le aree corticali visive di ordine superiore (Das & Huxlin, 2010), è stato osservato che alcuni individui possiedono una piccola quantità di visione residua, che tuttavia si discosta dalla visione normale risultando tipicamente inconsapevole, e pertanto denominata “*visione cieca*” o “*blindsight*” (Cowey, 2010). Il *blindsight* è associato ad una limitata sensibilità residua per caratteristiche degli stimoli come movimento, colore o luminanza (Das & Huxlin, 2010), che può essere inconsapevole (*blindsight tipo I*) o consapevole (*blindsight tipo II*) (Sahraie et al., 2013). Ciononostante, le funzioni visive residue variano considerevolmente tra gli individui colpiti in termini di proporzione del campo visivo interessata, la qualità del processo visivo residuo nel campo cieco e il grado di coscienza associato a questo processo (Sato et al., 2018). Purtroppo, nonostante le capacità visive residue e il recupero spontaneo²⁹ osservabili in seguito ad un danno cerebrale (Sato et al., 2018; Zhang et al., 2006), i soggetti con cecità corticale rimangono gravemente compromessi quando cercano di utilizzare la vista nella loro vita quotidiana (Das & Huxlin, 2010). Ergo, si rivela necessaria la riabilitazione delle funzioni visive perse per promuovere un recupero tardivo

²⁸ Tipicamente deficitaria in pazienti con degenerazione maculare.

²⁹ I.e. miglioramenti nella visione rispetto alla fase acuta dovuta a riduzione dell'edema o modificazioni dei circuiti perilesionali.

(Zhang et al., 2006) e al fine di migliorare il funzionamento quotidiano. Per il trattamento della cecità corticale, e in particolare per l'emianopsia omonima, sono stati proposti differenti protocolli riabilitativi, suddivisi in approcci compensativi, approcci sostitutivi e approcci restitutivi (Pollock et al., 2019). I primi comprendono i protocolli riabilitativi basati su strategie di movimenti oculari, con lo scopo di migliorare la scansione del campo visivo leso, mentre i secondi consistono in training caratterizzati dall'utilizzo di dispositivi ottici (i.e. prismi) o modifiche esterne per sostituire la funzione del campo visivo difettoso (Pollock et al., 2019). Gli approcci restitutivi invece mirano al ripristino del campo visivo compromesso, cercando di recuperare la funzionalità visiva persa, ad esempio favorendo il potenziamento del blindsight o l'ampliamento del campo visivo (Pollock et al., 2019). Gli approcci riabilitativi basati sull'apprendimento percettivo fanno parte di quest'ultima categoria di training.

1.4.4. PL e Trattamenti Restitutivi dell'Emianopsia Omonima

Un primo esempio di trattamento restitutivo basato sul Perceptual Learning è stato testato da Sabel e colleghi e venduto come *Vision Restoration Therapy* (VRT) (Kasten et al., 1998; Sabel & Kasten, 2000; Sabel Bernhard A. et al., 2004). Il training è stato proposto a pazienti con lesioni in V1 o al nervo ottico e richiedeva di svolgere quotidianamente un compito di detezione di luci direttamente da casa. La difficoltà del compito variava man mano che migliorava l'accuratezza, per cui veniva modificata la luminosità dello stimolo ogni qualvolta la prestazione raggiungeva o superava il 90%. La strategia del compito consisteva nello stimolare il confine tra le porzioni intatte e danneggiate di campo visivo, così da reclutare circuiti visivi potenzialmente integri e capaci di rilevare il segnale visivo ma sottoperformanti, chiamate "*zone di transizione*" (Sabel & Kasten, 2000). Il successo è misurato in termini della quantità di ingrandimento del campo visivo raggiunta dopo circa sei mesi di allenamento quotidiano. È stato osservato che il training aveva risultati promettenti: l'angolo visivo si ampliava di circa 5° e soggettivamente i pazienti percepivano miglioramenti nelle abilità visive (Sabel & Kasten, 2000). Tuttavia, questi risultati sono stati messi in discussione da alcuni studi che non hanno osservato miglioramenti a seguito del training VRT, suggerendo che non è possibile stabilire con certezza dei miglioramenti se non sono sistematicamente monitorati i movimenti oculari (Horton, 2005). Un altro protocollo riabilitativo che è stato sviluppato mirava a migliorare

la percezione del movimento, capacità di cruciale importanza nella vita quotidiana e che può risultare compromessa in seguito a cecità per il campo visivo (Das & Huxlin, 2010; Huxlin, 2008). Il training, proposto da Huxlin e colleghi, consisteva in un compito home-based di discriminazione della direzione del movimento di punti casuali svolto in un periodo di tempo di 9-18 mesi, preceduto e seguito da una perimetria Humphreys per misurare il campo visivo (Huxlin, 2008). I risultati hanno mostrato che l'allenamento sistematico favoriva un ampliamento del campo visivo con trasferimento ad altri compiti ed abilità (i.e. sensibilità al contrasto), con tuttavia una certa specificità per le posizioni allenate ed un range di frequenze spaziali e temporali (Cavanaugh & Krystal R., 2017; Huxlin, 2008; Huxlin et al., 2009). Le evidenze prodotte da Huxlin e colleghi hanno posto le basi per una riabilitazione efficace dei difetti visivi tramite l'apprendimento percettivo, mostrando come un miglioramento, anche se limitato, sia possibile. Il laboratorio Neruovis.us dell'Università degli studi di Padova ha recentemente sviluppato e testato un training restitutivo misto per la riabilitazione visiva di pazienti con emianopsia omonima, chiamato *Neuro Restoration Therapy* (NRT) (Casco et al., 2018). Gli obiettivi principali del trattamento erano sostanzialmente due, ovvero l'ampliamento del campo visivo e il potenziamento del blindsight (Casco et al., 2018). Inoltre, gli autori volevano investigare se, e in che grado, fosse possibile ottenere un trasferimento dei miglioramenti da compiti semplici a compiti complessi, potenzialmente raggiungibile utilizzando stimoli Gabor (Maniglia & Seitz, 2018). Il protocollo riabilitativo prevedeva tre valutazioni visive che comprendevano una perimetria Humphrey ed una perimetria dinamica ad alta risoluzione, e la valutazione di abilità visive quali l'acuità, la discriminazione di figure e il blindsight³⁰. Il training consisteva in un compito a scelta forzata temporale (2IFC) in cui i pazienti dovevano rilevare quando la Gabor era presentata, se con il primo o con il secondo suono, tutto mantenendo lo sguardo fisso al centro dello schermo. Sono state predisposte tre condizioni: condizione statica, in cui la Gabor statica poteva assumere quattro diverse orientazioni (0°; 45°; 90°; 135°); una condizione movimento (6°/s); una condizione movimento in controfase (flicker, 20HZ) (Casco et al., 2018). Durante il compito, la Gabor poteva assumere una di quattro posizioni diverse in ogni trial, calibrate per ogni paziente in funzione de difetto visivo specifico: al limite della zona di transizione

³⁰ Una valutazione iniziale per valutare la baseline, ovvero le abilità visive prima del training, una intermedia per valutare l'andamento ed una finale per valutare gli effetti del training sulla visione.

tra campo visivo cieco e vedente; in un'area completamente cieca; in un'area nel campo visivo vedente, come condizione di controllo (Casco et al., 2018). Le posizioni lungo il confine tra campo visivo vedente e campo visivo cieco erano sistematicamente spostate verso il campo cieco in base alla riduzione della soglia durante l'allenamento (Casco et al., 2018). Similmente al VRT, la difficoltà del compito aumentava in funzione dell'accuratezza, tuttavia seguendo una scala *one-up-three-down*, per cui il livello di contrasto della Gabor si riduceva dopo tre risposte corrette (Casco et al., 2018). Il protocollo, somministrato a pazienti con emianopsia omonima, era associato ad un abbassamento delle soglie di contrasto in tutti i pazienti. Questi risultati, insieme ad un miglioramento osservato sia nel blindsight che nel riconoscimento di figure, indicano un effetto positivo del training nel potenziare la sensibilità nelle zone di transizione e nel campo visivo cieco (Casco et al., 2018). Complessivamente, le evidenze discusse hanno messo in luce che l'apprendimento percettivo rappresenta un potente strumento per la riabilitazione di persone con difetti visivi congeniti o dovuti ad una lesione. Difatti, contro le evidenze dei primi studi che suggerivano un'intrinseca stabilità del sistema visivo, è stato dimostrato che tutte le strutture, comprese quelle primarie, sono in grado di riorganizzarsi in seguito all'allenamento visivo sistematico. Di conseguenza, il miglioramento delle funzioni visive sembra possibile, ma vi sono alcuni limiti incontrati dai protocolli di riabilitazione sviluppati sin ora che devono essere presi in considerazione.

1.4.5. Limiti della riabilitazione tramite PL

La letteratura scientifica rilevante nel campo dell'apprendimento percettivo nel contesto della riabilitazione visiva ha mostrato risultati estremamente promettenti. Tuttavia, è cruciale ricordare che esistono molte limitazioni da affrontare. Uno di questi limiti significativi è illustrato dal numero di trial necessari per ottenere un risultato efficace nell'apprendimento percettivo. L'Apprendimento Percettivo spesso coinvolge migliaia di prove di pratica per giorni o settimane (Doshier & Lu, 1998; Fahle & Edelman, 1993). Nonostante alcuni autori abbiano mostrato come sia possibile osservare modesti miglioramenti della performance anche dopo poche sessioni di pratica in alcuni compiti in persone normo vedenti, l'allenamento intensivo ed esteso solo assicura miglioramenti all'interno di ogni singola sessione ed il raggiungimento di prestazioni asintotiche

(Hussain et al., 2009a). Nelle popolazioni cliniche, le diverse metodologie di allenamento percettivo discusse precedentemente hanno dimostrato successo sia nel migliorare la sensibilità visiva per particolari compiti/stimoli nel campo visivo cieco sia nell'ampliare il campo visivo (Das & Huxlin, 2010; Huxlin, 2008). Ciò che accomuna la maggior parte dei protocolli di riabilitazione è che tutti prevedono una stimolazione intensiva e ripetitiva, che può durare da diverse settimane (Sahraie et al., 2006) a molti mesi (Casco et al., 2018; Huxlin, 2008) prima di poter osservare miglioramenti significativi. Ad esempio, nello studio di Huxlin e colleghi (2009), la procedura prevedeva dalle 6000 ai 30,000 prove di allenamento in un compito di discriminazione di movimento di punti casuali, prima che si osservassero miglioramenti di tale abilità visiva in pazienti con lesioni in V1 (Huxlin et al., 2009). Questo è un periodo di tempo molto più lungo rispetto a quanto richiesto per la maggior parte dei casi di apprendimento percettivo visivo nei normo vedenti (Ball & Sekuler, 1986; Hussain et al., 2009a). A livello neurale, attraverso l'allenamento, che può consistere nella detezione o la discriminazione ripetuta di bersagli visivi nel campo visivo cieco, il sistema visivo lesionato è in grado di riapprendere lentamente ad elaborare ed interpretare le scarse informazioni visive che riceve (Das & Huxlin, 2010; Sato et al., 2017). Ciò implica che sono necessarie molte prove e molto tempo prima che il sistema visivo mostri dei miglioramenti associati con il training, e pertanto i protocolli riabilitativi sono molto prolungati, richiedendo un impegno significativo e costante da parte dei pazienti. Ad esempio, il protocollo NRT impegna i pazienti per quattro allenamenti settimanali da svolgere per diversi mesi (Casco et al., 2018). Pertanto, una sfida attuale consiste nell'ottimizzazione dell'apprendimento, con l'obiettivo di aumentare l'efficienza dei paradigmi di riabilitazione. Una possibilità è rappresentata dalle ricerche che hanno investigato sistematicamente il ruolo del rumore per il potenziamento della percezione (i.e. Battaglini et al., 2023; Riani & Simonotto, 1994; Simonotto et al., 1997; van der Groen & Wenderoth, 2016). In particolare, è stato osservato un fenomeno, chiamato *Risonanza Stocastica*, per cui specifici livelli di rumore aggiunto agli stimoli incrementano la sensibilità degli individui o in generale dei sistemi non-lineari³¹, favorendo la prestazione in compiti percettivi (Moss, 2004). Vari studi condotti hanno mostrato un fenomeno simile alla risonanza stocastica anche

³¹ In matematica, sistemi in cui l'output non è proporzionale all'input. In altre parole, quei sistemi in cui il segnale in uscita non è proporzionale al segnale in ingresso.

nell'elaborazione visiva, dimostrando che vi sono livelli di rumore ottimale che se aggiunti agli stimoli ne migliorano la detezione (Simonotto et al., 1997). È stato osservato che il rumore visivo esterno potenzia la sensibilità al contrasto in compiti di detezione di Gabor (van der Groen & Wenderoth, 2016) e l'abilità in compiti di discriminazione di movimento coerente (Battaglini et al., 2023). Questo fenomeno potrebbe avere una grande rilevanza nella riabilitazione visiva. Infatti, ciò potrebbe rappresentare un potente strumento per ottimizzare l'allenamento visivo e ridurre il numero di prove necessarie, poiché aumenterebbe la probabilità che il sistema visivo danneggiato rilevi gli stimoli, che tipicamente hanno un segnale molto debole. Incrementando la possibilità di detezione di stimoli molto deboli in ogni prova è possibile che si riduca il numero di sessioni di allenamento che sono tipicamente necessarie per ottenere i miglioramenti desiderati (Battaglini et al., 2023).

CAPITOLO 2: IL RUMORE NELLA PERCEZIONE E LA RISONANZA STOCASTICA

2.1. Variabilità e Rumore: lo stato dell'arte

Nel linguaggio comune, il termine “rumore” viene tipicamente associato a qualcosa di sgradevole, fastidioso ed a volte addirittura dannoso per l'essere umano. La parola viene difatti utilizzata come sinonimo di suono o perturbazione sonora, valutata come soggettivamente non musicale, disturbante o che interrompe la quiete. Nelle scienze, il “rumore” è un termine generico che solitamente si riferisce a disturbi o fluttuazioni casuali o irregolari, non prevedibili ed indesiderate che possono influenzare la precisione di una misurazione, di un segnale o dei dati raccolti. In fisica, il rumore è genericamente definito come “ogni perturbazione stocastica dovuta ad agenti esterni ad un sistema dinamico” (Treccani). In biologia, il termine "rumore" si riferisce generalmente alla variabilità dei dati misurati quando esperimenti identici vengono ripetuti o quando i biosegnali non possono essere misurati senza che le fluttuazioni di fondo distorcano la misurazione desiderata (McDonnell & Abbott, 2009). In psicofisiologia è noto che i biosegnali sono soggetti a diverse fonti di rumore, sia interne che esterne. Un esempio è il rumore di fondo, ovvero le oscillazioni casuali del segnale elettrico cerebrale registrabile sullo scalpo, che riduce il rapporto segnale-rumore nell'analisi dei potenziali evento-relati (Cacioppo et al., 2016). In generale, è chiaro che in ambito scientifico il rumore ha assunto un'accezione negativa: da un lato esso implica variabilità e scarsa predicibilità, dall'altro rappresenta una fonte di errore che oscura i fenomeni sotto investigazione. In questa prospettiva, il rumore comporta incertezza ed aleatorietà, rendendo gli studiosi incapaci di stabilire relazioni causali in modo affidabile. Per questa ragione, sono state sviluppate specifiche metodologie per eliminare o ridurre il rumore, fonte di casualità e di errore, dal fenomeno oggetto di studio. Per riprendere l'esempio della psicofisiologia, le oscillazioni casuali del segnale elettrico³² sono eliminate, quando possibile, attraverso la media dei potenziali evocati dagli stimoli nel tempo e per ogni elettrodo, una procedura conosciuta come *averaging* (Cacioppo et al., 2016). Questa

³² *Indici dell'attività elettrica cerebrale di fondo.*

procedura consente di ridurre il rumore di fondo, che si presume essere distribuito casualmente in potenziali positivi e negativi, che di conseguenza si eliminano a vicenda. Questa attività è di fatto considerata irrilevante nell'analisi degli ERP ed è esclusivamente riconosciuta come una fonte di disturbo. Tuttavia, l'attività elettroencefalografica di fondo è stata spesso analizzata e si è spesso dimostrata molto rilevante ed indicativa del funzionamento cerebrale (Cacioppo et al., 2016). Pertanto, la variabilità, che in modo denigratorio viene spesso considerata "rumore" in realtà potrebbe rappresentare un'informazione o una caratteristica particolarmente rilevante. Sono state fornite diverse definizioni di variabilità e di rumore in ambito scientifico, che sono riassunte nella tabella seguente (Sternad, 2018).

<i>Variabilità e Variazione</i>	Termini generici per tutti i set o serie di osservazioni che non sono costanti e possono anche non essere stazionari
<i>Varianza</i>	Concetto ben definito in statistica che misura la dispersione dei dati rispetto alla loro media, quantificata come deviazione quadratica di una variabile casuale dalla sua media.
<i>Rumore</i>	Variabilità non strutturata, sia nel dominio temporale che spaziale. Nel trattamento dei segnali, è definito come un segnale casuale con uguale intensità a diverse frequenze, densità spettrale costante a tutte le frequenze dei componenti (rumore bianco).
<i>Rumore colorato o rumore 1/f</i>	Segnali con densità spettrale di potenza proporzionale a $1/f^\beta$; per il rumore browniano $\beta=2$. Nota, il segnale è comunque rumore, ma ha diversi gradi di prevedibilità.
<i>Incertezza</i>	Termine che ha origine nella teoria della probabilità e nella letteratura bayesiana, definito come stati o risultati possibili misurati assegnando probabilità a ciascuno stato o risultato possibile, comprese le funzioni di densità di probabilità per variabili continue.
<i>Fluttuazioni</i>	Comportamento non costante nel tempo che può essere stocastico o deterministico. Serie temporali con variazioni sinusoidali e più termini di frequenza sono fluttuazioni, ma non sono stocastiche. Il grado di struttura è misurato con metriche, come l'entropia.

<i>Processi Deterministici versus Stocastici</i>	Sistema o processo il cui risultato è completamente determinato dalle condizioni iniziali e dagli ingressi, senza casualità coinvolta nello sviluppo dei futuri stati. Sequenza casuale o selezione di dati che non hanno struttura nel dominio temporale o spaziale.
<i>Distribuzioni Isotropiche versus Anisotropiche</i>	Distribuzione uniforme in tutte le direzioni; Distribuzione non uniforme in diverse direzioni.

Tabella 2.1 - Diverse definizioni di variabilità (adattata da Sternad, 2018).

Una prima classificazione possibile tra le varie manifestazioni di rumore in un sistema riguarda la distinzione tra rumore interno, generato dalle fonti interne al sistema stesso, e rumore esterno, causato dagli accoppiamenti tra il sistema e fonti esterne di segnali. Nel caso specifico della percezione, Treisman (1964) sostiene che vi sono tre principali sorgenti di rumore che influenzano la capacità umana di detezione del segnale. Il primo è il rumore intrinseco del sistema nervoso umano, ovvero le oscillazioni spontanee dell'attività elettrica neuronale. Il secondo è la variabilità intrinseca degli stimoli sensoriali. L'ultima sorgente di rumore sono le variazioni nella risposta del sistema nervoso a seguito dell'esposizione ad uno stimolo (Treisman, 1964). È noto che il rumore, e la variabilità che ne deriva, sono caratteristiche intrinseche del sistema nervoso umano, che permeano ogni suo livello, dalla percezione di stimoli sensoriali alla genesi di risposte motorie (Faisal et al., 2008). Ciononostante, il rumore è stato spesso considerato nient'altro che un fattore di disturbo nell'attività neuronale, che limita il processamento delle informazioni. Tuttavia, la concettualizzazione del rumore come “*nuisance*” o disturbo è valida solo per sistemi ideali, probabilmente poco riproducibili nella realtà, per cui il rumore rappresenta una fonte significativa di interferenza (McDonnell & Abbott, 2009). In altre parole, non esiste sistema che non operi in un ambiente rumoroso, e pertanto ciò che viene definito dispregiativamente come rumore potrebbe assumere una certa rilevanza. Come già anticipato, il sistema nervoso centrale è naturalmente e intrinsecamente caratterizzato di variabilità e processi stocastici, che potrebbero avere una loro significatività nell'attività del sistema stesso. Ad esempio, il rumore può migliorare la trasmissione e la codifica delle informazioni nel sistema nervoso (Traynelis & Jaramillo, 1998), e promuovere le abilità cognitive. In talune circostanze, le fluttuazioni spontanee sono inevitabilmente presenti, e possono essere utilizzate deliberatamente per

ottenere dei vantaggi. Diverse evidenze hanno suggerito che il sistema nervoso e i processi sensoriali possono trarre beneficio da livelli specifici di rumore (McDonnell & Abbott, 2009). In alcuni casi, infatti, le fluttuazioni casuali o “rumorose” possono migliorare l’elaborazione del segnale invece che ridurla. Questo fenomeno controintuitivo di facilitazione stocastica è noto come *Risonanza Stocastica*, per cui livelli ottimali di rumore facilitano la detezione e la trasmissione di segnali deboli o sottosoglia nei sistemi non-lineari (McDonnell & Ward, 2011). Complessivamente, la variabilità, tipicamente concepita come rumore distruttivo o disturbante, in realtà è un indice di flessibilità e di possibilità di scelta del sistema nervoso centrale, nonché un motore dell’auto-organizzazione in un sistema dinamico (Sternad, 2018). Una conseguenza diretta di ciò è la necessità di riconsiderare il rumore e la variabilità in un modo alternativo, come non necessariamente negative ma potenzialmente significativi. Nei prossimi paragrafi saranno discusse le classificazioni principali del rumore, le sorgenti neurali di variabilità e il ruolo funzionale che questi processi stocastici assumono nel funzionamento cerebrale e comportamentale.

2.2. Rumore interno o endogeno

Come già anticipato, è possibile distinguere tra rumore esterno, intrinseco agli stimoli nell’ambiente, e rumore interno, intrinseco al sistema stesso preso in considerazione. Nello studio della percezione sensoriale umana, quest’ultimo fa tipicamente riferimento al rumore intrinseco al sistema nervoso, detto anche “*rumore neurale*” (Battaglini et al., 2023). Esempi di ciò che viene definito *rumore neurale* sono fornite nel già citato lavoro di Treisman (1964), ovvero le oscillazioni spontanee dell’attività elettrica neuronale e le variazioni nella risposta neurale a seguito di stimolazione sensoriale (Treisman, 1964). È noto che misurazioni ripetute dell’attività cerebrale possono rivelare una significativa quantità di variabilità di prova in prova nella risposta neurale, mantenendo allo stesso tempo costanti e controllate le condizioni sperimentali. Ciò avviene perché a livello neuronale vi sono molti processi stocastici/probabilistici in atto, come l’apertura e la chiusura dei canali ionici e la produzione e la degradazione delle proteine, caratterizzati da fluttuazioni biochimiche ed elettrochimiche casuali, che anche se di piccola entità, incidono sull’attività dell’intera cellula (Faisal et al., 2008). Alcune di queste sorgenti di rumore che modulano l’attività del sistema nervoso sono state discusse in una recente

revisione della letteratura (Faisal et al., 2008). Ad un primo livello, ovvero quello sensoriale, il rumore intrinseco degli stimoli e quello generato dalla trasduzione dei segnali³³ determinano variabilità nelle risposte neurali e le soglie percettive per gli stadi successivi di elaborazione (Faisal et al., 2008). A livello cellulare, il rumore elettrico³⁴ provoca fluttuazioni del potenziale di membrana senza alcun input sinaptico, e il rumore sinaptico³⁵, generato dagli input che le sinapsi di ogni cellula riceve da milioni di altre sinapsi, genera fluttuazioni casuali/rumorose e spontanee nella corrente post-sinaptica (Faisal et al., 2008). Questi eventi possono, almeno teoricamente, interferire con le prestazioni comportamentali (Faisal et al., 2008). Infatti, tale variabilità della risposta neurale è stata tipicamente interpretata come una fonte di disturbo e di degradazione del segnale a causa di processi aleatori, e senza alcun significato funzionale. *L'ipotesi del rumore neurale* esemplifica questa concezione (Crossman & Szafran, 1956; Welford, 1958). Come proposto da Welford (1958) gli stimoli sensoriali in ingresso vengono tradotti in impulsi neurali, i quali vengono successivamente elaborati in un contesto caratterizzato dalla presenza di rumore neurale. Tale rumore cerebrale è causato da un'attività errata e casuale del sistema nervoso, e aumenta con l'avanzare dell'età (Welford, 1958). Secondo l'autore, questo incremento della variabilità si traduce in una riduzione del rapporto segnale-rumore. In altre parole, gli adulti più anziani presentano una peggiore elaborazione del segnale rispetto ai giovani adulti a causa di questo aumento del rumore di fondo, che si ritiene aumenti con l'invecchiamento o in associazione con condizioni patologiche come la malattia di Alzheimer (Allen et al., 1992; Welford, 1958). Ad esempio, Krueger (1978) ha ipotizzato che il rumore interno modifichi in modo casuale le caratteristiche visive degli stimoli, che ha come conseguenza diretta un'influenza negativa sulle prestazioni in compiti visivi. Secondo il modello del *noisy-operator* (o *operatore rumoroso*), il rumore interno al cervello genera delle discrepanze casuali in stimoli che in realtà sono simili, portando le persone a giudicarli come diversi (Krueger, 1978). Secondo alcuni autori questo fenomeno spiegherebbe la minore efficienza di elaborazione del segnale nell'invecchiamento e in patologie come la malattia di *Alzheimer*, che hanno come comune denominatore un incremento della variabilità

³³ Rumore di trasduzione.

³⁴ Rumore generato dall'apertura e chiusura dei canali ionici: noto anche come Rumore dei canali.

³⁵ Detto anche rumore sinaptico di fondo.

dell'attività neurale ovvero di rumore cerebrale (Allen et al., 1992; Krueger & Allen, 1987). In aggiunta, alcuni studiosi hanno suggerito che l'aumento di rumore neurale con l'avanzare dell'età contribuisca al declino cognitivo associato all'invecchiamento. In particolare, è emerso che gli adulti più anziani presentano livelli elevati di rumore neurale di fondo, misurato in uno stato di riposo, e una maggiore variabilità dell'attività della banda alpha³⁶ cerebrale in risposta ad uno stimolo rispetto ai più giovani (Tran et al., 2020). Questa maggiore variabilità dell'attività neurale potrebbe, secondo gli autori, ridurre l'elaborazione sensoriale e, di conseguenza le prestazioni cognitive (Tran et al., 2020).

2.2.1. Rumore Neurale e Variabilità: ruolo nel processamento delle informazioni

Le evidenze appena discusse hanno supportato la concezione che il “rumore” insito nel sistema nervoso centrale rappresenti un fattore di disturbo nel processamento delle informazioni, potenzialmente distortore del segnale da elaborare. Le fluttuazioni casuali che generano variabilità da prova a prova³⁷ sono considerate rumorose e senza alcun significato funzionale. È stato ripetutamente osservato che queste possono ridurre la sensibilità e il rapporto segnale-rumore, con un risultante impatto negativo sulle funzioni cognitive. Tuttavia, recentemente questa prospettiva è stata messa in discussione da alcune ricerche che hanno osservato che la variabilità neurale potrebbe risultare funzionalmente rilevante nel cervello. Difatti, la variabilità è una caratteristica intrinseca e naturale del sistema nervoso centrale, osservabile a più livelli del sistema (Faisal et al., 2008). A questo proposito, è stato suggerito che vi siano vari vantaggi della variabilità nel funzionamento neurale e nel rumore interno per il comportamento e per l'attività cerebrale. Complessivamente, la variabilità cerebrale rappresenta un aspetto positivo ed essenziale del funzionamento neurale, poiché è relata a maggiori capacità di adattamento, apprendimento e gestione delle informazioni (Liljenström, 2003). Un primo vantaggio consiste nel miglioramento nel processamento delle informazioni. Un cervello che presenta una maggiore variabilità possiede anche una maggiore complessità e una

³⁶ *Nell'EEG, l'intervallo di frequenze compreso tra 8 e 12 Hz che tipicamente si riduce quando c'è un aumento dello sforzo e della concentrazione in compiti visivi.*

³⁷ *Intesa come variazioni delle risposte neurali ma senza variazioni nella stimolazione (i.e. stesso stimolo ripetuto).*

maggior capacità di elaborazione delle informazioni (McIntosh et al., 2008). Ad esempio, McIntosh e colleghi (2008) hanno messo in luce una correlazione tra maggior stabilità comportamentale e maggior variabilità della funzione cerebrale durante lo sviluppo. Gli autori hanno confrontato la variabilità di prova in prova del comportamento con l'attività cerebrale in bambini (8-15) e giovani adulti (20-33). Dai risultati è emerso che mentre la variabilità comportamentale si riduce con lo sviluppo, la variabilità del segnale neurale aumenta con la crescita, favorendo maggior stabilità del comportamento osservabile nel campione di adulti (McIntosh et al., 2008). Inoltre, il cosiddetto rumore neurale sembra essere associato a migliore performance comportamentale, per cui maggior la variabilità del segnale neurale e migliori le prestazioni al compito (McIntosh et al., 2008). Questi risultati suggeriscono che un certo livello di variabilità interna al sistema nervoso centrale risulta necessaria affinché esso operi in modo ottimale (McIntosh et al., 2008). Inoltre, un effetto peculiare del rumore interno sul funzionamento neurale riguarda la sua capacità di potenziamento di segnali deboli, altrimenti non rilevabili dal sistema. Questo fenomeno, osservato in diversi sistemi biologici tra cui il cervello umano, è noto come *Risonanza Stocastica Interna* (McDonnell & Abbott, 2009). Ad esempio, alcuni studi che hanno impiegato modelli neuronali hanno messo in luce che il rumore interno migliora la trasmissione delle informazioni (Hô & Destexhe, 2000). Inoltre, è stato dimostrato che il rumore interno può influenzare prestazioni psicofisiche attraverso la risonanza stocastica (Kim et al., 2006). Questo fenomeno sarà discusso in modo più esauriente nei prossimi paragrafi. In secondo luogo, il rumore neurale favorisce una maggior capacità del sistema di adattarsi all'ambiente. La variabilità cerebrale favorisce maggior flessibilità nei comportamenti in risposta all'ambiente esterno. Infatti, il "rumore" può causare oscillazioni sincrone e cambiare lo stato dinamico del sistema, con conseguenti effetti positivi sull'efficacia nell'elaborazione delle informazioni (Liljenström, 2003). Di conseguenza, la natura caotica e dinamica dei network neurali e il rumore generato da alcuni neuroni può aumentare la reattività del sistema e renderlo più flessibile (Liljenström, 2003). Le fluttuazioni del funzionamento cerebrale favoriscono un livello necessario di flessibilità del sistema da istante a istante, consentendogli di convergere su risposte ottimali nonostante stimoli imperfetti. Data la natura dinamica dell'ambiente esterno, il cervello non può sapere esattamente cosa

incontrerà negli istanti successivi e risulta quindi ideale se non si bloccasse in nessun particolare modello di risposta rigida (Garrett et al., 2013).

Infine, la variabilità neurale rappresenta un importante fattore per l'acquisizione di abilità e per l'apprendimento in generale. Studi di tipo connessionista e cellulare hanno mostrato che le reti formate in ambienti con più rumore sono più resilienti alle perturbazioni, facilitando l'apprendimento e l'adattamento all'ambiente (Faisal et al., 2008). Inoltre, l'apprendimento avviene in fasi in cui la variabilità gioca una serie di ruoli e contribuisce in vari modi. Nella fase iniziale della ricerca delle soluzioni ad un compito, maggiori livelli di variabilità dell'attività neurale sono desiderabili, poiché essa è associata ad un'esplorazione più ampia delle possibilità durante l'acquisizione di nuove abilità (Sternad, 2018).

2.3. Rumore esterno

A differenza del rumore interno, il quale è generato da parte di sorgenti endogene del sistema (i.e. il corpo umano), il rumore esterno proviene per definizione da fonti esterne al sistema o processo di interesse. Classici esempi della vita quotidiana sono il rumore causato dalle macchine che viaggiano, dal suono di un trapano o dalla vibrazione di un cellulare appoggiato su una tavola imbandita. Nelle scienze come fisica, biologia e neuroscienze, per *rumore esogeno* si intendono la variabilità e le fluttuazioni casuali e non strutturate presenti nell'ambiente esterno, che sono indipendenti dalle dinamiche interne del sistema di studio e tipicamente considerate come oscillazioni imprevedibili e dunque indesiderate. Esempi sono le interferenze elettriche causate dalle apparecchiature, come l'interferenza elettromagnetica e il rumore di rete, che nell'analisi dei biosegnali rappresentano tipiche variazioni del segnale dovute ad agenti esterni al corpo umano, e per cui sono state sviluppate procedure specifiche per eliminarle (Cutmore, 1999). Nella percezione sensoriale, una fonte di rumore esterno sono le variazioni casuali delle caratteristiche fisiche degli stimoli. Alcuni autori hanno proposto che il rumore esterno derivi dalla variabilità nelle rappresentazioni codificate a partire dagli stimoli, o dalla variabilità tra esempi specifici di stimoli testati, facenti parte della stessa categoria (Ratcliff et al., 2018). Difatti, tutti gli stimoli esterni sono intrinsecamente caratterizzati da diversi livelli di variabilità, o rumorosi, perché sono per natura o termodinamici o

quantistici (Faisal et al., 2008). Ad esempio, nella visione il numero di fotoni che sono successivamente assorbiti dai fotorecettori varia seguendo una distribuzione di Poisson³⁸, ponendo un limite fisico alla sensibilità al contrasto durante circostanze in cui vi è bassa illuminazione (Bialek, 1987). Inoltre, la variabilità esterna concerne i cambiamenti nelle caratteristiche fisiche dell'ambiente, che si verificano quando le condizioni ambientali variano in modo imprevedibile o casuale. Un esempio sono le modificazioni casuali nella quantità di luce o le oscillazioni della luminosità, che possono avere un'influenza sulla percezione visiva. In questi casi lo stimolo è lo stesso, ma varia il modo in cui il sistema lo elabora o risponde ad esso. Infine, gli stimoli percettivi non rilevanti per il compito possono rappresentare anche essi fonte di rumore esterno. Ad esempio, se lo stimolo target è fiancheggiato da altri stimoli simili a cui non bisogna rispondere, questi fungono da distrattori e sono considerati quindi rumorosi (Eriksen & Eriksen, 1974).

2.3.1. Rumore esterno: buono o cattivo?

Da un punto di vista sperimentale, una grande mole di studi ha messo in luce un'associazione tra maggiori livelli di rumore degli stimoli e il peggioramento delle prestazioni in compiti percettivi. Tipicamente, l'aggiunta di rumore agli stimoli, come un numero casuale di livelli di grigio inseriti nei pixel di uno stimolo visivo (Doshier & Lu, 1998) o l'incremento casuale della numerosità degli stimoli (Battaglini et al., 2023) è un metodo utilizzato per investigare gli effetti del rumore esterno sulla percezione. In psicofisica, il rumore³⁹ può dar luogo ad un fenomeno noto come "*mascheramento*" (o *negative-masking* in inglese), il quale comporta un'interferenza nella percezione del segnale da parte di stimoli di mascheramento, che interferiscono nella rilevazione dello stimolo target (Laming, 1985). Ad esempio, Estes (1972) ha evidenziato che la similarità tra stimolo target e rumore, ovvero stimoli distrattori presentati in prossimità del target, degradavano la prestazione dei partecipanti sia in termini di velocità che in termini di accuratezza nella detezione del target. Inoltre, ad un maggior numero di stimoli "rumorosi" corrispondeva una maggiore latenza di risposta ed una minore probabilità di rilevare lo stimolo target (Estes, 1972). In un paradigma differente, Doshier e Lu (1998)

³⁸ *Distribuzione di probabilità discreta che esprime un valore di probabilità di eventi rari in un intervallo di tempo, conoscendone la media.*

³⁹ *Qui inteso come stimoli distrattori che interferiscono con la rilevazione dello stimolo target.*

hanno osservato che per maggiori livelli di contrasto del rumore⁴⁰ aggiunti alle Gabor, era necessario un più alto livello di contrasto dello stimolo per compensare gli effetti detrimenti del rumore. In altre parole, i risultati suggeriscono che la sensibilità al contrasto di stimoli visivi si riduce all'aumentare del rumore esterno in cui gli stimoli sono immersi, inducendo un peggioramento nella detezione del segnale (Doshier & Lu, 1998). Tuttavia, i primi studi di psicofisica sul *mascheramento negativo* hanno messo in luce che stimoli visivi, tattili e acustici molto deboli risultavano più facilmente rilevabili quando accoppiati ad uno stimolo di mascheramento di debole intensità (Laming, 1985). Difatti, il rumore esterno può anche produrre benefici nella percezione, in alcuni casi migliorando la sensibilità dell'osservatore. Ad esempio, Ward e colleghi (2001) hanno osservato che specifici livelli di rumore, operazionalizzato come livelli di grigio aggiunti casualmente in ciascun pixel dello stimolo, riduceva la soglia di contrasto a cui stimoli deboli potevano essere rilevati (Ward et al., 2001). Questo fenomeno, noto come *risonanza stocastica esterna*, è tipicamente rappresentato da una curva ad U rovesciata, per cui vi sono livelli intermedi di rumore aggiunti agli stimoli che migliorano la sensibilità dell'osservatore, mentre valori più bassi o più alti la riducono (Moss, 2004). Ciò dimostra che anche la variabilità esterna oltre quella interna può avere un ruolo importante nella percezione. I prossimi paragrafi saranno dedicati alla discussione di questo fenomeno.

2.4. La Risonanza Stocastica: una definizione

Come ampiamente discusso nei precedenti paragrafi, il rumore, interno o esterno che sia, può avere un ruolo rilevante nel processamento delle informazioni e nell'elaborazione sensoriale. Un esempio del concetto contraddittorio del “rumore utile o buono” (McDonnell & Abbott, 2009) è rappresentato dalla Risonanza Stocastica (in inglese *Stochastic Resonance, SR*), processo per cui il rumore potenzia un segnale e la sua rilevabilità. Prima dell'interessamento da parte del campo della biologia e delle neuroscienze, in cui la Risonanza Stocastica ha contribuito alla ricerca sulla percezione sensoriale, questo fenomeno fu inizialmente proposto come spiegazione delle ricorrenti ere glaciali sulla terra, che hanno una periodicità di 100.000 anni. Un gruppo di fisici ha osservato che la regolarità delle ere glaciali è dovuta alla combinazione tra la debole

⁴⁰ Rumore esterno creato mediante l'aggiunta di pixel rumorosi allo stimolo target.

oscillazione periodica del pianeta intorno al sole, insufficiente per causare un intenso raffreddamento, e le intense variazioni annuali nel calore accumulato dalla Terra (Benzi et al., 1982). Successivamente, è stato messo in luce che la Risonanza Stocastica avviene anche nei sistemi a soglia⁴¹, come il sistema nervoso, il che ha permesso lo sviluppo di applicazioni della SR nell'elaborazione e nel trasferimento dei segnali (Moss, 2004). Ad oggi, la risonanza stocastica è riconosciuta come un fenomeno che si verifica in un ampio spettro di sistemi fisici e vi è una vasta gamma di applicazioni contemporanee in vari settori della scienza e della tecnologia. Queste includono le applicazioni laser, i dispositivi interferometrici quantistici superconduttori (SQUID), l'elaborazione di informazioni digitali in presenza di rumore e la trasmissione di informazioni indotta dalla presenza di rumore nei neuroni sensoriali dei sistemi biologici (Moss, 1994). Essenzialmente, la SR può essere definita come un fenomeno statistico che si verifica nei sistemi non-lineari, sia artificiali che naturali, conseguente all'effetto del rumore sull'elaborazione ed il trasferimento delle informazioni (Moss, 2004). In particolare, specifici livelli di rumore favoriscono il potenziamento del contenuto informativo di un segnale (come i treni di potenziali d'azione o i segnali prodotti da un insieme neuronale) o il miglioramento nella rilevazione di stimoli deboli (Moss, 2004). Se il rumore è in una quantità adeguata o ottimale, si ottiene il massimo potenziamento della sensibilità, mentre intensità di rumore maggiori deteriorano semplicemente la capacità di rilevazione o il contenuto informativo (Moss, 2004). Tipicamente, il miglioramento nell'output del sistema dovuto a livelli ottimali di rumore, diversi da zero, è misurato attraverso il rapporto-segnale rumore (SNR). In particolare:

$$\text{SNR} \propto \left(\frac{\epsilon \Delta U}{D} \right)^2 \epsilon (-\Delta U / D)$$

Dove ϵ rappresenta l'intensità del segnale, ΔU l'altezza della soglia e D l'intensità del rumore. Ergo, intensità di rumore ottimali producono un incremento rapido della SNR nella rilevazione di segnali deboli o sottosoglia, in sistemi che funzionano attraverso una soglia, mentre livelli di rumore di intensità superiore generano un decremento della SNR

⁴¹ Sistemi o dispositivi che entrano in funzione o causano una reazione quando un particolare livello critico o soglia di un parametro specifico viene raggiunto o superato.

(McNamara & Wiesenfeld, 1989; Wiesenfeld & Moss, 1995). Questa caratteristica determina la tipica curva ad U-invertita che descrive la Risonanza Stocastica (**Fig. 2.1**) che si ottiene ponendo la sensibilità del sistema in funzione del rumore (McDonnell & Abbott, 2009).

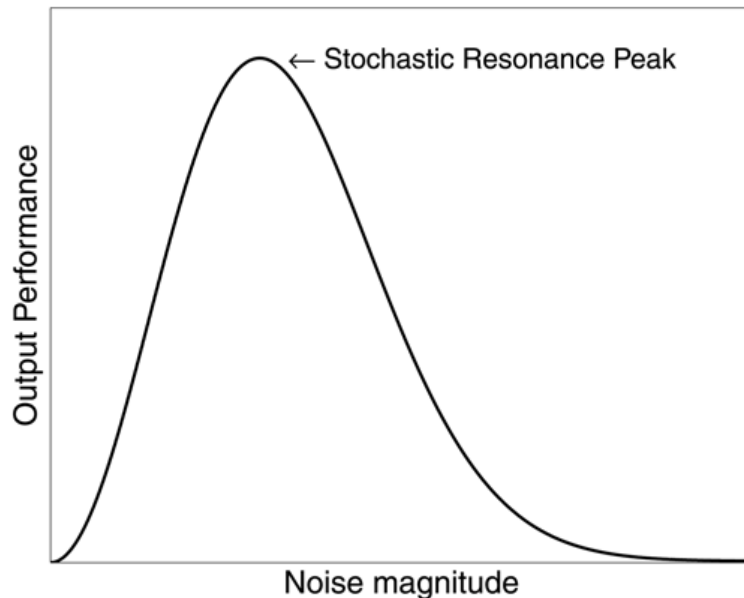


Figura 2.1. - La tipica curva di sensibilità in funzione del rumore ad U-invertita della SR (da McDonnell & Abbott, 2009b).

Da questa descrizione del fenomeno emerge che vi sono delle condizioni fondamentali che devono realizzarsi affinché la SR possa manifestarsi. Un segnale coerente e di piccole dimensioni, una forma di soglia energetica e la possibilità di modificare la quantità di rumore che influisce sul segnale, sia attraverso l'aggiunta esterna o attraverso un processo interno, sono le condizioni necessarie affinché si manifesti il fenomeno della Risonanza Stocastica (SR) (Moss, 2004). Come suggerito dalla curva a forma di U-rovesciata, livelli ottimali (tipicamente intermedi) di rumore migliorano la prestazione, mentre valori di intensità minori o maggiori sono associati a prestazioni più scadenti (McDonnell & Abbott, 2009). In secondo luogo, la SR è presente solo in sistemi non-lineari. È comunemente noto che il rapporto segnale-rumore in uscita per sistemi lineari è massimizzato in assenza di rumore, e pertanto il rumore non può essere benefico in sistemi che operano in questo modo. La combinazione tra casualità (i.e. rumore) e non-linearità risulta essere essenziale affinché si osservi questo potenziamento rumore-indotto (McDonnell & Abbott, 2009). Questi ingredienti necessari per la SR sono presenti in

molti sistemi artificiali, nonché intrinseci dei processi cerebrali, e ciò spiega la grande applicabilità di tale fenomeno. In particolare, la non-linearità peculiare dei processi cerebrali ha spinto molti autori a considerare la possibilità di impiegare la Risonanza Stocastica nell'analisi della dinamica sensoriale (Simonotto et al., 1997). I prossimi paragrafi saranno dedicati alla trattazione dello studio della Risonanza Stocastica nell'elaborazione sensoriale e nella percezione, seguita da una discussione circa le evidenze di SR nei processi cerebrali.

2.5. SR nei sistemi sensoriali e nella percezione

Le prime evidenze che hanno dimostrato la presenza della Risonanza Stocastica nella percezione sensoriale provengono da studi che hanno fatto uso di modelli animali. In particolare, diversi ricercatori hanno messo in luce che l'aggiunta di rumore esterno potenzia le informazioni sensoriali elaborate, che possono poi essere utilizzate attivamente dai sistemi sensoriali e dall'animale per la predazione o per l'evitamento dei predatori. Il primo studio che ha dimostrato questo ruolo del rumore nell'elaborazione dei segnali sensoriali è stato condotto da Douglass e colleghi (1993), che hanno osservato un fenomeno simil-SR nei meccanoettori del gambero d'acqua dolce (*Procambarus clarki*). I meccanoettori sono cellule pilifere presenti nella coda dell'animale e sono sensibili ai movimenti dell'acqua. Questi rilevano minimi movimenti dei peli cuticolari e traducono tali movimenti in impulsi nervosi che si dirigono centralmente attraverso i nervi sensoriali, inducendo una risposta anti-predatoria (Douglass et al., 1993). Gli studiosi hanno messo in luce che se aggiunti ottimali livelli di rumore esterno, la trasmissione di una stimolazione meccanica debole era potenziata in ogni meccanoettore, mentre livelli di rumore inferiori o maggiori erano associati ad una ridotta sensibilità (Douglass et al., 1993). Oltre alle evidenze riscontrate nei meccanoettori del gambero di acqua dolce, altri studi hanno messo in luce il potenziamento del segnale sensoriale rumore-indotto nel regno animale. Uno studio molto importante in questo rispetto è quello condotto da Russell e colleghi (1999) sul comportamento alimentare del pesce spatola americano (*Polyodon spathula*), che ha dimostrato che l'introduzione di rumore favorisce le abilità percettive dell'animale. In particolare, il pesce spatola possiede dei sensori elettrosensibili attraverso cui è in grado di monitorare i campi elettrici delle prede quando si trovano entro una certa distanza, superata la quale il segnale diventa più debole e difficile da rilevare.

Gli studiosi hanno mostrato che quando questa distanza era molto ampia, per cui il segnale elettrico era al di sotto della soglia sensoriale⁴², l'introduzione di un campo elettrico casuale, esterno e parallelo all'asse del pesce aumentava la sensibilità nella rilevazione delle prede (Russell et al., 1999). Queste evidenze della SR nei sistemi sensoriali animali hanno favorito un crescente interesse per l'argomento, spingendo molti ricercatori nell'investigare la presenza di questo fenomeno nella percezione umana. Difatti, nell'essere umano la Risonanza Stocastica è stata osservata in molte modalità sensoriali, tra cui le modalità tattile, visiva e uditiva. La ricerca si è principalmente focalizzata sulla visione, in cui è stato osservato che la percezione di griglie, figure ambigue, lettere e auto stereogrammi tridimensionali⁴³ è influenzata dal rumore e dai fenomeni di risonanza stocastica nella psicofisica umana (Ditzinger et al., 2000; Riani & Simonotto, 1994; Simonotto et al., 1997; Speranza et al., 1997; Ward et al., 2001). Ciononostante, non mancano le evidenze nelle altre modalità sensoriali. Nella percezione somatosensoriale, uno studio elegante di Collins e colleghi (1997) ha prodotto un'evidenza della SR per stimoli tattili deboli. I partecipanti erano esposti a stimolazioni tattili deboli, o sottosoglia, calibrate in funzione della soglia di ciascun partecipante, in modo da ottenere un segnale con ampiezza al di sotto della soglia percettiva. A tali stimoli erano aggiunte, in modo casuale, varie intensità di rumore, mentre in un'altra condizione i partecipanti erano esposti al rumore isolatamente. Il compito svolto dai partecipanti era di discriminazione tra il segnale (accoppiato al rumore) e il rumore presentato isolatamente. Se fosse presente risonanza stocastica nella percezione tattile umana, allora si sarebbe dovuto osservare una maggior percentuale di risposte corrette all'aumentare dei livelli di rumore, entro una certa soglia di intensità: ciò è esattamente ciò hanno riscontrato gli autori (Collins et al., 1997). In particolare, all'aumentare del livello di rumore la prestazione migliorava fino a raggiungere un picco per poi avere un andamento discendente per livelli di rumore maggiori, mentre questo effetto non era presente quando lo stimolo aveva intensità elevate, ovvero superava la soglia percettiva (Collins et al., 1997). Altri studiosi hanno invece investigato i meccanismi di Risonanza Stocastica nella modalità uditiva. Ad esempio, Zeng e colleghi (2000) hanno osservato che le capacità di detezione e di

⁴² *Non rilevabile, impercettibile.*

⁴³ *Immagini bidimensionali che, quando osservate correttamente, creano l'illusione di una profondità tridimensionale senza l'uso di dispositivi speciali.*

discriminazione di toni miglioravano se era aggiunto del rumore bianco⁴⁴ al segnale da rilevare/discriminare (Zeng et al., 2000). In un altro studio, è stato messo in luce che la sensibilità uditiva di persone normo-udenti aumentava con l'applicazione di rumore casuale agli stimoli acustici (Ward et al., 2001). In particolare, i partecipanti dovevano compiere una discriminazione tra due suoni, ovvero un battito a 3Hz e uno stimolo non-ritmico, e del rumore Gaussiano⁴⁵ è stato aggiunto ad entrambi gli stimoli in maniera casuale. Gli autori hanno osservato che la migliore prestazione era associata a specifici livelli di rumore aggiunto, diversi da zero (Ward et al., 2001). Nello stesso studio è stata investigata la Risonanza Stocastica in un compito di discriminazione visiva di graticoli e stimoli uniformi. Nella figura 2.2 è possibile osservare i risultati degli esperimenti condotti da Ward e colleghi (2001) sia per la modalità uditiva che per la modalità visiva, in cui si evidenzia che vi sono livelli ottimali di rumore uditivo e visivo gaussiano aggiunti a stimoli acustici o visivi, diversi da zero, associati con la prestazione migliore dei partecipanti (Ward et al., 2001).

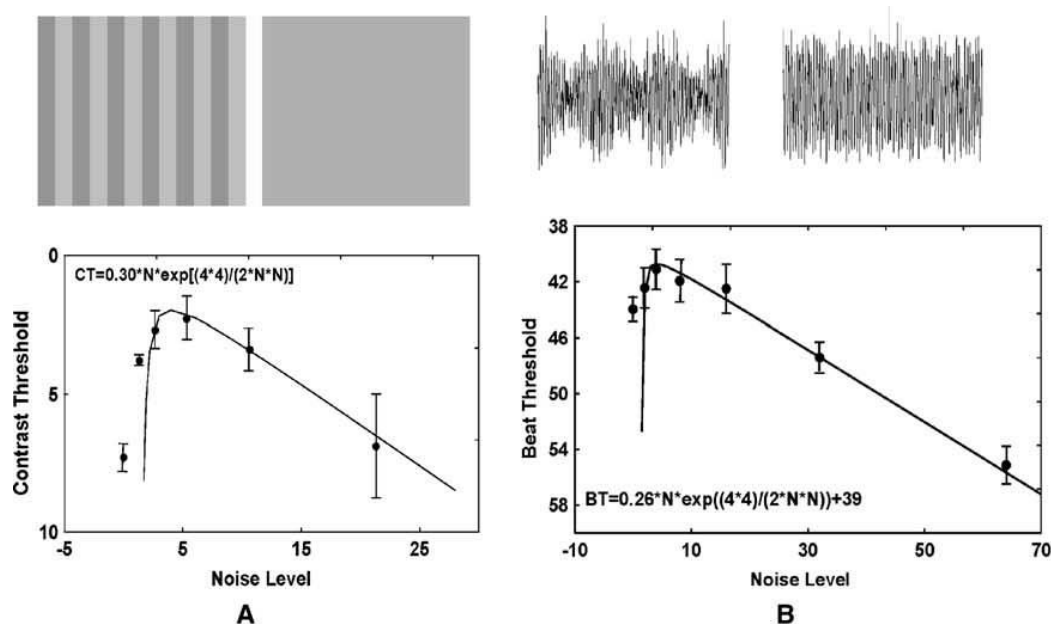


Figura 2.2 - Risultati di Ward e colleghi (2001): la risonanza stocastica nella visione e nell'udito (da Ward et al., 2001).

⁴⁴ Rumore acustico, casuale e continuo che contiene tutte le frequenze udibili alla stessa intensità.

⁴⁵ I livelli di intensità del rumore sono casuali secondo una distribuzione normale o Gaussiana.

Nei due grafici si può osservare la curva ad U-rovesciata che si osserva tipicamente quando si manifesta la Risonanza Stocastica, per cui livelli di intensità intermedia di rumore, sia nella modalità visiva che nella modalità uditiva, favoriscono un abbassamento delle soglie di contrasto rispetto a condizioni in cui i livelli di rumore sono maggiori o inferiori. Nel campo della visione, uno dei primi studi che ha evidenziato un fenomeno di Risonanza Stocastica nella percezione visiva è stato condotto da Simonotto e colleghi (1997). Nello specifico, il compito assegnato ai partecipanti dello studio consisteva nel determinare il miglior livello di contrasto al quale potevano distinguere tra due strisce sottili. Il rumore applicato agli stimoli visivi era costituito da pixel di grigio aggiunti casualmente, secondo una distribuzione gaussiana. Gli autori hanno riscontrato che livelli di rumore intermedi avevano un impatto positivo sulla rilevazione degli stimoli (Simonotto et al., 1997). Nell'immagine seguente (**Fig. 2.3**), adattata dagli autori, è possibile osservare un esempio del potenziamento rumore-indotto del segnale di stimoli visivi deboli. Si può facilmente osservare che l'aggiunta di pixel di rumore gaussiano incrementano il contenuto informativo dell'immagine che ha un segnale debole (immagine a sinistra) facilitandone la rilevabilità (Simonotto et al., 1997).



Figura 2.3 - L'immagine del Big Ben degradata è più facilmente riconoscibile (immagine centrale) quando viene aggiunto un livello medio di pixel grigi rumorosi (da Simonotto et al., 1997).

In seguito, ulteriori evidenze riguardanti la Risonanza Stocastica nella percezione visiva hanno confermato che tale fenomeno è presente in numerosi processi visivi. Ad esempio, uno studio di Piana e colleghi (2000) ha dimostrato che la SR gioca un ruolo importante nella discriminazione di lettere. I partecipanti impegnati in un compito di riconoscimento di lettere degradate, accoppiate con pixel rumorosi con diversi livelli di intensità che seguivano una Gaussiana, mostravano maggiore sensibilità ai caratteri quando erano

presenti ottimali livelli di rumore in un intervallo ristretto di valori (Piana et al., 2000). Più recentemente, van der Groen e Wenderoth (2016) hanno messo in luce che la SR è in grado di potenziare i meccanismi centrali della percezione, e può essere indotta sia tramite l'aggiunta di rumore agli stimoli che tramite l'aggiunta di rumore interno al sistema nervoso tramite stimolazione elettrica transcranica a rumore casuale (tRNS). Più specificamente, gli studiosi hanno riscontrato che l'aggiunta di rumore visivo o neurale migliorava la sensibilità al contrasto in un compito di discriminazione di graticoli (van der Groen & Wenderoth, 2016). Nonostante la maggior parte degli studi sulla Risonanza Stocastica nella percezione umana consistevano tipicamente nell'aggiungere rumore sensoriale direttamente agli stimoli sensoriali, è chiaro che la SR si verifica anche quando vengono modulati i livelli neurali di rumore del sistema nervoso centrale. Difatti, rumore neurale e rumore esterno interagiscono favorendo la manifestazione della Risonanza Stocastica (Aihara et al., 2008, 2010; Battaglini et al., 2023). Ad esempio, un gruppo di ricerca ha messo in luce che l'abilità di detezione di stimoli in movimento risulta potenziata sia dall'aggiunta di ottimali livelli di rumore esterno, operazionalizzato come un numero maggiore di stimoli distrattori⁴⁶, sia dall'aggiunta di specifici livelli di rumore neurale tramite tRNS (Battaglini et al., 2023). In particolare, gli studiosi hanno mostrato che le due sorgenti di rumore proposte interagiscono tra loro, e che l'induzione di rumore neurale a specifiche intensità (i.e. 1mA ma non 2mA) genera un miglioramento nella detezione con livelli di rumore esterno minori rispetto ad una condizione placebo (Battaglini et al., 2023).

Queste evidenze, insieme alle altre discusse nei paragrafi precedenti, supportano l'ipotesi per cui il rumore possa avere un ruolo funzionale nel sistema nervoso centrale e che possa migliorare le abilità sensoriali e percettive umane. Il prossimo paragrafo sarà pertanto dedicato alla trattazione degli studi che hanno cercato di chiarire quali meccanismi cerebrali sottostanno la Risonanza Stocastica.

2.5.1. La SR nel cervello

Date le numerose evidenze del potenziamento sensoriale rumore-indotto sia nei modelli animali che in partecipanti umani, una domanda che ci si può porre riguarda cosa accade

⁴⁶ *Distrattori.*

nel cervello, o meglio, quali meccanismi neurali sottostanno la Risonanza Stocastica. Come già discusso nei paragrafi precedenti, i neuroni e i circuiti nervosi sono sistemi non-lineari in cui la variabilità e il rumore sono presenti intrinsecamente e generati da diverse fonti⁴⁷ (Faisal et al., 2008). In aggiunta, è stato osservato che il rumore interno al sistema nervoso, chiamato rumore neurale, svolge un ruolo importante nel modulare le manifestazioni della Risonanza Stocastica nella percezione sensoriale generate dall'aggiunta di rumore esterno a stimoli impercettibili (Battaglini et al., 2023; Paffi et al., 2013; van der Groen & Wenderoth, 2016). Tuttavia, la questione circa cosa avviene nel cervello per spiegare la SR è molto dibattuta, e le sue basi cerebrali anatomico-funzionali sono ancora da chiarire del tutto. Alcuni studi su modelli animali e ricerche che hanno impiegato misure indirette dell'attività neurale e simulazioni tramite modelli neuronali hanno fornito ulteriori indicazioni circa i potenziali meccanismi neurali associati a questo fenomeno. Ad esempio, nel già citato studio di Douglass e colleghi (1993) sul gambero d'acqua dolce (*Procambarus Clarkii*), il potenziamento nella rilevazione sensoriale di stimoli periodici deboli, non rilevabili dall'animale, dovuta all'aggiunta di rumore di intensità intermedia al segnale⁴⁸ era associato ad un aumento nell'ampiezza dei picchi⁴⁹ evocati dallo stimolo (Douglass et al., 1993). In altre parole, il miglioramento comportamentale associato alla Risonanza Stocastica era associato ad un incremento nella coerenza dei picchi neuronali (Douglass et al., 1993). Attraverso l'utilizzo di modelli neuronali, alcuni autori hanno messo in luce che il rumore endogeno, come ad esempio il rumore dei canali ionici e il rumore sinaptico, potrebbe indurre la Risonanza Stocastica (Gianni et al., 2006). In particolare, gli studiosi hanno osservato che l'introduzione del rumore nel modello neuronale aumentava la variabilità interna al sistema, in termini di picchi di attivazione delle cellule, e che vi erano specifici livelli di rumore che ottimizzavano la codifica del segnale esogeno⁵⁰ da parte del modello (Gianni et al., 2006). Altri autori hanno invece investigato i correlati neurali del fenomeno della Risonanza Stocastica attraverso tecniche di neuroimmagine ed elettrofisiologiche⁵¹,

⁴⁷ Rumore sinaptico, rumore dei canali, rumore motorio.

⁴⁸ Risonanza Stocastica.

⁴⁹ Potenziali d'azione.

⁵⁰ Stimolazione elettromagnetica (EM).

⁵¹ fMRI e EEG, rispettivamente.

dimostrando che quando gli stimoli visivi erano accoppiati ad ottimali livelli di rumore esterno visivo si osservava la massima attivazione neurale a livello della corteccia visiva primaria (Simonotto et al., 1999) e un picco nei potenziali visivi evocati (VEP) (Srebro & Malladi, 1999), rispettivamente. Tuttavia, nonostante l'importante valore rappresentato da queste evidenze discusse, vi sono diversi limiti. Un primo limite concerne l'utilizzo di misure indirette dell'attività neurale negli studi in vivo, che non permette di comprendere i meccanismi causali interni. Un secondo limite riguarda invece le registrazioni non in vivo dei picchi neuronali, che rende difficile comprendere come si manifesta naturalmente la SR in un sistema biologico. Inoltre, tipicamente la metodologia adottata nello studio della SR nei sistemi biologici misura l'output del sistema dopo che del rumore viene aggiunto dall'esterno, ma è noto che la SR si manifesta anche internamente al sistema in assenza di rumore esterno (Moss, 2004). Questo è principalmente dovuto ad una comprensione ancora parziale del funzionamento del sistema nervoso e dalla difficoltà nel misurare e controllare il rumore endogeno nelle condizioni in vivo (Paffi et al., 2013). Alcuni studi si sono invece concentrati sul rumore a livello cellulare. Ad esempio, Stacey e Durand (2001) hanno mostrato che anche piccole quantità di rumore sinaptico, generato dalla convergenza dei segnali di diverse sinapsi, possono migliorare la risposta di una sinapsi indipendente a stimolazioni deboli, in accordo con i meccanismi della SR (Stacey & Durand, 2001). Altri autori hanno invece messo in luce che la Risonanza Stocastica può potenziare la sincronizzazione di fase tra risposta neurale e stimoli periodici (Bahar & Moss, 2004). Di conseguenza, la SR potrebbe essere impiegata naturalmente dal sistema nervoso centrale per potenziare stimolazioni deboli ed incrementarne quindi la rilevabilità (Traynelis & Jaramillo, 1998).

Complessivamente, queste evidenze supportano l'ipotesi per cui, a livello cerebrale, il rumore sia esterno che interno possa svolgere un ruolo funzionale nel processamento delle informazioni. Difatti, queste due sorgenti di rumore interagiscono tra loro aumentando la sensibilità del sistema tramite la Risonanza Stocastica, e ciò potrebbe avere molte applicazioni in ambito clinico (Battaglini et al., 2023; Moss, 2004; Paffi et al., 2013), che saranno discusse nel prossimo paragrafo.

2.6. La SR nella clinica: applicazioni pratiche

Nonostante la Risonanza Stocastica sia ancora oggetto di studio, le numerose evidenze accumulate circa l'impatto di questo fenomeno sul processamento delle informazioni, in particolare riguardo al potenziamento delle funzioni sensoriali, hanno aperto la strada a svariate applicazioni cliniche, tra cui la riabilitazione sensoriale o l'ottimizzazione di impianti protesici (Moss, 2004). Come già discusso nei paragrafi precedenti, i risultati di svariati studi supportano l'ipotesi per cui il rumore, sia endogeno che esogeno al sistema nervoso, possa avere un ruolo cruciale nel funzionamento del sistema stesso. Di conseguenza, la modulazione della variabilità del sistema nervoso potrebbe risultare particolarmente funzionale in alcune popolazioni cliniche in cui i neuroni sensoriali presinaptici sono compromessi (Paffi et al., 2013, 2015). A supporto di questa possibilità, Paffi e colleghi (2015) hanno indagato il possibile ruolo della SR in un modello neuronale che riproduceva un sistema compromesso, in cui la codifica di stimoli afferenti risulta deficitaria⁵². Gli autori hanno osservato che il modello beneficiava dell'aggiunta di rumore gaussiano ad un segnale (Paffi et al., 2015). In altre parole, questi risultati rappresentano una prova che la Risonanza Stocastica potrebbe migliorare le proprietà di codifica di un sistema compromesso, e potrebbe pertanto essere utilizzata per ottimizzare le tecniche di stimolazione utilizzate ad esempio negli impianti protesici, in cui i neuroni sensoriali compromessi devono essere bypassati (Paffi et al., 2015). Su questa linea, alcuni autori mostrano che la SR potrebbe essere implementata per ottimizzare gli impianti cocleari e il recupero della funzione uditiva (Morse & Evans, 1996; Morse & Roper, 2000). Ad esempio, Morse e Evans (1996) hanno osservato che l'elaborazione delle vocali codificate attraverso un impianto cocleare in modelli animali sperimentali beneficia dall'aggiunta di specifici livelli di rumore (Morse & Evans, 1996). Similmente, Zeng e colleghi (2000) hanno messo in luce che il rumore aggiunto in quantità ottimali a toni puri potenziano la sensibilità uditiva⁵³ in persone con impianti cocleari o cerebrali (Zeng et al., 2000). Nella modalità tattile, i risultati di alcuni studi hanno messo in luce che, attraverso la Risonanza Stocastica, sia possibile ridurre l'oscillazione posturale in persone anziane. Difatti, Priplata e colleghi (2002) hanno riscontrato che l'effetto del

⁵² *Ad esempio, in seguito all'invecchiamento o a causa di malattie degenerative.*

⁵³ *In termini di riduzione delle soglie percettive.*

potenziamento sensoriale rumore-indotto potrebbe compensare il declino età-dipendente nel controllo motorio e nell'equilibrio. Di conseguenza, i meccanismi di Risonanza Stocastica potrebbero risultare particolarmente rilevanti per la progettazione di dispositivi funzionali per il miglioramento delle abilità sensoriali tattili necessarie per l'equilibrio e il controllo motorio⁵⁴, in particolare in quei pazienti con gravi deficit sensoriali dovuti all'invecchiamento (Priplata et al., 2002). Per quanto riguarda la modalità visiva, è stato ampiamente dimostrato che il rumore visivo aggiunto in livelli ottimali può migliorare le abilità di detezione e discriminazioni di stimoli visivi di vario genere. Tuttavia, vi è un numero insufficiente di evidenze riguardo agli effetti del potenziamento visivo generato dall'accoppiamento di rumore e segnale per ottimizzare la visione di persone con difetti visivi. Ciononostante, alcuni autori hanno fornito delle indicazioni nonché prospettive future di questa possibilità che verranno illustrate nei prossimi paragrafi (Battaglini et al., 2023; Itzcovich et al., 2017).

2.6.1. SR nella Riabilitazione Visiva: possibile ruolo

Come già anticipato, vi è un'evidente mancanza di studi che hanno sistematicamente indagato la possibilità di utilizzare la Risonanza Stocastica per ottimizzare la visione in specifiche popolazioni cliniche. Tuttavia, uno studio pilota condotto da Itzcovich e colleghi nel 2017 ha investigato questa possibilità. L'obiettivo degli autori era quello di verificare se la Risonanza Stocastica potesse essere indotta in popolazioni di pazienti con difetti visivi dovuti a diversa eziologia, similmente a come avviene in persone normovedenti. In un compito di detezione di singole lettere, immerse in rumore visivo con diverse intensità o in assenza di rumore, gli autori hanno osservato che pazienti con gravi deficit visivi dovuti a retinite pigmentosa⁵⁵ o altri disturbi di varia eziologia, riconoscevano una maggiore proporzione di lettere quando del rumore gaussiano era aggiunto in quantità ottimali agli stimoli (Itzcovich et al., 2017).

⁵⁴ *Ad esempio, solette vibranti casuali per le scarpe.*

⁵⁵ *Distrofia retinica caratterizzata dalla graduale perdita dei fotorecettori e dalla disfunzione dell'epitelio pigmentato, caratterizzato da ridotta visione scotopica o a condizioni in cui vi è bassa luminosità, lento adattamento dalla visione notturna alla visione diurna, restringimento del campo visivo e sensibilità alla luce.*

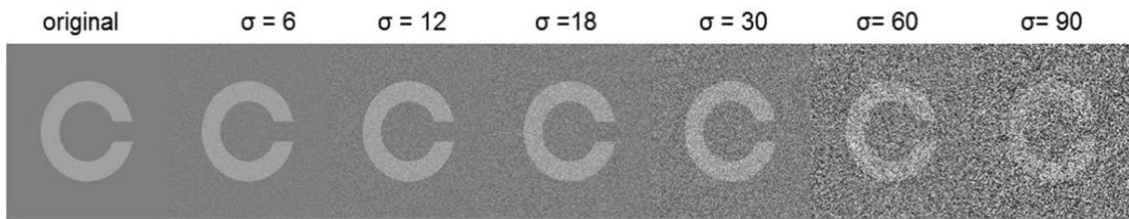


Figura 2.4 - Esempi di stimoli con e senza (primo a sinistra) rumore aggiunto con i livelli di intensità indicati (da Itzcovich et al., 2017).

I risultati di questo studio dimostrano che anche la funzione visiva di persone con un sistema visivo compromesso possono beneficiare dall'aggiunta di rumore e suggeriscono anche che i protocolli di riabilitazione visiva potrebbero fare uso della risonanza stocastica. Tuttavia, siamo ancora lontani da questa possibilità, e ad ora, nessun gruppo di ricerca ha proposto applicazioni cliniche della Risonanza Stocastica per il recupero di funzioni visive. Ciononostante, alcuni spunti e indicazioni di possibili utilizzi di questo fenomeno di potenziamento sensoriale provengono da ricercatori che hanno investigato gli effetti del rumore sulla percezione visiva in persone normo-vedenti. Ad esempio, Manjarrez et al. (2007) hanno fornito un'evidenza di risonanza stocastica cross-modale, per cui del rumore uditivo aggiunto in livelli ottimali può migliorare la trasmissione di segnali visivi deboli. Pertanto, gli autori hanno suggerito che il rumore uditivo potrebbe essere utilizzato negli interventi di riabilitazione visiva (Manjarrez et al., 2007). Più recentemente, Battaglini e colleghi (2023) hanno invece suggerito che la Risonanza Stocastica potrebbe essere implementata per ottimizzare paradigmi riabilitativi basati sull'apprendimento percettivo. Difatti, il rumore, sia interno che esterno, potrebbe agire incrementando la probabilità che il sistema visivo compromesso sia in grado di rilevare gli stimoli, così da rendere l'allenamento maggiormente efficiente e meno prolungato nel tempo. In altre parole, il potenziamento della sensibilità del sistema visivo durante l'allenamento con stimoli visivi potrebbe ridurre il numero di sessioni necessarie per ottenere dei miglioramenti, accorciando significativamente la durata dei protocolli riabilitativi che tipicamente coinvolgono i pazienti per diversi mesi (Battaglini et al., 2023).

2.7. Obiettivi e ipotesi sperimentali

Considerando le evidenze presenti in letteratura e le indicazioni fornite da alcuni autori, nonché la mancanza di studi che hanno indagato specificamente la possibilità di implementare la SR in protocolli riabilitativi per il recupero delle funzioni visive, la presente ricerca si è posta come obiettivo quello di esplorare questa possibilità. Ci si è pertanto chiesti se la Risonanza Stocastica possa essere indotta nel compito utilizzato in uno specifico protocollo di riabilitazione neurovisiva (NRT – Casco et al., 2018) descritto nei paragrafi precedenti. Come già anticipato, il protocollo NRT fa uso di un compito di detezione a scelta forzata temporale (2IFC) e di un metodo adattivo basato su una staircase che permette di misurare la soglia di contrasto a cui il partecipante è in grado di rilevare lo stimolo il 79,4% delle volte. Contrariamente ai classici studi sulla Risonanza Stocastica nella percezione sensoriale, in questo tipo di compito non vi è una misurazione preliminare delle soglie di contrasto e il segnale risulta inizialmente sopra-soglia, riducendosi man mano che il compito prosegue. A questo proposito, tre esperimenti pilota sono stati condotti in soggetti normo-vedenti per estendere i risultati riscontrati in letteratura (Aihara et al., 2008; Battaglini et al., 2023; Itzcovich et al., 2017; Piana et al., 2000; van der Groen & Wenderoth, 2016), e fornire ulteriori evidenze circa la Risonanza Stocastica esterna nella modalità visiva in compiti di discriminazione di Gabor patches, così da poter porre le basi per una sua implementazione nella riabilitazione visiva basata sull'apprendimento percettivo. Sulla base della letteratura precedente, nella ricerca presente ci si attendeva che le soglie di contrasto in compiti di detezione e discriminazione di Gabor Patches potessero beneficiare di ottimali livelli di rumore gaussiano nella forma di valori di grigio casuali aggiunti ai pixel del segnale. Inoltre, si è indagato se vi fosse un'interazione tra i livelli di rumore e la posizione in cui viene presentato lo stimolo. Dato che il compito utilizzato nel protocollo NRT prevede la presentazione di stimoli sia nel campo visivo periferico che in porzioni del campo visivo parafoveale⁵⁶, si è ipotizzato

⁵⁶ *Parafovea: area che può riferirsi ad una posizione a un angolo visivo di circa 4° dal punto di fissazione normale o alla regione che si estende fino a quell'angolo dalla fovea. È distintamente caratterizzata dalla fovea per le sue densità inferiori di coni e cellule gangliari e per la sua densità più elevata di bastoncelli (Sakurai, 2015).*

che la posizione potesse determinare delle differenze nell'effetto del rumore. La seguente ipotesi è stata formulata:

H. La sensibilità al contrasto di osservatori normovedenti in un compito a scelta forzata temporale (2IFC) è sistematicamente potenziata da livelli intermedi di rumore visivo aggiunto agli stimoli Gabor Patch. Pertanto, ci si attende un abbassamento delle soglie di contrasto per livelli intermedi/ottimali di rumore, rispetto alla condizione di controllo o valori di intensità di rumore maggiori. In altre parole, ci si attende che la prestazione al compito utilizzato nel protocollo NRT sia migliore per livelli intermedi di rumore e peggiore per livelli inferiori o superiori (**H1**).

Pertanto, come principale domanda di ricerca ci si è chiesti se fosse possibile osservare la Risonanza Stocastica esterna nel compito a scelta forzata temporale di detezione di Gabor Patch impiegato nel protocollo riabilitativo NRT (Casco et al., 2018). Questa ipotesi di partenza, molto generale, è stata poi specificata e differenziata all'interno dei singoli studi condotti. In particolare, nel primo studio si voleva verificare se la Risonanza Stocastica si verificasse quando il rumore visivo era aggiunto direttamente nelle porzioni interne delle Gabor patch e in maniera proporzionale all'intensità dello stimolo stesso. Nel secondo e nel terzo studio invece abbiamo indagato se la Risonanza Stocastica potesse manifestarsi quando il rumore era inserito nello sfondo in cui la Gabor compariva. Questa differenza metodologica tra il primo studio e gli altri due ha portato ad una specifica ulteriore della prima ipotesi sperimentale:

H.1.1. La sensibilità al contrasto di osservatori normovedenti è potenziata da livelli intermedi di rumore visivo aggiunto nelle porzioni interne degli stimoli e proporzionale all'intensità dello stimolo stesso (**H1.1**).

H.1.2. La sensibilità al contrasto di osservatori normovedenti è sistematicamente potenziata da livelli intermedi ed ottimali di rumore visivo aggiunto allo sfondo in cui sono presentati gli stimoli. In altre parole, ci aspettiamo che il rumore visivo, non più interno alle porzioni dello stimolo ma parte dello sfondo in cui lo stimolo compare, possa avere un effetto migliorativo sulla sensibilità al contrasto (**H1.2**).

Al solo scopo esplorativo, abbiamo anche investigato se ci fosse un effetto di interazione tra il rumore e la posizione retinica di presentazione degli stimoli. In particolare, si è indagato se la Risonanza Stocastica avesse effetti differenti in funzione della posizione di presentazione e ci si è chiesti se l'effetto del rumore fosse differente quando gli stimoli erano presentati in posizione periferica rispetto ad una posizione parafoveale.

CAPITOLO 3: LA RICERCA

La presente ricerca pilota è strutturata in tre studi, ognuno dei quali presenta variazioni nell'intensità del rumore visivo esterno aggiunto agli stimoli, che consistevano in Gabor patches. La differenza tra i tre studi risiede nella manipolazione specifica dei livelli di rumore, cioè il metodo con cui il rumore esterno viene applicato agli stimoli e le diverse intensità di rumore utilizzate. Inizialmente, il primo studio sarà presentato in dettaglio, includendo una descrizione del metodo, una presentazione dei risultati ottenuti e una breve discussione delle osservazioni fatte. In questa discussione sarà introdotto anche il razionale alla base del secondo studio. Successivamente, verrà esaminato il secondo studio, con una descrizione completa del metodo utilizzato, una presentazione dei risultati ottenuti e una riflessione sui suoi limiti. Questa analisi del secondo studio ci consentirà di delineare il razionale alla base del terzo studio. Infine, sarà illustrata la metodologia adottata per il terzo e ultimo studio, e saranno presentati i risultati ottenuti. L'obiettivo di questa struttura è fornire una visione chiara e progressiva della ricerca, evidenziando le motivazioni che hanno guidato la progettazione dei singoli studi.

3.1. Studio 1: metodo

3.1.1. Partecipanti

Dieci partecipanti hanno partecipato volontariamente a questo esperimento, normovedenti, o con visione corretta da occhiali e lenti a contatto, di cui 6 maschi e 4 femmine di età compresa tra i 20 e i 25 anni (età media: 23.4 anni; SD: 1.51). Tutti i partecipanti erano all'oscuro degli scopi dello studio. Lo studio è stato preliminarmente approvato dal Comitato Etico dell'Università degli studi di Padova (protocollo n-92-b), e il consenso informato è stato fatto visionare e firmare da ogni partecipante.

3.1.2. Apparato e stimoli

I partecipanti hanno svolto il compito in una stanza buia e silenziosa su un computer HP notebook 250 G6 – Core i3 6006U - RAM DDR4 4GB – HDD500GB – LED 15,6'' – Windows 10 PRO fornito dal centro NeuroVis.U. S dell'Università di Padova. Il gamma del monitor è stato corretto al valore 1. Il pc è stato posto ad una distanza di 57 cm, che

veniva accuratamente misurata prima dell'inizio di ogni sessione. Per stabilizzare la testa dei partecipanti, il compito è stato svolto con l'ausilio di una mentoniera oftalmica ottica. Il compito è stato svolto al buio e con visione binoculare. Gli stimoli adoperati in questa ricerca consistevano in stimoli *Gabor Patches* con orientazione pari a 0° (verticale) e presentati in modo statico, con una frequenza spaziale di 1 ciclo per grado. Una *Gabor Patch* è tecnicamente una variazione sinusoidale di luminanza moltiplicata per una funzione gaussiana, da un punto di vista percettivo risulta essere uno stimolo a barre bianco e nere con i contorni sfumati. Negli studi psicofisici della percezione visiva questi stimoli sono ampiamente utilizzati poiché presentano caratteristiche simili ai campi recettivi dei neuroni nella corteccia visiva primaria, che sono pertanto in grado di attivare in modo ottimale. La Gabor è caratterizzata da una lunghezza d'onda (λ), fase (φ) e deviazione standard (σ) dell'involuppo gaussiano di luminanza nello spazio (x, y) dell'immagine e può essere ricavata attraverso la seguente formula:

$$G(x, y) = \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}X + \varphi\right) e^{-\frac{(x^2+y^2)}{\sigma^2}}$$

In questo studio sperimentale le Gabor erano presentate su sfondo grigio uniforme, in una finestra di dimensioni di 14° e per una durata di presentazione di 200 ms.

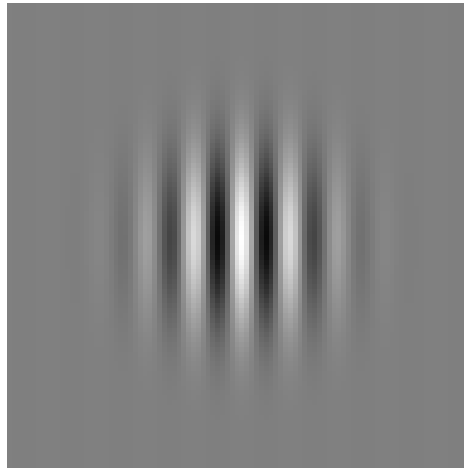


Figura 3.1 - Gabor patch con orientamento pari a 0°

3.1.3. Descrizione del compito

Il compito consisteva nella detezione di uno stimolo Gabor a contrasto variabile associato a del rumore visivo. Dati gli obiettivi clinici dello studio, il compito che i partecipanti

dovevano svolgere era il medesimo di quello utilizzato nel protocollo di riabilitazione visiva NRT (Casco et al., 2018). Il partecipante doveva compiere una scelta forzata tra due intervalli temporali (2IFC): lo stimolo appariva in concomitanza di uno dei due intervalli, distinti da due suoni consecutivi, e il partecipante doveva premere un tasto sulla tastiera a seconda che lo stimolo fosse comparso in corrispondenza del primo (tasto M) o del secondo suono (tasto Z). Un trial era caratterizzato da due intervalli, in cui in uno solamente la Gabor era presentata. I due intervalli temporali erano separati di più o meno 200msec. Un trial iniziava dopo che il partecipante premeva un tasto e l'esperimento procedeva pertanto al ritmo determinato dal partecipante. Dopo aver fornito la risposta, un feedback uditivo segnalava se quest'ultima fosse corretta o errata. La risposta doveva essere data alla fine di ogni trial, dopo la presentazione di entrambi gli intervalli temporali, a cui seguiva il feedback e l'onset del trial successivo. Come nell'NRT, il compito impiegato nello studio proponeva le posizioni delle Gabor utilizzate nella riabilitazione di pazienti con emianopsia omonima destra e sinistra. Pertanto, le Gabor potevano essere presentate in quattro diverse posizioni, in ordine casuale durante ogni sessione, di cui due eccentriche (una a destra e una a sinistra) e due para-foveali. Più specificamente le posizioni più "centrali" avevano coordinate di $x: 6; y: -6$ e $x: 6; y: 6$ (condizione destra) o $x: -6; y: -6$ e $x: -6; y: 6$ (condizione sinistra), mentre le posizioni eccentriche avevano coordinate di $x: 15; y: 0$ e $x: -15; y: 0$.

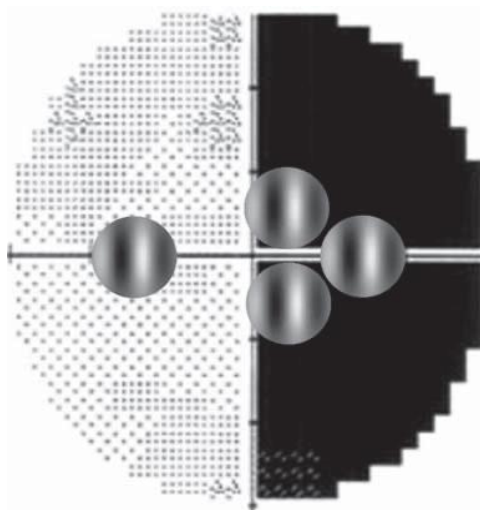


Figura 3.2 - Esempio di posizionamento delle Gabor - condizione con posizioni "centrali" a destra.

Metà dei partecipanti svolgeva il compito in cui le Gabor, quando presentate in porzioni più centrali (o parafoveali), erano situate a sinistra rispetto alla linea mediana di campo visivo, mentre l'altra metà svolgeva il compito con queste posizioni situate a destra rispetto alla linea mediana. La figura 3.2 mostra a scopo esemplificativo la distribuzione delle posizioni dello stimolo nel campo visivo. A differenza del paradigma classico dell'NRT, il compito presente comprendeva nove condizioni in cui diversi livelli di rumore visivo sono stati aggiunti direttamente agli stimoli Gabor, ed una condizione di controllo in cui il livello di intensità di rumore era pari a zero, per un totale di dieci condizioni. Il rumore è stato creato e aggiunto attraverso questa procedura: ad ogni singolo pixel dell'immagine della Gabor Patch è stato assegnato un valore che era uguale al valore di luminanza del pixel stesso a cui era aggiunto un valore casuale di luminanza proporzionale al valore del pixel originale. In altre parole, il valore di luminanza del pixel dell'immagine è stato moltiplicato per un valore di luminanza casuale che poteva essere superiore o inferiore al valore del pixel originale del 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90%. Questi valori percentuali definivano i livelli di intensità del rumore, dove il 10% indicava il livello di rumore più basso mentre il 90% indicava il livello di rumore più alto. Inoltre, questi valori indicavano un range percentuale entro cui erano circoscritti i valori casuali. Nelle immagini seguenti è possibile osservare due esempi di Gabor Patch in cui il rumore è stato generato seguendo questa procedura.

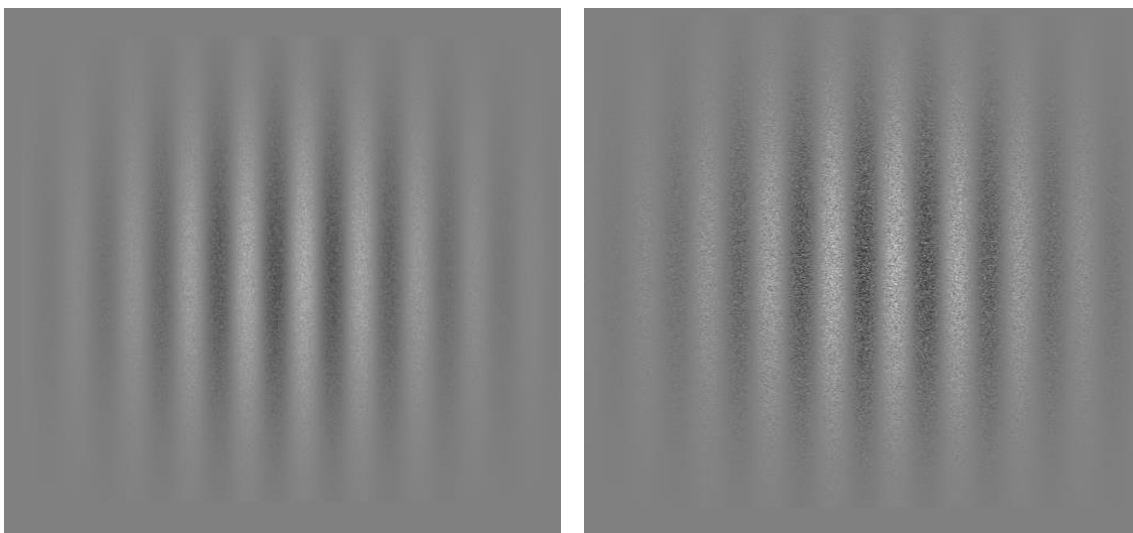


Figura 3.3 - Esempi di Gabor Patch con rumore gaussiano proporzionale all'intensità dei pixel originali degli stimolo. Le due Gabor sono esemplificative dei livelli di rumore 0.5 (a sinistra) e 0.9 (a destra).

Un livello di intensità di rumore del 10% stava ad indicare che ogni pixel originale dell'immagine era sostituito dal valore di luminanza del pixel originale moltiplicato per un valore casuale tra l'1 e il 10% superiore o inferiore rispetto al valore iniziale. Trattandosi di un valore proporzionale all'intensità del pixel originale dell'immagine, i pixel a bassa intensità (i.e. a basso contrasto o in porzioni più periferiche dello stimolo) risultavano meno influenzati dal rumore.

3.1.4. Procedura

Lo studio constava di dieci condizioni e i partecipanti svolgevano tutte le condizioni una volta in due sessioni sperimentali. Ogni sessione era composta da cinque condizioni in cui variavano i livelli di intensità di rumore come descritto precedentemente. L'ordine di svolgimento delle diverse condizioni è stato randomizzato tra i partecipanti e le due sessioni erano svolte all'incirca alla stessa ora. Ogni sessione durava circa cinquanta minuti, e la durata totale dell'esperimento era di cento minuti. Le sessioni erano svolte all'interno del laboratorio E08 del Dipartimento di Psicologia Generale (DPG) dell'Università degli studi di Padova. Il setting sperimentale consisteva in una stanza buia e silenziosa. Su una scrivania era posizionato il computer portatile, e a 57 cm di distanza era posta la mentoniera oftalmica ottica. Il partecipante visionava e firmava il consenso informato e lo sperimentatore proseguiva alla spiegazione del compito, con esempi visivi degli stimoli impiegati nel compito. Successivamente lo sperimentatore procedeva all'avvio del programma. Per iniziare lo svolgimento del compito, il partecipante doveva premere la barra spaziatrice. Durante il compito, il software procedeva automaticamente al calcolo della soglia di contrasto attraverso un metodo psicofisico adattivo facente uso di una *staircase one-up-three-down*, che permette di individuare la soglia che corrisponde al 79,4% di probabilità di individuare correttamente lo stimolo. L'algoritmo prevedeva un abbassamento del livello di contrasto dello stimolo in seguito a tre risposte corrette, ed un aumento del contrasto in seguito ad una singola risposta sbagliata. Al termine della prima sessione sperimentale, veniva concordata con il partecipante una data per la seconda sessione.

3.2. Studio 1: Risultati

Questo studio ha fatto uso delle soglie di contrasto⁵⁷ come misura della prestazione dei partecipanti al compito (variabile dipendente), che sono state analizzate in funzione della posizione di presentazione degli stimoli e dei livelli di intensità di rumore (variabili indipendenti). A questo proposito, è stata condotta un'analisi della varianza (ANOVA) a misure ripetute per esaminare l'effetto dei due fattori entro i soggetti sulle soglie di contrasto: il livello di intensità di rumore (con 10 livelli: 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9) e la posizione degli stimoli (con 4 livelli). L'analisi è stata condotta per valutare l'interazione tra questi due fattori e il loro impatto sulla prestazione nei partecipanti. La scelta di questo test è giustificata dalla presenza di un singolo campione in cui sono state eseguite misurazioni multiple sugli stessi soggetti. Per quanto riguarda il fattore rumore, è stato condotto il test della Sfericità di Mauchy per verificare l'ipotesi di sfericità dei dati, che verifica se le varianze delle differenze tra le condizioni sono omogenee. Il test è risultato significativo per questo fattore, ad indicare una violazione dell'assunto di sfericità. Pertanto, è stata apportata una correzione dei gradi libertà attraverso il metodo di correzione Greenhouse-Geissner, che ha permesso di osservare una non-significatività dell'effetto del fattore rumore sulla prestazione dei partecipanti: ($F_{(2.729, 24,562)} = 1.009$, $p_{corr} = 0.400$, $\eta^2 p = 0.101$). Pertanto, i risultati suggeriscono che il rumore non abbia alcun effetto sulle soglie di contrasto dei partecipanti. In altre parole, il rumore non ha alcuna influenza sulla prestazione dei partecipanti. Nei grafici seguenti è possibile osservare la media delle soglie di contrasto dei soggetti (nelle ordinate) per ogni livello di intensità di rumore (nelle ascisse), dove il primo valore indica la condizione di controllo, mentre l'ultimo valore indica il livello in cui il rumore ha intensità maggiore.

⁵⁷ *Variazione di luminanza tra bande chiare e bande scure e ricavato attraverso la seguente formula: $(L_{max} - L_{min}) / (L_{max} + L_{min})$, dove L_{max} rappresenta la luminanza massima ed L_{min} la luminanza minima.*

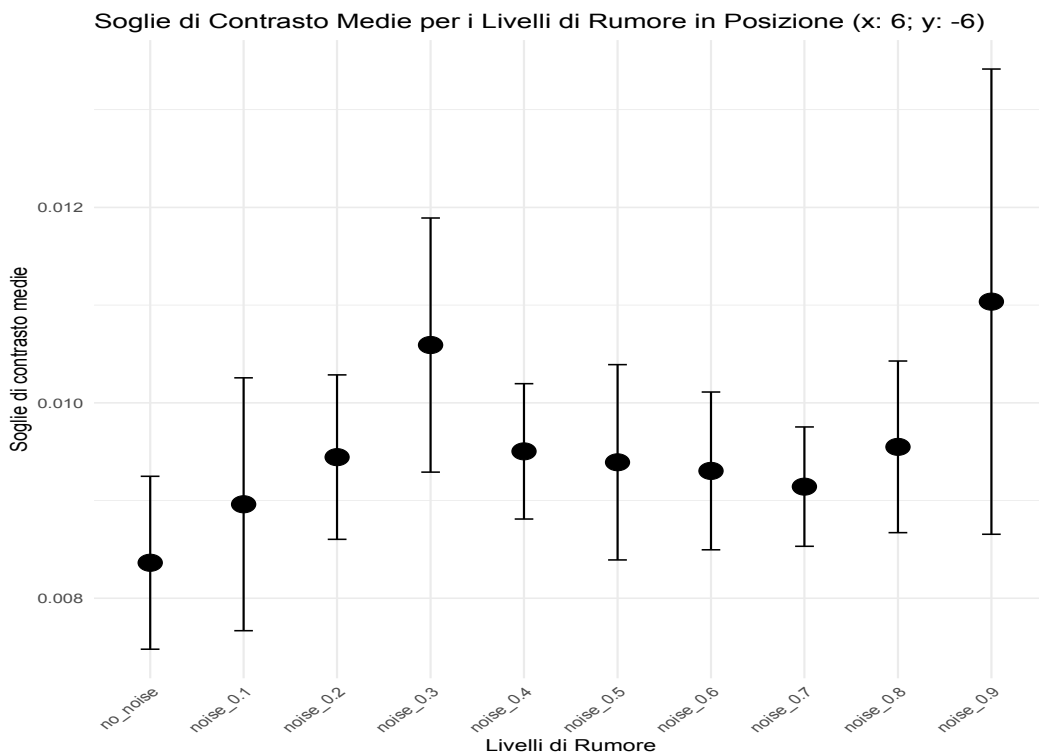
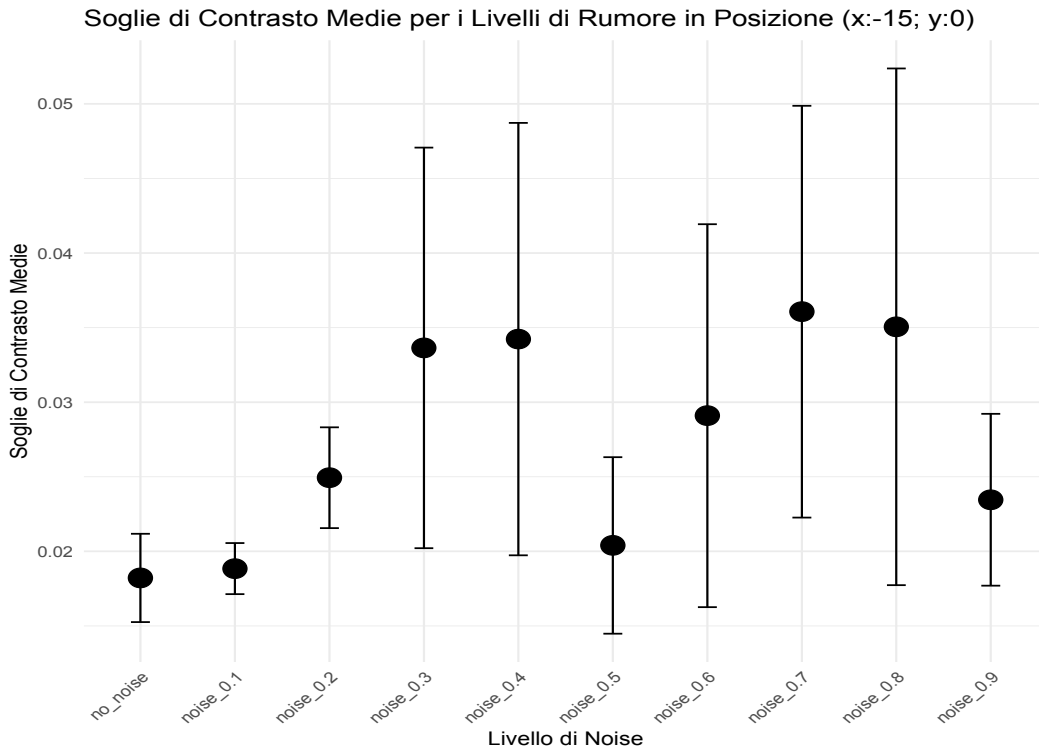


Grafico 3.1 - Medie delle soglie di contrasto con diverse intensità di rumore per due diverse posizioni. Un valore maggiore delle soglie indica peggioramento nella prestazione. 1.A. Soglie medie ottenute in posizione periferica (grafico in alto, x:15; y:0). 1B. Soglie medie ottenute in posizione parafoveale (grafico in basso, x: 6; y: -6).

Dai grafici si può evincere che non è emersa alcuna relazione significativa tra il fattore rumore e le soglie di contrasto. L'andamento delle prestazioni dei partecipanti all'aumentare dei livelli di rumore è risultato sostanzialmente piatto, come evidenziato chiaramente nei grafici 1A e 1B. Questa constatazione è supportata dall'osservazione delle ampie dimensioni degli errori, indicate dalle barre di errore associate a ciascun valore medio. In sintesi, il rumore non sembra influire sulle soglie di contrasto. Tuttavia, prendendo in considerazione il fattore posizione, è emerso che la prestazione dei partecipanti è influenzata significativamente da questo fattore. Il test di sfericità di Mauchy è risultato significativo, ed è pertanto stata condotta la correzione dei gradi di libertà tramite la correzione Greenhouse-Geissner. L'analisi statistica ha rivelato un effetto significativo della posizione sulla prestazione dei partecipanti: ($F_{(1.136, 10.224)} = 15.74$, $p_{corr} = 0.002$, $\eta^2p = 0.628$). Pertanto, la posizione retinica di presentazione degli stimoli, con quattro livelli, modulava le soglie di contrasto ottenute dai partecipanti. Ulteriori confronti tra le medie delle soglie di contrasto per le diverse posizioni sono stati condotti per esplorare più in dettaglio questo effetto. Nel grafico che segue sono evidenziati i risultati dei confronti appaiati che sono stati compiuti sulle medie delle posizioni. Attraverso questi confronti appaiati è stato possibile osservare che la media delle soglie di contrasto degli stimoli in posizione 1 e in posizione 4 (posizioni periferiche speculari con coordinate $x: 15; y:0$ e $x: -15; y: 0$, rispettivamente) differiscono significativamente da quelle ottenute in posizione 2 e in posizione 3 (posizioni parafoveali con coordinate $x:6; y: -6$ e $x: 6; y:6$, rispettivamente). In altre parole, questo risultato suggerisce che la prestazione dei partecipanti varia notevolmente in funzione dell'eccentricità degli stimoli. Inoltre, l'assenza di differenze statisticamente significative tra le soglie medie ottenute nelle posizioni speculari o simili⁵⁸ conferma ulteriormente la notevole differenza nelle prestazioni dei partecipanti tra stimoli presentati in posizioni eccentriche e meno eccentriche.

⁵⁸ Ad esempio: differenza tra le medie di posizione 1 e posizione 4, entrambe eccentriche e speculari.

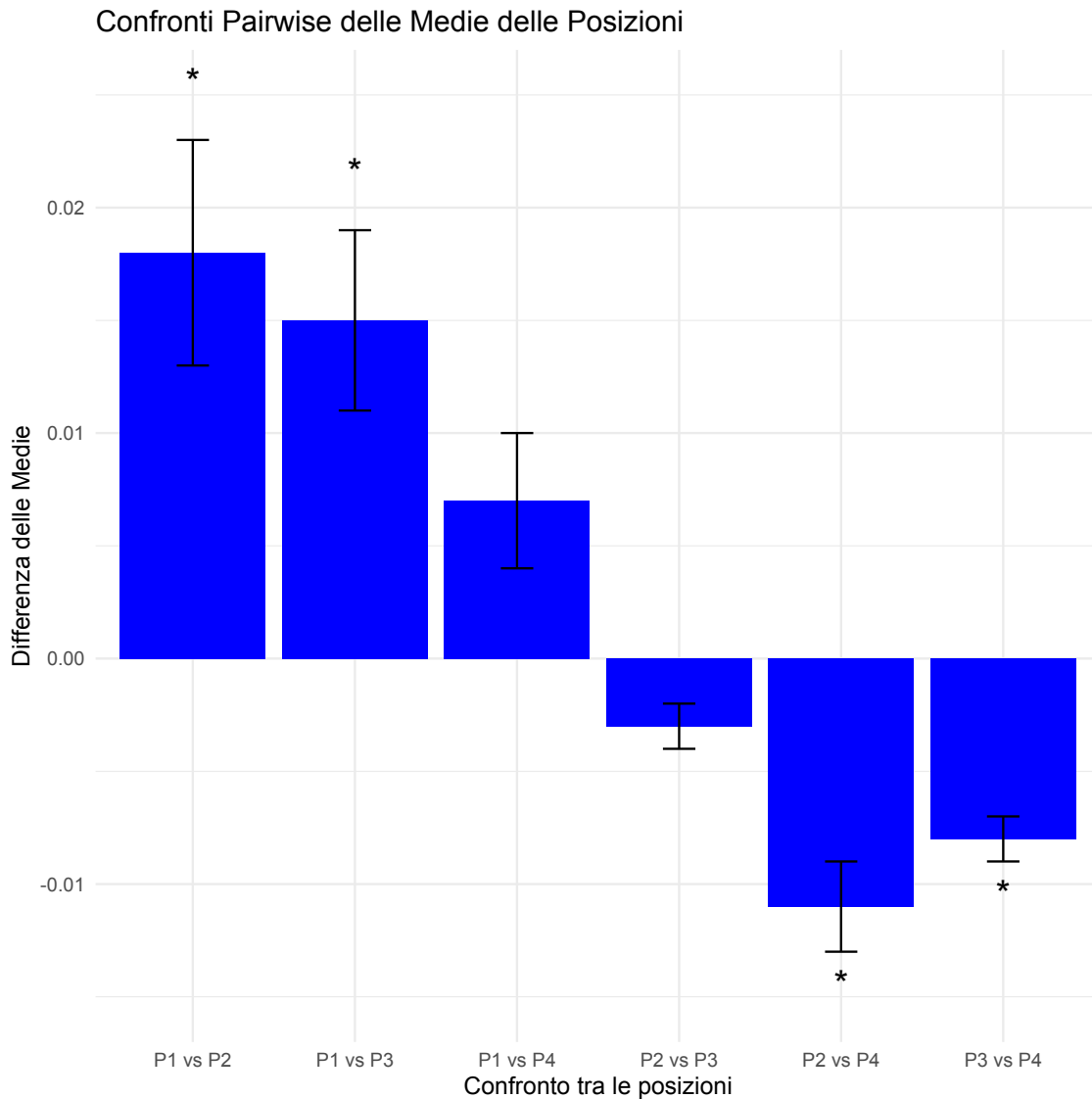


Grafico 3.2 - Confronti appaiati tra le medie delle soglie nelle diverse posizioni. Il confronto è stato ottenuto computando la differenza tra la media in una posizione e la media in un'altra.

Infine, l'analisi statistica dell'interazione tra fattore rumore e fattore posizione, condotta sempre nello stesso modo, ha messo in luce invece che non vi è nessun effetto statisticamente significativo dell'interazione tra questi due fattori: ($F_{(27, 243)} = 0.522$, $p_{corr} = 0.977$, $\eta^2 p = 0.055$). Ciò sta ad indicare che gli effetti dei fattori principali sono indipendenti l'uno dall'altro.

3.3. Studio 1: Discussione

Dai risultati si evince che il rumore gaussiano aggiunto agli stimoli, costruito e manipolato nelle modalità descritte nei paragrafi precedenti, non ha alcun effetto sulle

prestazioni dei partecipanti al compito di detezione a scelta forzata temporale di stimoli Gabor proposto nel presente studio. Difatti, l'analisi statistica condotta ha messo in luce che non vi è alcuna differenza statisticamente significativa tra le soglie di contrasto, in media, per i diversi livelli di intensità del rumore. In conclusione, i risultati indicano che questa manipolazione sperimentale non ha condotto all'osservazione della Risonanza Stocastica. La Risonanza Stocastica avrebbe dovuto manifestarsi come una significativa diminuzione delle soglie di contrasto, corrispondente a un miglioramento delle prestazioni, in presenza di livelli intermedi di rumore. D'altra parte, ci si sarebbe aspettato che le soglie fossero più elevate a valori di intensità del rumore molto bassi (come 0) o molto alti (come 0.9) rispetto a valori intermedi e ottimali. Pertanto, l'andamento atteso nei grafici avrebbe dovuto seguire una forma a "U"⁵⁹, che non è emersa dai dati osservati. Al contrario, è emerso un andamento piatto delle prestazioni dei partecipanti al variare dei livelli di rumore, indicante che il rumore non potenzia né inficia la sensibilità al contrasto di persone normo-vedenti. Tuttavia, questi risultati sono in contrapposizione non solo con gli studi che hanno evidenziato il potenziamento sensoriale rumore-indotto, ma anche con le evidenze prodotte dagli studi di psicofisica che hanno mostrato un effetto detrimento del rumore visivo sulla prestazione in compiti di detezione e discriminazione del contrasto (Doshier & Lu, 1998). Una spiegazione alternativa dei risultati che sono stati osservati potrebbe essere collegata alla specifica manipolazione dei livelli di rumore. L'intensità del rumore era proporzionale all'intensità dei pixel degli stimoli Gabor, e variava all'interno di un range di valori definito a priori in funzione della condizione specifica. Di conseguenza, il rumore risultava molto debole quando il contrasto degli stimoli era al di sotto della soglia di contrasto dei partecipanti. Affinché si possa manifestare la risonanza stocastica, si suppone che il rumore aggiunga contenuto informativo al segnale e favorisca il superamento della soglia percettiva di un osservatore (Moss, 2004). A questo scopo, il rumore dev'essere visibile e di un'intensità adeguata. Per poter verificare questa possibilità, è stata proposta una nuova manipolazione dei livelli di intensità di rumore che è stata implementata nel secondo studio di questa ricerca pilota,

⁵⁹ *La misura delle prestazioni sono soglie di contrasto, per cui un miglioramento è indicato da soglie più basse mentre un peggioramento da soglie più alte.*

in modo da testare questa ipotesi. I prossimi paragrafi sono pertanto dedicati alla trattazione del secondo studio che è stato condotto.

3.4. Studio 2. Metodo

Il metodo dello studio 2 era il medesimo dello studio 1, con qualche eccezione. Ciò che differenziava il presente studio dal precedente era la specifica manipolazione del fattore rumore. In particolare, è stata modificata la procedura attraverso cui il rumore è stato costruito e i livelli di intensità di rumore impiegati. Inoltre, nonostante il compito utilizzato fosse lo stesso, la nuova manipolazione del rumore ha portato ad una modifica del compito, anche se di lieve entità.

3.4.1. Partecipanti

Tredici persone normo-vedenti o con vista corretta con occhiali o lenti a contatto hanno partecipato volontariamente a questo secondo esperimento, di cui 6 maschi e 7 femmine, di età compresa tra 21 e 58 anni (età media: 26.5 anni; SD: 9.46).

3.4.2. Apparato e stimoli

Gli stimoli e l'apparato sperimentali nel presente studio sono i medesimi dello studio precedente.

3.4.3. Descrizione del compito

Analogamente allo studio 1, il compito previsto in questo studio era un compito di detezione di Gabor Patch a scelta forzata temporale (2IFC), ma presentava alcune differenze. In primis, la procedura attraverso cui il rumore è stato costruito ed aggiunto agli stimoli Gabor si differenziava in questo esperimento rispetto al precedente. Pertanto, il compito di detezione cambiava leggermente, dato che il rumore era parte dello sfondo e non più interno allo stimolo stesso. Mediante questa nuova manipolazione, un *trial* constava di due intervalli, in cui in uno dei due intervalli era presentato lo stimolo contornato dal rumore, mentre nell'altro era presentato il rumore isolato. Il rumore corrispondeva ad intensità di grigio aggiunti ai pixel dell'immagine in modo casuale in un'area di forma quadrata (**Fig. 3.1**). Il secondo studio di questa ricerca prevedeva cinque

diverse intensità del rumore. Come nel primo esperimento, è stata inclusa una condizione di controllo in cui l'intensità del rumore era pari a zero. La procedura di costruzione dei livelli di rumore prevedeva che a metà dei pixel che formavano l'immagine della Gabor venisse assegnato un valore casuale di grigio secondo una distribuzione Gaussiana con media 0 e valori della deviazione standard pari a 0.05, 0.25, 0.45, 0.65, 0.85, dove il valore di 0.05 corrispondeva alla condizione con minor rumore, mentre il valore 0.85 corrispondeva alla condizione con maggior rumore. L'intensità del grigio inserita nei pixel dell'immagine aveva valori simili all'intensità di grigio dei pixel dello stimolo in assenza di rumore per valori bassi della deviazione standard (i.e. 0.05), mentre per valori alti l'intensità del grigio era più dissimile e pertanto si configurava come una condizione con un livello di rumore maggiore (i.e. 0.85). Esempi di Gabor patches a cui è stato aggiunto del rumore gaussiano e il rumore isolato sono presentati nelle immagini seguenti.

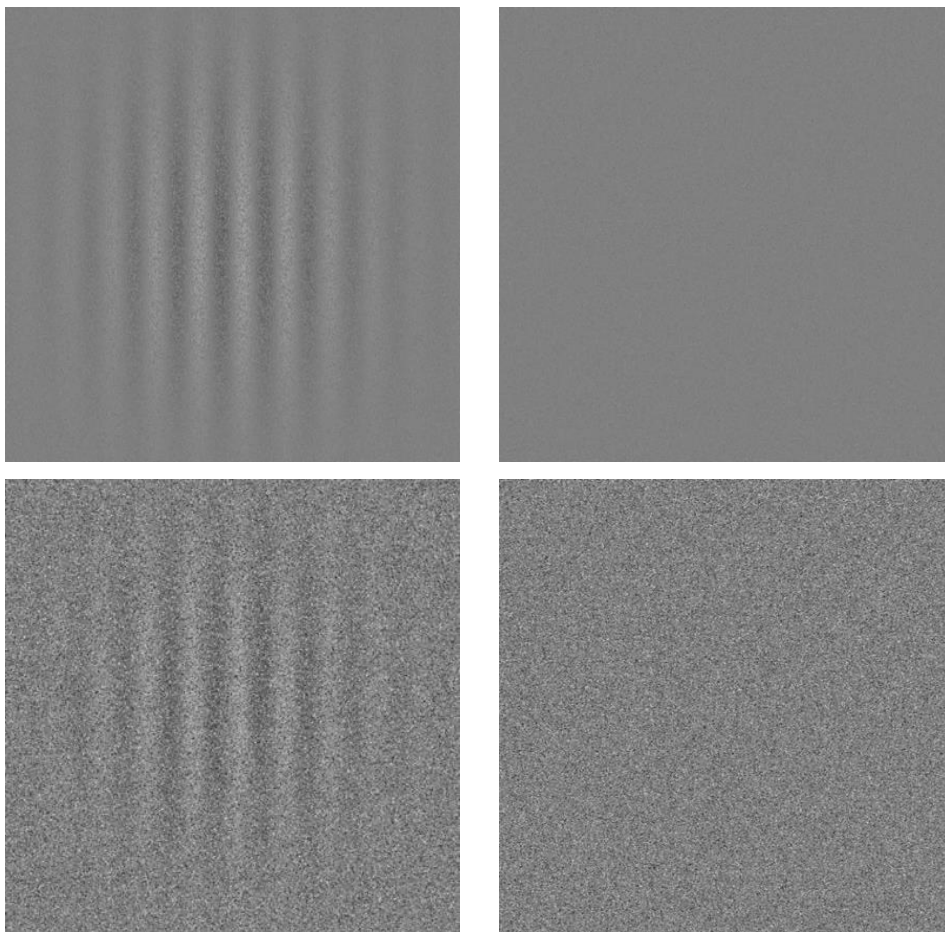


Figura 3.4 - Esempi di Gabor patches con rumore gaussiano (a sinistra) e rumore isolato (a destra), senza stimolo. Nelle due immagini in alto, il rumore è di intensità di 0.05, mentre nelle immagini in basso è pari a 0.45.

Data questa nuova modalità di costruzione e manifestazione percettiva del rumore, si è deciso di modificare le posizioni degli stimoli per evitare che l'area di rumore e la Gabor risultassero asimmetriche e parzialmente tagliate dalla schermata. Pertanto, le coordinate sono state leggermente modificate in modo da allontanare gli stimoli dal margine inferiore e dal margine superiore (per le posizioni parafoveali) e dal margine laterale sinistro e destro dello schermo (per le posizioni eccentriche). Le nuove coordinate erano le seguenti: $x: 4; y: -6$ e $x: 4; y: 6$ (condizione destra) o $x: -4; y: -6$ e $x: -4; y: 6$ (condizione sinistra) per le posizioni parafoveali, mentre $x: 12; y: 0$ e $x: -12; y: 0$ per le posizioni eccentriche.

3.4.4. Procedura

Il secondo studio della ricerca descritta in questo elaborato constava di sei condizioni. In cinque condizioni sono state manipolate le intensità di rumore visivo ed una era invece di controllo, caratterizzata dall'assenza del rumore. Le condizioni sono state svolte tutte in un'unica sessione sperimentale. La durata complessiva dell'esperimento era di 60 minuti. La procedura utilizzata era la medesima dello studio precedentemente condotto.

3.5. Studio 2: Risultati

La variabile dipendente utilizzata in questo studio per misurare la prestazione dei partecipanti era la soglia di contrasto calcolata automaticamente dal programma attraverso una *staircase one-up-three-down*, per ognuna delle quattro posizioni e per tutti i livelli di rumore. È stata pertanto analizzata la prestazione dei partecipanti in funzione del livello di intensità del rumore e della posizione retinica di presentazione degli stimoli. Come nello studio precedente, è stata condotta un'analisi della varianza (ANOVA) a misure ripetute per esaminare l'effetto di due fattori entro i soggetti sulle soglie di contrasto: il livello di intensità di rumore (con 6 livelli: 0, 0.05, 0.25, 0.45, 0.65, 0.85) e la posizione degli stimoli (con 4 livelli). Per quanto riguarda il fattore rumore, è stato condotto il test della Sfericità di Mauchy per verificare l'ipotesi di sfericità dei dati. Il test è risultato significativo per questo fattore, ad indicare una violazione dell'assunto di sfericità. Pertanto, è stata apportata una correzione dei gradi libertà attraverso il metodo di correzione Greenhouse-Geissner, che ha permesso di osservare una significatività dell'effetto del fattore rumore sulla prestazione dei partecipanti: ($F_{(8,113.953)} =$

44.547, $p_{corr} < 0.001$, $\eta^2p = 0.712$). Come si può osservare nel grafico seguente, il rumore ha un effetto negativo sulle soglie di contrasto ottenute dai partecipanti. In altre parole, la relazione tra rumore e soglie di contrasto è direttamente proporzionale, per cui a livelli di intensità di rumore maggiori corrispondono soglie di contrasto più alte, che rappresentano un indice di peggiori prestazioni. Ciò suggerisce che il rumore ha un effetto detrimento sulle prestazioni dei partecipanti al compito svolto.

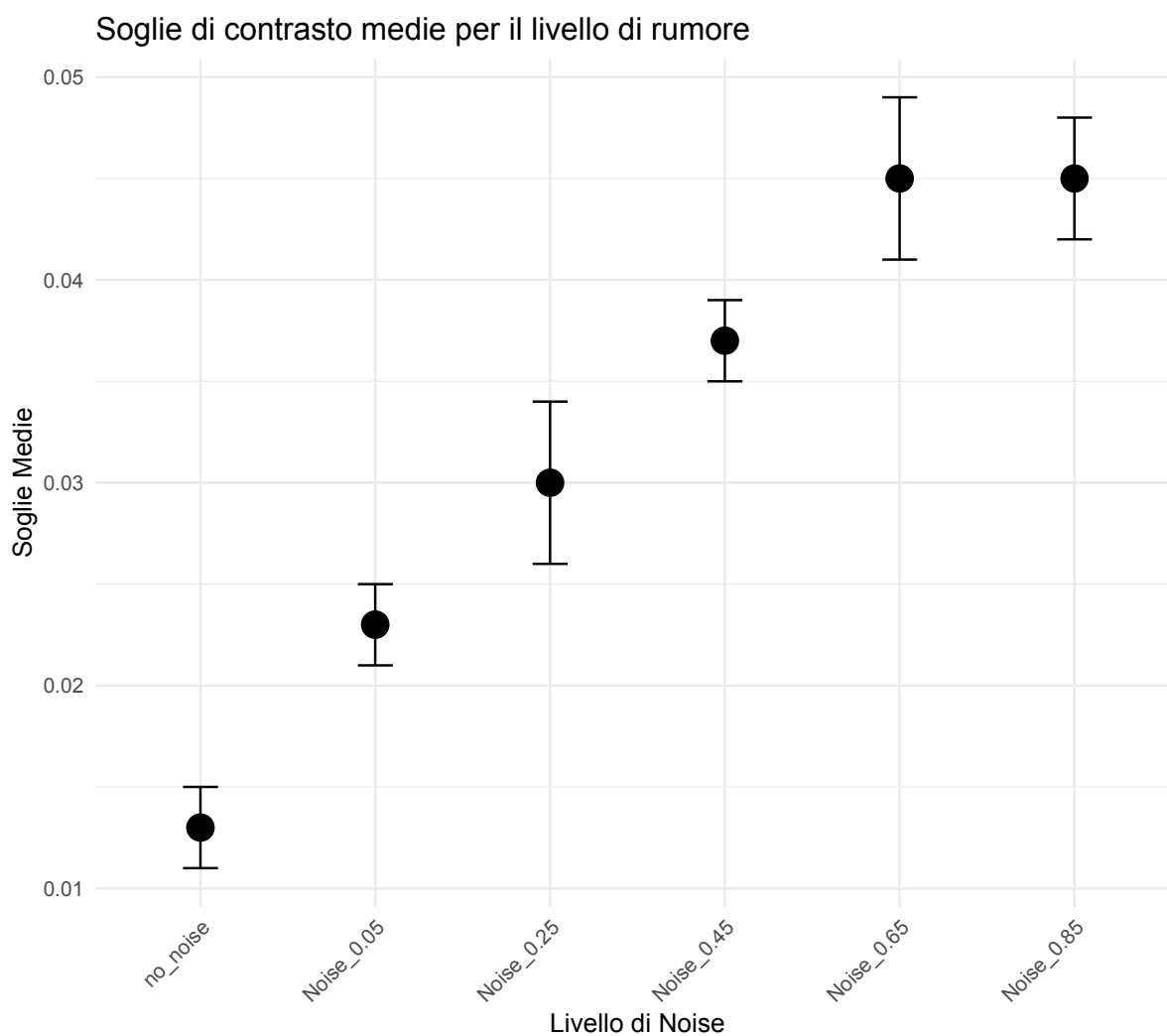


Grafico 3.3 - Soglie di contrasto medie per i 6 livelli di rumore applicati alle Gabor. Le soglie sono più basse, e quindi migliori, per valori di rumore più bassi.

3.6. Studio 2: Discussione

Contrariamente ai risultati osservati nel primo studio, questi dati suggeriscono che la sensibilità al contrasto di partecipanti normo-vedenti è influenzata in modo significativo dal rumore visivo gaussiano. In particolare, le prestazioni dei partecipanti al compito sono inficiate dall'aggiunta del rumore. Le soglie contrasto medie tendono ad aumentare significativamente all'aumentare dell'intensità del rumore gaussiano visivo. Difatti, le prestazioni dei partecipanti al compito sono migliori in assenza di rumore e peggiorano in modo lineare con l'aumentare dei livelli di intensità di rumore visivo. In primis, questi risultati suggeriscono che il rumore visivo aggiunto agli stimoli Gabor, nelle modalità utilizzate nel primo studio, non era sufficientemente intenso da influenzare la prestazione dei partecipanti. In secondo luogo, i dati osservati permettono di concludere che i livelli di intensità di rumore visivo esterno non sono benefici per la sensibilità al contrasto delle persone normo-vedenti testate, e che non vi è evidenza della Risonanza Stocastica. Difatti, non è stato osservato alcun miglioramento della performance indotto da livelli ottimali, tipicamente intermedi, di rumore visivo esterno aggiunto agli stimoli, bensì è presente un peggioramento lineare e direttamente proporzionale all'intensità del rumore. Vi sono diverse spiegazioni possibili per i risultati ottenuti in questo studio. Inizialmente, è importante considerare che gli intervalli tra i diversi livelli di intensità del rumore potrebbero essere troppo ampi per rivelare la presenza della Risonanza Stocastica. È plausibile che questo fenomeno si manifesti in modo più evidente con livelli di rumore intermedi, situati tra i livelli di intensità utilizzati nello studio. In particolare, potremmo ipotizzare che la relazione tra intensità del rumore e prestazione, se rappresentata graficamente, possa assumere la forma di una curva a U. Tale curva, nel contesto dello studio, indicherebbe l'esistenza della Risonanza Stocastica, con prestazioni ottimali in prossimità dell'intervallo di valori di intensità del rumore tra 0 e 0.05, mentre le prestazioni declinerebbero linearmente al crescere del livello di rumore, in accordo con i dati ottenuti in questo studio. Per verificare questa ipotesi, è stato pianificato un terzo ed ultimo esperimento in cui l'intensità del rumore visivo è stata variata in maniera più dettagliata. Questo ha consentito di esaminare con maggiore precisione il comportamento delle prestazioni in relazione ai diversi livelli di rumore. La finalità di tale esperimento è esplorare se la Risonanza Stocastica può emergere con maggiore chiarezza all'interno dell'intervallo di intensità del rumore compreso tra 0 e 0.05, e se la prestazione declinerà

linearmente con l'aumento dell'intensità del rumore, in coerenza con i risultati osservati nella fase precedente dello studio.

3.7. Studio 3: Metodo

Il terzo e ultimo esperimento di questa ricerca pilota si differenzia dal secondo studio solo per il numero di condizioni ed i livelli di intensità del rumore aggiunti agli stimoli Gabor Patches.

3.7.1. Partecipanti

Questo studio ha coinvolto 10 partecipanti, normo-vedenti o con visione corretta da occhiali o lenti a contatto, che hanno volontariamente preso parte all'esperimento, di cui 6 maschi e 4 femmine di età compresa tra i 23 e i 25 anni (età media: 24.6; SD: 1.17).

3.7.2. Apparato e stimoli

Gli stimoli e l'apparato sperimentale del terzo studio di questa ricerca pilota non differivano da quelli dei due studi precedentemente descritti.

3.7.3. Descrizione del compito

Il compito svolto dai partecipanti in questo terzo studio era il medesimo dello studio precedente. In aggiunta, la modalità di costruzione e aggiunta del rumore non variava tra lo studio 2 e lo studio 3. Tuttavia, nell'ultimo esperimento sono stati manipolati i livelli di intensità del rumore gaussiano aggiunto agli stimoli Gabor e sono stati costruiti quattro livelli di rumore. Analogamente agli studi precedentemente descritti, è stata prevista una condizione di controllo in cui vi era assenza di rumore, per un totale di cinque condizioni. In particolare, all'immagine della Gabor era aggiunto un valore casuale di grigio secondo una distribuzione Gaussiana con media 0 e valori della deviazione standard pari a 0.01; 0.02; 0.03; 0.04. Le condizioni sono state svolte in un'unica sessione sperimentale con una durata complessiva di circa 50 minuti.

3.7.4. Procedura

La procedura di questo studio era la medesima dello studio precedente.

3.8. Risultati

Anche per l'ultimo studio di questa ricerca esplorativa sono stati analizzati gli effetti dei due fattori, rumore (a 5 livelli: 0; 0.01; 0.02; 0.03; 0.04) e posizione (a 4 livelli), sulle soglie di contrasto nel compito di detezione a scelta forzata temporale di stimoli Gabor. Trattandosi della medesima metodologia degli studi precedenti, in cui sono state compiute misurazioni ripetute sugli stessi partecipanti, è stata condotta un'analisi della varianza (ANOVA) a misure ripetute per analizzare i dati raccolti. I risultati dell'analisi hanno messo in luce un effetto significativo della posizione degli stimoli: ($F_{(3,27)} = 7.261$, $p_{corr} = 0.001$, $\eta^2p = 0.447$). Prendendo invece in considerazione il fattore rumore, l'analisi ha evidenziato che non vi è alcun effetto statisticamente significativo del rumore sulle soglie di contrasto: ($F_{(4,36)} = 2.095$, $p_{corr} = 0.102$, $\eta^2p = 0.189$). Pertanto, i livelli di intensità del rumore visivo impiegati non hanno avuto alcuna influenza sulla prestazione dei partecipanti al compito, indicando l'assenza di una relazione significativa tra la variabile indipendente "rumore" e la variabile dipendente "soglie di contrasto". I risultati indicano che la manipolazione dei livelli di rumore visivo impiegata non ha generato differenze statisticamente significative nelle performance dei partecipanti, evidenziando l'assenza di un effetto o di una correlazione tra le due variabili prese in considerazione. Difatti, le intensità di rumore utilizzate in questo studio erano molto deboli. Infine, non vi è alcuna significatività dell'effetto dell'interazione tra i due fattori (noise×posizione), indice di un'indipendenza degli effetti dei due fattori: ($F_{(12,108)} = 0.871$, $p_{corr} = 0.578$, $\eta^2p = 0.088$).

CAPITOLO 4: DISCUSSIONE GENERALE

Un'ipotesi principale è stata formulata in questa ricerca pilota, che è stata successivamente articolata maggiormente nei tre studi condotti e suddivisa in due sotto-ipotesi. La prima di queste, specificamente testata nel primo studio dei tre condotti, riguardava il potenziale miglioramento nella sensibilità al contrasto indotto da livelli intermedi di rumore visivo aggiunto nelle porzioni interne della Gabor e proporzionale all'intensità dei pixel dello stimolo stesso. Utilizzando come variabile dipendente la soglia di contrasto di osservatori normovedenti, questa ipotesi non è stata supportata dai dati. Ciò suggerisce che il rumore visivo, operazionalizzato come valori casuali di grigio di pixel proporzionali al valore dei pixel del segnale, non ha alcun effetto migliorativo sulla sensibilità al contrasto. Dovrebbe essere tenuto in considerazione che la manipolazione dell'intensità di rumore impiegata non aveva alcun effetto, né positivo né negativo, sulla prestazione degli osservatori. Come già anticipato, questo risultato si trova in contrapposizione con gli studi di psicofisica e con i modelli dell'osservatore, descritti nel primo capitolo, che hanno rilevato un'influenza negativa del rumore aggiunto agli stimoli sulla percezione visiva (Doshier & Lu, 1998; Lu & Doshier, 2008). Pertanto, questo risultato sembrerebbe essere dovuto ad una inadeguata manipolazione del contrasto del rumore, che risultava troppo debole per avere un effetto significativo. La seconda specificazione dell'ipotesi di ricerca è stata testata nel secondo e nel terzo studio condotti. Quest'ultima riguardava il potenziale effetto migliorativo di livelli intermedi di rumore visivo, aggiunto allo sfondo nel 50% dei pixel, sulla sensibilità al contrasto di osservatori normovedenti. Contrariamente alla nostra ipotesi iniziale, i dati da noi raccolti non forniscono evidenza di livelli ottimali di rumore visivo che migliorano la sensibilità al contrasto. Piuttosto, i nostri risultati suggeriscono che il rumore peggiora la performance e questo effetto dannoso sembra essere direttamente proporzionale all'intensità del rumore stesso. Inoltre, livelli di intensità di rumore molto bassi non hanno alcuna influenza sulla prestazione dei partecipanti. Infine, le osservazioni effettuate hanno messo in luce che non vi è alcuna interazione significativa tra la posizione degli stimoli e l'effetto del rumore sulla sensibilità al contrasto in nessuno dei tre studi. Tuttavia, nel primo e nel terzo studio la posizione aveva un effetto significativo sulle prestazioni indipendentemente dall'intensità del rumore. È stato osservato che le posizioni più

eccentriche erano associate a soglie più alte, mentre le posizioni parafoveali a soglie più basse. Come descritto nel primo capitolo di questo elaborato, l'acuità visiva è massima a livello della fovea in cui vi è un maggior numero di coni, e si riduce proseguendo via via verso la periferia. Pertanto, l'effetto della posizione è spiegabile in termini di eccentricità degli stimoli ed acuità visiva: all'aumentare dell'eccentricità degli stimoli⁶⁰, minore è l'acuità visiva, la sensibilità al contrasto e la percezione dei dettagli, per cui l'accuratezza della detezione si riduce (Harvey & Dumoulin, 2011). Complessivamente, le osservazioni effettuate nei tre studi pilota non forniscono alcuna evidenza del rumore "buono" (McDonnell & Abbott, 2009). I dati raccolti nella nostra ricerca non confermano le conclusioni precedentemente riportate in letteratura, secondo le quali l'aggiunta di rumore visivo agli stimoli può migliorare diverse abilità visive (Aihara et al., 2008; Battaglini et al., 2023; Itzcovich et al., 2017; Kim et al., 2006; Riani & Simonotto, 1994; Simonotto et al., 1997; Srebro & Malladi, 1999; van der Groen & Wenderoth, 2016), tra cui la sensibilità al contrasto. Una conclusione diretta che si può trarre dai risultati di questa ricerca è che la Risonanza Stocastica non si manifesta attraverso la specifica metodologia utilizzata, e che il rumore visivo esterno applicato agli stimoli può peggiorare anziché migliorare la sensibilità percettiva. Tuttavia, in letteratura sono presenti molte evidenze di Risonanza Stocastica nella percezione sensoriale in generale, compresa la percezione visiva. Sebbene questi ultimi risultino essere in numero limitato, le evidenze prodotte mostrano chiaramente l'esistenza di livelli ottimali di rumore visivo che hanno un effetto migliorativo sulla percezione visiva (Battaglini et al., 2023; Simonotto et al., 1997; van der Groen & Wenderoth, 2016). Data l'eterogeneità di questi studi, soprattutto in termini di analisi statistiche adottate, non ci è stato possibile condurre un'analisi quantitativa dell'effect size combinato per verificare la forza dell'effetto risultante. Pertanto, abbiamo condotto un'analisi qualitativa della letteratura e nella tabella seguente sono riportate sommariamente le caratteristiche degli studi che hanno riscontrato la SR in seguito all'aggiunta di rumore visivo agli stimoli in partecipanti umani. Sono stati esclusi tutti gli studi che hanno impiegato modelli matematici e/o animali, partecipanti con difetti visivi o che hanno utilizzato esclusivamente tecniche di stimolazione elettrica o magnetica transcranica come operazionalizzazione del rumore.

⁶⁰ Distanza degli stimoli dal centro del campo visivo.

Autore/i	Nome dello studio	Ann o	n	s_età media	Compito	Stimoli	VI	VD	Tipo di rumore	Indice statistico
Aihara et al.	Internal noise determines external stochastic resonance in visual perception	2008	21	20-32	Compito di detezione visiva	Quadrati	VII. Contrasto del rumore; VI2. Ampiezza del segnale; VI3. Rumore interno	Soglie percettive; % risposte corrette; d'	Rumore Gaussiano nei pixel	Non è stato fornito alcun indice statistico
Battaglini et al.	Noise in the brain: Transcranial random noise stimulation and perceptual noise act on a stochastic resonance-like mechanism	2023	42	21-33	Detezione del movimento coerente	Punti bianchi in movimento (3 deg/s)	Numerosità di punti in movimento casuale	% di risposte corrette	Livello di numerosità di punti in movimento casuale	$F [13,221] = 2.7; p = .001; \eta^2 p = .14$
Kim T. Blackwell	The Effect of White and Filtered Noise on Contrast Detection Thresholds	1997	6		Discriminazione temporale (2IFC)	Griglie sinusoidali verticali	Contrasto del rumore	Soglie di detezione del contrasto	Rumore bianco nei pixel	Non è stato fornito alcun indice statistico
Piana et al.	Role of noise in image processing by the human perceptivve system	2000	7		Riconoscimento di lettere	Lettere	Contrasto del rumore	Soglie di detezione del contrasto	Rumore gaussiano nei pixel	Indice statistico riportato solo per i primi due partecipanti (Chi-quadro)
Simonotto et al.	Visual Perception of Stochastic Resonance	1996	11	18-26	Discriminazione del contrasto	Strisce verticali	Contrasto del rumore	Soglie di detezione del contrasto	Rumore gaussiano nei pixel	Non è stato fornito alcun indice statistico
Starzynski & Engbert	Noise-enhanced target discrimination under the influence of fixational eye movements and external noise	2009	19	23,3	Compito di discriminazione di orientamento	Lettera E	Diffusione del movimento dello stimolo di fissazione (Ds)	RT	Movimento casuale dello stimolo di fissazione	linear mixed-effects model approach (lme): $Ds = 32 * 10^{\wedge -3} \text{ deg}^2 / s$
Treviño et al.	Noise Improves Visual Motion Discrimination via a Stochastic Resonance-Like Phenomenon	2016	26		Discriminazione movimento casuale di punti	Punti bianchi in movimento (7 deg/s-1)	Luminanza del rumore bianco	% risposte corrette	Luminanza rumore bianco	paired t-test, $P < 0.001$
van der Groen & Wenderoth	Transcranial Random Noise Stimulation of Visual Cortex: Stochastic Resonance Enhances Central Mechanisms of Perception	2016	31	24 (range: 20-30)	Compito di detezione visiva (2-AFC)	Gabor Patch	VII. Contrasto del rumore; VI2. Contrasto dello stimolo (sub- vs supra-threshold)	% risposte corrette	Rumore gaussiano nei pixel	ANOVA a misure ripetute: $(F(1,27) = 4.59, p = 0.041)$

Tabella 4.1 – Studi che hanno evidenziato la Risonanza Stocastica attraverso l'aggiunta di rumore di intensità variabile agli stimoli. n: numerosità del campione; VI: variabile indipendente; VD: variabile dipendente.

Non vi è alcun dubbio riguardo alla necessità di acquisire ulteriori prove al fine di poter conferire solidità a tale effetto. Ciononostante, le evidenze presenti in letteratura suggeriscono in modo abbastanza convincente l'esistenza di un effetto migliorativo del rumore visivo sulla percezione visiva, come avviene nelle altre modalità sensoriali. Come si può osservare nella tabella, gli studi sono in numero limitato e altamente eterogenei tra loro in termini di domanda di ricerca, compiti e stimoli utilizzati. Tuttavia, questi studi condividono la caratteristica di aver selezionato parametri degli stimoli in modo che risultassero impercettibili, sottosoglia, e di aver aggiunto intensità variabile di rumore visivo (Aihara et al., 2008; Battaglini et al., 2023; Blackwell, 1998; Piana et al., 2000; Simonotto et al., 1997; Starzynski & Engbert, 2009; Treviño et al., 2016; van der Groen & Wenderoth, 2016). Ciò rende necessario chiedersi quali siano i fattori che possano spiegare la mancata osservazione della Risonanza Stocastica nella ricerca presente. Infatti, è opportuno tenere a mente che vi sono varie differenze tra la metodologia impiegata in questa ricerca e la metodologia adottata dalla maggior parte degli studi in letteratura sulla SR nella percezione sensoriale visiva. Tipicamente, gli stimoli da discriminare o da rilevare sono depressi ad un livello costante di intensità, al di sotto della soglia percettiva, per cui risultano non rilevabili durante tutto il compito sperimentale. In questi studi, la soglia percettiva di riferimento era scelta in base ai risultati della letteratura oppure misurata per ogni partecipante prima del compito vero e proprio (i.e. Aihara et al., 2008; Simonotto et al., 1997; van der Groen & Wenderoth, 2016). Ad esempio, nello studio classico di Simonotto e colleghi (1997) gli stimoli originali erano artificialmente posti al di sotto di una soglia fissa, risultando non rilevabili in assenza del rumore.

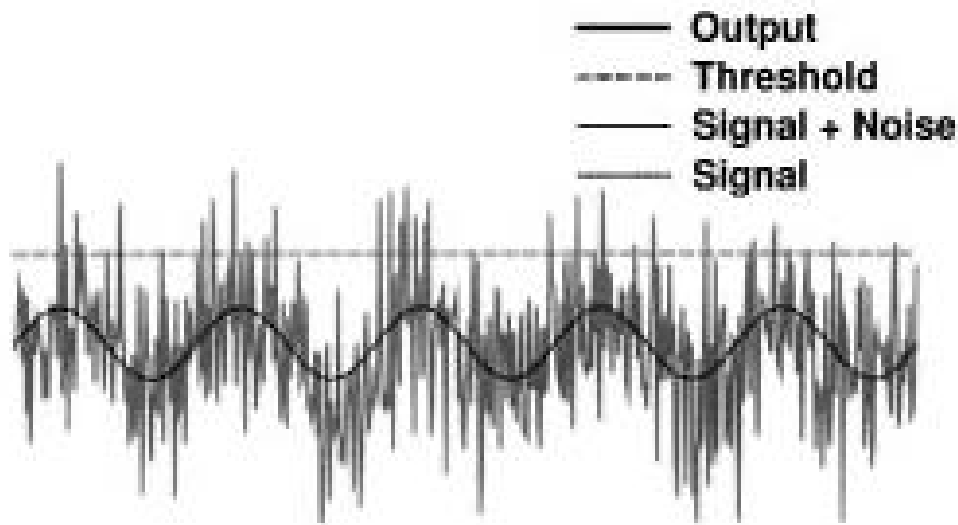


Figura 4.1 - Paradigma della soglia di risposta della SR. Lo stimolo sottosoglia è rappresentato da una sinusoide. La linea orizzontale corrisponde alla soglia mentre le linee verticali rappresentano il rumore, che favorisce il superamento della soglia (adattata da Simonotto et al., 1997)

Similmente, gli studi che hanno indagato l'effetto del rumore sulla detezione del movimento coerente di punti hanno fatto uso di parametri che rendevano il movimento impercettibile dai partecipanti nella condizione sperimentale (Battaglini et al., 2023; Treviño et al., 2016). Nello studio già citato di van der Groen e Wenderoth (2016), gli autori hanno fatto uso di un metodo adattivo psicofisico simile al nostro per misurare le soglie di contrasto per ogni singolo osservatore. Successivamente, i partecipanti sono stati suddivisi in due gruppi in funzione dell'intensità del segnale prodotto dagli stimoli, che poteva essere al di sotto della soglia o al di sopra della soglia. Nel gruppo sperimentale gli stimoli erano sottosoglia durante tutto il compito, e solo in questo caso gli autori hanno rilevato la tipica curva ad U-rovesciata, indicante la presenza di Risonanza Stocastica (van der Groen & Wenderoth, 2016). Come già ampiamente descritto, la ricerca presente ha fatto uso di un metodo psicofisico adattivo in cui una staircase one-up-three-down permetteva di calcolare le soglie di contrasto per ogni sessione. Il livello di contrasto degli stimoli si modificava in funzione delle risposte dell'osservatore, riducendosi di un passo dopo tre risposte corrette e aumentando di un livello dopo una sola risposta errata. Come si può osservare dal grafico seguente, questo metodo fa sì che lo stimolo non è situato costantemente al di sotto del livello di soglia percettiva dell'osservatore, bensì oscilla tra valori sotto- e sovrasoglia.

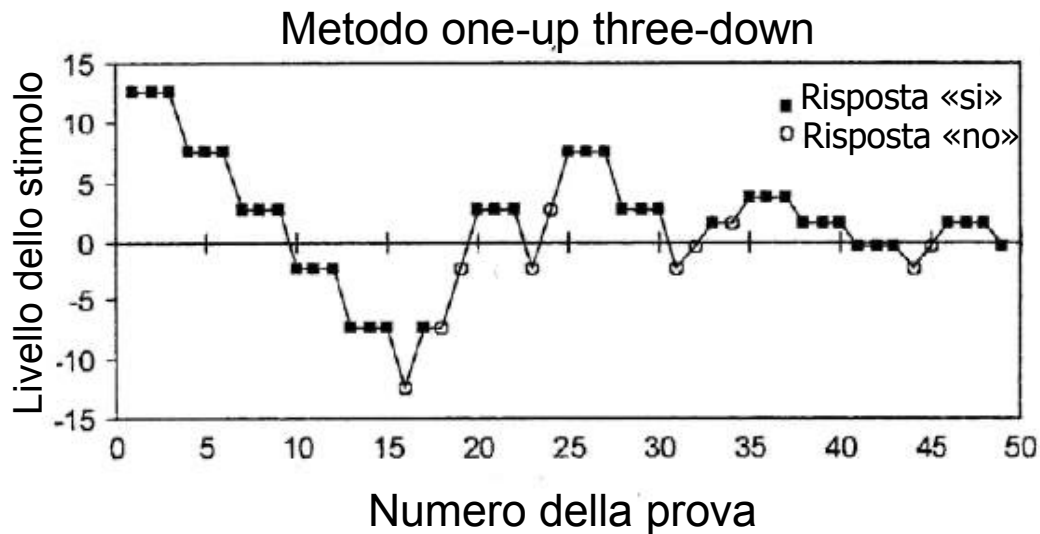


Figura 4.2 – Modificazione dell'intensità dello stimolo in funzione della risposta del partecipante con il susseguirsi delle prove attraverso un metodo adattivo psicofisico della staircase one-up-three-down.

Le osservazioni compiute in questi tre studi pilota suggeriscono la possibilità che le metodologie psicofisiche adattive, utilizzate per la riabilitazione visiva basata sull'apprendimento percettivo, potrebbero non essere idonee per investigare la Risonanza Stocastica. In altre parole, questa tipologia di metodo psicofisico non permetterebbe l'osservazione di un potenziamento rumore-indotto. Nello specifico, è plausibile che una più ampia serie di prove, in cui l'intensità dello stimolo persiste al di sotto della soglia percettiva, sia richiesta per osservare una riduzione delle soglie. È importante notare che uno degli ingredienti necessari per la manifestazione della Risonanza Stocastica è la presenza di uno stimolo sottosoglia e non rilevabile, il cui contenuto informativo viene amplificato dal rumore, agevolando un superamento della soglia (Moss, 2004). In conclusione, questa ricerca pilota fornisce indicazioni preliminari circa la potenziale applicazione della Risonanza Stocastica nei protocolli di riabilitazione basati sull'apprendimento percettivo. Più nello specifico, i dati dei tre studi non supportano l'ipotesi per cui la Risonanza Stocastica possa risultare un meccanismo psicofisico utile per ottimizzare la riabilitazione visiva basata sull'apprendimento percettivo, poiché risulta inapplicabile alle metodologie tipicamente adottate dai protocolli fino ad ora sviluppati. Tuttavia, è opportuno sottolineare che ulteriori indagini sono necessarie per corroborare tali speculazioni, che al momento rappresentano soltanto un'ipotesi.

4.1. Limiti della ricerca e prospettive future

Nonostante i risultati ottenuti nella ricerca presente, è essenziale riconoscere e affrontare i limiti che ne hanno influenzato l'interpretazione. In primo luogo, è necessario tenere in considerazione l'esigua numerosità del campione studiato. Difatti, la grandezza del campione per ognuno dei tre studi era molto limitata, constando di 10 partecipanti nel primo, di 13 partecipanti nel secondo studio e di 10 nel terzo e ultimo studio. La bassa numerosità campionaria risulta un limite in quanto associata ad una più bassa potenza statistica ed all'incapacità di poter concludere con certezza che i risultati siano rappresentativi della popolazione di riferimento oggetto di studio. Un secondo limite legato al campione studiato riguarda la grande omogeneità dei partecipanti, che consistevano per la maggior parte di studenti di Psicologia aventi un'età compresa in un intervallo molto ristretto (20-26 anni). La bassa eterogeneità del campione riduce la possibilità di generalizzare i risultati a popolazioni più ampie o diverse. Pertanto, mentre i risultati sono validi all'interno del contesto del nostro campione, è necessario cautela nell'applicarli a situazioni più ampie o eterogenee. In aggiunta, non sono stati monitorati i movimenti oculari dei partecipanti durante il compito, i quali avrebbero potuto influenzare le prestazioni degli osservatori. Nonostante questi limiti, la ricerca presente ha fornito delle indicazioni preliminari circa la possibilità di utilizzare la Risonanza Stocastica per ottimizzare la riabilitazione visiva basata sull'apprendimento percettivo. Le osservazioni effettuate non supportano l'applicabilità di questo fenomeno in questo tipo di protocolli. Tuttavia, è necessario riconoscere che risultano necessarie ulteriori prove per chiarire in modo più approfondito i meccanismi sottostanti il potenziamento sensoriale dovuto al rumore. Inoltre, nel nostro studio è stato preso in considerazione solo il rumore visivo esterno aggiunto agli stimoli. Alcuni studiosi hanno suggerito che la manifestazione della Risonanza Stocastica esterna sia modulata dai livelli di rumore interno, o rumore neurale (Aihara et al., 2008, 2010; Battaglini et al., 2023; van der Groen & Wenderoth, 2016). In particolare, due studi hanno influenzato i livelli di rumore neurale applicando la stimolazione elettrica transcranica a rumore casuale (tRNS) e hanno messo in luce che questa modulava l'effetto migliorativo del rumore sulla percezione visiva (Battaglini et al., 2023; van der Groen & Wenderoth, 2016). Di conseguenza, una prospettiva futura interessante potrebbe concentrarsi sull'esplorazione dell'effetto combinato sul processo di percezione visiva. Questo effetto sarebbe il risultato

dell'interazione tra il rumore neurale, modulato tramite l'impiego di tecniche di stimolazione, e l'aggiunta di rumore visivo esterno agli stimoli, all'interno dei compiti comunemente adottati nei protocolli di riabilitazione visiva, come ad esempio l'NRT.

CAPITOLO 5: CONCLUSIONI

L'obiettivo di questa ricerca pilota era indagare se la manipolazione dell'intensità dei livelli di rumore visivo gaussiano aggiunto ai pixel di una Gabor Patch (o dello sfondo) poteva indurre un fenomeno di potenziamento sensoriale rumore indotto, simile alla Risonanza Stocastica. In particolare, i tre studi condotti hanno esaminato se questo fenomeno fosse osservabile in un compito tipicamente utilizzato all'interno dei protocolli di riabilitazione visiva basati sull'apprendimento percettivo, che fa uso di un metodo adattivo psicofisico per la manipolazione dei livelli di contrasto dello stimolo. I risultati hanno mostrato che livelli di rumore troppo deboli non hanno alcuna influenza sulla sensibilità percettiva, suggerendo che il rumore debba avere un'intensità sufficientemente ampia affinché possa avere alcun effetto sulla visione di persone normovedenti. La relazione tra rumore e le soglie di contrasto, utilizzate come indice della prestazione dei partecipanti, è risultata essere piatta quando i valori del rumore considerati erano molto deboli. Quando l'intensità del rumore è sufficiente per influenzare le prestazioni dei partecipanti, esso riduce la sensibilità visiva in modo proporzionale alla sua intensità. Difatti, è emersa una relazione direttamente proporzionale tra l'intensità del rumore e le soglie di contrasto, indicante che all'aumentare del rumore visivo peggiora la sensibilità al contrasto di persone normovedenti. Nonostante studi precedenti (; Simonotto et al., 1997; van der Groen & Wenderoth, 2016) abbiano messo in luce che sia possibile indurre un potenziamento della sensibilità al contrasto attraverso l'aggiunta di rumore visivo in intensità intermedie e ottimali, nella ricerca presente ciò non è emerso. L'interpretazione che è stata proposta riguarda le differenze metodologiche tra questi studi e quelli in letteratura. In particolare, abbiamo suggerito che il metodo adattivo psicofisico delle staircase non è adeguato ad indurre la Risonanza Stocastica poiché gli stimoli non sono costantemente ad un livello sottosoglia. Questa caratteristica accomuna gli studi passati che hanno evidenziato questo fenomeno, e ciò potrebbe spiegare i risultati osservati. In conclusione, le osservazioni effettuate supportano l'idea per cui la Risonanza Stocastica indotta dal rumore visivo risulta inapplicabile in questo tipo di compiti. Per l'applicazione di tale fenomeno nella riabilitazione visiva potrebbe essere necessaria una diversa operazionalizzazione del rumore, ad esempio combinando il rumore visivo e la modulazione del rumore neurale attraverso tecniche di neurostimolazione.

BIBLIOGRAFIA

- Ahissar, M., & Hochstein, S. (1993). Attentional control of early perceptual learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 90(12), 5718–5722. <https://doi.org/10.1073/pnas.90.12.5718>
- Aihara, T., Kitajo, K., Nozaki, D., & Yamamoto, Y. (2008). Internal noise determines external stochastic resonance in visual perception. *Vision Research*, 48(14), 1569–1573. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2008.04.022>
- Aihara, T., Kitajo, K., Nozaki, D., & Yamamoto, Y. (2010). How does stochastic resonance work within the human brain? – Psychophysics of internal and external noise. *Chemical Physics*, 375(2–3), 616–624. <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2010.04.027>
- Allen, P. A., Namazi, K. H., Patterson, M. B., Crozier, L. C., & Groth, K. E. (1992). Impact of adult age and Alzheimer’s disease on levels of neural noise for letter matching. *Journals of Gerontology*, 47(5). <https://doi.org/10.1093/geronj/47.5.P344>
- Bahar, S., & Moss, F. (2004). Stochastic resonance and synchronization in the crayfish caudal photoreceptor. *Mathematical Biosciences*, 188(1–2), 81–97. <https://doi.org/10.1016/j.mbs.2003.09.004>
- Ball, K., & Sekuler, R. (1986). Improving Visual Perception in Older Observers 1. In *Journal of Gerontology* (Vol. 41, Issue 2). <http://geronj.oxfordjournals.org/>
- Barollo, M., Contemori, G., Battaglini, L., Pavan, A., & Casco, C. (2017). Perceptual learning improves contrast sensitivity, visual acuity, and foveal crowding in amblyopia. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 35(5), 483–496. <https://doi.org/10.3233/RNN-170731>
- Battaglini, L., Casco, C., Fertoni, A., Miniussi, C., Di Ponzio, M., & Vicovaro, M. (2023). Noise in the brain: Transcranial random noise stimulation and perceptual noise act on a stochastic resonance-like mechanism. *European Journal of Neuroscience*. <https://doi.org/10.1111/ejn.15965>
- Bays, B. C., Visscher, K. M., Le Dantec, C. C., & Seitz, A. R. (2015). Alpha-band EEG activity in perceptual learning. *Journal of Vision*, 15(10), 7. <https://doi.org/10.1167/15.10.7>
- Bear, M. F., Connors, B. W., & Paradiso, M. A. (2016). *Neuroscienze. Esplorando il cervello*. Edra.
- Benzi, R., Parisi, G., Sutera, A., & Vulpiani, A. (1982). Stochastic resonance in climatic change. *Tellus*, 34(1), 10–16. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1982.tb01787.x>
- Bialek, W. (1987). PHYSICAL LIMITS TO SENSATION AND PERCEPTION. *Annual Review of Biophysics and Biophysical Chemistry*, 16(1), 455–478. <https://doi.org/10.1146/annurev.bb.16.060187.002323>

- Blackwell, K. T. (1998). The effect of white and filtered noise on contrast detection thresholds. *Vision Research*, 38(2), 267–280. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(97\)00130-2](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(97)00130-2)
- Bola, M., Gall, C., & Sabel, B. A. (2013). The Second Face of Blindness: Processing Speed Deficits in the Intact Visual Field after Pre- and Post-Chiasmatic Lesions. *PLoS ONE*, 8(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0063700>
- Cacioppo, John. T., Tassinary, L. G., & Berntson, G. G. (2016). *Handbook of Psychophysiology*. Cambridge University Press.
- Campana, G., & Maniglia, M. (2015). Editorial: Improving visual deficits with perceptual learning. *Frontiers in Psychology*, 6(APR). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00491>
- Casco, C., Barollo, M., Contemori, G., & Battaglini, L. (2018). Neural Restoration Training improves visual functions and expands visual field of patients with homonymous visual field defects. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 36(2), 275–291. <https://doi.org/10.3233/RNN-170752>
- Cavanaugh, M. R., & Krystel R., H. (2017). *Visual discrimination training improves Humphrey perimetry in chronic cortically induced blindness*.
- Chung, S. T. L. (2011). Improving reading speed for people with central vision loss through perceptual learning. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 1164–1170.
- Clarke, C. (Charles R. A.), National Hospital for Neurology and Neurosurgery (London, E., & Institute of Neurology, Q. Square. (2009). *Neurology: a Queen Square textbook*. Wiley-Blackwell.
- Collins, J. J., Imhoff, T. T., & Grigg, P. (1997). Noise-mediated enhancements and decrements in human tactile sensation. *Physical Review E*, 56(1), 923–926. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.56.923>
- Cowey, A. (2010). The blindsight saga. In *Experimental Brain Research* (Vol. 200, Issue 1, pp. 3–24). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s00221-009-1914-2>
- Crossman, E. R., & Szafran, J. (1956). Changes with age in the speed of information-intake and discrimination. *Experientia, Suppl 4*, 128–134; discussion, 135.
- Cutmore, T. (1999). Identifying and reducing noise in psychophysiological recordings. *International Journal of Psychophysiology*, 32(2), 129–150. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(99\)00014-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(99)00014-8)
- Das, A., & Huxlin, K. R. (2010). New approaches to visual rehabilitation for cortical blindness: Outcomes and putative mechanisms. In *Neuroscientist* (Vol. 16, Issue 4, pp. 374–387). <https://doi.org/10.1177/1073858409356112>

- Denes, G. (2016). *Plasticità cerebrale. Come cambia il cervello nel corso della vita*. Carocci editore.
- Ditzinger, T., Stadler, M., Strüber, D., & Kelso, J. A. S. (2000). Noise improves three-dimensional perception: Stochastic resonance and other impacts of noise to the perception of autostereograms. *Physical Review E*, 62(2), 2566–2575. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.62.2566>
- Doshier, B. A., Jeter, P., Liu, J., & Lu, Z. L. (2013). An integrated reweighting theory of perceptual learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(33), 13678–13683. <https://doi.org/10.1073/pnas.1312552110>
- Doshier, B. A., & Lu, Z.-L. (1998). Perceptual learning reflects external noise filtering and internal noise reduction through channel reweighting. In *Psychology* (Vol. 95). www.pnas.org.
- Doshier, B., & Lu, Z.-L. (2017). *Visual Perceptual Learning and Models*. <https://doi.org/10.1146/annurev-vision-102016>
- Douglass, J. K., Wilkens, L., Pantazelou, E., & Moss, F. (1993). Noise enhancement of information transfer in crayfish mechanoreceptors by stochastic resonance. *Nature*, 365(6444), 337–340. <https://doi.org/10.1038/365337a0>
- Eriksen, B. A., & Eriksen, C. W. (1974). Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception & Psychophysics*, 16(1), 143–149. <https://doi.org/10.3758/BF03203267>
- Estes, W. K. (1972). Interactions of signal and background variables in visual processing. *Perception & Psychophysics*, 12(3), 278–286. <https://doi.org/10.3758/BF03207204>
- Fahle, M. (1997). Specificity of Learning Curvature, Orientation, and Vernier Discriminations Hyperacuity learning Transfer of learning Perceptual training Plasticity of function INTRODUCTION. In *Vision Res* (Vol. 37, Issue 14).
- Fahle, M. (2004). Perceptual learning: A case for early selection. *Journal of Vision*, 4(10), 879–890. <https://doi.org/10.1167/4.10.4>
- Fahle, M. (2005). Perceptual learning: Specificity versus generalization. In *Current Opinion in Neurobiology* (Vol. 15, Issue 2, pp. 154–160). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2005.03.010>
- Fahle, M., & Daum, I. (2002). Perceptual learning in amnesia. In *Neuropsychologia* (Vol. 40).
- Fahle, M., & Edelman, S. (1993). Long-term Learning in Vernier Acuity: Effects of Stimulus Orientation, Range and of Feedback. In *Vision Res* (Vol. 33, Issue 3).
- Fahle, M., & Poggio, T. (2002). *Perceptual Learning* (eds.). MIT PRESS.

- Faisal, A. A., Selen, L. P. J., & Wolpert, D. M. (2008). Noise in the nervous system. In *Nature Reviews Neuroscience* (Vol. 9, Issue 4, pp. 292–303). <https://doi.org/10.1038/nrn2258>
- Fiorentini, A., & Berardi, N. (1997). Visual Perceptual Learning: A Sign of Neural Plasticity at Early Stages of Visual Processing. *Archives Italiennes de Biologie*, *135*, 157–167.
- Fraser, J. A., Newman, N. J., & Biousse, V. (2011). *Disorders of the optic tract, radiation, and occipital lobe* (pp. 205–221). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52903-9.00014-5>
- Garrett, D. D., Samanez-Larkin, G. R., MacDonald, S. W. S., Lindenberger, U., McIntosh, A. R., & Grady, C. L. (2013). Moment-to-moment brain signal variability: A next frontier in human brain mapping? *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *37*(4), 610–624. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.02.015>
- Gianni, M., Liberti, M., Apollonio, F., & D’Inzeo, G. (2006). Modeling electromagnetic fields detectability in a HH-like neuronal system: stochastic resonance and window behavior. *Biological Cybernetics*, *94*(2), 118–127. <https://doi.org/10.1007/s00422-005-0029-5>
- Gilbert, C. D., Das, A., Ito, M., Kapadia, M., & Westheimer, G. (1996). Spatial integration and cortical dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *93*(2), 615–622. <https://doi.org/10.1073/pnas.93.2.615>
- Gilbert, C. D., Li, W., & Piech, V. (2009). Perceptual learning and adult cortical plasticity. In *Journal of Physiology* (Vol. 587, Issue 12, pp. 2743–2751). <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2009.171488>
- Goldstone, R. L. (1998). PERCEPTUAL LEARNING. In *Annu. Rev. Psychol* (Vol. 49). www.annualreviews.org
- Harris, H., Gliksberg, M., & Sagi, D. (2012). Generalized perceptual learning in the absence of sensory adaptation. *Current Biology*, *22*(19), 1813–1817. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.07.059>
- Harvey, B. M., & Dumoulin, S. O. (2011). The Relationship between Cortical Magnification Factor and Population Receptive Field Size in Human Visual Cortex: Constancies in Cortical Architecture. *The Journal of Neuroscience*, *31*(38), 13604–13612. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2572-11.2011>
- Herzog, M. H., & Fahle, M. (1997). The Role of Feedback in Learning Discrimination Task. In *Vision Res* (Vol. 37, Issue 15).
- Hô, N., & Destexhe, A. (2000). Synaptic Background Activity Enhances the Responsiveness of Neocortical Pyramidal Neurons. *Journal of Neurophysiology*, *84*(3), 1488–1496. <https://doi.org/10.1152/jn.2000.84.3.1488>

- Horton, J. C. (2005). Disappointing results from Nova Vision's visual restoration therapy. *British Journal of Ophthalmology*, 89(1), 1–2. <https://doi.org/10.1136/bjo.2004.058214>
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1970). The period of susceptibility to the physiological effects of unilateral eye closure in kittens. *The Journal of Physiology*, 206, 419–436.
- Hung, S. C., & Carrasco, M. (2021). Feature-based attention enables robust, long-lasting location transfer in human perceptual learning. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93016-y>
- Hussain, Z., Sekuler, A. B., & Bennett, P. J. (2009a). How much practice is needed to produce perceptual learning? *Vision Research*, 49(21), 2624–2634. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2009.08.022>
- Hussain, Z., Sekuler, A. B., & Bennett, P. J. (2009b). Perceptual learning modifies inversion effects for faces and textures. *Vision Research*, 49(18), 2273–2284. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2009.06.014>
- Huxlin, K. R. (2008). Perceptual plasticity in damaged adult visual systems. *Vision Research*, 48(20), 2154–2166. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2008.05.022>
- Huxlin, K. R., Martin, T., Kelly, K., Riley, M., Friedman, D. I., Burgin, W. S., & Hayhoe, M. (2009). Perceptual relearning of complex visual motion after V1 damage in humans. *Journal of Neuroscience*, 29(13), 3981–3991. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4882-08.2009>
- Itzcovich, E., Riani, M., & Sannita, W. G. (2017). Stochastic resonance improves vision in the severely impaired. *Scientific Reports*, 7(1), 12840. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12906-2>
- Jeter, P. E., Doshier, B. A., Liu, S. H., & Lu, Z. L. (2010). Specificity of perceptual learning increases with increased training. *Vision Research*, 50(19), 1928–1940. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2010.06.016>
- Jeter, P. E., Doshier, B. A., Petrov, A., & Lu, Z. L. (2009). Task precision at transfer determines specificity of perceptual learning. *Journal of Vision*, 9(3). <https://doi.org/10.1167/9.3.1>
- Kandel, E. R., Schwartz, J. H., Jessel, T. M., Siegelbaum, S. A., & Hudspeth, A. J. (2014). *Principi di Neuroscienze* (V. Perri & G. Spidalieri, Eds.). Casa Editrice Ambrosiana.
- Karni, A., & Sagi, D. (1991). Where practice makes perfect in texture discrimination: Evidence for primary visual cortex plasticity (perceptual learning/preattentive vision/orientation gradient/monocularity). In *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* (Vol. 88). <https://www.pnas.org>
- Kasten Erich, Wüst Stefan, Behrens-Baumann Wolfgang, & Sabel Bernhard A. (1998). Computer-based training for the treatment of partial blindness. *Nature Medicine*, 1083–1087.

- Kim, Y.-J., Grabowecky, M., & Suzuki, S. (2006). Stochastic resonance in binocular rivalry. *Vision Research*, *46*(3), 392–406. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2005.08.009>
- Krueger, L. E. (1978). A theory of perceptual matching. *Psychological Review*, *85*(4), 278–304. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.85.4.278>
- Krueger, L. E., & Allen, P. A. (1987). Same-different judgments of foveal and parafoveal letter pairs by older adults. *Perception & Psychophysics*, *41*(4), 329–334. <https://doi.org/10.3758/BF03208234>
- Laming, D. (1985). Some principles of sensory analysis. *Psychological Review*, *92*(4), 462–485. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.92.4.462>
- Law, C. T., & Gold, J. I. (2008). Neural correlates of perceptual learning in a sensory-motor, but not a sensory, cortical area. *Nature Neuroscience*, *11*(4), 505–513. <https://doi.org/10.1038/nn2070>
- Liljenström, H. (2003). Neural Stability and Flexibility: A Computational Approach. *Neuropsychopharmacology*, *28*(S1), S64–S73. <https://doi.org/10.1038/sj.npp.1300137>
- Liu, J., Lu, Z. L., & Doshier, B. A. (2010). Augmented Hebbian reweighting: Interactions between feedback and training accuracy in perceptual learning. *Journal of Vision*, *10*(10). <https://doi.org/10.1167/10.10.29>
- Lu, Z. L., Chu, W., & Doshier, B. A. (2006). Perceptual learning of motion direction discrimination in fovea: Separable mechanisms. *Vision Research*, *46*(15), 2315–2327. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2006.01.012>
- Lu, Z. L., & Doshier, B. A. (2008). Characterizing Observers Using External Noise and Observer Models: Assessing Internal Representations With External Noise. *Psychological Review*, *115*(1), 44–82. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.115.1.44>
- Maniglia, M., Cottureau, B. R., Soler, V., & Trotter, Y. (2016). Rehabilitation Approaches in Macular Degeneration Patients. *Frontiers in Systems Neuroscience*, *10*. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2016.00107>
- Maniglia, M., Pavan, A., Sato, G., Contemori, G., Montemurro, S., Battaglini, L., & Casco, C. (2016). Perceptual learning leads to long lasting visual improvement in patients with central vision loss. *Restorative Neurology and Neuroscience*, *34*(5), 697–720. <https://doi.org/10.3233/RNN-150575>
- Maniglia, M., & Seitz, A. R. (2018). Towards a whole brain model of Perceptual Learning. In *Current Opinion in Behavioral Sciences* (Vol. 20, pp. 47–55). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2017.10.004>
- Maniglia, M., Soler, V., & Trotter, Y. (2020). Combining fixation and lateral masking training enhances perceptual learning effects in patients with macular degeneration. *Journal of Vision*, *20*(10), 19. <https://doi.org/10.1167/jov.20.10.19>

- Maniglia, M., Visscher, K. M., & Seitz, A. R. (2021). Perspective on Vision Science-Informed Interventions for Central Vision Loss. *Frontiers in Neuroscience*, *15*. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.734970>
- Manjarrez, E., Mendez, I., Martinez, L., Flores, A., & Mirasso, C. R. (2007). Effects of auditory noise on the psychophysical detection of visual signals: Cross-modal stochastic resonance. *Neuroscience Letters*, *415*(3), 231–236. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2007.01.030>
- Maunsell, J. H. R., & Newsome, W. T. (1987). Visual Processing in Monkey Extrastriate Cortex. *Annual Review of Neuroscience*, *10*(1), 363–401. <https://doi.org/10.1146/annurev.ne.10.030187.002051>
- McDonnell, M. D., & Abbott, D. (2009). What is stochastic resonance? Definitions, misconceptions, debates, and its relevance to biology. In *PLoS Computational Biology* (Vol. 5, Issue 5). Public Library of Science. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1000348>
- McDonnell, M. D., & Ward, L. M. (2011). The benefits of noise in neural systems: bridging theory and experiment. *Nature Reviews Neuroscience*, *12*(7), 415–425. <https://doi.org/10.1038/nrn3061>
- McGovern, D. P., Webb, B. S., & Peirce, J. W. (2012). Transfer of perceptual learning between different visual tasks. *Journal of Vision*, *12*(11). <https://doi.org/10.1167/12.11.4>
- McIntosh, A. R., Kovacevic, N., & Itier, R. J. (2008). Increased Brain Signal Variability Accompanies Lower Behavioral Variability in Development. *PLoS Computational Biology*, *4*(7), e1000106. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1000106>
- McNamara, B., & Wiesenfeld, K. (1989). Theory of stochastic resonance. *Physical Review A*, *39*(9), 4854–4869. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.39.4854>
- Merav Ahissar, & Shaul Hochstein. (1997). *Task difficulty and the specificity of perceptual learning*.
- Morse, R. P., & Evans, E. F. (1996). Enhancement of vowel coding for cochlear implants by addition of noise. *Nature Medicine*, *2*(8), 928–932. <https://doi.org/10.1038/nm0896-928>
- Morse, R. P., & Roper, P. (2000). Enhanced coding in a cochlear-implant model using additive noise: Aperiodic stochastic resonance with tuning. *Physical Review E*, *61*(5), 5683–5692. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.61.5683>
- Moss, F. (1994). 5. Stochastic Resonance: From the Ice Ages to the Monkey's Ear. In *Contemporary Problems in Statistical Physics* (pp. 205–253). Society for Industrial and Applied Mathematics. <https://doi.org/10.1137/1.9781611971552.ch5>

- Moss, F. (2004). Stochastic resonance and sensory information processing: a tutorial and review of application. *Clinical Neurophysiology*, *115*(2), 267–281. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2003.09.014>
- Paffi, A., Apollonio, F., d’Inzeo, G., & Liberti, M. (2013). Stochastic resonance induced by exogenous noise in a model of a neuronal network. *Network: Computation in Neural Systems*, *24*(3), 99–113. <https://doi.org/10.3109/0954898X.2013.793849>
- Paffi, A., Camera, F., Apollonio, F., d’Inzeo, G., & Liberti, M. (2015). Restoring the encoding properties of a stochastic neuron model by an exogenous noise. *Frontiers in Computational Neuroscience*, *9*. <https://doi.org/10.3389/fncom.2015.00042>
- Piana, M., Canfora, M., & Riani, M. (2000). Role of noise in image processing by the human perceptive system. *Physical Review E*, *62*(1), 1104–1109. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.62.1104>
- Pinel, J. P. J., & Barnes, S. J. (2018). *Psicobiologia* (A. Facchetti, M. Ferrara, P. Marangolo, & T. Pizzorusso, Eds.). Edra.
- Polat, U. (2009). Making perceptual learning practical to improve visual functions. *Vision Research*, *49*(21), 2566–2573. <https://doi.org/10.1016/J.VISRES.2009.06.005>
- Polat, U., Ma-Naim, T., Belkin, M., & Sagi, D. (2004). *Improving vision in adult amblyopia by perceptual learning*. <https://www.pnas.org>
- Pollock, A., Hazelton, C., Rowe, F. J., Jonuscheit, S., Kernohan, A., Angilley, J., Henderson, C. A., Langhorne, P., & Campbell, P. (2019). Interventions for visual field defects in people with stroke. In *Cochrane Database of Systematic Reviews* (Vol. 2019, Issue 5). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD008388.pub3>
- Pourtois, G., Rauss, K. S., Vuilleumier, P., & Schwartz, S. (2008). Effects of perceptual learning on primary visual cortex activity in humans. *Vision Research*, *48*(1), 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2007.10.027>
- Priplata, A., Niemi, J., Salen, M., Harry, J., Lipsitz, L. A., & Collins, J. J. (2002). Noise-Enhanced Human Balance Control. *Physical Review Letters*, *89*(23), 238101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.238101>
- Ratcliff, R., Voskuilen, C., & McKoon, G. (2018). Internal and external sources of variability in perceptual decision-making. *Psychological Review*, *125*(1), 33–46. <https://doi.org/10.1037/rev0000080>
- Riani, M., & Simonotto, E. (1994). Stochastic resonance in the perceptual interpretation of ambiguous figures: A neural network model. *Physical Review Letters*, *72*(19), 3120–3123. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.72.3120>
- Russell, D. F., Wilkens, L. A., & Moss, F. (1999). Use of behavioural stochastic resonance by paddle fish for feeding. *Nature*, *402*(6759), 291–294. <https://doi.org/10.1038/46279>

- Sabel, B. A., & Kasten, E. (2000). Restoration of vision by training of residual functions. In *Curr Opin Ophthalmol* (Vol. 11). <http://journals.lww.com/co-ophthalmology>
- Sabel Bernhard A., Kenkel Sigrid, & Kasten Erich. (2004). Vision restoration therapy (VRT) efficacy as assessed by comparative perimetric analysis and subjective questionnaires. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 399–420.
- Sagi, D. (2011). Perceptual learning in Vision Research. In *Vision Research* (Vol. 51, Issue 13, pp. 1552–1566). <https://doi.org/10.1016/j.visres.2010.10.019>
- Sahraie, A., Treveltham, C. T., MacLeod, M. J., Murray, A. D., Olson, J. A., & Weiskrantz, L. (2006). Increased sensitivity after repeated stimulation of residual spatial channels in blindsight. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(40), 14971–14976. <https://doi.org/10.1073/pnas.0607073103>
- Sahraie, A., Treveltham, C. T., MacLeod, M.-J., Weiskrantz, L., & Hunt, A. R. (2013). The Continuum of Detection and Awareness of Visual Stimuli Within the Blindfield: From Blindsight to the Sighted-Sight. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 54(5), 3579. <https://doi.org/10.1167/iovs.12-11231>
- Sakurai, M. (2015). Parafovea. In *Encyclopedia of Color Science and Technology* (pp. 1–4). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27851-8_215-1
- Sasaki, Y., Nanez, J. E., & Watanabe, T. (2010). Advances in visual perceptual learning and plasticity. In *Nature Reviews Neuroscience* (Vol. 11, Issue 1, pp. 53–60). <https://doi.org/10.1038/nrn2737>
- Sato, G., Rizzo, R., Villani, G., Contemori, G., Toffoli, G., Volpe, R., & Casco, C. (2018). *La riabilitazione visiva dell'emianopsia*.
- Schwartz, S., Maquet, P., & Frith, C. (2002). *Neural correlates of perceptual learning: A functional MRI study of visual texture discrimination*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(26), 17137–17142. <https://doi.org/10.1073/pnas.242414599>
- Seitz, A. R. (2017). Perceptual learning. In *Current Biology* (Vol. 27, Issue 13, pp. R631–R636). Cell Press. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.05.053>
- Shibata, K., Sasaki, Y., Kawato, M., & Watanabe, T. (2016). Neuroimaging evidence for 2 types of plasticity in association with visual perceptual learning. *Cerebral Cortex*, 26(9), 3681–3689. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhw176>
- Shibata, K., Watanabe, T., Sasaki, Y., & Kawato, M. (2011). Perceptual learning incepted by decoded fMRI neurofeedback without stimulus presentation. *Science*, 334(6061), 1413–1415. <https://doi.org/10.1126/science.1212003>
- Simonotto, E., Riani, M., Seife, C., Roberts, M., Twitty, J., & Moss, F. (1997). *Visual Perception of Stochastic Resonance*.

- Simonotto, E., Spano, F., Riani, M., Ferrari, A., Levrero, F., Pilot, A., Renzetti, P., Parodi, R. C., Sardanelli, F., Vitali, P., Twitty, J., Chiou-Tan, F., & Moss, F. (1999). fMRI studies of visual cortical activity during noise stimulation. *Neurocomputing*, 26–27, 511–516. [https://doi.org/10.1016/S0925-2312\(99\)00042-9](https://doi.org/10.1016/S0925-2312(99)00042-9)
- Speranza, F., Moraglia, G., & Schneider, B. A. (1997). Noise-Limited Detection in Young and Old Observers. *Perceptual and Motor Skills*, 84(3), 829–830. <https://doi.org/10.2466/pms.1997.84.3.829>
- Srebro, R., & Malladi, P. (1999). Stochastic resonance of the visually evoked potential. *Physical Review E*, 59(3), 2566–2570. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.59.2566>
- Stacey, W. C., & Durand, D. M. (2001). Synaptic Noise Improves Detection of Subthreshold Signals in Hippocampal CA1 Neurons. *Journal of Neurophysiology*, 86(3), 1104–1112. <https://doi.org/10.1152/jn.2001.86.3.1104>
- Starzynski, C., & Engbert, R. (2009). Noise-enhanced target discrimination under the influence of fixational eye movements and external noise. *Chaos*, 19(1). <https://doi.org/10.1063/1.3098950>
- Sternad, D. (2018). It's not (only) the mean that matters: variability, noise and exploration in skill learning. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 20, 183–195. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2018.01.004>
- Strum, A., & Fenigstein, A. (2014). Complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) X-ray sensors. In *High Performance Silicon Imaging: Fundamentals and Applications of CMOS and CCD sensors* (pp. 348–372). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1533/9780857097521.2.348>
- Swienton, D. J., & Thomas, A. G. (2014). The Visual pathway-functional anatomy and pathology. *Seminars in Ultrasound, CT and MRI*, 35(5), 487–503. <https://doi.org/10.1053/j.sult.2014.06.007>
- Tarita-Nistor, L., Brent, M. H., Steinbach, M. J., Markowitz, S. N., & González, E. G. (2014). Reading Training with Threshold Stimuli in People with Central Vision Loss: A Feasibility Study. *Optometry and Vision Science* 91(1), 86–96.
- Tran, T. T., Rolle, C. E., Gazzaley, A., & Voytek, B. (2020). Linked Sources of Neural Noise Contribute to Age-related Cognitive Decline. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 32(9), 1813–1822. https://doi.org/10.1162/jocn_a_01584
- Traynelis, S. F., & Jaramillo, F. (1998). Getting the most out of noise in the central nervous system. *Trends in Neurosciences*, 21(4), 137–145. [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(98\)01238-7](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(98)01238-7)
- Treccani, G. (n.d.). Rumore. In *Treccani online*.
- Treisman, M. (1964). Noise And Weber's Law: The Discrimination Of Brightness And Other Dimensions. In *Psychological Review* (Vol. 71, Issue 4).

- Treviño, M., De la Torre-Valdovinos, B., & Manjarrez, E. (2016). Noise Improves Visual Motion Discrimination via a Stochastic Resonance-Like Phenomenon. *Frontiers in Human Neuroscience*, *10*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00572>
- Ungerleider, L. G., & Haxby, J. V. (n.d.). “What” and “where” in the human brain *Introduction*.
- van der Groen, O., & Wenderoth, N. (2016). Transcranial Random Noise Stimulation of Visual Cortex: Stochastic Resonance Enhances Central Mechanisms of Perception. *The Journal of Neuroscience*, *36*(19), 5289–5298. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4519-15.2016>
- Ward, L., Desai, S., Rootman, D., Tata, M., & Moss, F. (2001). Noise can help as well as hinder seeing and hearing. *Bull. Am. Phys. Soc.*, *46*, N23.002.
- Watanabe, T., Nānez, J. E., & Sasaki, Y. (2001). Perceptual learning without perception. *Nature*, *413*, 844–848.
- Welford, A. T. (1958). *Aging and human skill*. Oxford University Press.
- Wiesenfeld, K., & Moss, F. (1995). Stochastic resonance and the benefits of noise: from ice ages to crayfish and SQUIDS. *Nature*, *373*(6509), 33–36. <https://doi.org/10.1038/373033a0>
- Xiao, L. Q., Zhang, J. Y., Wang, R., Klein, S. A., Levi, D. M., & Yu, C. (2008). Complete Transfer of Perceptual Learning across Retinal Locations Enabled by Double Training. *Current Biology*, *18*(24), 1922–1926. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.10.030>
- Yashar, A., & Denison, R. N. (2017). Feature reliability determines specificity and transfer of perceptual learning in orientation search. *PLoS Computational Biology*, *13*(12). <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1005882>
- Zeng, F.-G., Fu, Q.-J., & Morse, R. (2000). Human hearing enhanced by noise. Published on the World Wide Web on 23 May 2000. *Brain Research*, *869*(1–2), 251–255. [https://doi.org/10.1016/S0006-8993\(00\)02475-6](https://doi.org/10.1016/S0006-8993(00)02475-6)
- Zhang, J. Y., Zhang, G. L., Xiao, L. Q., Klein, S. A., Levi, D. M., & Yu, C. (2010). Rule-based learning explains visual perceptual learning and its specificity and transfer. *Journal of Neuroscience*, *30*(37), 12323–12328. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0704-10.2010>
- Zhang, X., Kedar, S., Lynn, M. J., Newman, N. J., & Biousse, V. (2006). Natural history of homonymous hemianopia. *Neurology*, *66*(6), 901–905. <https://doi.org/10.1212/01.wnl.0000203338.54323.22>

