

**ALMA MATER STUDIORUM -UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
CAMPUS DI CESENA**

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA BIOMEDICA

**Basi neurali della percezione visiva conscia e inconscia:
evidenze da studi su potenziali evento-correlati**

Elaborato in

Sistemi Neurali

Relatore

Prof.ssa Elisa Magosso

Presentato da

Alberto Porisini

Anno Accademico 2017/2018

INDICE

Introduzione 4

Capitolo 1 6

- 1.1 ELETTROENCEFALOGRAFIA (EEG)6
- 1.2 Potenziali Evento Correlati (ERP)13
- 1.3 Conclusioni.....21

Capitolo 2: Metodologie di analisi di Potenziali Evento Correlati 21

- 2.1 Analisi nel dominio del tempo .22
- 2.2 Analisi tempo-frequenza27
 - 2.2.1 La Trasformata di Fourier e i suoi limiti29
 - 2.2.2 La Short-Time Fourier Transform ed i suoi limiti.....31
 - 2.2.3 La Trasformata Wavelet e i suoi vantaggi38
- 2.3 Applicazione dei metodi tempo-frequenza ai segnali ERP45

Capitolo 3: Modelli concettuali della consapevolezza visiva e studi di lesioni 52

- 3.1 Il sistema visivo nell'uomo..... 53
- 3.2 Modelli concettuali della consapevolezza visiva..... 58
- 3.3 Studi di lesioni 62

Capitolo 4: Studi ERP di percezione visiva conscia e inconscia 65

- 4.1 I paradigmi sperimentali ERP per lo studio della visione conscia.... 66
- 4.2 Teorie della consapevolezza visiva e risposte ERP 70
- 4.3 La componente P100 75
- 4.4 Visual Awareness Negativity .. 78
- 4.5 Late positivity 84
- 4.6 Analisi tempo-frequenza in paradigmi di percezione conscia ed inconscia 89

Conclusioni 98

Bibliografia 102

Introduzione

Il lavoro svolto nel presente elaborato ha riguardato i Potenziali Evento Correlati (Event-Related Potential) in risposta a stimoli visivi; in particolare, sulla base della letteratura scientifica, si è voluto fornire una panoramica su come studi basati su ERP possano fare luce sulla dinamica temporale dei processi alla base dell'esperienza soggettiva del vedere, ovvero della consapevolezza visiva.

I moderni metodi di imaging cerebrale, quali risonanza magnetica funzionale (fMRI) e PET sebbene riescano a fornire valide informazioni su quali aree neurali vengono attivate durante i processi cognitivi, e quindi anche i processi visivi, hanno però una bassa risoluzione temporale non permettendo di rilevare il decorso temporale dell'elaborazione cerebrale e l'ordine temporale con cui le diverse aree neurali vengono attivate.

Informazioni circa la dinamica dei processi neurali ad una elevata risoluzione temporale (dell'ordine del millisecondo) possono essere ottenute mediante registrazione elettroencefalografiche acquisite mentre il soggetto esegue uno specifico task. I cambiamenti di potenziale elettrico che sono 'time-locked' (letteralmente legati nel tempo) all'evento cognitivo o sensoriale sono chiamati potenziali cerebrali evento correlati (ERP). Essi possono essere generati in risposta a stimoli esterni di qualunque natura (visivi, motori, uditivi etc.) e appaiono come un metodo ideale per seguire l'andamento temporale dell'elaborazione neurale durante il task con precisione del millisecondo. Ogni volta che ci viene presentato uno stimolo un potenziale evento correlato viene generato. Questa risposta però è immersa nel segnale EEG di fondo poiché è di ampiezza molto inferiore e quindi richiede specifiche elaborazioni per poter essere rilevata. La tecnica comunemente utilizzata per estrarre segnali ERP è detta di Averaging e consiste nel mediare segmenti di segnale EEG sincronizzati rispetto all'istante di applicazione dello stimolo.

I potenziali ERP, una volta estratti, si presentano come una serie di deflessioni positive o negative dette componenti o picchi del segnale. Tali componenti si differenziano una dall'altra a seconda della loro ampiezza, latenza dallo stimolo che le ha generate, polarità e distribuzione sullo scalpo. Per estrarre informazioni dagli ERP, vengono eseguite analisi nel dominio dei tempi, analisi nel dominio della frequenza e analisi tempo-frequenza.

La tecnica basata su ERP sembra essere l'approccio ottimale per investigare un problema centrale nelle moderne neuroscienze cognitive, ovvero la consapevolezza visiva; gli studi basati su risposte ERP a stimoli visivi cercano di comprendere quali siano le aree neurali e le tempistiche che

consentono alle informazioni visive che riceviamo in ingresso di raggiungere la consapevolezza, per poter entrare nell'esperienza soggettiva ed essere riportate verbalmente. La vista è probabilmente il principale sistema sensoriale attraverso il quale ci rapportiamo con il mondo esterno e pur essendo uno dei sistemi più studiati e probabilmente meglio conosciuti del nostro sistema nervoso, quali siano i correlati neurali della consapevolezza visiva è ancora una questione aperta e ampiamente dibattuta.

La tesi è organizzata nel seguente modo.

Nel primo capitolo viene brevemente descritta l'elettroencefalografia, ovvero la registrazione dell'attività elettrica cerebrale mediante elettrodi sullo scalpo. Quindi si introducono i potenziali evento correlati, descrivendo la metodica dell'Averaging per la loro estrazione del segnale EEG di fondo, e si descrivono brevemente le principali componenti (deflessioni) che si presentano in generale nelle risposte ERP.

Il secondo capitolo descrive più nel dettaglio le specifiche componenti dei potenziali ERP visivi, indicando per ciascuna componente, le aree cerebrali e i processi cognitivi ad essa associati. Inoltre in questo capitolo viene dato ampio spazio alla metodologia di analisi tempo-frequenza delle risposte ERP basata sulla Trasformata Wavelet (particolarmente adatta allo studio di segnali fortemente non stazionari, quali sono appunto i segnali EEG e le risposte ERP).

Il terzo capitolo presenta il sistema visivo nell'uomo, partendo dalla retina (contenente i fotorecettori) per arrivare alla corteccia visiva primaria e alle cortecce visive di ordine superiore. Inoltre vengono presentate alcune teorie circa le basi neurali della consapevolezza visiva, basate anche su studi di lesioni (ovvero studi che investigando l'alterazione di percezione visiva in soggetti umani che hanno subito danni a regioni della corteccia visiva cercano di inferire il ruolo funzionale delle aree danneggiate).

Infine il quarto capitolo, descrive i principali lavori nella letteratura scientifica basati su ERP che investigano le aree e le dinamiche neurali alla base della consapevolezza visiva. In tale capitolo, si descrivono i paradigmi sperimentali utilizzati per manipolare la consapevolezza visiva (ovvero paradigmi sperimentali che consentono di produrre esperienze soggettive di consapevolezza e non consapevolezza visiva a fronte degli stessi stimoli fisici). Quindi si esaminano le principali componenti e ritmi ERP che sono stati messi in relazione a fenomeni di percezione conscia e inconscia e i risultati sono commentati in relazione alle teorie esistenti circa le basi neurali della consapevolezza visiva.

Infine vengono presentate delle brevi conclusioni sul lavoro svolto.

Capitolo 1

1.1 ELETTROENCEFALOGRAFIA (EEG)

La tecnica di elettroencefalografia nasce agli inizi del 900, più precisamente nel 1924, grazie al medico tedesco Hans Berger che per la prima volta registrò l'attività elettrica all'interno del cervello di un ragazzo sottoposto ad un intervento chirurgico, utilizzando aghi di acciaio bagnati di zinco successivamente inseriti nel tessuto sottocutaneo.

Qui viene riportata la prima definizione di elettroencefalogramma data proprio dal medico tedesco:

“The electroencephalogram represents a continuous curve with continuous oscillations in which [...] one can distinguish larger first order waves with an average duration of 90 milliseconds and smaller second order waves of an average duration of 35 milliseconds”

Da quel momento in avanti lo studio e l'analisi dell'attività elettrica del cervello umano ha avuto considerevoli sviluppi sotto tutti i punti di vista: praticità, affidabilità delle misure, minore invasività dell'esame. Siamo passati ad esempio dall'utilizzo di strumentazioni elettroencefalografiche basate su valvole termoioniche ad una tecnologia sempre più sviluppata basata su transistor e circuiti integrati digitali che non solo consentono la registrazione dell'attività elettrica cerebrale, ma anche la sua elaborazione a posteriori e la successiva memorizzazione su supporti fissi.

Il sistema nervoso è costituito da un complesso di organi e tessuti specializzati, la cui funzione principale è quella di ricevere e riconoscere stimoli provenienti dall'ambiente esterno o interno dell'organismo e successivamente di elaborare risposte coordinate e sincronizzate volontarie o involontarie. Il neurone, cellula base del sistema nervoso, è un particolare tipo di cellula eccitabile in grado di ricevere, elaborare e trasmettere informazioni alle cellule adiacenti per mezzo di impulsi elettrici, meglio denominati potenziali d'azione.

L'**elettroencefalografia (EEG)** di superficie è quindi una metodologia strumentale elettrofisiologica che consiste nella registrazione dell'attività elettrica cerebrale sia di background, cioè in condizioni di riposo, sia durante processi sensoriali, cognitivi o motori mediante elettrodi posizionati sul cuoio capelluto del paziente ottenendo un tracciato in forma grafica dell'attività dell'encefalo.

L'EEG registra informazioni di tipo funzionale che permettono di seguire la dinamica spazio-temporale dell'attività cerebrale.

Tale apparecchiatura, l'elettroencefalografo, permette quindi di misurare in modo piuttosto accurato e affidabile i potenziali sulla superficie dell'encefalo, i quali sono generati dalla materia grigia (corteccia cerebrale). Il segnale elettrico dell'encefalo è generato dalla corrente extracellulare dovuta all'attività sinaptica di un numero molto elevato di neuroni, in particolare neuroni corticali piramidali che giacciono in corrispondenza dell'area corticale sottostante l'elettrodo utilizzato durante la rilevazione.

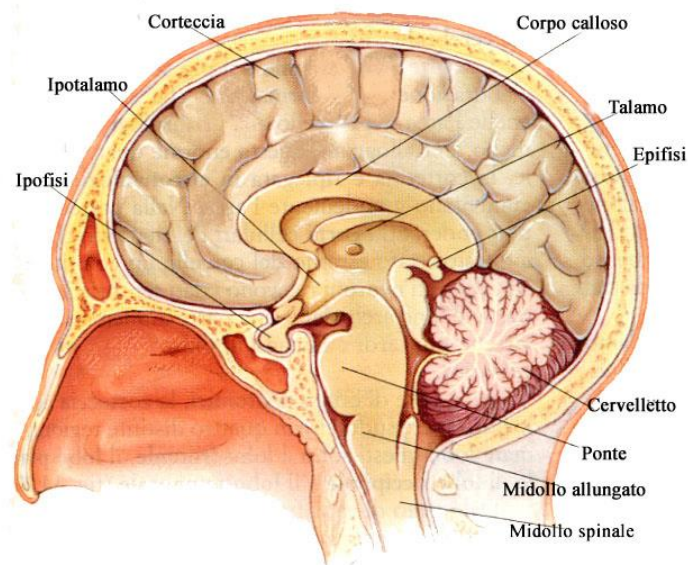


Figura 1: sistema nervoso centrale

Sebbene ogni neurone contribuisca in parte all'attività elettrica all'interno dell'encefalo, il contributo singolo di ogni neurone è troppo piccolo per essere rilevato tramite EEG.

Un'ulteriore difficoltà nel rilevare il segnale elettroencefalografico è data dal fatto che il potenziale generato all'interno dell'encefalo deve attraversare una serie di "ostacoli" (cute, cranio formato da tessuto osseo, meningi), i quali attenuano significativamente il segnale, prima di poter essere rilevato dagli elettrodi posti sullo scalpo del paziente. È necessario quindi che un numero elevato di cellule nervose si attivino in modo sincrono e coordinato così da generare un segnale sufficientemente elevato tale da far sì che l'apparecchiatura EEG riesca a rilevarlo adeguatamente. Migliaia/milioni di neuroni quindi cooperano tra loro, se eccitati contemporaneamente, in modo tale da dare in uscita un segnale EEG complessivo che corrisponde alla somma delle singole componenti (interferenza costruttiva se le singole componenti sono in fase). Il segnale elettroencefalografico registrato in superficie riflette l'attività post-sinaptica sincrona di intere popolazioni di neuroni.

Per elettroencefalogramma si intende la differenza di potenziale elettrico tra un elettrodo attivo (esplorante), posizionato di solito superficialmente al sito del quale si vuole monitorare l'attività, e un elettrodo che funge da riferimento, collocato ad una certa distanza dal primo in corrispondenza di una regione elettricamente inerte o comunque sufficientemente lontano dagli elettrodi d'interesse dove ci si aspetta di osservare i principali effetti (nuovamente sullo scalpo se si tratta di riferimento cefalico, oppure in altri punti del corpo quali lobi auricolari, dorsi delle mani nel caso di riferimento non-cefalico).

Elettrodi utilizzati

I principali elettrodi utilizzati nell'elettroencefalografia di superficie sono in oro o in argento con differenze a seconda del tipo di elettrodo utilizzato.



Figura 2: elettrodi per EEG

Le principali caratteristiche di un elettrodo devono essere le seguenti:

- Deve assicurare un contatto stabile e prolungato con la cute, in modo tale da ridurre gli errori durante la misurazione
- Aderire perfettamente alla superficie che si vuole analizzare in modo da minimizzare le dispersioni di corrente
- Deve essere progettato in modo tale da garantire la resistenza minima al passaggio di corrente

Vediamo ora i principali tipi di elettrodi utilizzati in un esame EEG per meglio comprendere la procedura:

- 1) Elettrodi fissati sullo scalpo del paziente: sono elettrodi d'oro o più comunemente argento rivestito di cloruro d'argento con una forma a coppa di diametro variabile tra gli 0.1-1 cm. Per fissare gli elettrodi è necessario ripulire la zona di interesse, applicare un gel conduttivo con lo scopo di diminuire l'impedenza naturale della pelle, la quale ha caratteristiche di isolante, migliorando quindi la conduttività.
- 2) Cuffia di elettrodi: il tipo di elettrodo è analogo a quello del punto precedente, ma gli elettrodi sono mantenuti in posizione tramite una cuffia elasticizzata che si adatta facilmente alla conformazione dello scalpo del paziente. Si utilizza questo tipo di soluzione quando si vogliono analizzare numerosi punti sulla superficie dello scalpo. Rispetto alla soluzione precedente, ha il vantaggio di un tempo di propagazione molto inferiore, a discapito però di una minore stabilità meccanica degli elettrodi.

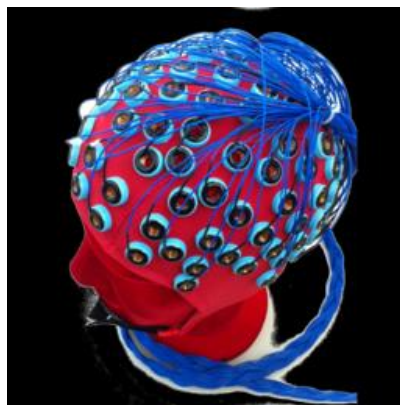


Figura 3: cuffia di elettrodi per EEG

- 3) Elettrodi ad aghi ipodermici: sono costituiti da aghi di acciaio o platino non clorurati di lunghezza variabile da 1 a 2 cm, di diametro pari a circa 1 mm ed eventualmente ricurvi

all'estremità. Sono elettrodi che vengono inseriti direttamente sotto-cute, ma a causa della loro invasività vengono utilizzati quasi esclusivamente in caso di interventi chirurgici o pazienti in terapia intensiva.

Quello che manca da chiarire è come vengono posizionati gli elettrodi sullo scalpo del soggetto; per fare questo è stato definito uno schema di posizionamento standard in modo tale da rendere le misurazioni confrontabili chiamato Sistema Internazionale 10-20. Secondo questo standard ogni elettrodo viene identificato da una lettera maiuscola F=frontale, O=occipitale, T=temporale, C=centrale, P=parietale in base alla zona in cui è collocato. La lettera è seguita da un numero pari se l'elettrodo si trova nell'emisfero destro, viceversa il numero sarà dispari. Vi è un'unica eccezione; quando l'elettrodo è posizionato nella zona mediana la lettera maiuscola è seguita dalla lettera z minuscola.

Grazie a questa standardizzazione è possibile catalogare i segnali provenienti da specifiche aree cerebrali di interesse in base al lobo di rilevamento.

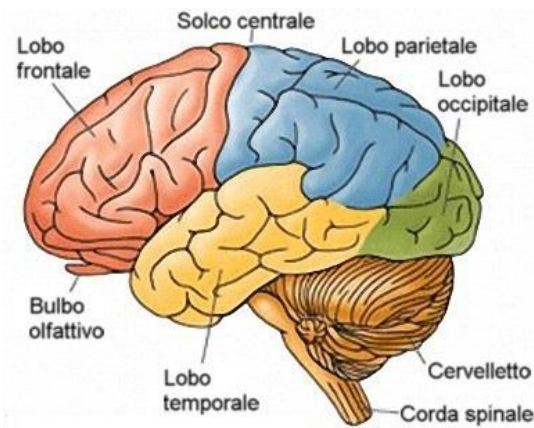


Figura 5: suddivisione del sistema nervoso centrale nei diversi lobi

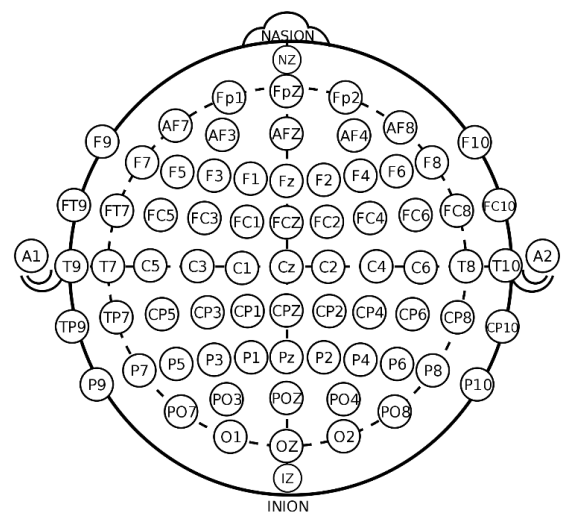


Figura 4: rappresentazione del sistema internazionale 10-20 con 32 elettrodi in ciascun emisfero

Il segnale elettroencefalografico

La rappresentazione grafica della registrazione tramite elettroencefalografia è detta Elettroencefalogramma.

Il tracciato viene visualizzato su monitor e successivamente può essere archiviato su CD, DVD o Hard disk. L'analisi EEG viene svolta principalmente per monitorare e diagnosticare eventuali patologie come epilessia, disturbi del sonno, traumi cranici e molte altre.

Il tracciato EEG si presenta a prima vista come una serie di fluttuazioni del segnale. Tali onde identificano le componenti del segnale elettroencefalografico. All'interno di queste fluttuazioni è possibile identificare oscillazioni in specifiche bande di frequenza dette "ritmi EEG", ognuno dei quali si differenzia dall'altro in base al suo contenuto spettrale.

Proprio grazie a questa suddivisione in frequenza sono stati definiti 4 principali ritmi EEG, utili per la diagnosi:

- 1) Ritmo theta: in condizioni normali il ritmo theta si presenta nelle prime fasi del sonno, quando si è ancora in una situazione di dormiveglia con un contenuto frequenziale tra 4 e 7 Hz con ampiezza tra 20-100 microvolt. Sono onde tipicamente localizzate nella regione temporo-parietale e sono di particolare interesse scientifico poiché associate a processi di memoria e apprendimento.
- 2) Ritmo alpha: è il così detto ritmo base dell'EEG infatti viene misurato su un paziente sveglio mentre questo tiene gli occhi chiusi (condizione di rilassamento); difatti si interrompe all'apertura degli occhi. È caratterizzato da una frequenza che varia da 8 a 13 Hz e da un'ampiezza media di circa 30 microvolt. L'attenuazione delle onde alpha sembra essere correlata ad una maggiore disponibilità a ricevere uno stimolo sensoriale o motorio.
- 3) Ritmo beta: è rilevato quando un paziente è ad occhi aperti e impegnato in attività cerebrale qualsiasi; in condizioni di attenzione e concentrazione quando le aree corticali sono attive. È caratterizzato da un intervallo di frequenza 14-30 Hz e da un'ampiezza media che va da 1 a 20 microvolt.

- 4) Ritmo delta: sono onde che si rilevano nei periodi di sonno più profondo, più precisamente nella quarta fase del sonno, detto anche ad “onde lente”, poco prima della fase REM (quinta fase del sonno). Se rilevate in condizioni di veglia sono da attribuire a cause patologiche cerebrali come coma o forme tumorali. Hanno una frequenza minore di 4 Hz e una tensione media di 150 microvolt.

- 5) Onde Gamma: sono localizzate nelle regioni frontali e come le onde beta sono rilevate in condizioni di attenzione e concentrazione. Sono associate a fasi di elaborazione attiva e sono più evidenti in attività cognitive di alto livello che richiedono di integrare informazioni elaborate in aree cerebrali differenti. A differenza delle onde beta però hanno un contenuto in frequenza diverso, maggiore di 30 Hz.

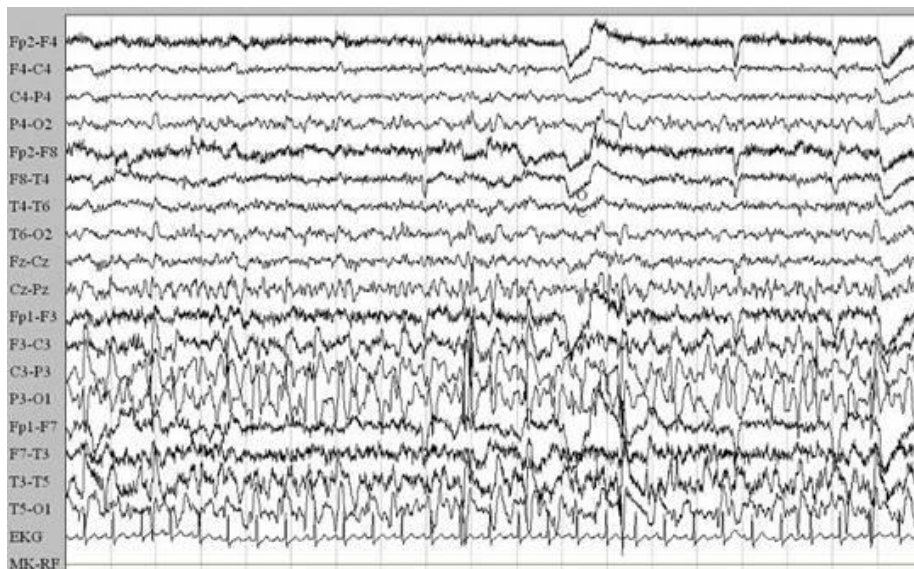


Figura 6: rappresentazione Segnale EEG

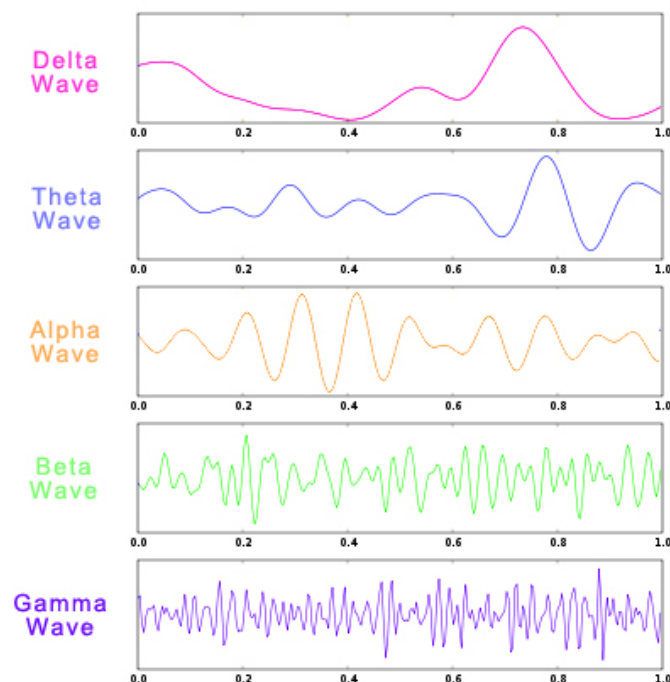


Figura 7: ritmi EEG

1.2 Potenziali Evento Correlati (ERP)

Nella precedente parte ci siamo soffermati sulle caratteristiche base dell'analisi elettroencefalografica, come viene effettuata, a che cosa serve e i principali strumenti utilizzati. Cercheremo ora di inoltrarci più nel dettaglio cercando di capire come il segnale EEG rilevato può essere sfruttato al fine di comprendere meglio la complessa struttura di reti neurali che sono alla base del nostro sistema nervoso.

Oltre all'attività spontanea del cervello che può essere misurata in modo continuo e viene descritta attraverso una classificazione dei principali tipi di onde cerebrali che la caratterizzano (onde gamma, theta, alfa, beta e delta), risulta molto interessante capire che cosa accada all'interno delle nostre reti neurali quando siamo soggetti a qualche stimolo esterno di qualsiasi natura.

L'analisi dei potenziali evento correlati e le moderne tecniche di imaging cerebrale sono i principali metodi di analisi delle reti neurali che stanno alla base del nostro elaborare, interpretare, trasmettere ed immagazzinare informazioni dall'ambiente esterno. Ciò che differenzia principalmente i due metodi è che le recenti tecniche di Neuroimaging come Tomografia ad emissione di positroni (PET), risonanza magnetica funzionale (fMRI), spettroscopia ad infrarossi (NIRSI) e Magnetoencefalografia (MEG) non riescono a rilevare il decorso temporale dell'elaborazione neurale o l'ordine temporale in cui le aree neurali vengono attivate, fornendoci quindi un risultato a bassa risoluzione temporale.

La tecnica che ci permette di superare tale limite e di concentrare la nostra attenzione proprio sull'analisi della dinamica temporale dei processi neurali è proprio l'analisi degli EVENT RELATED POTENTIAL (ERP).

I potenziali evento correlati sono fluttuazioni di tensione, nell'attività EEG spontanea in corso, molto piccole generate nelle strutture cerebrali in risposta a stimoli specifici. Queste piccole variazioni di tensione sono quindi time-locked poiché a latenza fissa rispetto all'evento esterno che le ha provocate, ecco perché gli ERP vengono anche più comunemente denominati potenziali evocati.

Quello che solitamente viene fatto è quindi presentare uno stimolo esterno di qualsiasi tipo ad un soggetto e successivamente valutare come il soggetto elabora e risponde allo stimolo stesso.

A seconda dell'area neurale attivata e del compito funzionale (successiva risposta), i processi che seguono un evento esterno possono essere categorizzate in varie classi, in modo tale da rendere più chiari gli studi successivi:

- Processi sensoriali visivi: riconoscimento di colori, scritte, forme e oggetti di varia natura
- Processi sensoriali uditivi: riconoscimento di suoni a diverse frequenze e tonalità
- Processi motori
- Processi affettivi: associati ad emozioni positive o negative
- Processi di controllo cognitivo: selezione di una risposta appropriata tra più scelte possibili o inibizione di un'azione preparata [1]

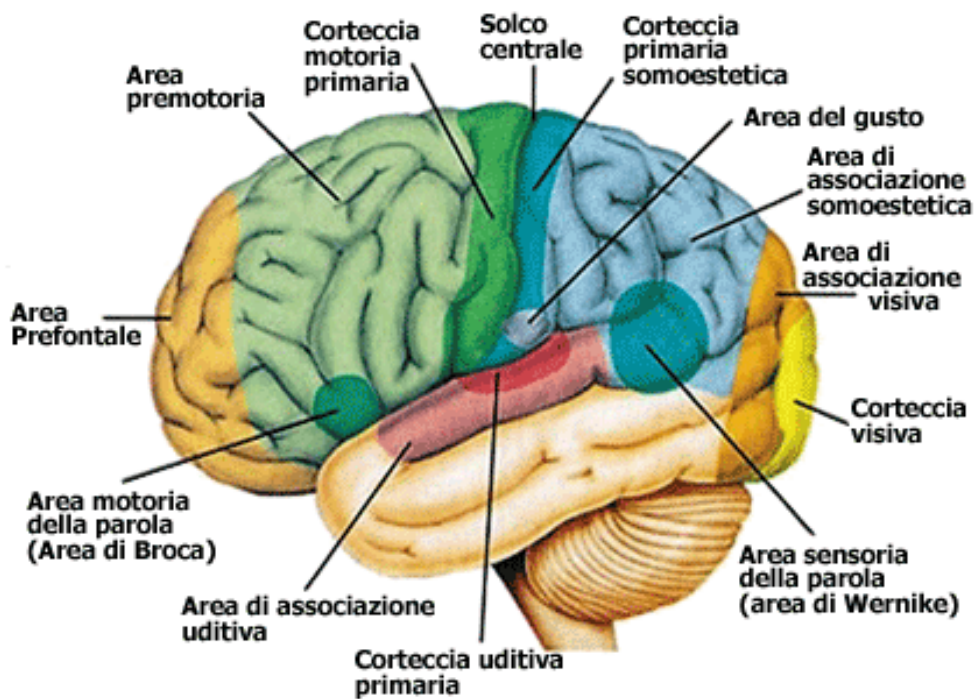


Figura 8: suddivisione delle aree sensoriali cerebrali

Gli ERP sono molto usati nell'ambito della neuropsicologia e delle neuroscienze per studiare il cervello umano intatto e vedere come questo elabora i segnali provenienti dall'esterno e produce una

conseguente risposta. Grazie a questa tecnica siamo quindi in grado di valutare i processi neurofisiologici di più basso livello, tipicamente di ambito puramente sensoriale, e allo stesso tempo processi di più alto livello come l'attenzione selettiva, l'aggiornamento della memoria, la comprensione semantica dell'evento.

I neuroni corticali infatti se stimolati si attivano e producono potenziali post sinaptici inibitori o eccitatori. Se tali neuroni vengono eccitati sincronicamente e sono similmente orientati in una certa area della corteccia, i potenziali post sinaptici si sommano in fase producendo un campo complessivo extracellulare sufficientemente elevato tale da poter esser rilevato in superficie grazie agli elettrodi posti sullo scalpo.

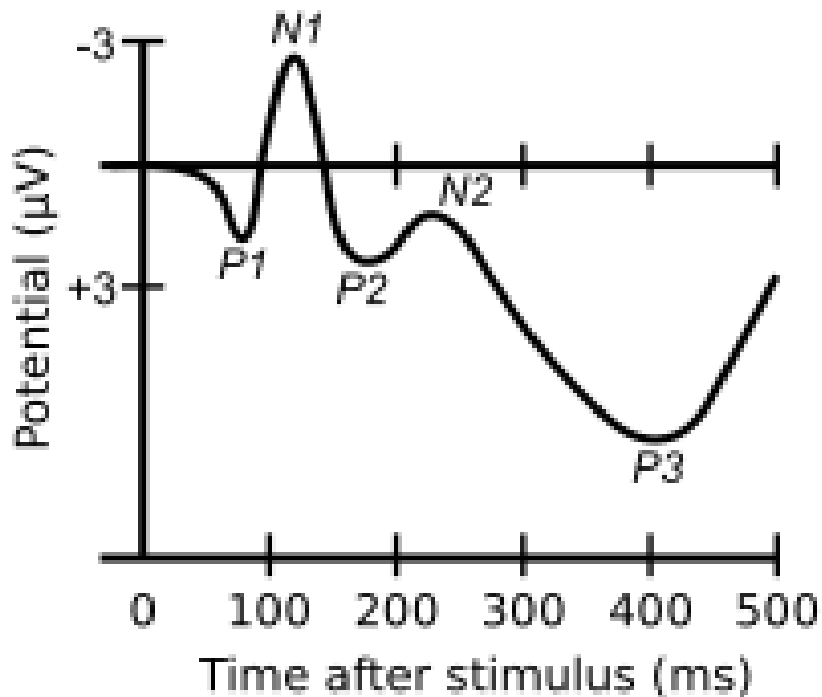


Figura 9: tracciato di un potenziale evento correlato generico

La figura 9 riportata sopra mostra un generico andamento di tracciato per un potenziale evento correlato. Come si può notare in figura, la generica onda ERP è una sequenza di deflessioni positive

e negative distribuite in serie. Ciascuna di queste deflessioni sia essa positiva o negativa prende il nome di picco/componente ERP e l'intera sequenza può durare circa mezzo secondo post-stimolo.

Le componenti ERP possono essere suddivise in due macrocategorie: componenti esogene e componenti endogene. Le prime sono deflessioni che raggiungono un picco nei primi 100 millisecondi post-stimolo e dipendono per la maggior parte dalle caratteristiche fisiche e sensoriali dello stimolo utilizzato (visivo, uditivo, motorio). Le seconde invece sono componenti più tardive e riflettono processi di più alto livello, come ad esempio accesso alla memoria, attenzione selettiva e il "significato" che il soggetto attribuisce allo stimolo stesso.

Le componenti sono caratterizzate da 4 parametri principali:

- 1) Latenza: intervallo di tempo che intercorre dalla presentazione dell'evento alla comparsa della componente stessa e solitamente viene misurata in millisecondi.
- 2) Ampiezza: entità della deflessione espressa in microvolt. Solitamente è riferita rispetto ad un valore di baseline (valore a riposo in condizioni standard).
- 3) Polarità: definisce se si tratta di una componente con segno positivo o negativo (P=positive, N=negative)
- 4) Distribuzione sullo scalpo: indica la posizione sulla superficie cranica dove viene misurata la massima ampiezza della componente stessa

Ad esempio la prima componente P1, ben visibile in figura 10, è identificata da una lettera maiuscola P, che indica la polarità della componente in questo caso positiva, e da un numero che indica la latenza del picco (1=100 millisecondi).

Le componenti ERP quindi sono la manifestazione dell'attività nervosa associata a diversi stadi dell'elaborazione dell'informazione. Un primo stadio, precoce nel tempo, di elaborazione prettamente sensoriale e un secondo stadio più tardivo che manifesta processi cognitivi più complessi e specifici.

Prima di trattare le metodologie di estrazione delle componenti ERP dal segnale EEG complessivo due precisazioni vanno fatte: la prima è che le forme d'onda ERP non sono assolute, ciò significa che variano in primo luogo dalle condizioni sperimentali con le quali sono state rilevate e in secondo luogo variano anche da soggetto a soggetto, in base all'età, stato clinico e altri fattori. [1]

La seconda precisazione è che sebbene gli ERP riflettano l'attivazione di specifiche aree neurali in risposta a stimoli/eventi time locked, è importante sottolineare che la forma d'onda visibile negli ERP non è il risultato della somma lineare di processi indipendenti, bensì dell'interazione di meccanismi tra loro collegati e sinergici.

Estrapolazione dei potenziali ERP

Quello che manca da analizzare è come i potenziali ERP vengano estrapolati dal segnale EEG di fondo e si giunga quindi ad una forma d'onda chiara ed analizzabile come quella riportata in figura 10.

La tecnica più comunemente utilizzata è detta di **Averaging**.

Questa tecnica è basata su un facile concetto di somma in fase di segnali: ad intervalli regolari e costanti di tempo viene dato in input sempre lo stesso stimolo, a cui segue sempre un potenziale evento correlato, come descritto in precedenza. Il problema fondamentale rimane quello di estrarre la forma d'onda ERP dagli eventuali disturbi, artefatti di strumentazione e principalmente dal segnale EEG di background. Il potenziale ERP infatti ha un'ampiezza molto inferiore rispetto al segnale EEG di fondo e al rumore generico, questo determina un SNR (rapporto tra il segnale utile e rumore) molto basso che non permette di visualizzare in maniera diretta la forma d'onda di interesse.

Quello che viene fatto quindi è ripresentare lo stimolo più e più volte quindi calcolare la media dei segmenti temporali di interesse del segnale EEG, chiamati epoche o trials, allineandoli rispetto all'istante di presentazione dello stimolo.

Da N presentazioni dello stimolo si ottengono N epoche del segnale EEG le quali vengono mediate per ottenere il risultato finale.

Riportiamo di seguito il procedimento:

$$y_i(t) = u_i(t) + v_i(t)$$

Mediamo ora su N trials:

$$y_m(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i(t) + v_i(t)) = u(t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i(t)$$

La formula sopra riportata riassume quanto detto: $y_m(t)$ rappresenta la media del segnale che si vuole ottenere, $u_i(t)$ la i -esima forma d'onda ERP associata alla i -esima epoca, mentre $v_i(t)$ è il segnale EEG di background in ogni trial che deve essere eliminato.

Il risultato della tecnica quindi si basa sul fatto che poiché il segnale EEG di fondo è in continua fluttuazione e non rimane mai costante se l'operazione viene effettuata mediando un numero molto grande "N" di epoche allora le fluttuazioni casuali tenderanno ad elidersi (interferenza distruttiva di segnali fuori fase) poiché mai sincronizzate o correlate e a media statistica nulla. Mentre, a differenza del segnale EEG di fondo, assunto come rumore sovrapposto alla componente di interesse, le N forme d'onda ERP, per ipotesi sempre costanti e alla stessa latenza in ogni epoca, che seguono le N ripetizioni sequenziali e randomizzate di stimolo si sommano in fase. Così facendo si ottiene la componente di interesse ripulita dal rumore e dal segnale EEG sovrapposto.

Introduciamo nei risultati anche i concetti di valor medio e varianza in modo tale da avere due indici che consentono di delineare quanto la stima della forma d'onda ERP tramite Averaging sia precisa.

$$E[y_i(t)] = E[u_i(t)] + E[v_i(t)]$$

$$E[u_i(t)] = u(t)$$

$$\text{var}(y_i(t)) = \sigma^2$$

$$E[y_m(t)] = E[u(t)] + \frac{1}{N} E \sum_{i=1}^N (v_i(t)) = u(t)$$

$$\text{var}[e(t)] = \frac{1}{N^2} E\left[\sum_{i=1}^N (v_i(t))^2\right] = \sigma^2/N$$

Come è possibile notare dalle formule sopra riportate, più il numero di ripetizioni N è grande più la stima della componente ERP mediata è affidabile. La varianza (valore che indica la dispersione di una variabile intorno al suo valor medio) con un N molto molto grande tende a ridursi considerevolmente, il segnale ERP emerge dal rumore di fondo con una morfologia sempre più definita rendendo i risultati migliori.

$$P_s = \text{potenza del segnale} = \frac{1}{T} \int_0^T E[(u_i(\tau))^2] d\tau = \frac{1}{T} \int_0^T [(u(\tau))^2] d\tau$$

Supponiamo che $v_i(t)$ sia approssimabile da un rumore gaussiano a valore medio nullo e varianza σ^2

$$P_m = \text{potenza del rumore su un singolo trial} = \frac{1}{T} \int_0^T E[(v_i(\tau))^2] d\tau$$

$$P_n = \text{potenza del rumore sulla media di N trial} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{N^2} E\left[\sum_{i=1}^N (v_i(\tau))^2\right] d\tau = \frac{1}{N} \sigma^2$$

$$\text{SNR} = \frac{P_s}{P_n} = (P_s * N) / \sigma^2$$

È doveroso fare una precisazione sulla tecnica a media corrente sopra spiegata. La tecnica di averaging è basata sull'ipotesi che le forme d'onda ERP siano costanti tra epoca ed epoca, che si presentino più o meno sempre con la stessa ampiezza, ma cosa più fondamentale sempre con la stessa latenza dallo stimolo che le ha originate, a meno di piccolissime variazioni in fase. Per ogni componente ogni picco deve essere alla stessa latenza del picco della componente corrispondente all'epoca precedente. Questo però non è sempre vero e può capitare che forme d'onda ERP si presentino a diverse latenze tra le varie epoche e che quindi il risultato della tecnica sia una versione molto distorta e inferiore in ampiezza rispetto alla forma d'onda che si voleva analizzare inizialmente.

Per eliminare questo e altri tipi di problemi (come la non stazionarietà del segnale EEG) sono stati introdotti altri metodi di estrapolazione delle componenti ERP. Alcuni di questi sono ad esempio il metodo Woody che usa funzioni di crosscorrelazione, algoritmi di pick detection, metodi di curv fitting e frunctional area; tuttavia sono metodologie che qui non verranno trattate in quanto la tecnica di Averaging è ancora tutt'oggi la metodologia più utilizzata per l'estrazione delle forme d'onda ERP dal segnale EEG di fondo.

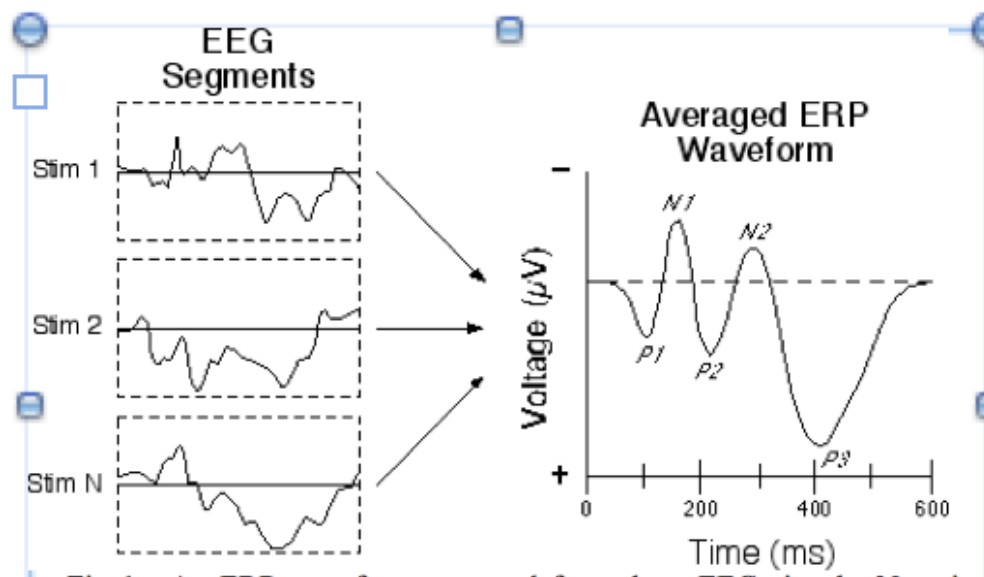


Figura 10: rappresentazione grafica della tecnica di Averaging

1.3 Conclusioni

Come abbiamo visto la tecnica di analisi ERP per l'analisi dei correlati neurali alla base del nostro sistema nervoso si discosta molto dalle tecniche di imaging cerebrale. Innanzitutto la modalità ERP è una metodologia di analisi per niente invasiva e relativamente poco costosa. Ciò che però differenzia in modo nitido i due approcci è che a differenza delle tecniche di imaging, gli ERP permettono di studiare come le informazioni vengono elaborate all'interno delle reti neurali gerarchiche con un'altissima risoluzione temporale real-time. [2]

Capitolo 2

Metodologie di analisi di Potenziali Evento Correlati

In questo capitolo illustreremo le principali metodologie di analisi utilizzate per estrarre informazioni da potenziali evento correlati.

I potenziali ERP sono segnali, e come tali, caratterizzati da uno specifico andamento temporale e contenuto frequenziale. Di seguito, analizzeremo gli ERP proprio da questi due punti di vista cercando di capire quali informazioni possiamo estrapolare nel dominio del tempo e quali nel dominio della frequenza.

In particolare illustreremo come l'analisi frequenziale di un segnale si sia evoluta negli ultimi decenni tanto da non dover più considerare il dominio dei tempi e il dominio delle frequenze come completamente separati e distinti; le informazioni di ciascuno dei due domini vengono conglobate in nuovo dominio, Tempo-Frequenza, grazie al quale è possibile superare (in buona parte) i limiti teorici/pratici dei metodi precedentemente utilizzati e allo stesso tempo poter condurre un'analisi più dettagliata e specifica sull'andamento, intensità, forma del segnale di interesse.

2.1 Analisi nel dominio del tempo

Come descritto in precedenza il potenziale ERP si presenta come una serie di deflessioni positive o negative che compaiono sequenzialmente. Tali deflessioni vengono identificate come **componenti ERP** e si distinguono sulla base di quattro parametri principali: latenza, ampiezza, polarità, distribuzione sullo scalpo.

L'analisi ERP nel dominio del tempo consiste nell'individuazione e descrizione di ciascuna componente proprio sulla base delle 4 caratteristiche sopra riportate e una successiva interpretazione del suo "significato", ovvero quali processi neurali siano da associare a ciascuna componente della forma d'onda ERP.

Nel seguito verrà data una descrizione in termini generali delle componenti ERP, senza distinguere dettagliatamente tra ERP generati da stimoli di modalità sensoriali differenti (somatosensoriali, acustici, visivi, ecc.).

Da un punto di vista della classificazione, è utile distinguere tra due classi di componenti che si presentano negli ERP. Da un lato vi sono le componenti a minore latenza, le cui caratteristiche (ampiezza, latenza e distribuzione) sembrano dipendere principalmente dalle proprietà fisiche degli stimoli sensoriali, come la loro modalità e intensità, e che sono associate a processi neurali di più basso livello (quali la trasmissione dell'informazione attraverso la via sensoriale, e una pura elaborazione sensoriale); queste sono dette **componenti esogene**. Le loro caratteristiche sono meno influenzate dallo stato del soggetto e dalla natura dell'interazione tra il soggetto e lo stimolo, cioè sono meno influenzate da manipolazioni "cognitive". Dall'altro lato vi è un set di componenti le cui caratteristiche (e in effetti la cui stessa esistenza) dipendono dalla natura dell'interazione del soggetto con lo stimolo. Queste componenti variano in funzione di fattori quali l'attenzione, la rilevanza del compito e la natura dell'elaborazione richiesta dallo stimolo, e alcune possono essere suscitate anche in assenza di un evento esterno, come, ad esempio, quando uno stimolo atteso di fatto non si verifica. Queste sono dette **componenti endogene**. La distinzione endogena-esogena è in realtà una semplificazione eccessiva del reale stato delle cose. Infatti, anche le precoci componenti "sensoriali" hanno dimostrato essere modificabili mediante manipolazioni cognitive (ad es. attenzione) e molte delle più tardive componenti "cognitive" hanno dimostrato essere influenzate dagli attributi fisici dello stimolo/evento presentato (ad esempio, la modalità dello stimolo). Per questo motivo è più corretto concepire una dimensione esogena-endogena che coesiste ed evolve nel tempo. Così, si può dire che quelle componenti ERP che si verificano entro i primi 100 ms di presentazione dello stimolo tendono ad essere più esogene, mentre quelle che si verificano successivamente tendono ad essere più endogene [3].

Nel seguito, le componenti sono riportate e brevemente discusse in base alla loro latenza di comparsa e quindi in base a un ordine di crescente sensibilità a fattori cognitivi. Poiché la maggior parte degli studi su ERP ha investigato risposte che si verificano nei primi 100-500 ms dopo lo stimolo, ci si limiterà a descrivere componenti con queste latenze. Come anticipato nel Capitolo 1, alle componenti ERP vengono solitamente assegnate etichette come P1 o P100, N1 o N100, P3 o P300 che si riferiscono alla loro polarità (P, polarità positiva; N, polarità negativa) e posizione all'interno della forma d'onda (100 o 300 indica la comparsa della componente circa 100 ms, oppure 300 ms, dopo la presentazione dello stimolo). È bene sottolineare che componenti ERP elicitate da diverse modalità a cui viene applicata la stessa etichetta non sono necessariamente correlate funzionalmente, bensì si

presentano con la stessa polarità e con la stessa latenza temporale nella forma d'onda del rispettivo ERP. Ad esempio, le componenti uditive P1 e N1 non hanno una particolare relazione funzionale con le componenti visive P1 e N1. Anche le componenti più tardive, come la P3, che come detto precedentemente sono meno influenzate dalla modalità specifica dello stimolo/evento che le ha generate, possono avere sotto-componenti specificamente legate alla particolare modalità sensoriale [4].

Componente P100: È caratterizzata da una deflessione positiva intorno ai 100 millisecondi post-stimolo. A seconda però della stimolazione utilizzata può presentarsi anticipata o posticipata. In caso di stimolo sensoriale uditivo la componente è anticipata a 50 ms e raggiunge la massima ampiezza nelle regioni centrali e frontali. Tale componente P1 uditiva è preceduta da una serie di onde con polarità positiva che si verificano entro i primi 10 ms dalla presentazione dello stimolo acustico e che riflettono la trasmissione dell'informazione lungo la via acustica tronco-encefalica, e da successive onde con latenza tra i 10 e i 50 ms che originano nel talamo e nella corteccia uditiva primaria. Se invece lo stimolo è visivo la componente P1 si presenta con latenza di circa 100 ms post stimolo (con inizio tra 60-90 ms post-stimolo e picco tra 100 - 130 ms post -timolo) e raggiunge la massima ampiezza nelle regioni occipitali. La componente P1 visiva è preceduta dalla componente C1 (con inizio tipicamente tra i 40-60 ms post-stimolo e picco tra 80-100 ms post-stimolo), che origina nella corteccia visiva primaria e pertanto anch'essa maggiormente visibile nella regione occipitale. Diversamente da altre componenti, è etichettata con C anziché con P o N in quanto la sua polarità può variare. Nel caso dei potenziali visivi, data la sovrapposizione temporale tra la C1 e la P1, l'inizio della P1 è difficile da identificare accuratamente. In generale, la componente P1 viene considerata principalmente una componente 'sensoriale', ovvero esogena; essa è sensibile a variazioni nei parametri fisici dello stimolo, ma sembra essere influenzata anche da processi di attenzione spaziale. [3,4].

Componente N100: è una deflessione negativa che segue l'onda P1 e che viene rilevata con una latenza tra i 150-200 ms nel caso di stimoli visivi e con una latenza tra gli 80-120 ms nel caso di stimoli uditivi. In analogia con il caso precedente la massima ampiezza in caso di stimoli visivi si rileva in corrispondenza del lobo occipitale (ma si rileva anche anteriormente), diminuendo di intensità se gli stimoli sono presentati a brevi intervallo di tempo l'uno dall'altro. Per stimoli uditivi

invece la massima ampiezza si rileva nelle zone frontali e centrali (elettrodo Cz) e per questo è anche definita “potenziale di vertice”. La componente N100, pur essendo una componente precoce che riflette il normale svolgimento della risposta sensoriale a una stimolazione esterna (quindi una componente esogena “obbligata”, come le precedenti), è influenzata da processi attentivi e sembra essere amplificata quando il soggetto compie task di discriminazione di stimoli rispetto a semplici task di rilevamento di stimoli. [3,4].

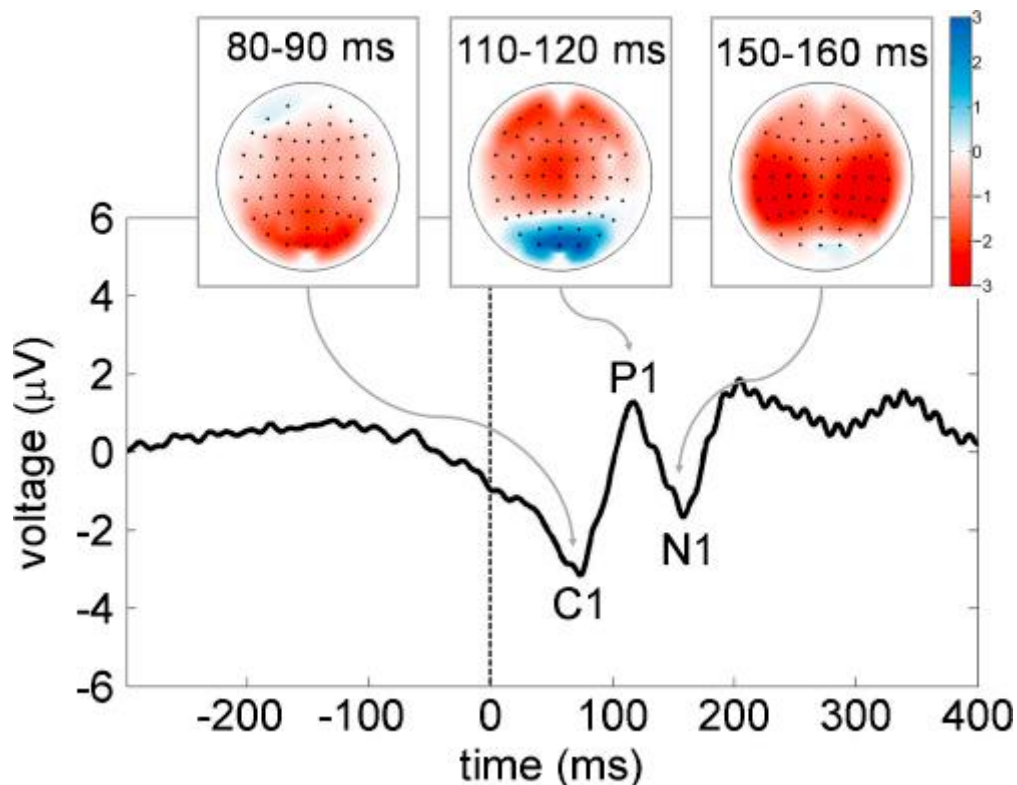


Figura 11: topografia, polarità e latenza delle componenti ERP precoci: C1, N1, P1

Componente P200: è una deflessione positiva con latenza di circa 200 ms post-stimolo. Come la N100 e P100 anche la P200 è una componente che si ritiene associata alla risposta sensoriale, ma è anche studiata in relazione a processi di attenzione selettiva o di memoria a breve termine. In stimoli uditivi è strettamente dipendente dall'intensità del suono udito e in molti casi è meno localizzata risultando così spesso conglobata alla N100. Per quanto riguarda stimoli visivi la latenza risulta leggermente traslata, 150-250 ms post stimolo, e la massima ampiezza viene rilevata in prossimità della zona frontale, aumentando a seconda della difficoltà dello stimolo presentato. In particolare, questa componente è maggiore quando la stimolazione contiene dei target e quando i target sono infrequenti; in questo senso è simile alla componente P300 (si veda sotto) [3,4].

Componente N200: è una deflessione negativa che raggiunge un picco circa 200 ms dopo la presentazione dello stimolo. È caratterizzata da una bassa ripetibilità poiché varia in modo sostanziale da individuo a individuo. La sua interpretazione psicologica verte essenzialmente su fattori quali la discriminazione dello stimolo, la selezione del target e l'orientamento della risposta. La sua durata si accorcia e la sua ampiezza diminuisce se gli intervalli inter-stimolo sono più brevi. La N200 si manifesta con maggiore ampiezza in corrispondenza della regione fronto-centrale, mentre la sorgente della componente pare essere localizzata nella corteccia uditiva sovratemporale. È formata da 3 sottocomponenti:

N2a (anche definita Mismatch negativity (MMN)): è un componente negativa che è suscitato da qualsiasi cambiamento di stimolo discriminabile. In uno scenario ripetitivo di stimolazione uditiva MMN rappresenta il processo automatico del cervello coinvolto nella codifica della differenza o del cambiamento dello stimolo.

N2b: è leggermente più tardiva rispetto all'N2a e appare quando i cambiamenti nelle proprietà fisiche dello stimolo sono rilevanti per il compito.

N2C: è suscitata quando è necessaria una classificazione e discriminazione di stimoli disparati.

Componente P300: È probabilmente la componente ERP maggiormente studiata e si presenta come un ampio picco a latenza 300 ms post stimolo. È una componente endogena e si manifesta in risposta a stimoli rari, denominati target, riflettendo quindi processi mentali più complessi come l'aggiornamento della memoria di lavoro, discriminazione di un evento target da uno non target, attenzione e concentrazione del soggetto allo stimolo presentato. È rilevata principalmente in aree centro-parieto-occipitali mediane e la sua ampiezza è direttamente dipendente dalla rarità dello stimolo e dalla distanza tra uno stimolo target e il successivo. La latenza invece discrimina l'avvenuto riconoscimento del target presentato e l'attenzione selettiva allo stimolo.

Componente N400: questa componente raggiunge picchi a circa 400 ms dopo l'inizio dello stimolo, con una negatività che può essere osservata in una finestra temporale compresa tra 250 e 500 ms. Si manifesta principalmente in situazioni in cui viene rilevata un'incongruenza nel tipo di evento proposto e la sua ampiezza può variare da -5 a 5 microvolt. La distribuzione, sebbene possa variare leggermente a seconda dello stimolo di elicitazione, è massima rispetto ai siti dell'elettrodo centro-parietale ed è leggermente più elevata sul lato sinistro dello scalpo per stimoli di tipo visivo.

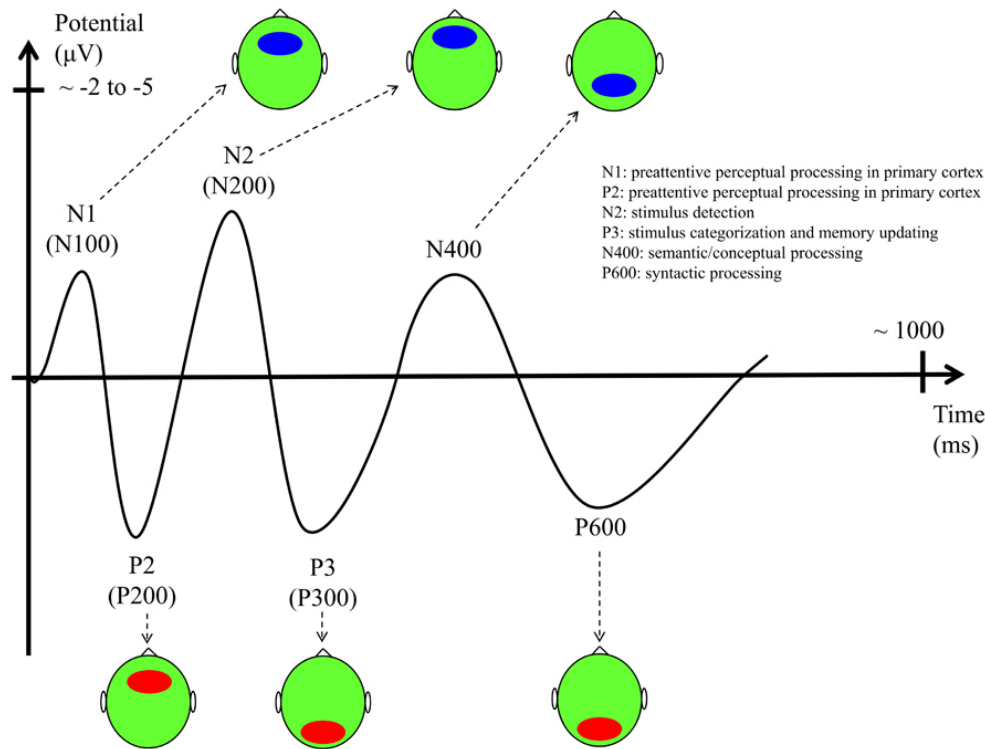


Figura 12: topografia, latenza, polarità ed ampiezza delle componenti ERP N1, P2, N2, P3, N400 e P600

2.2 Analisi tempo-frequenza

Fino ad ora abbiamo analizzato i potenziali evento correlati da un solo punto di vista, non considerando il fatto che possano esistere informazioni sugli ERP estraibili al di fuori del dominio del tempo. Fino a non poco tempo fa questa infatti era l'unica metodologia utilizzata per lo studio degli ERP.

La rappresentazione nel dominio dei tempi è però una rappresentazione limitata del segnale. Informazioni sulle funzioni cognitive associate all'analisi ERP possono essere nascoste nel contenuto in frequenza (spettro) di tali segnali. Infatti, le risposte cerebrali a eventi sensoriali e cognitivi possono essere descritte come oscillazioni evento-correlate (*Event-Related Oscillations*, ERO) nel dominio spettrale o nel dominio tempo-frequenza. Ogni componente ERP può essere vista come una ERO a una frequenza specifica o come una sovrapposizione di più ERO a frequenze diverse. Ad esempio, la componente P100 raggiunge il picco generalmente a 100 ms e ha una larghezza temporale di circa 50

ms. Se questa componente ERP è vista come mezzo ciclo di un'oscillazione, 50 ms corrispondono a un'oscillazione con periodo di 100 ms (cioè frequenza 10 Hz) che corrisponde alla banda alfa (8-12 Hz). Componenti più tardive e di durata maggiore come la P300 corrispondono a oscillazioni più lente nelle bande di frequenza delta (0-4 Hz) e theta (4-8 Hz). Pertanto, è la sovrapposizione di tutte le oscillazioni evento-correlate in tutte le bande di frequenza che determina la morfologia e l'ampiezza dell'ERP [5]. Sulla base di queste considerazioni è evidente l'utilità di eseguire un'analisi dell'ERP nel dominio della frequenza o nel dominio tempo-frequenza, per estrarre e valutare le oscillazioni (ovvero i ritmi) evento-correlati.

Da questo punto di vista è importante anche osservare che le risposte oscillatorie a eventi sensoriali e cognitivi possono includere sia risposte precisamente phase-locked rispetto all'inizio dello stimolo (cioè risposte che si presentano sempre con la stessa latenza e fase rispetto all'inizio dello stimolo), sia risposte non phase-locked all'inizio dello stimolo, ovvero che presentano una variazione (jitter) nella latenza da un trial all'altro (Figura 13). Nel primo caso si parla di *oscillazioni evocate* (*stimulus-evoked oscillations*) dallo stimolo/evento ed emergono nell'ERP derivato mediante tecnica dell'averaging. Nel secondo caso si parla di oscillazioni indotte (*stimulus-induced oscillations*), le quali tendono a cancellarsi mediando la risposta su più trial, e quindi non sono rilevate dalle classiche tecniche di averaging nel dominio dei tempi. Si vedrà più avanti che metodi specifici tempo-frequenza applicati a singoli trial consentono di studiare anche le oscillazioni indotte. In particolare, le stimulus-evoked oscillations sono analizzate applicando la decomposizione tempo-frequenza al potenziale ERP mediato sui trial, mentre le stimulus-induced oscillations sono analizzate applicando dapprima la decomposizione tempo-frequenza a ogni singolo trial e quindi mediando la potenza risultante su tutti i trial [5,6].

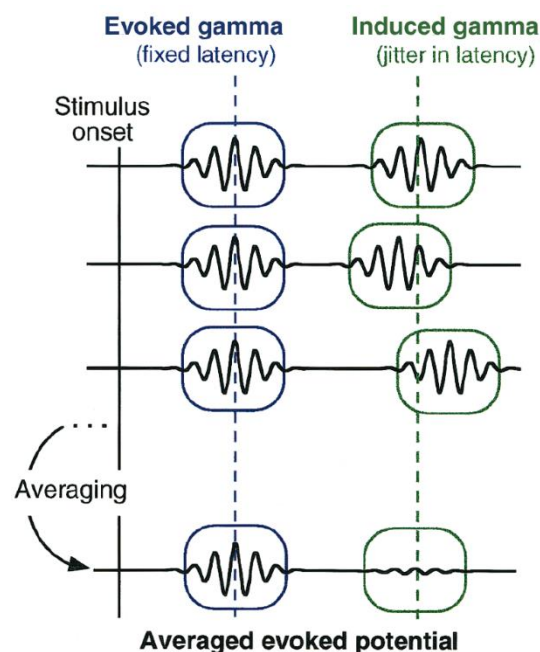


Figura 13 - Rappresentazione schematica delle risposte oscillatorie evocate e indotte. La figura si riferisce ad oscillazioni in banda gamma, ma gli stessi concetti si applicano a oscillazioni in altre bande di frequenza. Una risposta evocata (rettangoli blu) appare sempre con la stessa latenza e fase in ogni singolo trial e quindi emerge nel potenziale evocato medio (ottenuto con la tecnica dell'averaging mediando tutti i trial nel tempo). Una risposta indotta (rettangoli verdi) appare con una variazione (jitter) in latenza da trial a trial, centrata attorno a una data latenza (linea verde verticale); la risposta indotta tende pertanto a cancellarsi nel potenziale evocato medio. Specifici metodi tempo-frequenza devono essere utilizzati per caratterizzare le attività indotte. [Figura tratta da 6]

Per i motivi sopra esposti negli ultimi anni hanno trovato un riscontro sempre più importante i metodi di analisi tempo-frequenza. Descriveremo qui i principali metodi attraverso i quali si estraggono informazioni frequenziali dai segnali cerebrali e più propriamente dai potenziali evocati.

Innanzitutto definiamo che cosa si intende per segnale stazionario e segnale non stazionario. Un segnale stazionario è un segnale il cui contenuto in frequenza non varia nel tempo, viceversa un segnale non stazionario è un segnale il cui contenuto in frequenza cambia nel tempo. I segnali biologici e in particolare l'EEG (e quindi l'ERP) sono esempi classici di segnali non stazionari.

2.2.1 La Trasformata di Fourier e i suoi limiti

La prima metodologia che verrebbe in mente di utilizzare per estrarre informazioni in frequenza di un segnale è la già nota Fourier Transform (FT).

La FT estrae la composizione spettrale di un segnale $x(t)$, trasformando dal dominio dei tempi al dominio della frequenza. La trasformata di Fourier di $x(t)$ è espressa come

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.1)$$

e la trasformata di Fourier inversa è data da

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) \cdot e^{j2\pi ft} df \quad (2.2)$$

I limiti di questa tecnica però sono evidenti: la Fourier Transform infatti ci permette di ottenere informazioni solo su quali frequenze sono contenute all'interno del segnale in esame e non sul “quando” certe componenti frequenziali appaiono. Riusciamo ad ottenere solamente il contenuto spettrale del segnale senza però avere informazioni sulla localizzazione temporale delle componenti spettrali stesse. Poiché i segnali biologici sono quasi tutti non stazionari, cioè le loro componenti spettrali variano in funzione del tempo, la Fourier Transform non è la tecnica adatta per analizzare questo tipo di segnali (EEG nel nostro caso).

Infatti, analizzando la figura 14, notiamo che il risultato della Fourier Transform per un segnale stazionario o non stazionario è lo stesso a meno di picchi oscillatori poco influenti presenti tra i vari picchi principali; identifichiamo quali componenti spettrali esistono nel segnale, ma non quando queste compaiono.

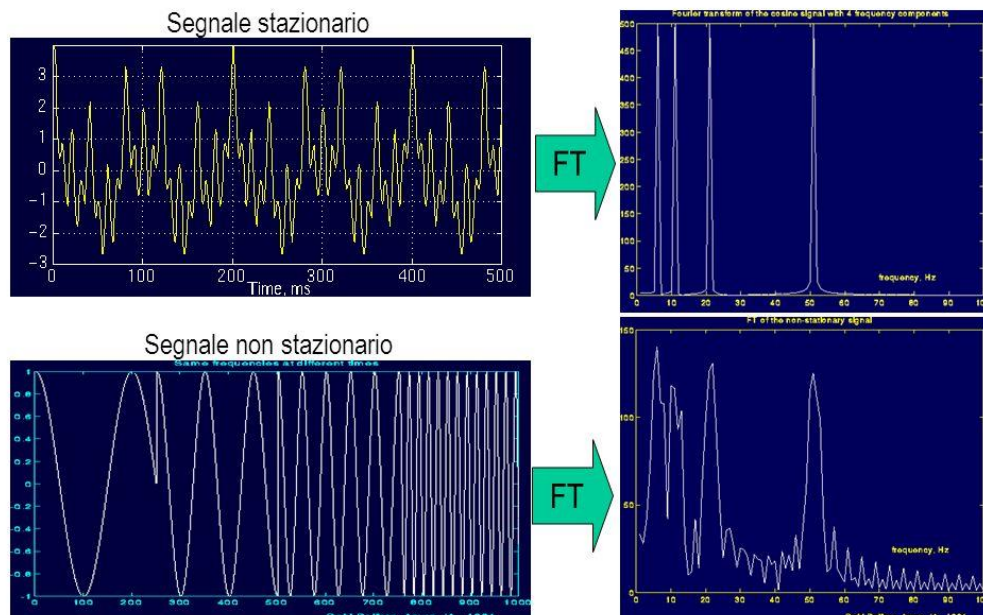


Figura 14 – Fourier Transform (FT) di un segnale stazionario e FT di un segnale stazionario. [Tratta da 7]

Un altro esempio di segnale non stazionario è mostrato in figura 15 (pannello di sinistra) insieme alla FT del segnale (pannello di destra) [8]. Il segnale è costituito da quattro treni di impulsi, ognuno comprendente due elementi transienti con diversa frequenza principale (1.5 KHz e 650 Hz); i quattro treni di impulsi sono separati da intervalli di 12 ms. È evidente come la trasformata di Fourier non sia in grado di evidenziare l'alternanza nel segnale di intervalli temporali contenenti le due principali componenti spettrali (a 650 Hz e 1.5 kHz) e intervalli temporali praticamente privi di contenuto spettrale.

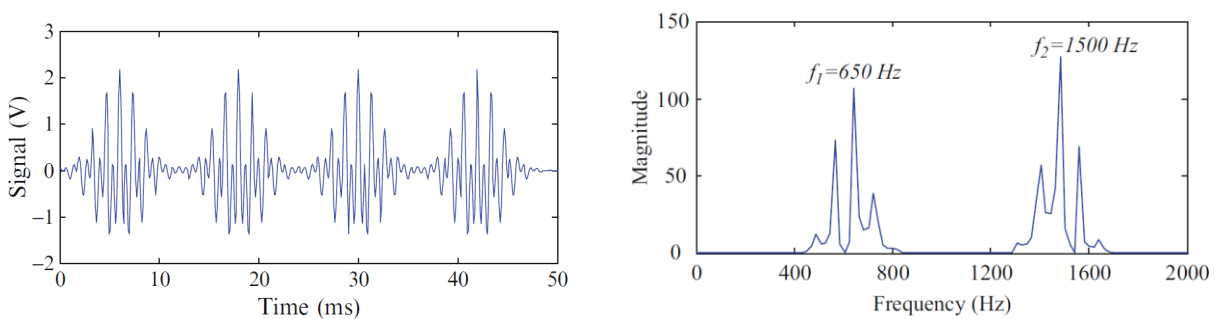


Figura 15 - Esempio di segnale non stazionario (sinistra) e sua trasformata di Fourier (destra). La trasformata di Fourier mostra la presenza di due principali componenti spettrali a 650 Hz e 1.5 kHz, ma non è in grado di rilevare che tale contenuto spettrale è presente nel segnale intervallato da tratti praticamente privi di contenuto frequenziale (tratti del segnale di valore praticamente continuo). Tratta da [8]

Per superare questo limite della FT, negli ultimi decenni è stata definita una nuova trasformazione, la **Wavelet Transform (WT)** che fornisce una rappresentazione tempo-frequenza del segnale in grado di estrarre l'evoluzione del contenuto spettrale del segnale al variare del tempo. Nel seguito vengono descritti i concetti di base della Wavelet Transform, introducendo dapprima la Short Time Fourier Transform di cui la Wavelet Transform può essere considerata un'evoluzione.

2.2.2 La Short-Time Fourier Transform ed i suoi limiti

Una soluzione per superare i limiti della FT consiste nel suddividere il segnale in segmenti (all'interno dei quali il segnale è assunto approssimativamente stazionario) e applicare a ciascun segmento la trasformata di Fourier; questo corrisponde a eseguire una FT localizzata nel tempo ('time-localized'), ovvero una **Short Time Fourier Transform**.

A tale scopo viene scelta una funzione finestra $w(t)$ di larghezza $\Delta\tau$ che viene di volta in volta fatta scorrere di un tempo τ lungo il segnale. Per uno specifico τ , viene calcolata la trasformata di Fourier del segnale all'interno della finestra; quindi la finestra viene spostata di τ lungo l'asse dei tempi e un'altra trasformata di Fourier viene calcolata. Il segnale all'interno della finestra viene assunto stazionario.

Per meglio comprendere questo processo, si consideri la funzione finestra dapprima centrata attorno a zero, cioè $\tau = 0$ ($w(t)$). Se la larghezza della finestra è pari a $\Delta\tau$ (secondi), la funzione $w(t)$ centrata in $\tau = 0$ andrà a sovrapporsi ai primi $\Delta\tau/2$ secondi del segnale e, finestra e segnale vengono moltiplicati. Facendo questo, solo i primi $\Delta\tau/2$ secondi del segnale vengono prelevati e il risultato di questa trasformazione è la FT dei primi $\Delta\tau/2$ secondi del segnale. Se questa parte del segnale è stazionaria, come supposto, il risultato ottenuto sarà la rappresentazione in frequenza del primo tratto di segnale. Il passo successivo consiste nel muovere la finestra di τ (ottenendo $w(t - \tau)$), moltiplicarla nuovamente per il segnale e determinare la FT del prodotto. Questa procedura viene iterata fino a coprire l'intero segnale, secondo la formula qui riportata

$$STFT(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot w(t - \tau) \cdot e^{-j2\pi f t} dt \quad (2.3)$$

dove $x(t)$ è il segnale originale. Come espresso dalla formula, per ogni tempo τ e per ogni frequenza f un nuovo coefficiente viene calcolato. In questo modo, la STFT trasforma un segnale nel dominio dei tempi, in una rappresentazione 2D tempo-frequenza, come indicato in figura 16.

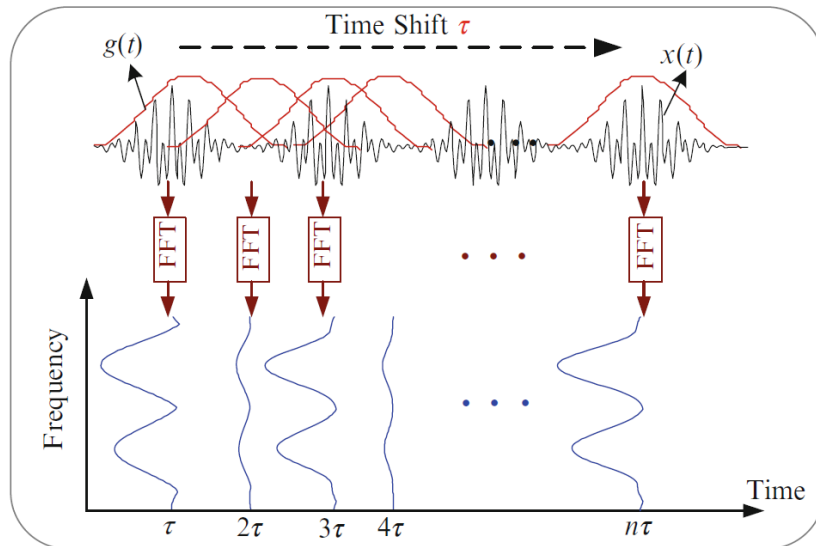


Figura 16 - Illustrazione concettuale della applicazione della STFT al segnale $x(t)$ (il segnale $x(t)$ è lo stesso rappresentato in Figura 15). Tratta da [8]

Sulla base di quanto sopra esposto, sorge la seguente domanda: perché, dato che la STFT fornisce una rappresentazione tempo-frequenza del segnale, è necessario un altro strumento di trasformazione come la Wavelet Transform per analizzare il segnale nel dominio tempo-frequenza?

La risposta a questa domanda risiede nell'utilizzo della funzione finestra $w(t)$. Innanzitutto è opportuno specificare che sono state proposte diverse funzioni finestra (rettangolare, Gaussiana, Hamming, Bartlett, ecc). Al variare del tipo di finestra utilizzata (anche a parità di durata temporale della finestra), la forma dello spettro tempo variante può modificarsi sensibilmente. Al di là di questa precisazione, il limite della STFT risiede nel compromesso tra risoluzione nel tempo e risoluzione in frequenza che l'utilizzo di una finestra temporale di una determinata durata introduce; tale compromesso è spesso chiamato *Principio di Indeterminazione di Heisenberg* nel piano tempo-frequenza.

Tale principio afferma che non è possibile scegliere contemporaneamente a piacere la risoluzione nel tempo e la risoluzione in frequenza di una funzione; in particolare, con riferimento alla funzione finestra, non è possibile sceglierla arbitrariamente stretta nel tempo e in frequenza (cioè non è possibile localizzarla in maniera arbitrariamente precisa nel tempo e in frequenza). Infatti, l'estensione nel tempo $\Delta\tau$ e l'estensione in frequenza Δf di una funzione $w(t)$ non sono indipendenti, ma sono legati tra loro dalla relazione [8]

$$\Delta\tau \cdot \Delta f \geq \frac{1}{4\pi} = c, \text{ costante} \quad (2.4)$$

La misura di dispersione nel tempo $\Delta\tau$ è definita nel seguente modo [8]

$$\Delta\tau^2 = \frac{\int t^2 \cdot |w(t)|^2 dt}{\int |w(t)|^2 dt} \quad (2.5)$$

Interpretando $|w(t)|^2 / \int |w(t)|^2 dt$ come una funzione densità di probabilità, la misura sopra può infatti essere interpretata come una varianza, e la sua radice quadrata come una deviazione standard, ovvero come una dispersione nel tempo.

Analogamente, la misura di dispersione in frequenza Δf è definita nel seguente modo [8]:

$$\Delta f^2 = \frac{\int f^2 \cdot |W(f)|^2 df}{\int |W(f)|^2 df} \quad (2.6)$$

dove $W(f)$ è la trasformata di Fourier della funzione finestra $w(t)$ e $|W(f)|^2 / \int |W(f)|^2 df$ va anche in questo caso interpretata come una funzione densità di probabilità.

Nel caso in cui la finestra $w(t)$ sia gaussiana (cioè del tipo $e^{-\alpha t^2/2}$, con $\alpha > 0$ parametro che definisce la larghezza della Gaussiana), un tipo di finestra largamente utilizzato nella STFT, vale il segno di uguaglianza nella equazione (2.4), ovvero

$$\Delta\tau \cdot \Delta f = \frac{1}{4\pi} = c, \text{ costante} \quad (2.7)$$

Il principio di indeterminazione nel piano tempo-frequenza è illustrato graficamente nella figura 17, in cui il prodotto $\Delta\tau \cdot \Delta f$ di una funzione finestra gaussiana (indicata con il simbolo $g(t)$ nella figura anziché con $w(t)$) è rappresentato dall'area di rettangoli di larghezza $\Delta\tau$ e altezza Δf . [8] Come si osserva, dovendo rimanere costante l'area del rettangolo, una migliore risoluzione in frequenza è associata a una peggiore risoluzione nel tempo (pannello a sinistra) mentre una migliore risoluzione nel tempo è associata a una peggiore risoluzione in frequenza (pannello a destra).

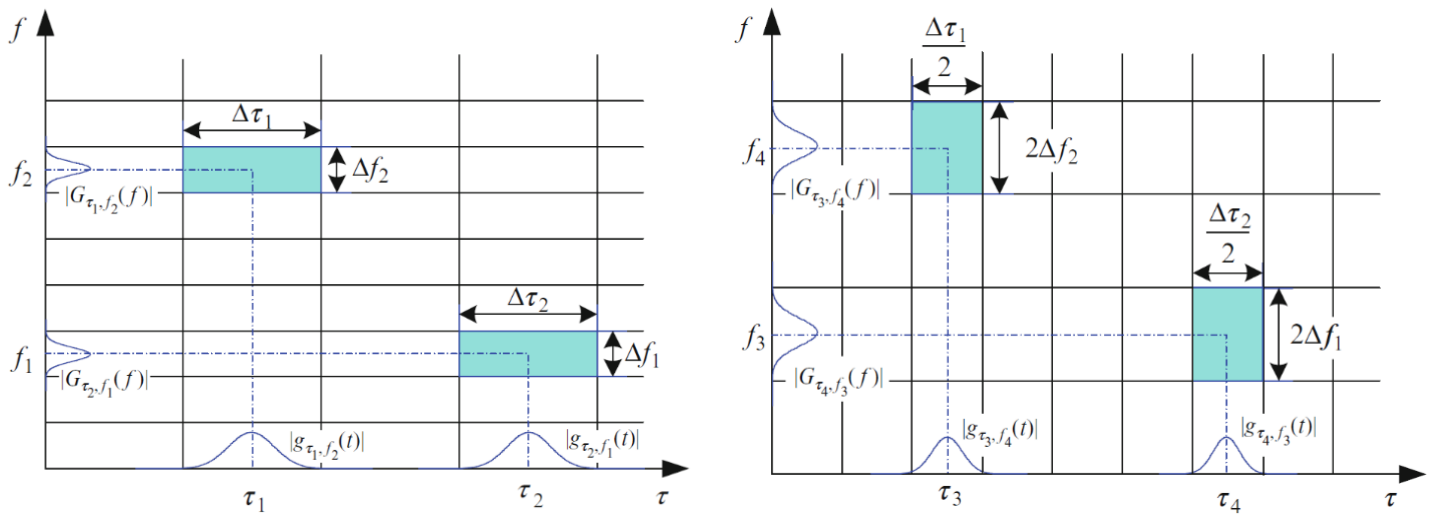


Figura 17 - Compromesso risoluzione tempo-frequenza nella STFT. I due grafici illustrano il principio di indeterminazione nel piano tempo-frequenza, con riferimento a una funzione finestra gaussiana (qui indicata con $g(t)$): il pannello a sinistra si riferisce a una finestra con risoluzione temporale $\Delta\tau = \Delta\tau_1 = \Delta\tau_2$ e risoluzione in frequenza $\Delta f = \Delta f_1 = \Delta f_2$; il pannello a destra si riferisce a una finestra con risoluzione temporale $\Delta\tau/2$ e risoluzione in frequenza $2 \cdot \Delta f$. Da notare quindi che un incremento di risoluzione nel tempo comporta una diminuzione di risoluzione in frequenza e viceversa. È importante anche osservare come, in ogni caso, la risoluzione nel tempo sia costante lungo tutto l'asse delle frequenze e la risoluzione in frequenza sia costante lungo tutto l'asse dei tempi. Tratta da [8].

L'effetto del compromesso tra risoluzione nel tempo e in frequenza nella STFT è illustrato in figura 18, in cui è mostrato il risultato della STFT con finestra Gaussiana applicata al segnale $x(t)$ (pannello in alto a sinistra, già considerato in figura 15 e figura 16): sono applicate finestre con tre diverse estensioni temporali (1.6 ms, 25.6 ms e 6.4 ms). Mentre la finestra più piccola (1.6 ms) fornisce un'elevata risoluzione temporale, separando i quattro treni di impulsi contenuti nel segnale (figura 18, pannello a), la sua risoluzione in frequenza è troppo bassa per differenziare le due componenti frequenziali (a 650 Hz e 1.5 kHz) sovrapposte all'interno di ciascun treno di impulsi. Di conseguenza, le componenti di frequenza 1.5 kHz e 650 Hz non sono risolte e vengono visualizzate come un'unica larga campana lungo l'asse delle frequenze. Al contrario, la finestra con maggiore estensione temporale (25.6 ms), presenta una buona risoluzione in frequenza in grado di separare le due componenti frequenziali (pannello b), ma data la sua bassa risoluzione temporale non consente di separare i quattro treni di impulsi intervallati da tratti continui. Le prestazioni migliori si ottengono nel terzo caso (finestra di 6.4 ms), mostrato nel pannello c, che consente di separare le componenti in frequenza nonché i treni di impulsi nel tempo, caratterizzando adeguatamente il segnale nel piano tempo-frequenza [8]. Naturalmente, questo è un caso semplice in cui è sufficiente scegliere una finestra di dimensione appropriata per estrarre correttamente l'evoluzione nel tempo del contenuto

frequenziale del segnale. Come commentato più avanti, in generale una sola finestra di durata fissata può non consentire di caratterizzare appropriatamente segnali non-stazionari.

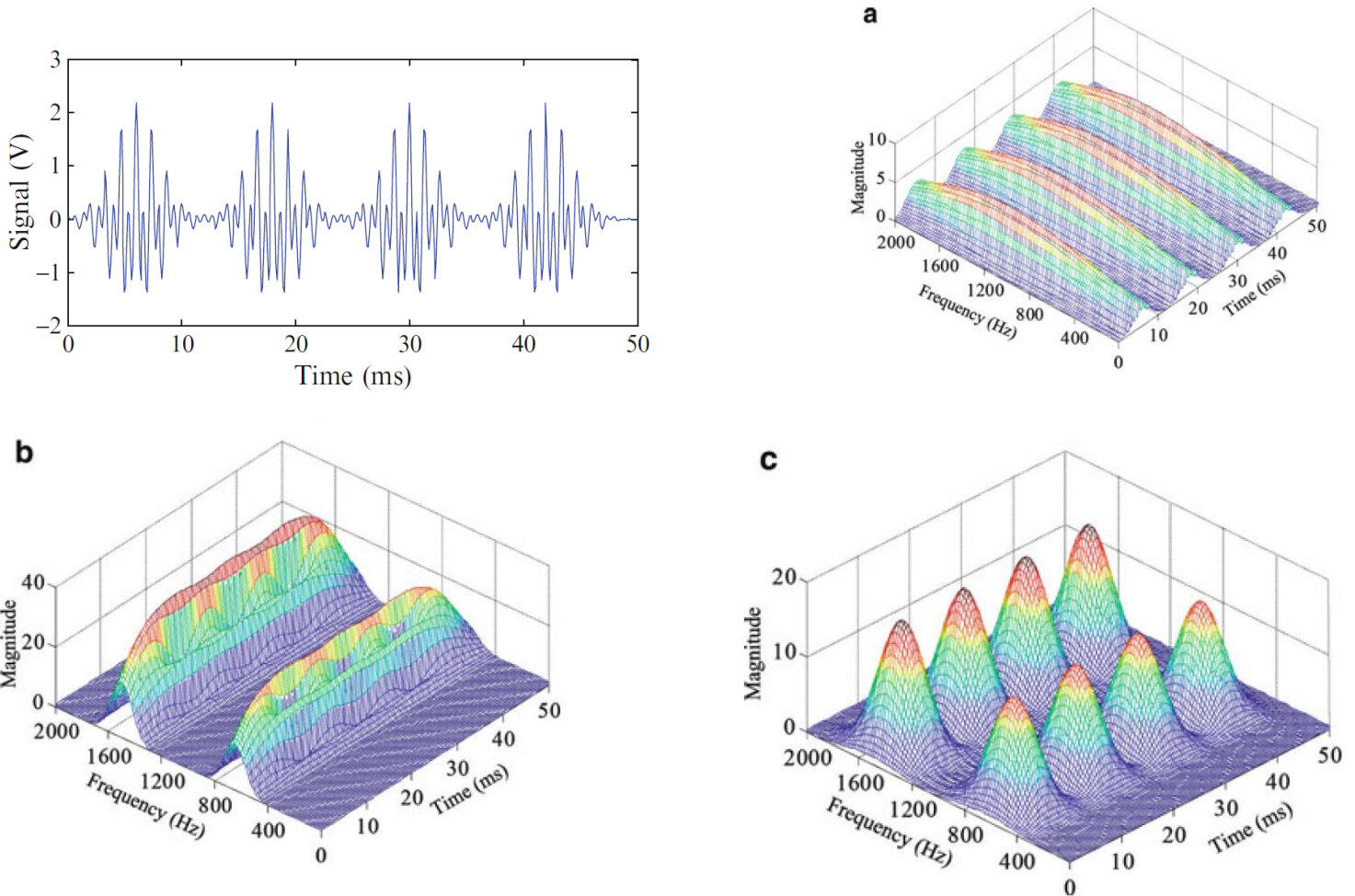


Figura 18 – Applicazione della STFT al segnale $x(t)$ (pannello in alto a sinistra) usando finestre Gaussianhe con diverse estensioni temporali (pannello a: 1.6 ms; pannello b: 25.6 ms; pannello c: 6.4 ms). Nel pannello a, si ottiene una buona risoluzione temporale ma un’inadeguata risoluzione nelle frequenze. Nel pannello b si verifica la situazione opposta, ovvero si ha una buona risoluzione in frequenza ma un’inadeguata risoluzione nel tempo. Nel pannello c, la risoluzione è adeguata sia nel tempo che in frequenza [Tratta da 8]

Un altro esempio che mette in evidenza il limite della STFT è illustrato nel seguito con riferimento ad un segnale (qui non mostrato) che presenta 4 diverse componenti frequenziali, ognuna in un diverso intervallo temporale del segnale. Come evidenziato in figura 19 (pannello superiore), utilizzando una Gaussiana stretta come funzione finestra, nella STFT si ottengono bande di frequenza piuttosto ampie (bassa risoluzione in frequenza) e parzialmente sovrapposte (la sovrapposizione è visibile soprattutto a frequenze più basse) [7]. Viceversa, utilizzando una funzione finestra più larga (pannello inferiore, le bande di frequenza tendono ad assottigliarsi (migliore risoluzione in

frequenza), ma come controparte la risoluzione temporale peggiora e le diverse componenti spettrali sono risolte con minore precisione a livello temporale [7].

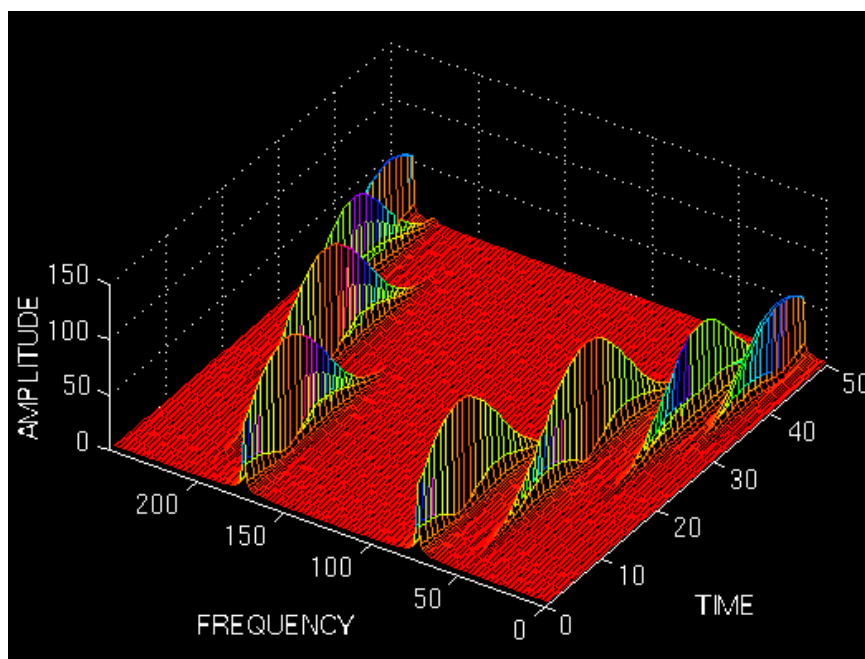
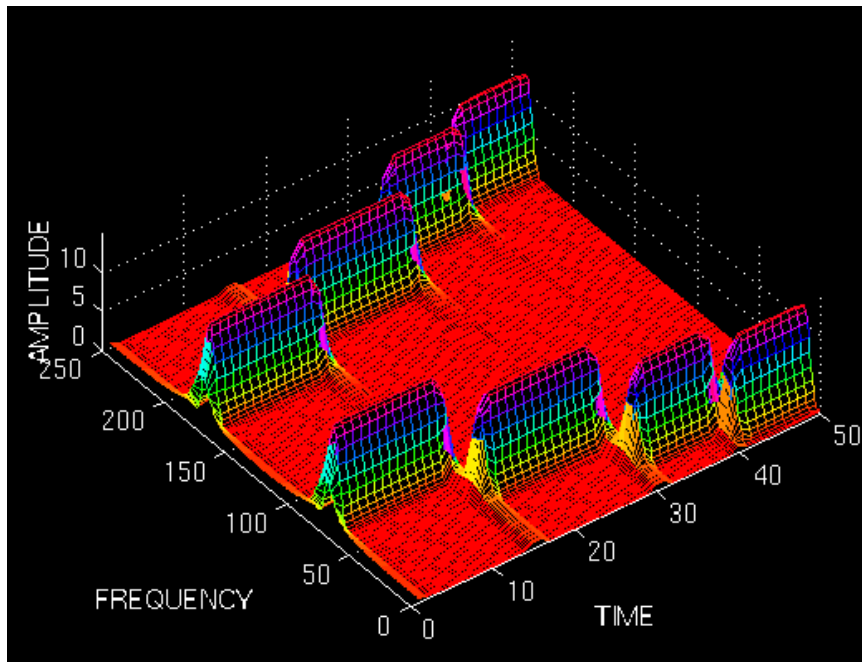


Figura 19– STFT di un segnale contenente 4 componenti frequenziali, ognuna presente in un diverso intervallo del segnale. Pannello superiore: la STFT è eseguita con una Gaussiana con supporto temporale stretto, tale da

garantire una buona risoluzione temporale, ma una ridotta risoluzione in frequenza (bande larghe in frequenza). Pannello inferiore: la STFT è eseguita con una gaussiana con supporto temporale più largo con conseguente perdita di risoluzione nei tempi, ma incremento di risoluzione in frequenza. Si noti che, essendo la FT di un segnale reale simmetrica, e poiché la STFT è una versione ‘a finestre’ della FT, anche la STFT risulta simmetrica rispetto alla frequenza di valore pari a metà frequenza di campionamento (la frequenza centrale nei grafici mostrati). Tratta da [7]

Quindi, in base a quanto descritto, finestre con supporto temporale stretto offrono una buona risoluzione temporale, ma una scarsa risoluzione in frequenza. Viceversa, finestre con supporto temporale ampio forniscono una buona risoluzione in frequenza, ma una scarsa risoluzione temporale; inoltre, le ampie finestre possono violare le condizioni di stazionarietà. Il problema, nella STFT, è che la funzione finestra viene scelta una volta per tutte e viene utilizzata per l'intera analisi, dando origine a una risoluzione temporale costante per tutte le frequenze e una risoluzione in frequenza costante lungo tutto l'asse dei tempi (si veda, in particolare, la figura 17). Tuttavia, si può osservare che quando si analizzano basse frequenze, si può essere maggiormente interessati ad una elevata risoluzione in frequenza (ad es. possiamo essere interessati a discriminare 1 Hz da 2 Hz), mentre in generale si può accettare una minore risoluzione temporale, dato che oscillazioni a bassa frequenza si sviluppano su intervalli temporali più lunghi (ovvero per basse frequenze l'assunzione di stazionarietà è valida su intervalli temporali più lunghi). Al contrario, quando si analizzano alte frequenze, si può essere meno interessati ad una elevata risoluzione in frequenza (come esempio, è ragionevole pensare che sia poco rilevante distinguere 100 Hz da 101 Hz e che lo sia molto di più distinguere 100 Hz da 150 Hz), mentre diventa importante una maggiore risoluzione nel tempo in quanto oscillazioni ad alta frequenza possono comparire transitoriamente su intervalli molto corti (pregiudicando l'ipotesi di stazionarietà del segnale anche su intervalli temporali relativamente brevi).

2.2.3 La Trasformata Wavelet e i suoi vantaggi

Per superare il limite della STFT sopra evidenziato è stata introdotta la Trasformata Wavelet (Wavelet Transform WT). Questa tecnica permette di analizzare i segnali con un approccio chiamato analisi multirisoluzione (Multiresolution Analysis, MRA). La MRA analizza frequenze diverse del segnale con diverse risoluzioni. Infatti, a differenza della STFT che utilizza una finestra di dimensione fissata,

la WT adotta finestre di dimensione variabile nell'analizzare componenti frequenziali differenti all'interno di un segnale. In questo modo garantisce una buona risoluzione temporale ad alte frequenze del segnale e una buona risoluzione in frequenza a basse frequenze del segnale. Questo metodo acquista significato quando il segnale originale è caratterizzato da alte frequenze con breve durata e basse frequenze con durata maggiore. Questo è in genere quello che si verifica nella pratica (figura 20), quindi per le basse frequenze possiamo in parte sacrificare la risoluzione nel dominio dei tempi a vantaggio di una migliore risoluzione nel dominio delle frequenze e viceversa per le alte frequenze.

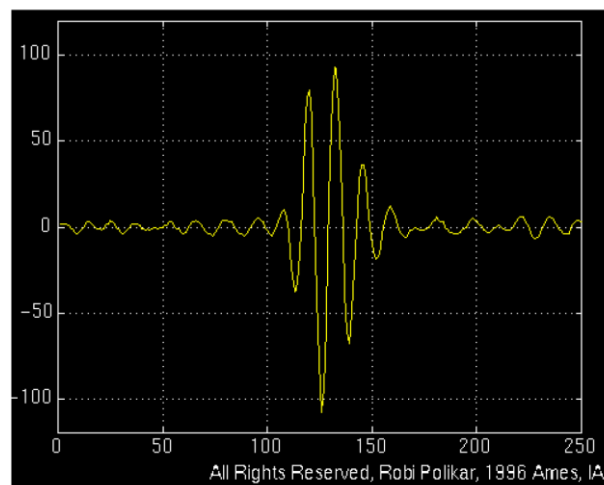


Figura 20– Esempio di segnale con alte frequenze aventi breve durata nella regione centrale e basse frequenze (ai lati della regione centrale) con durata maggiore. Tratta da [7].

Come abbiamo detto, la differenza della WT rispetto alla STFT consiste nell'utilizzare una finestra di dimensione variabile nell'analisi delle diverse componenti frequenziali nel segnale. Questo è realizzato calcolando la somiglianza tra il segnale e un set di funzioni 'template' ottenute scalando (cioè dilatando o contraendo) e traslando lungo l'asse dei tempi una funzione wavelet base $\psi(t)$ (detta *mother wavelet*, dove wavelet significa 'piccola onda') [8]. Questo processo è illustrato schematicamente in figura 21.

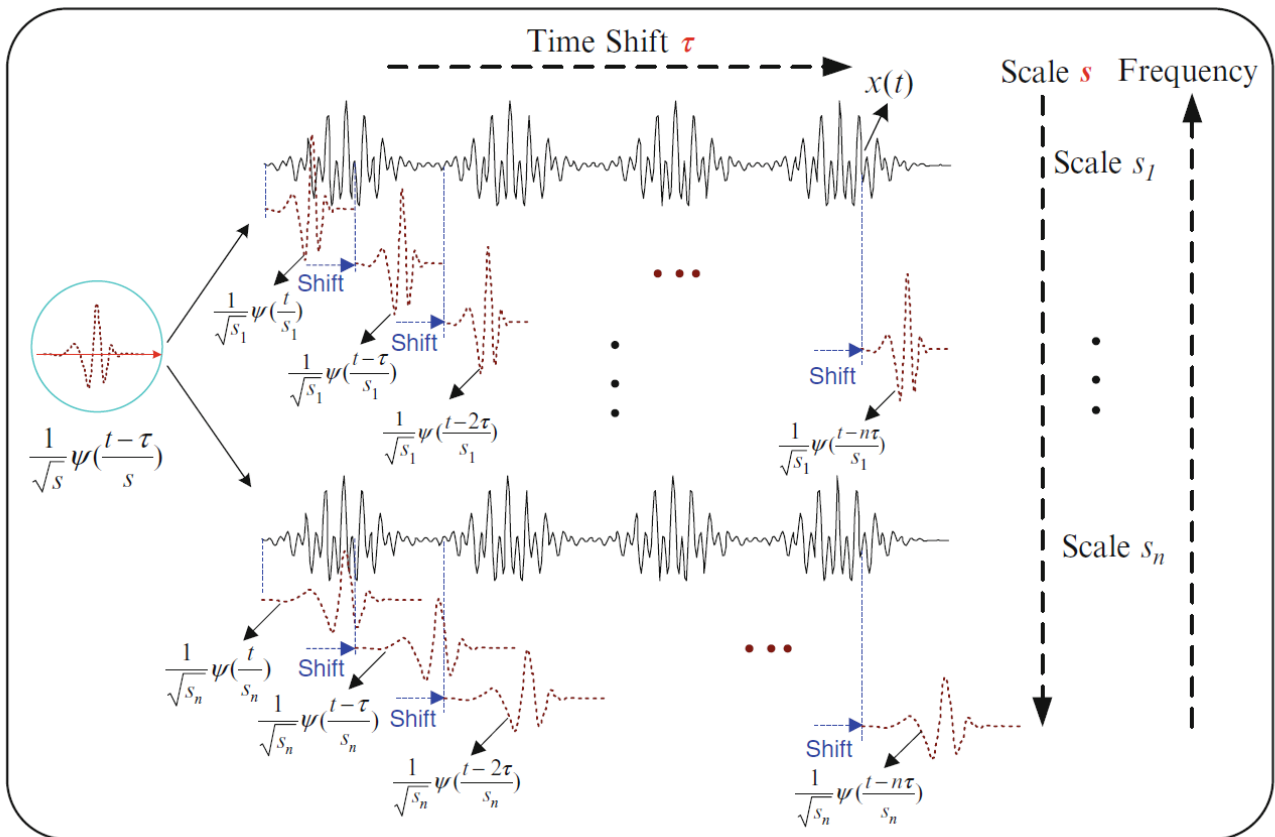


Figura 21- Illustrazione schematica della WT. Ogni versione scalata e traslata della mother wavelet, $\frac{1}{\sqrt{s}}\psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right)$ viene confrontata con la corrispondente sezione di segnale, per calcolarne la somiglianza. La figura mostra anche il rapporto di reciprocità inversa tra scala e frequenza: scale più alte ($s_n > s_1$) corrispondono a frequenze più basse ($f_1 < f_n$). Tratta da [8].

Matematicamente, la trasformata wavelet è espressa nel seguente modo

$$CWT_x^\psi(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \psi^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (2.8)$$

Nella espressione sopra $x(t)$ è il segnale originale da trasformare, $\psi(t)$ è la *mother wavelet*, s (con $s > 0$) è il parametro detto di scala, e τ è il parametro di traslazione nel tempo e il simbolo * denota

il complesso coniugato. *Mother wavelet* sta a significare la funzione usata come prototipo/riferimento per la generazione di ogni versione scalata e traslata usata nella trasformazione: $\frac{1}{\sqrt{s}}\psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right)$ è la versione scalata del fattore s e traslata di τ , dove è stato omesso il simbolo di complesso coniugato assumendo la mother wavelet reale. Si noti che la moltiplicazione per $\frac{1}{\sqrt{s}}$ serve a garantire che ogni versione scalata della wavelet abbia stesso contenuto energetico.

Riassumendo, dunque, il parametro τ ha le dimensioni di un tempo e indica la posizione della funzione wavelet lungo il segnale; il parametro s (adimensionale) è il fattore di scala: $s < 1$ corrisponde a una contrazione della wavelet madre, mentre $s > 1$ significa dilatazione della wavelet madre. Tra la scala s e la frequenza f vi è un rapporto di proporzionalità inversa, ovvero $s \propto \frac{1}{f}$. Pertanto, alte scale (valori elevati di s) corrispondono per reciprocità a basse frequenze, ovvero informazioni globali sul segnale; per controparte, basse scale (valori bassi di s) corrispondono ad alte frequenze. Pertanto, basse frequenze (corrispondenti ad alte scale) sono estratte ed analizzate con wavelet dilatate (largo supporto temporale, stretto supporto in frequenza), mentre alte frequenze (corrispondenti a basse scale) sono estratte ed analizzate con wavelet contratte (stretto supporto temporale, largo supporto in frequenza). Per ogni coppia di valori s e τ , il coefficiente $CWT_x^\psi(\tau, s)$ può essere considerato una misura di somiglianza tra il segnale e la wavelet scalata e traslata.

Di seguito e in figura 22 viene meglio illustrato il procedimento per la trasformazione wavelet, con riferimento alla sua applicazione al segnale già mostrato in figura 20.

Una volta scelta la wavelet madre, si inizia il calcolo con $s = 1$. Nella trasformata wavelet continua (CWT), il calcolo è svolto per tutti i valori di s , più piccoli e più grandi di 1. Per completezza, si evidenzia che la trasformata wavelet continua fornisce una rappresentazione ridondante del segnale a differenza di quello che avviene nella trasformata wavelet discreta (DWT), in cui i parametri di scala e traslazione sono discretizzati usando un campionamento diadico basato sulle potenze di 2 ($s = 2^j$ e $s = k \cdot 2^j$, con $j, k \in \mathbb{Z}$). Tuttavia la DWT non è trattata nel dettaglio in questo lavoro (essa si basa comunque sugli stessi concetti fondamentali qui illustrati relativamente alla CWT) e nel seguito si continuerà a fare riferimento alla sola CWT.

Per semplicità, qui la procedura è avviata dalla scala $s = 1$ e continua per valori crescenti di s , partendo perciò da frequenze più alte e procedendo verso frequenze più basse. Questo primo valore di s ($s = 1$) corrisponde dunque, nella nostra analisi, alla wavelet più compressa, poiché aumentando il valore di s la wavelet si dilata progressivamente. La wavelet viene dapprima posizionata all'inizio del segnale (ovvero $\tau = 0$) e, per quei parametri di scala ($s=1$) e traslazione ($\tau = 0$), viene calcolato il coefficiente $CWT_x^\psi(\tau, s)$ in base all'equazione 2.8. Successivamente, la wavelet con scala $s = 1$ viene

spostata verso destra della quantità τ e si ottiene quindi il valore di trasformazione in τ e $s=1$ nel piano tempo-scala. Questa procedura viene ripetuta fino a quando la wavelet non raggiunge la fine del segnale. Quindi il valore di s è aumentato (o diminuito) e la procedura viene ripetuta.

La figura 22 mostra l'applicazione di questa procedura per due diversi valori di scala s . Si noti che l'area in blu rappresentata in figura 22 denota il supporto temporale della wavelet con scala s (più largo per scale maggiori).

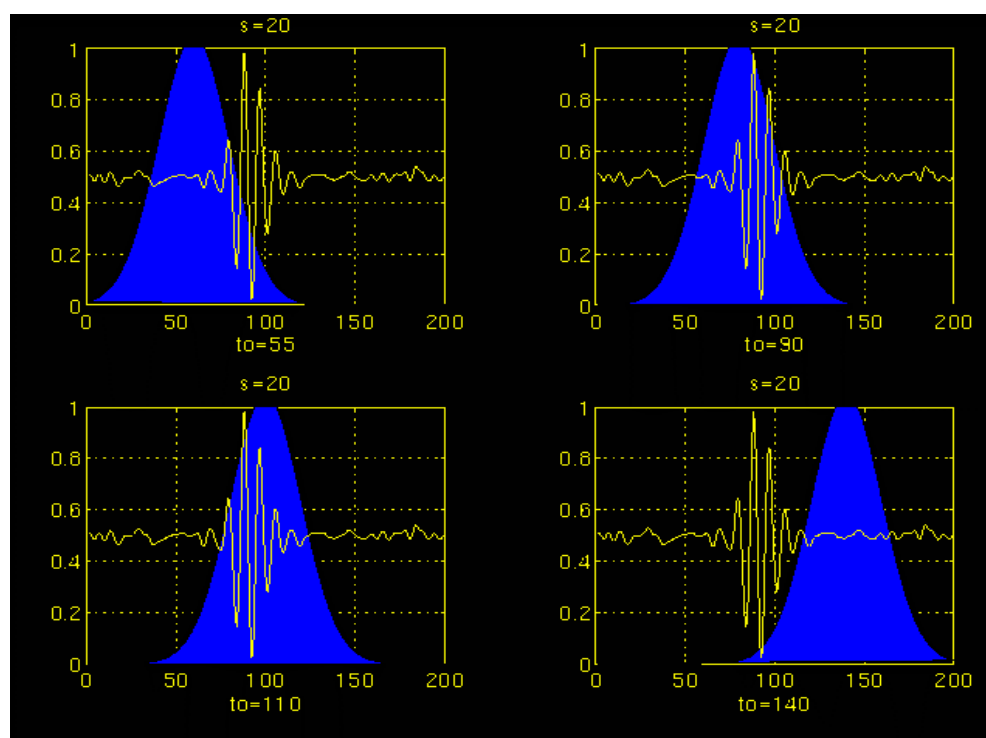
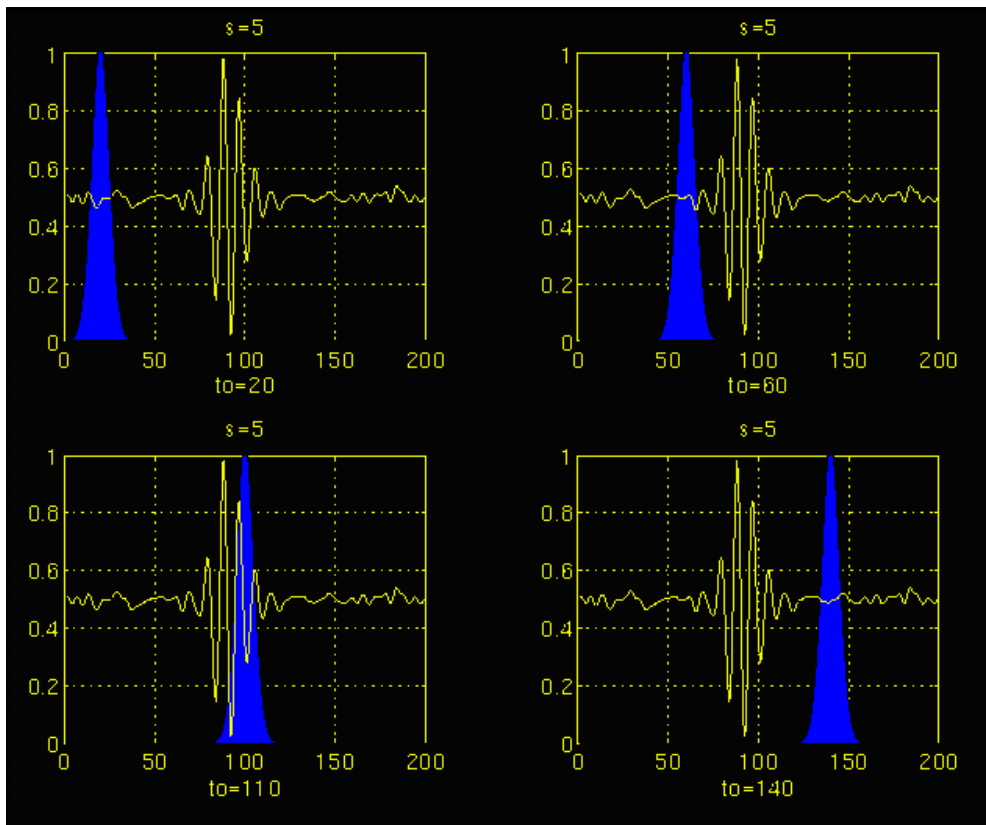


Figura 22 – Procedura per il calcolo della trasformata wavelet del segnale mostrato in figura 20. In ciascun pannello, l'area blu rappresenta il supporto temporale della wavelet alla corrispondente scala s (il supporto temporale è più largo per scale più grandi). La wavelet a ciascuna scala viene traslata lungo tutto il segnale e per ogni valore del parametro τ di traslazione (nei pannelli indicato con t_0) il coefficiente $CWT_x^\psi(\tau, s)$ viene calcolato. Tratta da [7].

Se, in corrispondenza al tempo τ il segnale ha una componente spettrale corrispondente al valore corrente di s (ovvero è simile alla wavelet con scala s), il coefficiente $CWT_x^\psi(\tau, s)$ dà un valore relativamente grande. Se la componente spettrale corrispondente al valore corrente di s non è presente nel segnale, il valore del coefficiente $CWT_x^\psi(\tau, s)$ sarà relativamente piccolo, o zero. Come descritto in precedenza, man mano che la scala aumenta, la trasformata wavelet tende ad estrarre dal segnale le componenti a frequenza inferiore. Si noti che in figura 22 gli assi sono traslazione e scala. Tuttavia in generale, è possibile ottenere anche una rappresentazione tempo-frequenza, convertendo la scala in frequenza ($s = F_c/f$, dove F_c è la frequenza centrale della mother wavelet, definita come la frequenza in corrispondenza della quale è massimo il modulo della sua trasformata di Fourier.).

In conclusione, il vantaggio della WT rispetto alla STFT (che ha una risoluzione costante per tutti i tempi e le frequenze), è quello di adattare la risoluzione alle componenti in esame: la WT ha una buona risoluzione nel tempo e bassa risoluzione in frequenza alle alte frequenze mentre ha una alta risoluzione in frequenza e scarsa risoluzione temporale a basse frequenze. Questo è illustrato nella figura 23 (si confronti la figura 23 con la figura 17)

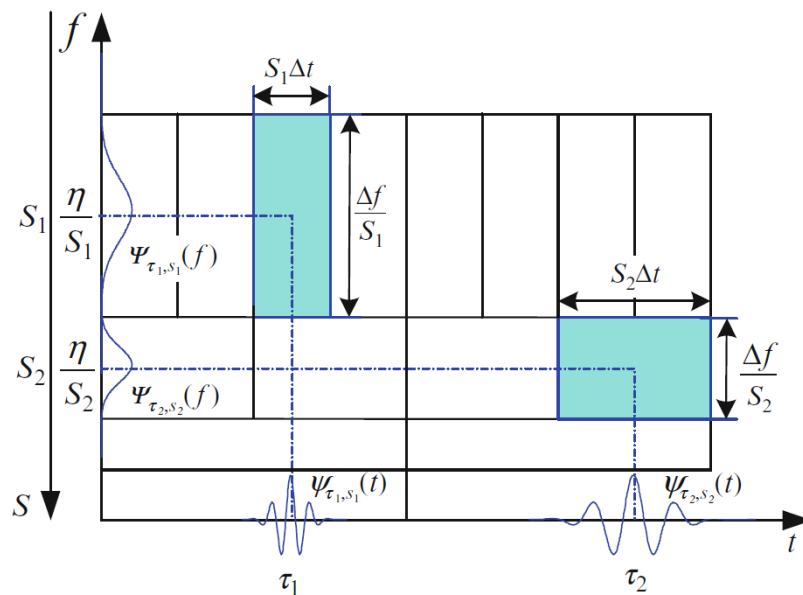


Figura 23– Risoluzione tempo-frequenza nella trasformazione wavelet. Sono rappresentate due wavelet con due diversi valori del parametro di scala ($s_1 < s_2$, quindi $f_1 > f_2$; il simbolo η qui rappresenta la frequenza centrale dell'onda). La wavelet più compressa (scala s_1), che estrae frequenze più alte dal segnale, ha uno stretto supporto temporale e un più largo supporto in frequenza; viceversa la wavelet più dilatata (scala s_2), che estrae le basse frequenze, ha un supporto temporale più largo e un supporto in frequenza più stretto. Tratta da [8].

Un esempio di risultato dell'applicazione della trasformata wavelet è mostrato in figura 24, con riferimento al segnale già considerato nella figura 18. Si può notare che tutte le componenti transienti del segnale sono ben discriminate sia nel dominio del tempo che della scala.

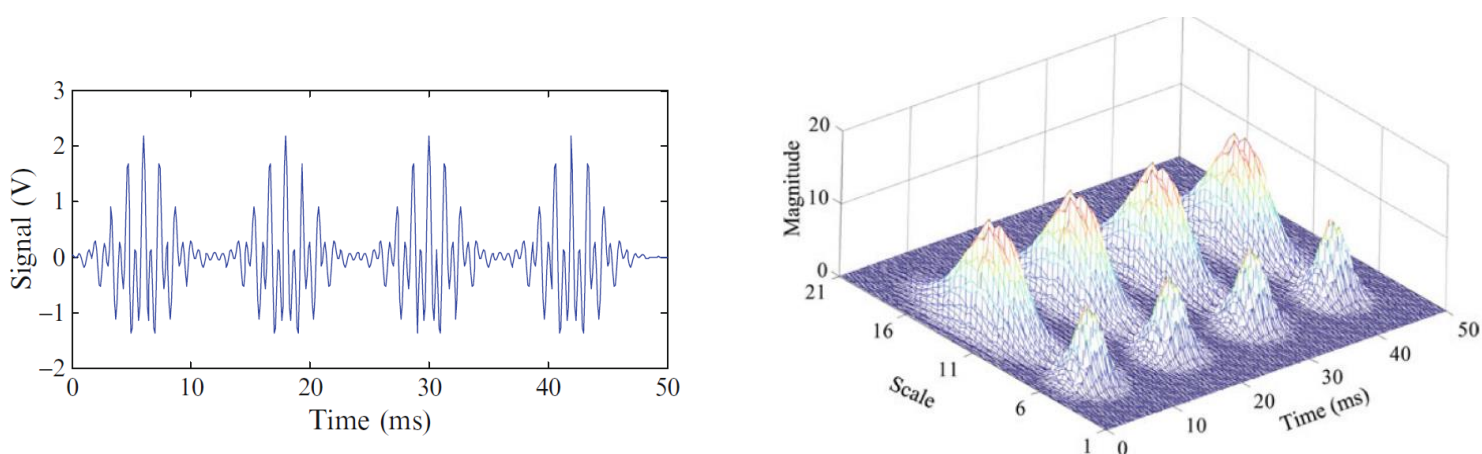


Figura 24: trasformata wavelet (pannello a destra) del segnale mostrato nel pannello a sinistra. Tratta da [8].

Un ulteriore esempio di risultato di applicazione della trasformata wavelet a un segnale non stazionario è mostrato in figura 25.

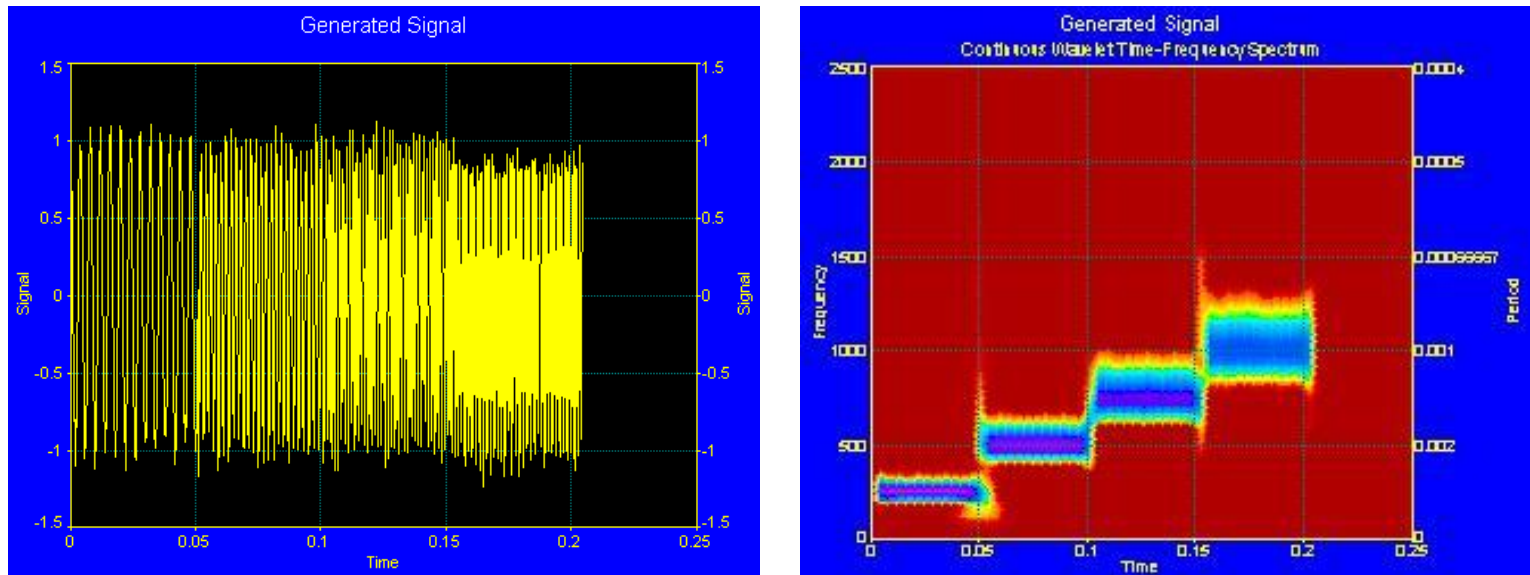


Figura 25 - Trasformata wavelet nel pannello a destra del segnale mostrato nel pannello a sinistra. I valori della trasformata wavelet sono riportati rispetto alla frequenza anziché alla scala. Qui si può ben apprezzare la migliore risoluzione in frequenza alle basse frequenze e la migliore risoluzione nel tempo alle alte frequenze. Tratto da [9].

2.3 Applicazione dei metodi tempo-frequenza ai segnali ERP

Conclusa la prima parte di spiegazione dell'approccio metodologico utilizzato per l'analisi wavelet di un generico segnale, concentriamo ora la nostra attenzione sul perché tale analisi sia importante per meglio caratterizzare i risultati ottenuti tramite ERP.

L'analisi delle componenti ERP in bande di frequenza distinte potrebbe essere svolta utilizzando filtri convenzionali digitali basati su Fourier. Tale approccio riesce a fornire come risultato l'insieme di tutte le componenti di frequenza presenti in un segnale, ma come controparte ha lo svantaggio di non riuscire a localizzare temporalmente quando queste componenti di frequenza emergono,

restituendo risultati spuri con una risoluzione in frequenza temporale che non seguono l'evoluzione temporale del contenuto spettrale del segnale.

Ecco perché sono stati implementati nuovi metodi, alternativi al filtraggio basato sulla trasformata di Fourier, come la trasformata Wavelet, per l'analisi del contenuto spettrale tempo-variante dei potenziali evocati. La Wavelet Transform infatti, come descritto precedentemente, ha due principali vantaggi per quanto riguarda la rappresentazione del contenuto frequenziale del segnale e della sua evoluzione nel tempo:

- 1) Non è condizionata dalla stazionarietà del segnale
- 2) Permette una risoluzione ottimale sia nel campo delle frequenze sia nel dominio dei tempi

Analizziamo entrambi i punti precedenti in relazione ai segnali ERP.

Innanzitutto, per quanto riguarda il punto 1, i segnali cerebrali come l'EEG e di conseguenza i potenziali ERP, come già accennato in precedenza, sono non stazionari, ovvero il loro contenuto in frequenza cambia nel tempo. Utilizzando la Trasformata di Fourier è possibile eseguire analisi spettrali di ERP, trasformando il segnale nel dominio della frequenza. Tuttavia, gli spettri non forniscono informazioni su come le componenti in frequenza evolvono nel tempo e alcune componenti in frequenza non possono essere osservate nello spettro, poiché sono solo di breve durata in relazione alla durata totale della trasformazione in frequenza. Questo è molto importante nel caso degli ERP, dove le risposte rilevanti avvengono solitamente in un tempo relativamente breve (dell'ordine dei millisecondi). [5]

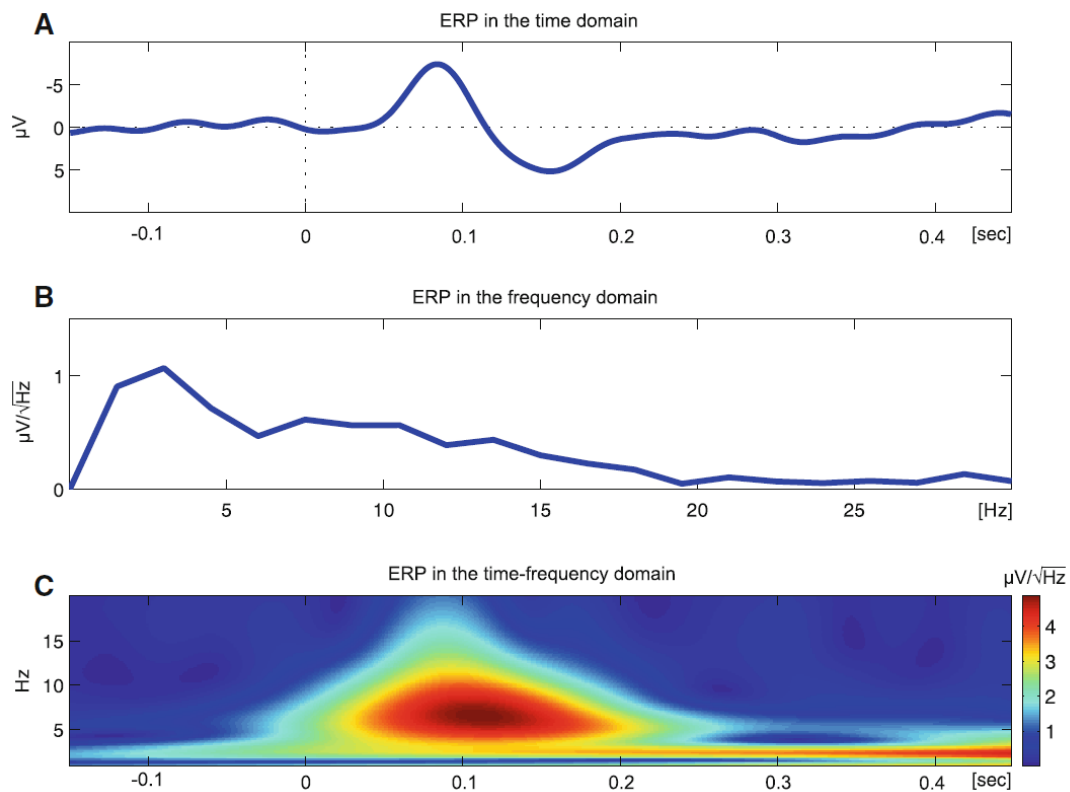


Figura 26 – Rappresentazione di un ERP in diversi domini. Pannello a: nel dominio dei tempi. Pannello b: nel dominio delle frequenze (trasformata di Fourier). Pannello c: nel dominio tempo-frequenza; questa rappresentazione è ottenuta mediante trasformata wavelet. Tratta da [10]

La figura 26 mostra un ERP in diversi domini: tempo, frequenza e tempo-frequenza. Dal pannello b notiamo che si verifica un picco intorno a 2-3 Hz. Nel pannello c (che mostra una rappresentazione tempo-frequenza del segnale ERP ottenuta mediante trasformata wavelet), invece, rileviamo due componenti spettrali e le loro evoluzioni nel tempo sono chiaramente visibili: una componente di frequenza con picco a 6 Hz e a 0.1 s dopo l'inizio dello stimolo e un'altra componente con picco a 2-3 Hz attorno a 0.4 secondi. Come descritto precedentemente, ogni singola riga del grafico tempo-frequenza è il risultato di una trasformazione wavelet separata (che utilizza una wavelet a una specifica scala). È interessante notare che la componente a 2-3 Hz è visibile anche nel dominio della frequenza (pannello b) mentre la componente a 6 Hz non lo è. Ciò è dovuto al fatto che lo spettro è stato calcolato per un secondo e la componente a 6 Hz appare solo per una frazione di quel secondo mentre la componente a 2-3 Hz ha una durata maggiore ed è quindi rilevabile con i tradizionali metodi di trasformazione. [5]

L'esempio sopra illustrato chiarisce l'importanza dell'implementazione dell'analisi tempo-frequenza anche per i segnali ERP; molte componenti come P100, N200, P50 e via dicendo appaiono per un

così breve intervallo di tempo che con i tradizionali metodi di Fourier sarebbe difficile rilevarle e allo stesso non sarebbe possibile analizzare come il loro contenuto in frequenza evolve nel tempo.

Come è facile notare il grafico nel pannello c di figura 26 è tridimensionale: in ascissa è posta la variabile tempo, in ordinata la frequenza e la scala di colori (il cui significato è riportato sulla destra) quantifica l'intensità del segnale alle diverse frequenze e ai diversi istanti di tempo. La codifica a colori può essere utilizzata per rappresentare parametri diversi del segnale a seconda delle applicazioni: ampiezza, potenza, energia o densità spettrale di potenza.

Come visto in precedenza la WT restituisce una scomposizione di $x(t)$ a diverse scale, tendendo a fornire valori più alti a quelle scale e posizioni temporali in cui la wavelet più somiglia a $x(t)$. Le versioni contratte della funzione wavelet corrispondono alle componenti ad alta frequenza del segnale originale e, d'altra parte, le versioni dilatate corrispondono alle oscillazioni a bassa frequenza. Quindi, correlando il segnale originale con le funzioni wavelet di diverse dimensioni (ovvero a diverse scale), possiamo ottenere i dettagli del segnale a diverse scale. Indipendentemente dalle proprietà matematiche delle wavelet da scegliere, un requisito fondamentale è che assomigli ai pattern da localizzare nel segnale, in modo tale da ottenere la migliore localizzazione tempo-frequenza delle feature di interesse nel segnale. [10]

Per quanto riguarda il punto 2, come è stato già evidenziato nel sotto-capitolo 2.2.3, l'efficacia della trasformata wavelet sta proprio nell'utilizzo di wavelet a diverse scale; in questo risiede il superamento del limite della STFT che utilizza una finestra di dimensione fissata e in questo si realizza la possibilità di adattare la risoluzione a seconda della frequenza esaminata. L'utilizzo di una sola wavelet non permetterebbe questo. Infatti, una singola wavelet può essere ottimizzata per avere una risoluzione arbitrariamente alta nel dominio del tempo o nel dominio delle frequenze, ma non in entrambi i domini contemporaneamente. La wavelet infatti è ottenuta moltiplicando una oscillazione a valori complessi con una Gaussiana. A seconda della Gaussiana utilizzata, la wavelet ha una diversa risoluzione di tempo e frequenza. La risoluzione temporale delle wavelet è determinata dalla deviazione standard nel tempo, pertanto, una breve wavelet ha una risoluzione temporale migliore di una wavelet più lunga. Tuttavia, la risoluzione in frequenza è inversamente proporzionale alla risoluzione nel tempo, sulla base del principio di indeterminazione di Heisenberg. In figura 27 è riportato graficamente questo concetto, e le sue implicazioni nell'analisi ERP.

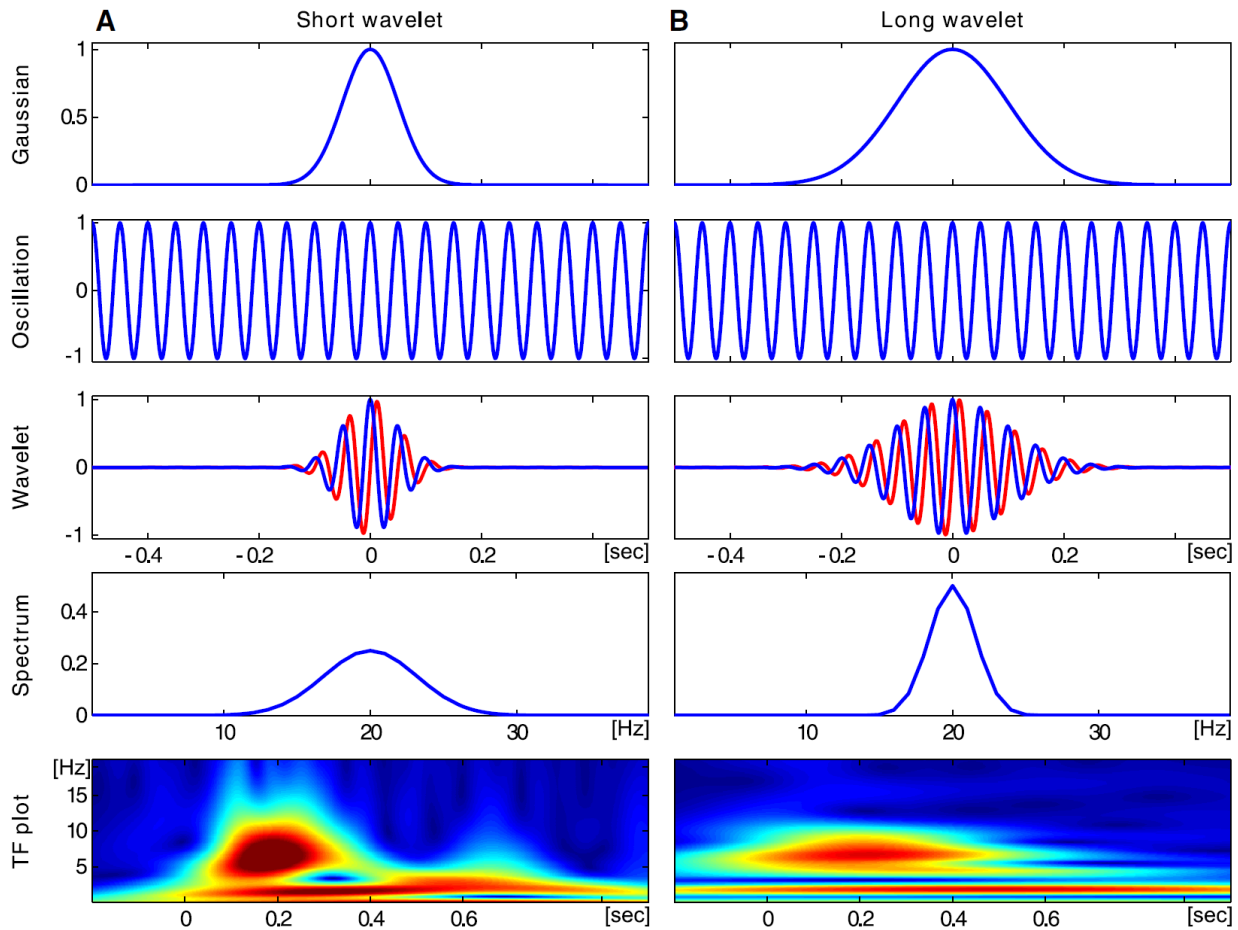


Figura 27 – Analisi tempo frequenza dello stesso potenziale ERP mostrato in figura 26, usando però una sola wavelet a scala fissa (pertanto questa rappresentazione tempo-frequenza corrisponde sostanzialmente a una STFT). Pannello A: Moltiplicando una Gaussiana avente piccola deviazione standard nel tempo (prima riga) per una oscillazione a valori complessi (seconda riga in cui solo la parte reale è mostrata) si ottiene una wavelet (terza riga, in rosso i valori reali, in blu i valori immaginari). Lo spettro della wavelet (cioè il modulo della Trasformata di Fourier della wavelet) è mostrato nella quarta riga. Facendo la convoluzione tra la wavelet (fissata) e il segnale ERP di figura 26, si ottiene il grafico tempo frequenza nella quinta riga. La wavelet con stretto supporto temporale ha una buona risoluzione nel tempo ma una ridotta risoluzione in frequenza; questo comporta una sovrapposizione tra le due componenti frequenziali sopra e sotto i 5 Hz (si confronti con la figura 26). Pannello B: Usando una Gaussiana con una durata maggiore, si ottiene una wavelet con più cicli e con uno spettro più stretto, e perciò una migliore risoluzione in frequenza. In tal caso, le due componenti sono ben separate nel dominio della frequenza, ma localizzate con meno precisione nel dominio del tempo. Tratta da [5].

In particolare, si osserva che la wavelet di durata breve (pannello A in figura 27) ha una migliore risoluzione nel tempo ma una peggiore risoluzione in frequenza rispetto alla wavelet di durata maggiore (pannello B in figura 27). Di conseguenza, lo spettro tempo-frequenza ottenuto con la

wavelet di durata inferiore (quinta riga nel pannello A), pur evidenziando due risposte oscillatorie distinte a 2 Hz e a 6 Hz, mostra una sovrapposizione delle due risposte sopra e sotto i 5 Hz. Al contrario, lo spettro tempo-frequenza ottenuto con la wavelet di durata maggiore mostra una netta separazione in frequenza tra le due risposte, ma la durata temporale delle risposte risulta più ‘spalmata’, a causa della minore risoluzione e quindi localizzazione nel tempo [5].

Un punto importante in relazione all’utilizzo dell’analisi tempo-frequenza per caratterizzare le risposte cerebrali a stimolazioni sensoriali/cognitive, consiste nella possibilità di applicare tale analisi per estrarre le oscillazioni indotte dallo stimolo/evento (event-induced oscillations), introdotte nel sotto-capitolo 2.1. Come precedentemente sottolineato, essendo queste risposte non phase-locked all’inizio dello stimolo, esse tendono ad essere cancellate nel potenziale medio calcolato mediando la risposta temporale sui trial (infatti alcuni trial possono presentare picchi e altri valli alla stessa latenza, che tendono a cancellarsi reciprocamente). Poiché è stato dimostrato che le oscillazioni indotte riflettono importanti informazioni sui processi cognitivi, sono stati sviluppati metodi come l’analisi tempo-frequenza per analizzarli su una singola prova (singolo trial). Se ogni singola epoca/trial di un esperimento EEG viene dapprima sottoposta a una trasformazione wavelet e quindi vengono calcolati i valori assoluti, si ottengono solo valori positivi che non si possono elidere reciprocamente. Mediando dunque le rappresentazioni tempo-frequenza ottenute sui singoli trial, si ottiene una rappresentazione dell’attività totale evento-correlata; i valori assoluti calcolati mediando le trasformazioni wavelet rappresentano l’ampiezza delle oscillazioni. [5]. Questo approccio, per l’estrazione dell’attività sia evocata che indotta, è descritto graficamente nella figura 28 e nella figura 29.

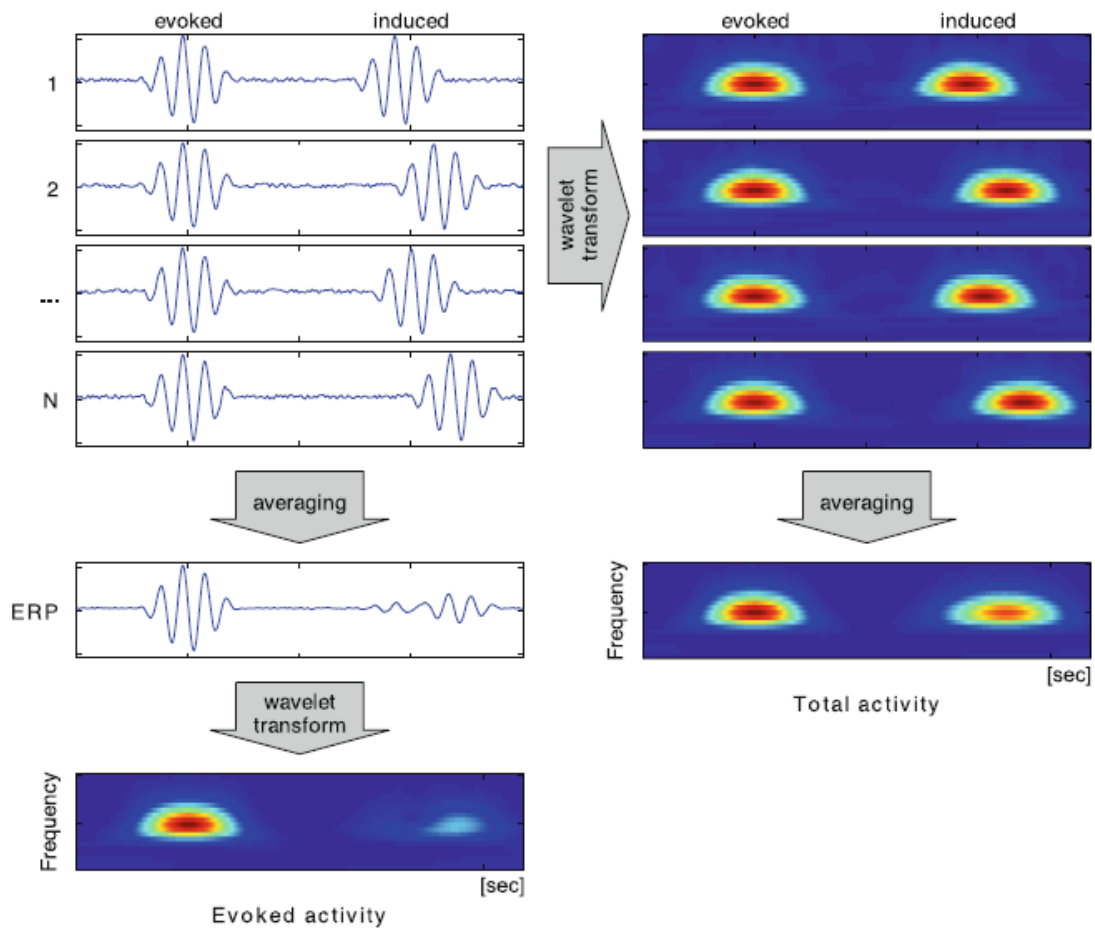


Figura 28 - Oscillazioni evocate e indotte (Evoked Event-Related Oscillations and Induced Event-Related Oscillations). Per estrarre le oscillazioni evocate, è sufficiente fare la media su tutte le singole prove e calcolare una trasformazione wavelet dell'ERP mediato (pannello di sinistra). Per analizzare anche le oscillazioni indotte, ogni singola prova deve essere prima sottoposta alla trasformata wavelet e i valori assoluti devono essere calcolati per prevenire l'annullamento con valori negativi. Quindi, viene calcolata la media delle trasformazioni wavelet, producendo la risposta cerebrale oscillatoria totale che comprende le oscillazioni evocate e le oscillazioni indotte (vedi pannello di destra). Quelle componenti che appaiono solo nella rappresentazione della risposta totale ma non nella rappresentazione della risposta evocata, sono appunto considerate le oscillazioni indotte. Tratta da [5].

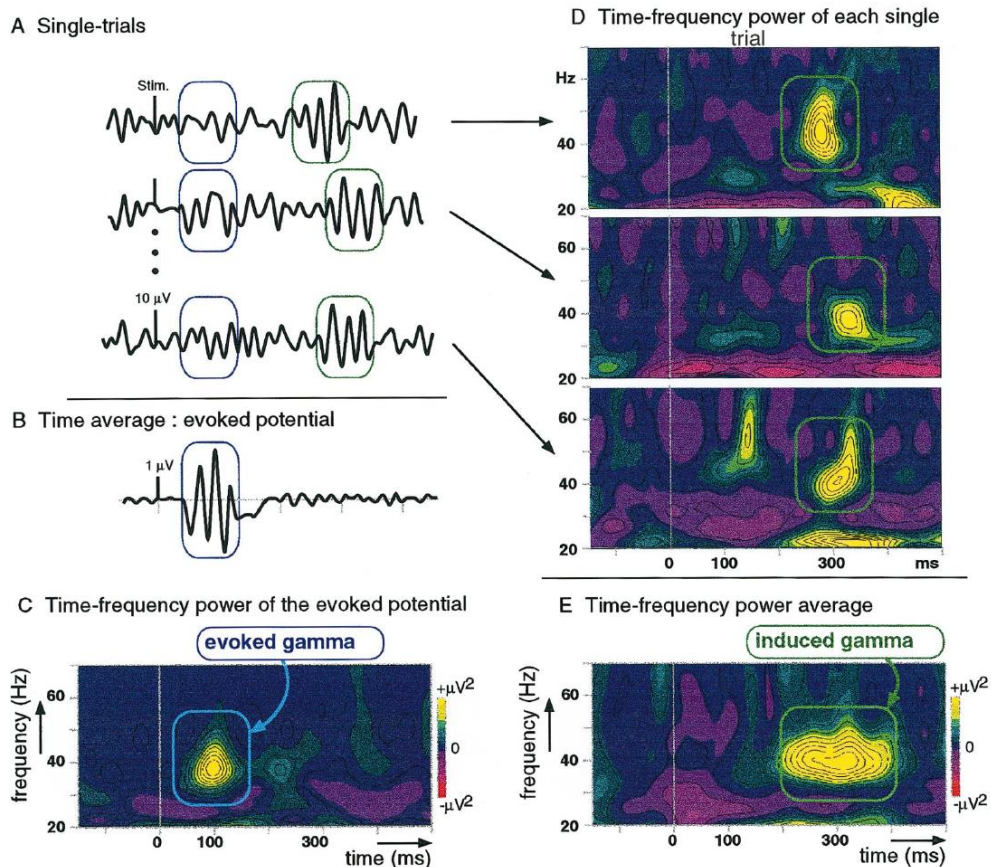


Figura 29 – Oscillazioni evocate e indotte in banda gamma. A) Segnali EEG in singoli trial, che mostrano una risposta di piccola ampiezza in banda gamma, phase-locked rispetto all'inizio dello stimolo (riquadri blu), e una risposta in banda gamma non phase-locked rispetto allo stimolo, ovvero con un jitter nella latenza (riquadri verdi). B) Media dei singoli trial che genera il potenziale evocato convenzionale (cioè mediato), con conseguente cancellazione dell'attività non phase-locked, cioè indotta. C) Rappresentazione tempo-frequenza della potenza della risposta evocata in banda gamma, ottenuta mediante trasformata wavelet del potenziale evocato mediato sulle singole prove. La scala a colori codifica le variazioni di potenza del segnale (positive o negative) rispetto alla baseline di pre-stimolo. Ovviamente, l'attività non phase-locked non compare. Quando invece la potenza nel piano tempo-frequenza viene calcolata per ogni singolo trial (applicando la trasformata wavelet ad ogni singolo trial, pannello D), e quindi viene mediata su tutti i trial (pannello E), la risposta indotta emerge chiaramente (si noti che qui la risposta evocata non è evidente essendo in ogni trial di ampiezza molto inferiore rispetto alla risposta indotta). [Tratta da 6]

Molti pacchetti software commerciali sono dotati di tool per il calcolo della trasformata wavelet e l'analisi tempo-frequenza. Inoltre, sono disponibili molti pacchetti non proprietari, scaricabili liberamente dal Web, che possono essere utilizzati in MATLAB. Uno di questi è il software EEGLab (<https://sccn.ucsd.edu/eeglab/index.php>) il quale offre molte routine aggiuntive per l'organizzazione dei dati EEG e una varietà di strumenti di analisi del segnale.

Capitolo 3

Modelli concettuali della consapevolezza visiva e studi di lesioni

La vista è probabilmente il mezzo principale attraverso il quale analizziamo e percepiamo ciò che ci circonda, ne siamo strettamente dipendenti e tramite il sistema visivo siamo in grado di valutare i molti aspetti dell'ambiente nel quale viviamo quotidianamente.

In questa prima parte cercheremo di spiegare come sia organizzato il nostro sistema visivo, partendo dall'occhio in cui si hanno le prime fasi di elaborazione dell'immagine fino al sistema nervoso centrale, sede dei processi percettivi/cognitivi i quali permettono a ciascuno di noi di ricostruire una personale rappresentazione del mondo che lo circonda. Quindi verranno illustrate le principali teorie relative alla consapevolezza visiva.

3.1 Il sistema visivo nell'uomo

Per comprendere al meglio il meccanismo della visione umana dobbiamo distinguere tre parti principali:

1) Occhio

2) Retina

3) Aree visive della corteccia cerebrale

L'occhio

L'occhio umano è un sistema ottico costituito da un diottro, ovvero un sistema di lenti che comprende: cornea, umor acqueo e umor vitreo e da una lente biconvessa, il cristallino, la cui curvatura della parte anteriore può essere modificata dalla contrazione dei muscoli ciliari, variando così la distanza focale della lente (processo di accomodamento). Cornea, camera anteriore, cristallino e camera posteriore nel loro complesso formano una lente convergente che proietta le immagini sulla retina, rimpicciolite e capovolte. Una membrana muscolare, detta iride, al cui centro è situata un'apertura, la pupilla, consente di regolare la quantità di luce che entra nell'occhio.

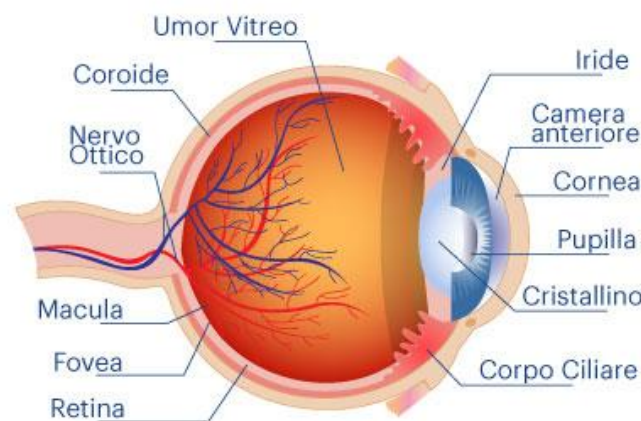


Figura 30: schematizzazione delle parti costituenti l'occhio umano

La retina

La luce è una forma di energia elettromagnetica che entra nell'occhio attraverso la pupilla ed è fatta convergere, dalla cornea e dal cristallino, sulla retina la quale è posta sulla parete posteriore dell'occhio.

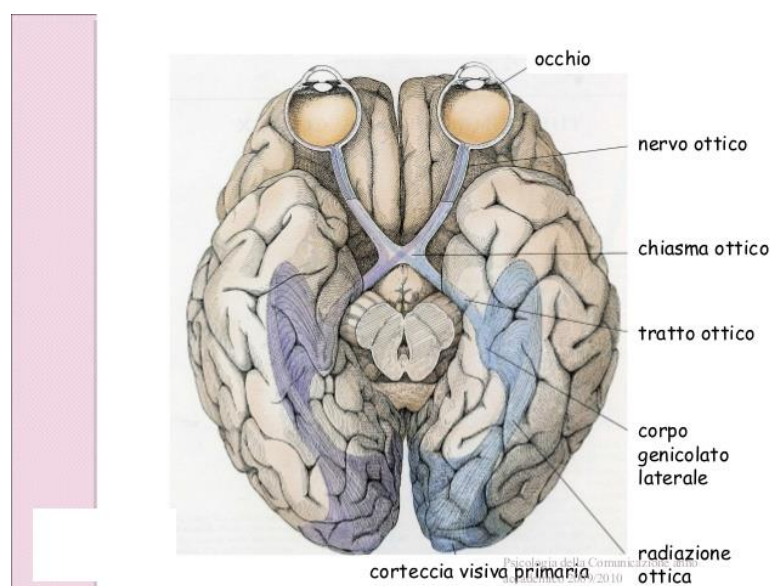
La pupilla è circondata da un'iride pigmentata che può espandersi o contrarsi, rendendo la pupilla più grande o più piccola a seconda del livello di luce incidente. La luce attraversa una complessa rete di cellule per arrivare ai bastoncelli e ai coni, che si trovano nella parte posteriore della retina. La

superficie sensibile dell'occhio infatti è costituita dai fotorecettori, bastoncelli e coni, il cui compito è quello di trasformare in impulsi elettrici le informazioni ricevute dalle reazioni fotochimiche che vengono attivate dalla radiazione luminosa. I milioni di fotorecettori posizionati sulla superficie della retina rispondono alla presenza della luce che li colpisce generando piccoli potenziali elettrici, effettuando così una prima elaborazione del segnale visivo (fototrasduzione). Questi segnali passano per via sinaptica in una rete di cellule nella retina, attivando cellule gangliari retiniche i cui assoni si raggruppano formando il nervo ottico, un “cavo” che conduce l'informazione visiva al di fuori dalla retina fino ai centri superiori, dapprima al Nucleo Laterale Genicolato (Lateral Geniculate Nucleus, LGN) del Talamo e da qui alle aree corticali. Le fibre nervose provenienti da punti diversi della retina si dirigono verso punti diversi del LGN e della corteccia, ricreando così una mappa topologica della retina nel cervello. Gli assoni entrano nel cervello, dove trasmettono i potenziali d'azione a differenti regioni visive con diverse funzioni.

Aree visive della corteccia cerebrale

La corteccia visiva è l'elaboratore dei dati provenienti dalla retina e all'interno di essa si giunge alla vera e propria rappresentazione della forma di immagine definitiva.

Il nervo ottico di ciascun occhio entra nel cervello. Le fibre di ciascun nervo si incontrano in una struttura detta chiasma ottico; metà di esse passa nell'emisfero opposto e si uniscono alla metà del nervo ottico che non è passata dall'altra parte. Questi fasci contengono ora fibre provenienti da ambedue gli occhi e si dirigono in una struttura sotto-corticale chiamata nucleo laterale genicolato (all'interno del Talamo). Qui l'immagine subisce una prima elaborazione che cerca di mettere in evidenza l'oggetto rispetto allo sfondo, i suoi contorni, le differenze di contrasto.



Dal talamo l'informazione viene inviata alla corteccia cerebrale visiva. La corteccia visiva è suddivisa gerarchicamente in più aree. La corteccia visiva primaria (nota anche come corteccia striata o V1) è il sito iniziale di elaborazione dell'informazione visiva nella corteccia; V1 riceve circa il 90% delle proiezioni dalle fibre retiniche attraverso il LGN. La corteccia V1 invia le informazioni a varie aree visive corticali extra-striate come V2, V3, V4, V5 (detta anche MT, Middle Temporal visual area), V6 (detta anche DM, DorsoMedial visual area). Tali regioni sono localizzate nella corteccia posteriore (per lo più nella corteccia occipitale, ma anche in quella temporale e parietale). Esiste una corteccia visiva per ogni emisfero cerebrale. La corteccia visiva dell'emisfero sinistro riceve segnali riguardanti il campo visivo di destra, e la corteccia visiva di destra riceve l'informazione proveniente dal campo visivo di sinistra. Questo è il luogo in cui vengono create ed elaborate le percezioni interne dell'ambiente esterno.

Mentre si ascende la gerarchia visiva, i neuroni hanno progressivamente campi recettivi più ampi e riescono ad elaborare stimoli sempre più complessi (per campo recettivo di un neurone si intende la regione di spazio visivo all'interno del quale uno stimolo esterno è in grado di attivare il neurone). I neuroni nella retina e nel LGN sono monoculari e hanno campi recettivi del tipo 'centre-surround' concentrici, con una regione circolare al centro ('centre') e una corona circolare all'esterno ('surround'); questi neuroni rispondono in maniera ottima alla illuminazione differenziale del 'centre' rispetto al 'surround'. In V1 invece i neuroni mostrano molte nuove proprietà come: la selettività per l'orientamento, la direzione del movimento e la disparità binoculare. I neuroni V1 sono anche sensibili al colore, al contrasto, alla frequenza spaziale e alla dominanza oculare. [11]

Le registrazioni elettriche effettuate in studi neurofisiologici infatti hanno rivelato alcune caratteristiche importanti delle cellule della corteccia visiva, fra queste vi sono la selettività all'orientamento dello stimolo, la loro ordinata organizzazione colonnare e la plasticità dell'intero sistema.

L'intricata circuiteria della corteccia visiva è uno dei grandi rompicapo che hanno incuriosito i neuroscienziati. Differenti tipi di neuroni sono disposti in sei strati corticali, connessi a formare precisi circuiti locali che solo ora stiamo iniziando a comprendere. A ciascuna area visiva sono associati precisi compiti di elaborazione sugli aspetti del mondo visibile, quali la forma, colore, movimento, distanza e molti altri.

Gli studi indicano che circa metà della corteccia cerebrale è adibita ad elaborazioni di tipo visivo e sebbene la corteccia cerebrale visiva sia suddivisa in 6 macroaree ciascuna con il suo compito, l'area

visiva primaria (V1) è al giorno d'oggi la regione di elaborazione visiva più studiata in assoluto. Si tratta di un'area altamente specializzata per il processamento dell'informazione riguardante la forma e la collocazione di oggetti statici.

Come anticipato precedentemente, V1 si posiziona in modo univoco come centro di smistamento primario di quasi tutte le informazioni visive che raggiungono altre aree corticali. Circa il 90% delle proiezioni dall'occhio sono convogliate a V1 attraverso il nucleo laterale genicolato. [11]. Da V1 l'informazione è trasmessa in aree visive di più alto livello, zone extrastriate come V2, V3, V4, V5 (MT), V6 (DM) e PO (Parieto-Occipitale) per un'analisi più specifica attraverso due vie principali: la via dorsale e la via ventrale.

La via dorsale inizia nella corteccia V1, attraversa l'area V2 (dove in parte viene elaborata), giunge all'area dorsomediale (DM o V6) e all'area visiva V5 (o MT) ed in seguito alla corteccia parietale posteriore. La corrente "dorsale" è spesso definita anche la "via del dove e del come" (via del 'where') ed è associata al movimento, alla codifica spaziale della posizione degli oggetti, ed al controllo di occhi e braccia, specialmente quando l'informazione visiva serve per afferrare un oggetto.

La via ventrale inizia sempre nella corteccia V1, prosegue verso V2 e V4, e infine raggiunge la corteccia temporale inferiore (Inferotemporal, IT). È definita la "via del cosa" (via del 'what') ed è associata al riconoscimento delle forme, alla rappresentazione degli oggetti e alla memoria a lungo termine.

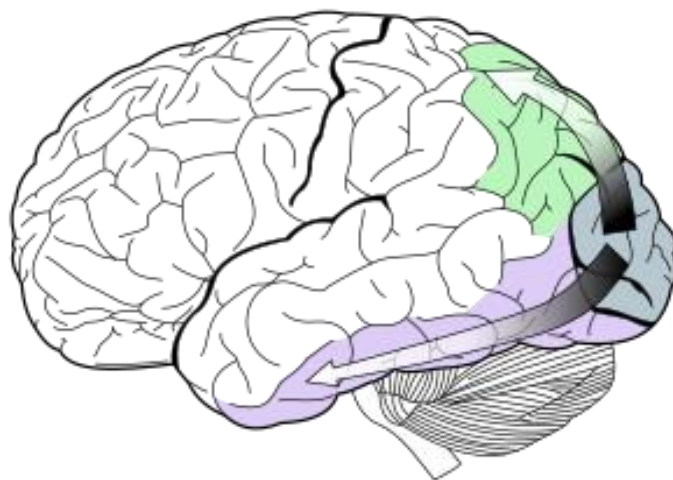


Figura 32: via visiva dorsale e via visiva ventrale

La maggior parte delle connessioni tra aree visive consiste in connessioni feedforward (cioè connessioni sinaptiche tra un'area visiva di più basso livello nella gerarchia verso aree visive di più alto livello) e feedback (ovvero in direzione opposta, cioè da aree visive di più alto livello indietro verso aree visive di più basso livello). Questo sta ad indicare che esiste una complessa interazione all'interno delle reti cerebrali. Inoltre, V1 riceve proiezioni di feedback anche da molte aree alle quali non proietta direttamente (ad esempio dalla corteccia uditiva); ciò evidenzia che molte regioni extrastriate sono in relazione diretta o indiretta con V1.

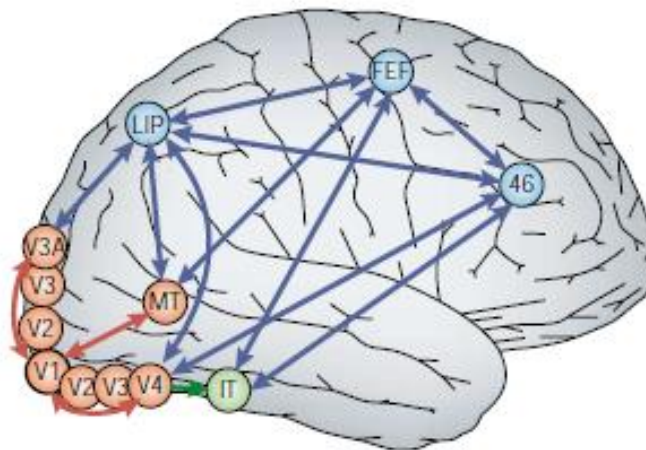


Figura 33: connessioni di V1 con le aree visive extrastriate.
Tratta da [11]

3.2 Modelli concettuali della consapevolezza visiva

Una volta appresi i concetti chiave sull'organizzazione del nostro sistema ottico, ovvero su come il processo di elaborazione dell'immagine si sviluppi dall'occhio fino al sistema nervoso centrale, concentreremo ora la nostra attenzione sul che cosa significhi essere realmente consapevoli di ciò che guardiamo e osserviamo con i nostri occhi. In altre parole, siamo sicuri di essere sempre consapevoli di ciò che osserviamo? Tutto ciò che vediamo entra nella nostra esperienza soggettiva? O qualcosa viene elaborato all'interno del nostro cervello senza che noi nemmeno ce ne rendiamo conto?

Quello che cercheremo di capire in questa parte, e più in dettaglio in seguito, è come sia possibile distinguere una percezione conscia da una inconscia, quali aree neurali siano coinvolte nel processo

di consapevolezza visiva, con quale meccanismo tali aree nervose comunichino tra di loro e con quali tempistiche esse si attivino.

È necessario introdurre inizialmente che cosa si intenda con il termine “consapevolezza visiva”. Il concetto di consapevolezza visiva non è facile da delineare e non esiste una definizione precisa e lineare; difatti molti studi si fondano su una definizione di consapevolezza di tipo empirico. Ovvero, ad un soggetto vengono presentati stimoli visivi di varia natura e come conseguenza la consapevolezza visiva può essere definita operativamente e misurata oggettivamente istruendo il soggetto a dare una risposta per indicare se lo stimolo A o B (target) generico è stato percepito. Il linguaggio verbale, un'azione motoria volontaria o altri sistemi di output volontario garantiscono che il soggetto risponda in modo consapevole anziché automatico; ai soggetti può anche essere chiesto di descrivere quello che hanno visto. Ciò che risulta cruciale è quindi la capacità da parte del soggetto di riportare e riferire in modo chiaro e senza ambiguità se lo stimolo è stato visto o meno. Se il soggetto riferisce di aver visto lo stimolo si parla quindi di percezione conscia, viceversa se il soggetto non riesce a riferire se lo stimolo è stato visto o meno si parla di percezione inconscia.

La consapevolezza così definita può essere vista come la somma di due contributi differenti: il primo è definito come “*consapevolezza fenomenica*”, il secondo invece “*consapevolezza riflessiva*”.

La consapevolezza fenomenica si riferisce a esperienze soggettive immediate, fugaci, vaghe, non sempre così chiare e ai margini della coscienza. È definita come un'esperienza qualitativa, nella quale il soggetto ha una vaga impressione di ciò che sta osservando, come ad esempio semplici sensazioni di colore, forme, dimensioni e orientamento dello stimolo presentato. [11]

I contenuti della coscienza fenomenica che vengono scelti per ulteriori approfondimenti da parte di meccanismi di attenzione selettiva entrano a far parte di ciò che viene definito come consapevolezza riflessiva. È una forma di coscienza di ordine superiore e al contrario della precedente, consiste solo in quei pochi contenuti della coscienza fenomenica che sono stati attentamente selezionati per un'ulteriore elaborazione cognitiva nella memoria di lavoro. I contenuti della coscienza riflessiva entrano a far parte a tutti gli effetti della nostra esperienza soggettiva e possono essere riportati verbalmente o altrimenti espressi attraverso qualsiasi meccanismo di output volontario; possono essere inoltre concettualizzati e codificati in una memoria a lungo termine. [12]

Una volta definito che cosa si intenda con il termine “consapevolezza visiva” quello che immediatamente viene da chiedersi è dove e come tale meccanismo avvenga. Le teorie

sull'argomento sono molteplici, ancora non del tutto chiare e in fase di sviluppo. Molti sono gli aspetti ancora da chiarire e i quesiti aperti; uno di questi riguarda il ruolo relativo della corteccia visiva primaria (V1) e delle corteccie extrastriate. Il ruolo di V1 è il più controverso e il più studiato negli ultimi anni: infatti, ciò che differenzia maggiormente le diverse teorie è se il ruolo di V1 sia necessario o meno per l'effettivo raggiungimento di una percezione consapevole.

Si sono infatti delineate due linee di pensiero a seconda del modello utilizzato:

1) Modello gerarchico

2) Modello di interazione

Ne discutiamo qui di seguito i concetti principali.

Modelli gerarchici – Tali modelli propongono che solo le aree extrastriate di livello superiore sono direttamente e necessariamente coinvolte nella consapevolezza visiva; un eventuale danno a V1 semplicemente interrompe il flusso di informazioni verso queste aree.

Secondo i modelli gerarchici, l'input visivo viene analizzato a livelli crescenti di complessità e specificità diventando così sempre più accessibile alla consapevolezza a livelli più alti della corteccia visiva. Si presume che le aree extrastriate, come V4, MT e la corteccia inferotemporale (IT), riflettano direttamente informazioni coscienti sulle caratteristiche dell'oggetto/stimolo osservato, quali colore, movimento, forma, orientamento spaziale e significato semantico.

Al contrario, secondo tali modelli, V1 fornisce l'input visivo necessario, proprio come gli occhi, ma senza avere alcuna funzione nel rappresentare informazioni visive coscienti, funzione propria delle aree visive extrastriate. In particolare alcuni studiosi suggeriscono che solo le aree visive extrastriate che proiettano informazioni direttamente alla corteccia prefrontale possono direttamente contribuire alla coscienza, basandosi sul presupposto che tutte le esperienze coscienti devono essere riferibili e capaci di generare un atto motorio, processi questi che coinvolgono la corteccia prefrontale. Poiché V1 manca di proiezioni dirette alla corteccia prefrontale, questa teoria presuppone che V1 non possa direttamente contribuire alla consapevolezza visiva. Altri studi propongono che sia regioni frontali sia regioni parietali legate a processi attentivi siano importanti per la percezione conscia e che segnali

'top-down' (cioè da regioni di più alto livello a regioni di più basso livello) verso aree della corteccia extrastriata contribuiscano a selezionare per la consapevolezza specifiche rappresentazioni visive.

I modelli gerarchici quindi presuppongono che la consapevolezza sia correlata più strettamente con l'attività nelle aree extrastriate rispetto a V1 e che l'interruzione dell'attività nella corteccia visiva primaria non dovrebbe compromettere la consapevolezza se l'attività extrastriata rimane intatta.

Modelli di interazione. Questi modelli propongono che V1 sia necessaria alla consapevolezza visiva formando circuiti dinamici ricorrenti, feedforward and feedback, con le aree extrastriate. V1, come già visto in precedenza, ha connessioni reciproche con molte aree extrastriate, comprese le aree V2, V3, V3A, V4 e MT. Secondo questi modelli, l'attività sostenuta tra una data area extrastriata e V1 è necessaria per generare una rappresentazione visiva consapevole. Quindi, nonostante la mancanza di connessioni feedforward dirette con la corteccia prefrontale, V1 può determinare quali informazioni extrastriate raggiungono le aree prefrontali sostenendo o meno le informazioni rappresentate nelle aree extrastriate intermedie. V1 assume quindi una sorta di ruolo decisionale su quali informazioni riescono a raggiungere aree più elevate e quali no.

Le connessioni ricorrenti con V1 sembrano supportare altre importanti funzioni. Aree di livello più elevato potrebbero inviare segnali di feedback per confermare l'affidabilità delle informazioni che ricevono da V1 o per modulare l'attività di V1 sulla base di meccanismi 'top-down', quali il raggruppamento percettivo o la selezione attentiva. Le connessioni ricorrenti con V1 potrebbero anche funzionare come sistema di indicizzazione per contribuire al raggruppamento percettivo ('perceptual binding'), cioè contribuire a collegare tra loro tipi diversi di informazioni che vengono analizzati in aree o percorsi visivi separati. Con 'perceptual binding' ci si riferisce appunto al problema di come il cervello integra diverse informazioni su colore, orientamento, movimento, forma e così via in un'unica rappresentazione percettiva coerente. Poiché V1 contiene una mappa ad alta risoluzione di quasi tutte le informazioni sulle caratteristiche rilevanti e forma connessioni ben organizzate con aree extrastriate, potrebbe funzionare come una sorta di "mappa" che consente di unificare le informazioni percettive provenienti da più aree visive.

I modelli di interazione quindi prevedono che l'interruzione dell'attività V1 dovrebbe sempre compromettere la consapevolezza anche se l'attività extrastriata rimane intatta. [11]

Per riassumere, gli attuali modelli di consapevolezza non concordano sostanzialmente sul fatto che l'attività nelle aree corticali visive sia sufficiente a generare una coscienza visiva o se sia necessaria un'attività corticale diffusa per la coscienza. I cosiddetti "globalisti" hanno postulato che la coscienza visiva emerga dall'attivazione interconnessa e sincrona di vaste aree distribuite del cervello come regioni parietali, prefrontali e anteriori. L'interazione globale armoniosa di singoli processori separati sarebbe quindi il tratto distintivo del cervello cosciente. Al contrario, i cosiddetti "localisti" hanno proposto che la coscienza visiva emerga da circuiti cerebrali specifici e localizzati in cui la sola attività delle aree corticali visive è sufficiente a generare una percezione cosciente.

Molti aspetti restano da chiarire, tra cui se il ruolo di V1 sia necessario e sufficiente per raggiungere consapevolezza visiva. Molte prove attuali indicano che l'attività V1 è necessaria per la normale percezione cosciente ed è strettamente associata ad alcune forme di consapevolezza visiva. Ulteriori e future indagini su V1 e le sue interazioni con aree più elevate potrebbero fornire importanti informazioni sulle basi neurali della consapevolezza visiva.

3.3 Studi di lesioni

Studi in soggetti umani che hanno subito danni a regioni della corteccia visiva costituiscono una metodica di rilievo per inferire il ruolo funzionale delle aree danneggiate. Qui si riportano studi di interesse nell'indagine della consapevolezza visiva.

Lesioni alla corteccia visiva primaria (pazienti emianoptici) e 'blindsight'

Un particolare caso di interesse nello studio della consapevolezza visiva è l'analisi dei processi neurali in soggetti che hanno subito un danno irreversibile alla corteccia visiva primaria, nelle regioni parietali posteriori della corteccia, detti pazienti emianoptici. L'emianopsia consiste nella perdita di metà del campo visivo e può colpire la metà destra/sinistra o la metà alta/bassa del campo visivo.

In linea teorica quindi pazienti affetti da questi tipi di lesione sarebbero totalmente incapaci di vedere e rilevare stimoli presentati nel campo visivo cieco controlesionale.

Persone con un danno esteso alla corteccia visiva primaria riferiscono di non poter vedere oggetti presentati nel loro campo visivo cieco ma in casi di compiti a scelta forzata (nei quali può venire loro chiesto di prendere in mano un oggetto o riferire verbalmente la posizione di un oggetto/stimolo presentato nel loro campo cieco), non potendo esimersi nel dare una risposta o compiere una scelta, lo fanno con notevole accuratezza pur non avendo una percezione visiva cosciente dell'oggetto o stimolo in questione. Questo curioso ed affascinante fenomeno è noto come blindsight o "visione

cieca". Nei compiti a scelta forzata, i pazienti con blindsight possono discriminare la presenza, la posizione, l'orientamento e la direzione di movimento di uno stimolo bersaglio con una significativa precisione nonostante non segnalino nessuna consapevolezza dello stimolo. Oltre la sua importanza a livello clinico, il fenomeno del blindsight offre una concreta opportunità di studio dei correlati neurali alla base della percezione cosciente o non cosciente e del ruolo della corteccia visiva primaria in tali processi. [12]

Inizialmente la principale tecnica di analisi per questo tipo di lesioni era la risonanza magnetica funzionale; attraverso immagini si riusciva ad interpretare se e quali aree neurali si attivavano in paziente con danni a V1. Successivame

nte alcuni ricercatori hanno iniziato ad analizzare i potenziali ERP in pazienti affetti da blindsight confermando i risultati ottenuti precedentemente tramite fMRI.

Da questi studi è emerso che la capacità dei pazienti affetti da blindsight di rilevare stimoli presentati nel loro campo visivo cieco è dovuta ad attività evocate nelle zone ventrali extrastriate della corteccia visiva. L'attività di queste aree neurali però rimane fortemente sotto soglia, facendo sì che tali processi residui rimangano totalmente inconsci non manifestando alcuna consapevolezza.

Questi risultati indicano che potrebbe esserci una forte dissociazione tra l'elaborazione delle informazioni e la consapevolezza di tali informazioni: un certo numero di informazioni può raggiungere il sistema visivo per consentire ai soggetti di fare discriminazioni a scelta forzata, ma tali informazioni non risultano sufficienti per innescare un processo di consapevolezza.

Nei pazienti che hanno subito un danno ad uno dei due emisferi e che mostrano residue abilità di discriminazione visiva, le aree neurali della corteccia extrastriata (zone strutturalmente ancora intatte della corteccia in questi pazienti), potrebbero svolgere un ruolo cruciale. Sebbene la via geniculostriata, ovvero dalla retina al nucleo genicolato fino a V1 fornisca la maggior parte dell'input visivo alla corteccia cerebrale, esistono percorsi subcorticali alternativi che proiettano direttamente verso le aree extrastriate bypassando la corteccia visiva primaria. Molti studi infatti confermano che le informazioni visive possono ancora raggiungere aree extrastriate dopo che V1 è stata lesionata o inattivata. Difatti, studi su pazienti con danno a V1 unilaterale indicano che una rete di aree extrastriate può ancora essere attivata durante la stimolazione del campo visivo cieco. Gli stimoli non percepiti presentati nell'emisfero cieco evocano robuste risposte funzionali nelle aree occipito-parietale posteriore come MT e V3A sensibili al movimento, V4 / V8 sensibili al colore e le regioni occipitali laterali coinvolte nella percezione dell'oggetto. Quindi, una notevole elaborazione dello stimolo viene mantenuta nella corteccia extrastriata, ma questa attività sembra essere insufficiente

per supportare la consapevolezza in assenza di V1, in linea con le previsioni dei modelli di interazione. È possibile che i segnali provenienti da regioni extrastriate siano troppo deboli o degradati per supportare una percezione cosciente, ma siano sufficienti per una corretta discriminazione visiva nel caso in cui sia imposta una scelta forzata. [13]

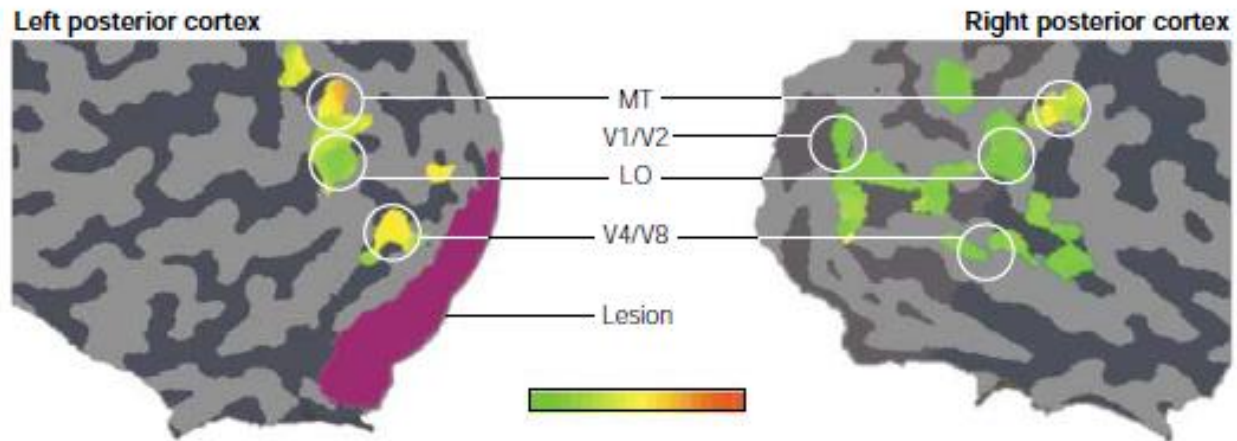


Figura 34: attivazione di aree visive extrastriate in un paziente con lesione alla corteccia visiva primaria. Tratta da [11].

La figura sopra riportata è una rappresentazione corticale della corteccia posteriore sinistra e destra in un paziente con blindsight e sito di lesione in V1 mostrato in viola. Le regioni attivate da stimoli presentati nel campo visivo sinistro intatto o nel campo visivo destro alterato sono indicate da una scala di colori (il verde rappresenta solamente il campo visivo sinistro, il rosso rappresenta solamente il campo visivo destro, il giallo rappresenta entrambi i campi). Come è possibile notare le aree extrastriate sopra citate MT, V4 / V8 e l'area occipitale laterale (LO) sono state tutte attivate da stimoli presentati all'emisfero cieco sebbene il paziente non fosse in grado di riportare una percezione cosciente di quello che stava osservando.

Per riassumere, le ipotesi sopra riportate dimostrano che la cecità corticale non significa necessariamente l'assenza di una risposta cerebrale in aree visive, specialmente quando la lesione è limitata alle aree visive primarie (V1). Studi hanno messo in evidenza un certo grado di riorganizzazione cerebrale nei pazienti con danni cerebrali ad uno dei due emisferi, dimostrando un certo grado di attività inconscio in aree corticali visive extrastriate. [13]

Lesioni alla corteccia extrastriata

Al contrario degli effetti devastanti delle lesioni V1, il danno a qualsiasi altra area visiva corticale porta a deficit più ristretti nella percezione visiva. Descriveremo in seguito alcuni tipi di lesione in aree extrastriate.

Le lesioni dell'area V2 possono portare a menomazioni del raggruppamento percettivo, ma non compromettono altre facoltà visive come ad esempio l'acuità visiva o la sensibilità al contrasto. Grandi lesioni bilaterali che comprendono l'area MT e vaste aree circostanti hanno portato alla perdita della percezione del movimento in alcuni pazienti, ma le lesioni MT in aree più limitate provocano deficit moderati nella discriminazione di direzione del movimento; tale deficit può però essere recuperato parzialmente col tempo.

Il danno, nelle regioni ventrali, come le aree V4 o V8 può portare alla perdita della percezione cosciente del colore, mentre le lesioni della corteccia inferotemporale possono compromettere il riconoscimento di oggetti e volti.

Lesioni del lobo parietale posteriore possono portare a deficit globali nell'attenzione visiva e nella consapevolezza. Difatti, i pazienti con lesioni unilaterali mostrano spesso negligenza spaziale, ovvero l'incapacità di rilevare o segnalare la consapevolezza di stimoli presentati all'emisfero contralesionale. Le lesioni bilaterali invece possono portare ad un deficit più profondo e complesso come la sindrome di Balint, che è caratterizzata dall'incapacità di percepire o occuparsi di più di un oggetto alla volta (simultanagnosia), deficit dell'attenzione e menomazioni nei movimenti oculari e nelle azioni che hanno bisogno di supporto visivo.

Il fatto che lesioni indipendenti delle regioni V1 o parietale-temporale possano compromettere notevolmente la visione cosciente indica che nessuna singola area visiva è sufficiente per la consapevolezza visiva. Mentre diverse regioni parietali-temporali sono state associate alla capacità di rilevare e rispondere a stimoli visivi, V1 sembra essere l'unica area visiva corticale cruciale per la consapevolezza visiva.

Capitolo 4

Studi ERP di percezione visiva conscia e inconscia

Il sistema visivo è uno dei canali percettivi più importanti per esplorare l'ambiente circostante e nel capitolo precedente abbiamo descritto in modo sintetico come e dove l'informazione visiva venga elaborata, codificata e sintetizzata.

Ci siamo quindi soffermati sul concetto di consapevolezza visiva, fornendone una definizione oggettiva e operativa, cercando di delineare che cosa si intenda con i termini di percezione conscia ed inconscia.

La domanda fondamentale per quanto riguarda l'elaborazione visiva però rimane ancora irrisolta: come e soprattutto quando l'informazione visiva in ingresso genera consapevolezza visiva? Ovvero, quando entra a far parte a tutti gli effetti dell'esperienza soggettiva di chi sta osservando?

Le teorie e le risposte proposte a tale domanda sono state molteplici e in qualche caso molto diverse una dall'altra, sia per quanto riguarda le conclusioni riportate, e sia per quanto riguarda gli approcci metodologici utilizzati durante l'analisi. Sebbene quindi, una risposta chiara ed univoca in grado di conciliare le varie teorie elaborate sull'argomento non sia stata ancora sviluppata, in quest'ultima sezione cercheremo di riportare i concetti chiave, le metodologie adottate e le conclusioni pubblicate delle teorie più recenti e significative, fornendo una panoramica generale ma allo stesso tempo sufficientemente dettagliata dei recenti studi sui processi neurali alla base della visione consapevole.

4.1 I paradigmi sperimentali ERP per lo studio della visione conscia/inconscia

La ricerca empirica sul problema fondamentale della *consapevolezza* è iniziata con la ricerca dei correlati neurali della percezione conscia (Neural Correlates of Consciousness, NCC) nella vasta gamma dei processi cognitivi. È diventata una delle questioni più impegnative nella ricerca neuroscientifica negli ultimi due decenni e si basa sulla premessa che solo alcune delle attività neurali che hanno continuamente luogo all'interno del sistema nervoso sono in correlazione diretta e causale con l'esperienza cosciente.

I metodi di imaging cerebrale, come risonanza magnetica funzionale (fMRI), sono stati usati negli ultimi 10-15 anni per studiare i correlati neurali della consapevolezza visiva, ma a causa della loro relativamente scarsa risoluzione temporale, presentano dei limiti nel rilevare il decorso temporale dell'elaborazione neurale o la sequenza temporale in cui le aree neurali sono attivate durante il processo di percezione consapevole. Per questo motivo la ricerca neuroscientifica moderna si è concentrata anche su un'altra metodologia per studiare i processi neurali alla base della consapevolezza visiva, ovvero i potenziali evento-correlati (ERP). Gli ERP infatti riflettono con una risoluzione del millisecondo l'evoluzione temporale della risposta elettrica del cervello a specifici eventi sensoriali e cognitivi. La tecnica ERP fornisce uno strumento eccellente per esaminare i meccanismi neurali mediante i quali il sistema nervoso consente l'emergere di esperienze soggettive coscienti. Le registrazioni elettrofisiologiche durante i compiti visivi possono far luce sulle dinamiche temporali dell'esperienza soggettiva del vedere. Informazioni dettagliate sulla dinamica temporale dell'elaborazione neurale possono essere ottenute registrando l'elettroencefalogramma mentre il partecipante svolge un compito cognitivo o visivo e i cambiamenti di potenziale elettrico time-locked con eventi sensoriali o cognitivi sembrano essere un metodo ideale per seguire direttamente il decorso dell'elaborazione neurale con una precisione al millisecondo durante le attività cognitive. [14]

Nello studio dei correlati neurali della percezione visiva conscia, la visibilità soggettiva dello stimolo deve in qualche modo essere manipolata per produrre condizioni che differiscono rispetto alla percezione cosciente.

Manipolare la consapevolezza visiva significa applicare una serie di metodologie, le quali differiscono l'una dall'altra in base al caso applicativo, e rendere uno stimolo, che senza alcuna manipolazione sarebbe facilmente rilevabile dal soggetto, "invisibile" se viene applicato un certo grado di manipolazione più o meno complesso, facendo sì che il soggetto sottoposto al test visivo non riesca a percepire consapevolmente lo stimolo. Le manipolazioni di coscienza quindi sono una metodologia usata molto frequentemente in quegli studi che ricercano i correlati neurali di coscienza. Questo tipo di procedure infatti consente di creare condizioni in cui è possibile distinguere quando il soggetto che prende parte all'esame/test percepisce consapevolmente uno stimolo visivo, da quando invece non lo percepisce. È rilevante sottolineare l'importanza di una corretta progettazione del paradigma sperimentale usato per manipolare la consapevolezza della visione. Infatti, nelle situazioni di vita reale, gli stimoli percepiti consciamente differiscono dagli stimoli che rimangono al di fuori della consapevolezza nelle loro caratteristiche fisiche, il tempo concesso per la loro elaborazione o la quantità di risorse attenzionali assegnate per la loro discriminazione. Tuttavia, per isolare i correlati neurali della consapevolezza percettiva, si deve sperimentalmente produrre una differenza nell'esperienza soggettiva che non può essere attribuita a differenze oggettive di stimolazione, tempo

di esposizione o attenzione. I ricercatori hanno cercato di raggiungere questo obiettivo progettando paradigmi in cui l'input visivo rimane lo stesso, mentre la percezione cosciente varia tra stati consapevoli e inconsapevoli. L'idea di base quindi consiste nel confrontare le risposte neurali agli stimoli visivi in condizioni in cui raggiungono la consapevolezza visiva con le risposte agli stessi stimoli quando non raggiungono la consapevolezza. Se gli stimoli sono fisicamente identici e solo l'esperienza cosciente degli osservatori differisce tra le condizioni proposte, allora la differenza nelle risposte neurali tra le condizioni, come differenze nelle onde degli ERP evocati dovrà essere necessariamente correlata al processo di consapevolezza visiva. Difatti, una potenziale critica potrebbe essere basata proprio sul fatto che in alcune manipolazioni di coscienza le condizioni sperimentali non sono fisicamente identiche. Pertanto, le differenze negli ERP potrebbero riflettere questa differenza fisica dello stimolo utilizzato e non la differenza nei processi che generano la visibilità soggettiva dello stimolo. Questo problema è comunemente superato utilizzando metodi con condizioni invariati nei quali appunto si confrontano due diverse esperienze di consapevolezza visiva mantenendo costante la stimolazione in modo tale da non creare nessuna ambiguità sul risultato ottenuto. Quindi, sebbene le differenze di ampiezza nelle forme d'onda dell'ERP possano a volte essere attribuite a differenze fisiche tra gli stimoli presentati in condizioni consapevoli e inconsapevoli, la maggior parte degli studi utilizza stimoli identici in entrambe le condizioni di test.

Ci sono diversi modi in cui la consapevolezza visiva può essere manipolata mentre gli stimoli fisici vengono mantenuti identici o il più simili possibile. Tra essi si possono citare:

- **Mascheramento (Masking)**: Target visibili sono resi talvolta invisibili mediante stimoli di mascheramento, generalmente presentati dopo il target entro un certo intervallo temporale dalla presentazione del target, ma senza modificare il target stesso

- **Ridotto contrasto (low-contrast stimuli)**: Vengono generati stimoli a basso contrasto così da essere presentati vicino alla soglia di percezione conscia del soggetto; in tal modo lo stesso stimolo fisico è consapevolmente percepito circa nella metà dei trials, e non percepito negli altri trial

- **Rivalità binoculare (binocular rivalry)**: solitamente, il cervello fonde le informazioni provenienti dai due occhi per aggiungere profondità alla visione. Ma se le due immagini sono così differenti da non poter essere fuse insieme, il cervello sceglie l'immagine di un solo occhio e sopprime l'altra. In pochi secondi, la percezione passa spontaneamente da un'immagine all'altra.

- **Percezione bistabile (bistable perception)**: può essere generata da stimoli visivi ambigui, ovvero stimoli che il sistema visivo può interpretare in più di un modo.

- **Cecità ai cambiamenti (change blindness)**: si riferisce ad una sostanziale difficoltà nel rilevare i cambiamenti tra due presentazioni di immagini successive, le quali sono separate da un breve blank (display vuoto) o altra interruzione.



Figura 35: esempio di stimolo visivo utilizzato in paradigmi di rilevamento dei cambiamenti



Figura 36: esempio di stimolo visivo utilizzato in paradigmi di percezione bistabile

I precedenti sono alcuni esempi di paradigmi di stimolazione applicati per manipolare la consapevolezza visiva, mantenendo costante la stimolazione fisica in condizioni consapevoli e inconsapevoli, e per studiare variazioni nell'ERP nelle due condizioni (consapevolezza/inconsapevolezza). Tuttavia bisogna notare che in alcuni di questi paradigmi viene confrontata una condizione in cui uno stimolo è consapevolmente percepito con una percezione in cui lo stimolo non è consapevolmente percepito (pur se presente, come ad esempio nei paradigmi di mascheramento o low-contrast), mentre in altri paradigmi (ad es. quello della percezione bistabile o quello della binocular rivalry) vengono confrontate due differenti esperienze di consapevolezza visiva mentre la stimolazione è mantenuta costante. Ancora diverso è il caso della cecità ai cambiamenti in cui si confronta la condizione in cui si ha consapevolezza di un cambiamento negli stimoli e la condizione in cui si ha assenza di tale consapevolezza, pur rimanendo il cambiamento negli stimoli fisici sempre presente. È importante riconoscere che questi diversi metodi possono enfatizzare aspetti diversi dell'elaborazione visiva e quindi produrre ERP diversi e forse diversi correlati di coscienza. Probabilmente l'approccio migliore sarebbe quello di impiegare vari metodi, ciascuno dei quali fornisce una prospettiva diversa rispetto allo stesso problema.

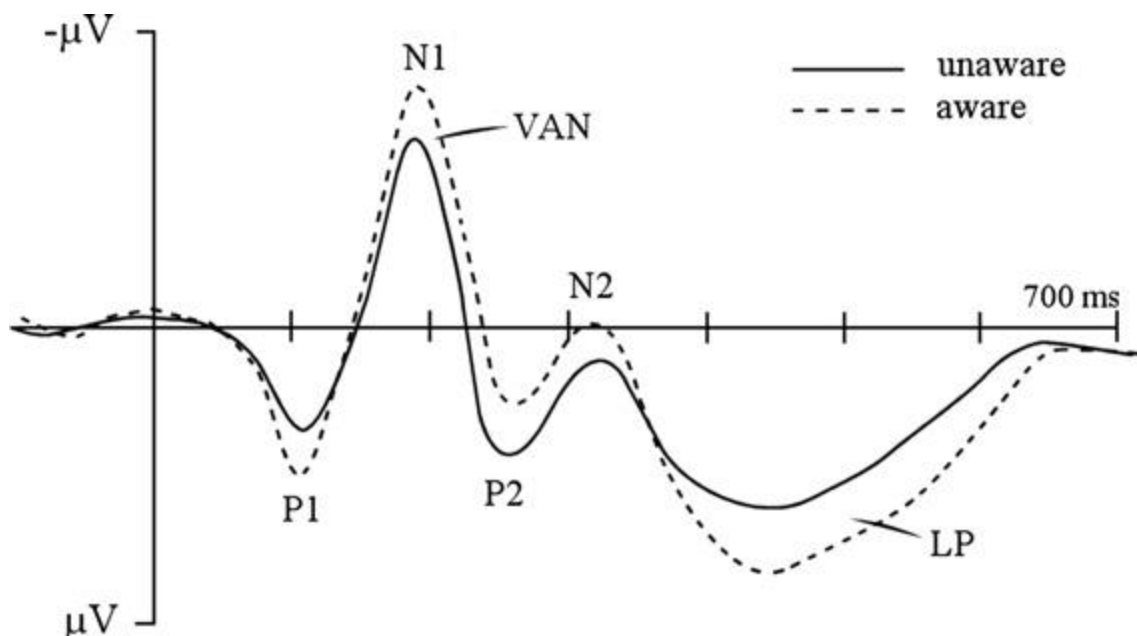
4.2 Teorie della consapevolezza visiva e risposte ERP

Come precedentemente detto, l'approccio ERP per lo studio delle basi neurali della consapevolezza visiva consiste nel focalizzarsi su un aspetto specifico (legato al paradigma sperimentale adottato e al fenomeno percettivo usato per manipolare la consapevolezza) e nell'assumere che, all'interno del sistema visivo nel suo insieme, alcune attività neurali si correlano all'esperienza visiva cosciente mentre altre attività no. La logica alla base di tali esperimenti è che un cambiamento nell'attività cerebrale può essere assunto come una firma dell'elaborazione cosciente o non cosciente. In paradigmi dove l'input è rimasto costante ma la percezione è cambiata, le corrispondenti modificazioni nell'attività neurale dovrebbero dunque rivelare i correlati neurali della ~~coscienza~~ percezione consapevole. Confrontando gli ERP associati alla percezione visiva inconscia e conscia, lo scopo degli studi ERP sulla consapevolezza visiva è di individuare la tempistica e la topografia sullo scalpo dei processi neuroelettrici che correlano specificamente, e forse consentono, la costruzione dell'esperienza visiva soggettiva. Tuttavia, il principale problema nell'individuare i correlati neurali della percezione conscia (NCC) è che qualsiasi attività o processo cerebrale che risulta correlato all'esperienza consapevole, può essere: a) un prerequisito neurale necessario affinché

un evento entri a far parte della coscienza soggettiva; b) il substrato neurale che corrisponde direttamente e costituisce l'esperienza cosciente; c) una conseguenza neurale corrispondente a qualsiasi ulteriore elaborazione post-percettiva dell'evento coscientemente percepito. Sebbene i processi post-percettivi stessi possano essere interessanti, non sono rilevanti per l'obiettivo principale nella neuroscienza della coscienza, che è appunto quello di rivelare i meccanismi che generano causalmente esperienze coscienti. Pertanto, è importante escludere gli effetti confondenti dei processi post-percettivi innescati dalla consapevolezza al fine di concentrarsi su finestre temporali pertinenti

I segnali ERP, come descritto nei capitoli precedenti, sono composti da una serie di deflessioni positive e negative, ognuna ad una certa latenza dalla presentazione dello stimolo che le ha generate. L'analisi ERP nell'ambito della consapevolezza visiva si basa proprio sullo studio di quali componenti correlano con processi di visione conscia. Quali delle numerose componenti ERP (C1, P1, N1, N2, P3) riportate nel secondo capitolo sono direttamente correlate a processi di consapevolezza visiva?

I principali candidati, secondo le ipotesi fino ad ora elaborate, sono la componente P100, la componente N200 e infine la P300 (si veda figura 1). Come è possibile notare in base alla distinzione che abbiamo introdotto nel primo capitolo, P100 e N200 sono due componenti esogene, mentre P300 è una componente di tipo endogeno. Le prime sono componenti più precoci, riflettono processi cognitivi di più basso livello e le loro caratteristiche sono influenzate in gran parte dalle caratteristiche fisiche dello stimolo. Allo stesso tempo però sono comunque influenzate da meccanismi di manipolazione cognitivi e dall'attenzione posta allo stimolo stesso. La P300 è una componente più tardiva e riflette processi cognitivi di più alto livello come accesso alla memoria di lavoro, attenzione selettiva e più in generale riflette la natura dell'interazione che il soggetto ha con lo stimolo.



Lo studio delle componenti ERP come basi neurali di consapevolezza visiva si basa sul confrontare ampiezza, latenza e topografia di ciascuna componente ERP in condizioni in cui il soggetto riporta di aver visto lo stimolo presentato (percezione conscia) rispetto a quelle invece in cui il soggetto riporta di non aver rilevato lo stimolo (percezione inconscia) (si veda figura 1). La prima componente ERP per la quale sono state riportate evidenze di correlazione con la percezione visiva consapevole è P1, in genere osservato subito dopo 100 ms dall'insorgenza dello stimolo. È stato dimostrato che la percezione cosciente è correlata con le ampiezze di P1 più positive (più positive rispetto alle condizioni in cui lo stesso stimolo non è percepito in modo cosciente). In secondo luogo, i risultati di altri studi suggeriscono che una differenza di ampiezza negativa attorno a 200 ms dopo l'inizio dello stimolo (Visual Awareness Negativity, VAN, cioè una amplificazione di negatività delle componenti N1 e N2) è il correlato primario della consapevolezza visiva. Infine, la terza differenza di ampiezza negli ERP che è stata associata alla consapevolezza visiva è la positività tardiva (Late Positivity, LP), e spesso osservata circa 300 ms dopo la presentazione dello stimolo e che coinvolge la componente P3 (cioè una amplificazione di positività della P3).

Le onde ERP precedentemente descritte che sono state suggerite essere correlate con la percezione cosciente differiscono l'una dall'altra non solo nella loro tempistica, ma anche nella loro ampiezza, polarità e topografia sullo scalpo suggerendo che sono basate su ~~fonti~~ sorgenti anatomicamente e funzionalmente distinte nel cervello. Pertanto, le onde ERP e i processi cerebrali sottostanti che sono stati suggeriti come correlati della consapevolezza visiva sono quindi molto diversi l'uno dall'altro. Quindi, quale di queste forme d'onda venga identificata come correlata alla consapevolezza visiva ha importanti conseguenze per le teorie NCC in generale, e in particolare per i modelli relativi alle basi neurali della coscienza visiva. Divergenze riguardanti i correlati ERP della consapevolezza visiva significano anche divergenze nelle ipotesi di fondo e nelle definizioni di coscienza e consapevolezza.

In particolare, come abbiamo già accennato nel capitolo precedente, spesso si distingue tra due concetti di consapevolezza. La consapevolezza fenomenica si riferisce a esperienze soggettive immediate, fugaci, non verbali, il cui contenuto può spesso variare in chiarezza, e la cui sensazione può essere vaga. La consapevolezza riflessiva o di accesso, invece, consiste di quei contenuti della coscienza fenomenica che sono selezionati per ulteriori processi cognitivi o di memoria; è considerata una forma di consapevolezza di ordine superiore, in grado di manipolare i contenuti della consapevolezza fenomenica e accedere a una gamma di sistemi cognitivi di output. La distinzione concettuale e funzionale tra consapevolezza fenomenica e riflessiva, implica che essi possono anche avere distinti correlati neurali che possono essere dissociati l'uno dall'altro e indagati separatamente, ad esempio utilizzando ERP. Altri modelli di consapevolezza, invece non separerebbero la

consapevolezza fenomenica e riflessiva, ma affermano che tutti i contenuti consapevoli devono avere accesso a sistemi cognitivi di output (report verbale/motorio).

Nel precedente capitolo abbiamo visto che la maggior parte dei segnali visivi raggiunge la corteccia attraverso il nucleo laterale genicolato del talamo, sebbene esistano anche altri percorsi. Nella corteccia, l'informazione visiva viene proiettata nelle aree visive dorsale e ventrale, che, pur non essendo completamente separate e indipendenti l'una dall'altra, mediano diverse funzioni visive. La via visiva dorsale converge su aree parietali ed è associato a funzioni principalmente visuomotorie e di codifica spaziale. La via visiva ventrale proietta alle aree corticali temporali che codificano le relazioni spaziali e abilita funzioni visive come il riconoscimento degli oggetti. Una notevole quantità di evidenze suggerisce che l'attività lungo la via visiva ventrale sia necessaria per la coscienza visiva. In particolare, alcuni studiosi ritengono che la consapevolezza visiva fenomenica venga generata nella via visiva ventrale da interazioni locali ricorrenti (cioè feedforward-feedback) tra aree visive ventrali di livello superiore ed inferiore (l'iniziale scarica di attività sensoriale che si estende verso aree visive di livello più elevato mediante connessioni feedforward sarebbe inconscia, mentre la successiva attività ricorrente feedback-feedforward darebbe origine a una consapevolezza fenomenica). La coscienza riflessiva emergerebbe in seguito a un'ulteriore espansione delle interazioni locali ricorrenti, mettendo in comunicazione le aree frontali e parietali con le cortecce sensoriali. I dati che supportano il ruolo dell'attività di feedback nella consapevolezza visiva provengono in particolare da studi che dimostrano che l'attività neurale che si verifica dopo segnali feedforward è correlata alla percezione soggettiva dello stimolo. Altri ricercatori invece sostengono che l'attività di tipo feedforward sia correlata alla percezione cosciente e che le interazioni ricorrenti tra aree visive inferiori e superiori abbiano solo uno scopo modulatore e non influiscono sui processi che portano alla consapevolezza. Entrambe le opinioni, tuttavia, condividono l'idea che i correlati della coscienza visiva risiedano principalmente all'interno della corteccia visiva.

Sebbene vi sia un sostanziale accordo sul fatto che le aree visive ventrali siano necessarie per la consapevolezza visiva si ritiene che l'attività in specifiche aree visive, sebbene correlata con la consapevolezza, non sia di per sé sufficiente per la percezione consapevole. Il ruolo della corteccia visiva primaria (V1) è il più discusso. Negli esseri umani neurologicamente sani V1 è una parte cruciale del sistema visivo, e il danno ad essa porta di solito a deficit evidenti nella consapevolezza visiva. Tuttavia, contenuti visivi coscienti sottili possono essere presenti anche se V1 è danneggiata, il che implica che V1 non è strettamente necessaria per esperienze visive soggettive. Il ruolo delle

aree extrasensoriali è un'altra questione controversa. I risultati di vari studi suggeriscono che la consapevolezza visiva sia accompagnata, non solo dall'attività nel sistema visivo, ma anche dall'attività nelle regioni prefrontale e parietale. In effetti, alcune teorie propongono che la coscienza emerga come risultato dell'attività sincrona su aree corticali distribuite. Altri sottolineano il ruolo dell'attività sincrona tra la corteccia e il talamo nel generare la percezione cosciente.

Un segno distintivo dei modelli che evidenziano l'importanza di un'attività neurale globale e diffusa come necessaria per la consapevolezza è che si concentrano sugli aspetti funzionali e cognitivi della consapevolezza, in particolare la disponibilità di informazioni consapevoli per i sistemi di output e il reporting verbale. Secondo il "modello di spazio di lavoro neuronale globale" (global neuronal workspace model), l'interazione globale armoniosa di singoli processori separati è il tratto distintivo per una percezione cosciente. Le informazioni nella corteccia visiva, ad esempio, raggiungono la coscienza solo dopo essere state selezionate nella rete neuronale diffusa che consente di influenzare i sistemi cognitivi e motori. Il modello sottolinea anche l'importanza dell'attenzione per la coscienza: l'attenzione infatti è vista come un prerequisito necessario (ma non sufficiente) per la percezione cosciente e questo è in linea con numerosi risultati che mostrano l'importanza dell'attenzione per la consapevolezza visiva. Altri, tuttavia, hanno tentato di differenziare l'attenzione dalla consapevolezza, proponendo che anche se l'attenzione è strettamente connessa con la consapevolezza, alcune caratteristiche della percezione consapevole potrebbero ancora dimostrarsi indipendenti dall'attenzione. Tuttavia, come discusso in seguito, la relazione tra attenzione e coscienza è uno dei quesiti centrali nella ricerca degli eventi neurali che sono in correlazione con la percezione cosciente. Un punto che viene spesso trascurato nelle discussioni sulla relazione tra attenzione e coscienza è che l'attenzione è un concetto ampio che può essere diviso in processi separati. L'attenzione può essere diretta volontariamente oppure può essere guidata dallo stimolo. Quindi, non esiste una risposta semplice alla relazione tra attenzione e consapevolezza.

Per riassumere quindi, gli attuali modelli di consapevolezza non concordano sostanzialmente sul fatto se l'attività nelle aree corticali visive sia sufficiente a generare una consapevolezza visiva o se sia necessaria un'attività corticale diffusa per la consapevolezza. In particolare, per meglio sintetizzare quanto descritto precedentemente, si possono individuare le seguenti principali teorie. Una teoria accetta la distinzione tra consapevolezza fenomenica e consapevolezza riflessiva; secondo tale teoria, la consapevolezza fenomenica coinvolge le aree visive ventrali ed emerge attraverso connessioni locali ricorrenti (feedback-feedforward) tra aree visive ventrali di livello superiore e inferiore, e sarebbe il prerequisito necessario per la consapevolezza riflessiva che avverrebbe successivamente attraverso l'espansione dell'attività neurale verso aree frontali e parietali (e il collegamento tra queste

aree e le aree visive). All'interno di questa teoria, il marker elettrofisiologico della consapevolezza fenomenica sarebbe la VAN (Visual Awareness Negativity che si manifesta intorno a 200 ms post-stimolo), che si manifesta più precocemente in particolare nelle regioni occipito-temporali; mentre la più tardiva LP (Late Positivity, cioè una amplificazione della P300) centralizzata e parietale sarebbe il marker ERP della consapevolezza riflessiva e di processi post-percettivi. L'altra teoria (Global Neuronal Workspace Model) della consapevolezza, invece, mette in discussione la distinzione tra consapevolezza fenomenica e consapevolezza riflessiva e sostiene che la percezione consapevole debba necessariamente aver accesso a un comportamento volontario e al linguaggio e quindi alla capacità di riferire verbalmente circa l'esperienza. In questa teoria, il concetto di consapevolezza coincide quindi con la consapevolezza riflessiva; secondo tale teoria, che sottolinea l'importanza delle interazioni neurali su larga scala, sarebbe pertanto la LP che principalmente riflette i processi di percezione consapevole, mentre la VAN corrisponderebbe ad uno stadio di processamento pre-conscio. [14,15]

Nel seguito, verranno esaminati i risultati relativi a ciascuna delle tre principali deflessioni nell'ERP che sono state osservate come correlate alla consapevolezza visiva (l'amplificazione di positività della componente precoce P100, l'amplificazione di negatività della N100 e N200, ovvero la Visual Awareness Negativity, e l'amplificazione di positività della P300, ovvero la Late Positivity) e discutiamo le conclusioni che si inferiscono dalle evidenze sperimentali.

4.3 La componente P100

Componenti P1 che originano in aree visive extrastriate ad una latenza di circa 100 millisecondi dopo l'inizio dello stimolo, si ritiene riflettano le risposte sensoriali (esogene) allo stimolo, poiché sono influenzate principalmente dalle caratteristiche fisiche esterne dello stimolo presentato (ad esempio la luminanza e il contrasto rispetto allo sfondo). Una caratteristica fondamentale di questa forma d'onda è che viene generata indipendentemente dalla richiesta o dal compito visivo che sta svolgendo il soggetto.

Il segnale neurale, in corrispondenza di uno stimolo visivo, raggiunge V1 entro 40 ms e le aree extrastriate superiori nella corrente ventrale entro 100 ms post stimolo; poiché i segnali di feedback corticale locale, provenienti dalle aree extrastriate di più alto livello, hanno dimostrato di influenzare in tempi molto brevi le aree di livello inferiore, allora la componente P1 potrebbero riflettere le prime interazioni di feedback tra le diverse aree corticali visive.

La componente P1 è stata analizzata in soggetti durante manipolazioni di coscienza specifiche e mirate.

Tra le informazioni più importanti in una scena visiva ci sono fattori come il colore, la profondità e le variazioni di intensità luminosa che definiscono i bordi ed i contorni degli oggetti. Una particolare caratteristica è denominata “contrasto di luminanza” ed è definita come la differenza di luminanza tra zone adiacenti.

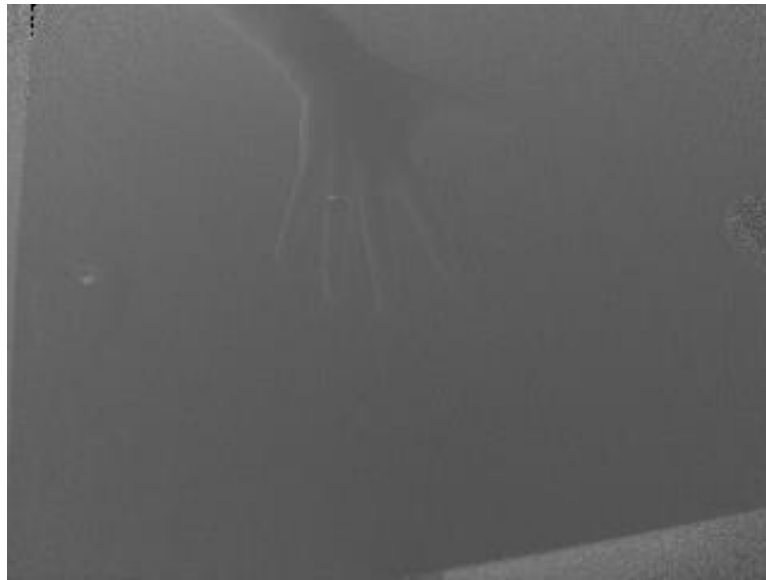


Figura 38: stimolo visivo in paradigmi di metodo a contrasto ridotto

Gli stimoli a contrasto ridotto possono essere utilizzati per generare risposte cerebrali vicino alla soglia di consapevolezza, in modo tale che gli ERP possano essere misurati per stimoli identici (o quasi identici) quando questi ultimi generano consapevolezza visiva e quando non lo fanno. Alcuni studi infatti hanno presentato stimoli a basso contrasto in prossimità di una soglia di rilevamento soggettiva determinata individualmente e hanno scoperto che stimoli consapevolmente riconosciuti suscitavano una maggiore ampiezza positiva nella finestra temporale P1 (110 - 160 ms) rispetto a stimoli che non venivano riconosciuti.

Percezione bistabile e Change blindness (CB) sono ulteriori due metodi di manipolazioni attraverso i quali sono stati raggiunti risultati simili al caso precedente. La percezione bistabile può essere evocata da stimoli visivi ambigui, nel senso che il sistema visivo può interpretarli in più di un modo a seconda del punto in cui il soggetto concentra la sua attenzione visiva (ad esempio la percezione del cubo di Necker). Il secondo invece si riferisce ad una sostanziale difficoltà nel rilevare cambiamenti tra due presentazioni di immagini successive che sono separate da un breve periodo di vuoto (display privo di immagini). Busch et al. hanno osservato che la semplice rilevazione del

cambiamento tra due immagini consecutive, che non prevede un'identificazione esatta di che cosa sia rappresentato nelle immagini, ha provocato un P1 intenso e ampio quando i cambiamenti sono stati rilevati rispetto a quando non stati rilevati. Poiché il miglioramento di P1 è apparso durante l'attività di rilevamento del cambiamento ma non in un'attività di ricerca visiva generica, Busch et al. hanno concluso che P1 potrebbe riflettere processi cognitivi che rilevano cambiamenti eseguendo confronti basati sulla memoria tra stimoli consecutivi. [14]

Ulteriori studi hanno rivelato lo stesso pattern, ovvero una amplificazione di positività nell'intervallo P1 in corrispondenza di stimolo percepiti consciamente rispetto a quelli che non sono stati rilevati.

Gli studi che hanno riportato P1 come correlato con la percezione visiva cosciente si trovano di fronte a un problema di possibile interferenza da attenzione in quanto hanno manipolato la consapevolezza utilizzando metodi che sono vulnerabili a processi attentivi.

Le componenti N2 e P3 che tratteremo in seguito sono state generate utilizzando gli stessi metodi che sono utilizzati per la componente P1, sebbene il numero di metodologie utilizzate per manipolare la consapevolezza sia molto superiore. A differenza di quest'ultima però, analizzando ERP ad una latenza di 200 o 300 millisecondi post stimolo si è notato che le componenti N2 e P3 erano maggiori in corrispondenza di stimoli rilevati consciamente, mentre la loro ampiezza diminuiva se lo stimolo non veniva percepito.

L'evidenza dei risultati non supporta l'affermazione secondo cui P1 rifletta l'emergere di processi che generano consapevolezza visiva. È noto che l'attenzione amplifica P1 e molti dei correlati di coscienza P1 riportati sono stati osservati usando metodi che sono sensibili alle influenze dell'attenzione. Le metodologie di manipolazione come rilevamento dei cambiamenti e change blindness infatti sono fortemente dipendenti dalla memoria e dall'attenzione; ciò porta a considerare i risultati ottenuti con i vari studi non strettamente associati alla consapevolezza visiva, ma piuttosto su processi che coinvolgono attenzione, memoria e consapevolezza allo stesso tempo, non riuscendo a separare nitidamente i diversi concetti. È importante sottolineare che P1 è noto per essere migliorato dall'attenzione spaziale e, inoltre, molti studi non sono riusciti a rilevare P1 come correlato con la coscienza.

Gli studi ERP che hanno manipolato l'attenzione oltre alla coscienza sono stati in grado di mostrare che i loro effetti possono essere considerati separati e almeno in parte indipendenti l'uno dall'altro. I processi neurali alla base di P1 non sono probabilmente direttamente coinvolti nella generazione della coscienza visiva, ma possono riflettere i processi preconsoci della selezione attentiva che influenzano ciò che entra o meno nella coscienza soggettiva. [15]

In conclusione, P1 è il primo componente ERP analizzato come possibile correlato alla consapevolezza visiva, ma l'evidenza complessiva riguardante P1 come correlato di processi che generano qualsiasi tipo di coscienza, sia essa fenomenale o riflessiva, è piuttosto debole. L'interpretazione generale più condivisa è che gli effetti della percezione cosciente su P1 riflettono molto probabilmente la modulazione preconsa delle caratteristiche dello stimolo.

4.4 Visual Awareness Negativity

Numerosi studi che utilizzano una varietà di metodi (un esempio classico è l'utilizzo di tecniche di mascheramento visivo, per manipolare la consapevolezza visiva), hanno riportato una maggiore negatività intorno a 200 ms (180-280 millisecondi) post-stimolo nei siti occipitotemporali; in particolare sulla corteccia temporale occipitale e posteriore. Questa differenza di ampiezza negativa tra condizioni consapevoli, corretta rilevazione dello stimolo, e inconsapevoli, mancata rilevazione dello stimolo, è stata definita con il nome di "negatività di consapevolezza visiva" (VAN, ovvero Visual Awareness Negativity) e, a differenza degli effetti P1 discussi sopra, non è legata a un componente specifico, ma appare tipicamente nell'intervallo di latenza corrispondente a N1-N2-P2.

Nella prima parte del capitolo abbiamo detto che avremmo analizzato tre principali correlati della consapevolezza visiva: P100, N200, P300. In questa sezione dedicheremo la nostra attenzione sul secondo di tali correlati; a voler essere precisi però non analizzeremo una componente specifica, ma d'ora in poi faremo sempre riferimento ad una differenza negativa, VAN, tra due ERP distinti: un potenziale ERP rilevato quando il soggetto è consapevole dello stimolo rilevato e un altro potenziale ERP rilevato quando il soggetto non è stato in grado di rilevare lo stimolo e quindi si trova in una condizione di inconsapevolezza.

Si noti che definiamo VAN come la differenza negativa tra gli ERP di stimoli che entrano nella consapevolezza visiva e di stimoli invece che non entrano a far parte della consapevolezza: la misurazione del VAN richiede sempre almeno due tipi di stimolo, quelli consapevoli e quelli inconsapevoli. Pertanto i componenti N1, P2 e N2 come tali non possono essere VAN. Ma se queste componenti vengono misurate in condizioni "consapevoli" e "inconsapevoli", VAN può essere definita come la differenza negativa tra condizioni consapevoli e inconsapevoli e si sovrappone a una qualsiasi delle componenti. [14]

VAN è quasi sempre seguita da una differenza tardiva positiva (LP), tra condizioni consapevoli e inconsapevoli, tipicamente situata nella finestra temporale P3, in particolare nei siti parietali e centrali. Discuteremo e tratteremo però questa seconda differenza positiva, più tardiva rispetto a VAN, nella terza parte di questo capitolo; ora concentreremo la nostra attenzione solamente sulla negatività di consapevolezza visiva, gli studi che hanno riportato tale risultato e le metodologie di manipolazione utilizzate durante questi studi.

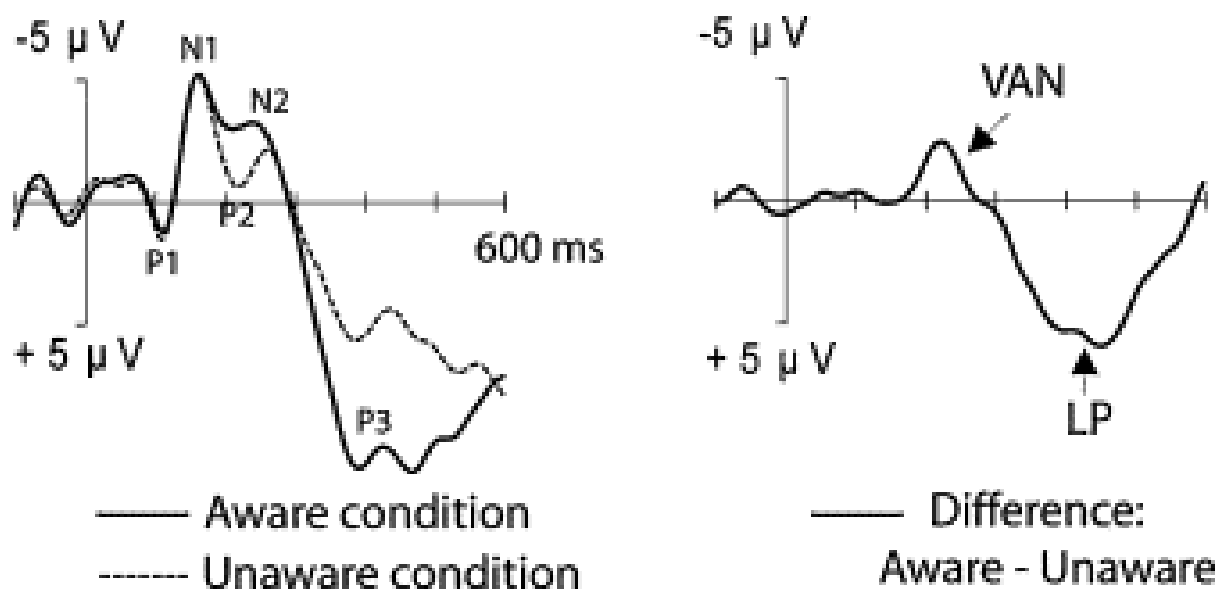


Figura 39: nel primo pannello sono state rappresentate le differenze ERP tra condizioni di stimoli consapevoli e stimoli inconsapevoli. Nel secondo pannello tali differenze sono state rappresentate tramite la VAN e la LP

Come già accennato in precedenza, la tecnica principale per rilevare potenziali ERP correlati alla consapevolezza visiva è quella di utilizzare metodologie per manipolare la consapevolezza ovvero cercare di differenziare situazioni in cui lo stimolo visivo può essere rilevato rispetto ad altre situazione in cui lo stimolo non viene rilevato rimanendo quindi invisibile, riuscendo quindi a manipolare la visibilità soggettiva dello stimolo per produrre condizioni che differiscono rispetto alla percezione cosciente.

Solitamente negli studi che utilizzano questo tipo di metodologie la manipolazione della consapevolezza viene eseguita individualmente, soggetto per soggetto, in modo tale che ciascun partecipante riesca a rilevare circa la metà, 50 %, degli stimoli presentati così da rendere le misure tra stimoli consapevolmente riconosciuti e quelli invece non rilevati confrontabili.

Vedremo di seguito studi che hanno utilizzato diverse manipolazioni di consapevolezza e che sono riusciti a rilevare la VAN come correlato di consapevolezza.

Una prima tecnica utilizzata è il mascheramento visivo. Uno stimolo target, che il soggetto ha il compito di rilevare durante il test visivo, può essere reso “invisibile” quando un altro stimolo, solitamente più intenso, detto appunto maschera, viene presentato simultaneamente, poco prima (mascheramento in avanti) o poco dopo (mascheramento all'indietro) rispetto allo stimolo target in questione.

Wilenius-Emet et al. hanno presentato ad un certo numero di partecipanti immagini di oggetti o “non-oggetti” su un display, intervallati da una maschera che è stata presentata prima (mascheramento in avanti) e dopo (mascheramento all'indietro) lo stimolo. Ai partecipanti è stato chiesto di decidere se lo stimolo rappresentava o meno un oggetto reale e hanno scoperto che gli stimoli che hanno raggiunto la consapevolezza visiva producevano una maggiore negatività (VAN) \ddagger in corrispondenza a circa 250 ms, nella finestra temporale N2, rispetto agli stimoli che non raggiungevano la consapevolezza. Questa negatività sembrava essere seguita da una positività associata alla consapevolezza.

Nel mascheramento visivo “common-onset” (ad insorgenza comune), lo stimolo e la maschera invece appaiono simultaneamente (non prima o dopo). Il mascheramento si verifica quando la maschera rimane sullo schermo dopo la scomparsa dello stimolo target. Uno studio che misura i correlati elettrofisiologici del mascheramento “common-onset” ha rilevato che circa 220 ms dopo l'inizio del target, nella finestra temporale P2, gli stimoli target rilevati suscitavano una maggiore negatività rispetto ai target non individuati.

La maggior parte di questi studi di mascheramento includeva una condizione di mascheramento con Stimulus Onset Asynchrony (SOA) costante (cioè con costante intervallo temporale tra la presentazione del target e la presentazione dello stimolo di masking) in cui circa la metà degli stimoli erano riconosciuti coscientemente dagli osservatori e metà non lo erano. La negatività posteriore (VAN) era prodotta pur mantenendo costante la maschera e quindi l'aumento della negatività a circa 200 ms non può essere spiegato dalle differenze nei tempi di presentazione delle maschere.

Wilenius et al. hanno anche presentato stimoli a basso contrasto in prossimità di una soglia di contrasto soggettiva determinata individualmente e hanno scoperto che stimoli consapevolmente riconosciuti suscitavano una maggiore negatività posteriore a 330-450 ms dopo l'inizio dello stimolo.

Un'altra metodologia di manipolazione della coscienza è definita come blink attentivo (attentional blink) ed è osservata quando due target consecutivi sono presentati tra distrattori in una rapida sequenza ad una velocità di circa 10 stimoli al secondo. Il riconoscimento del primo target (T1)

interferisce con l'elaborazione del secondo target (T2), in modo che i partecipanti non riescano a rilevare o riconoscere T2 se il secondo target è presentato tra i 200 e i 500 ms dopo il primo target. Studi su questo tipo di manipolazione hanno confrontato gli ERP sia durante l'attentional blink e sia durante repetition blindness (cecità alla ripetizione). La repetition blindness si verifica quando T2 è una ripetizione identica di T1. Hanno trovato una differenza di ampiezza negativa (VAN) tra gli ERP in cui T2 era consapevolmente riconosciuto e non riconosciuto in corrispondenza a 250-350 ms dallo stimolo sia durante attentional blink e sia durante repetitive blindness. L'amplificazione di negatività (VAN) era seguita dalla successiva late positivity (LP), ma solo nell'attentional blink. In sintesi, il quadro generale che emerge dagli studi di attentional blink è che la consapevolezza visiva di T2 è correlata a una negatività precoce (VAN) che è seguita da una successiva positività (LP).

Un ultimo caso che vogliamo riportare è uno studio che ha utilizzato test di rilevamento dei cambiamenti studiando ERP per rilevare le modifiche quando gli osservatori decidevano se un cambiamento di orientamento si verificava in uno dei rettangoli tra due successive visualizzazioni di rettangoli. L'intervallo vuoto tra i display era 250 ms. Il rilevamento del cambiamento consapevole è stato associato a uno spostamento della VAN nei siti posteriori intorno a 200 ms dopo il cambiamento dello stimolo e si è notato inoltre che la latenza di questo effetto variava in funzione della difficoltà del compito di rilevamento. [14]

Tuttavia, vi è una considerevole variabilità nella latenza della VAN in diverse condizioni di stimolazione. La VAN è stata osservata al più presto subito dopo 100 ms, ma alcuni studi che invece utilizzano stimoli a basso contrasto hanno riportato la VAN emergere relativamente tardi, a circa 300-400 ms post-stimolo. La maggiore latenza della VAN in alcuni studi sembrerebbe infatti riflettere compiti visivi più impegnativi in cui il soggetto necessita di una prolungata elaborazione per raggiungere la consapevolezza di quello che sta osservando.

La revisione di studi recenti mostra che il correlato ERP più affidabile e coerente correlato a processi di consapevolezza visiva soggettiva di uno stimolo, rispetto a uno stimolo che non entra in consapevolezza, sembra essere un aumento della negatività a circa 200 ms post stimolo nei siti di registrazione posteriore.

Poiché l'amplificazione di negatività a circa 200 ms nei siti occipitotemporali è molto simile alla negatività di selezione (Selection Negativity SN), un correlato ben noto di selezione attentiva non spaziale, ovvero quando gli stimoli sono presentati in corrispondenza alla regione di fissazione del soggetto, è stata esaminata la possibilità che VAN rifletta semplicemente meccanismi di attenzione come la SN. In uno studio i soggetti sono stati sottoposti a diverse combinazioni di frequenza spaziale e orientamento di stimolo. La consapevolezza dello stimolo da parte dei partecipanti è stata

manipolata presentando una maschera dopo uno stimolo molto breve (inconscio) o più lungo (percezione consapevole dello stimolo). I risultati indicano che mentre gli ERP provocati da stimoli percepiti in modo consapevole rispetto agli ERP di stimoli non percepiti iniziavano a differenziarsi dopo 100 ms (VAN) gli effetti dell'attenzione emergevano dopo 200 ms (SN). Quindi, almeno la prima parte del VAN (100-200 ms) ha mostrato l'indipendenza dall'attenzione non spaziale. Gli ERP per stimoli percepiti consciamente iniziano a differire da stimoli non percepiti dopo 100 ms (VAN: ampiezze più negative), ma le diverse condizioni di attenzione iniziano a differire solo dopo 200 ms (selezione negativa) e gli ERP mostrano una negatività di selezione (SN), aumento delle ampiezze negative in risposta a target, intorno a 200 ms dopo l'insorgenza dello stimolo. SN infatti fornisce una misura del tempo in cui una particolare caratteristica viene discriminata ed elaborata in modo selettivo nel cervello. Poiché SN e VAN sono simili nella distribuzione dei tempi, della polarità e della topografia sullo scalpo, era importante cercare di dissociare questi effetti. La prima parte della VAN (130-200 ms) risultava prodotta in modo indipendente dalla manipolazione attentiva, mentre solo la parte successiva (200-260 ms) era potenziata dall'attenzione in corrispondenza ai siti temporali posteriori. I risultati suggeriscono che la VAN emerga indipendente dalla selezione attentiva basata sugli oggetti e prima di essa. Si è osservata una doppia dissociazione tra VAN e SN, suggerendo che i processi elettrofisiologici associati alla selezione dell'attenzione non spaziale e alla consapevolezza visiva possono essere dissociati gli uni dagli altri nelle prime fasi dell'elaborazione. [15]

Sebbene i risultati rivisti in precedenza dimostrino che la VAN emerga indipendentemente dall'attenzione rivolta alle caratteristiche dello stimolo, la VAN potrebbe tuttavia mostrare dipendenza dall'attenzione spaziale (negli studi sopra citati, manipolando la consapevolezza, gli stimoli venivano sempre presentati alla fissazione, cioè in corrispondenza dell'area spaziale in cui i partecipanti stavano spazialmente rivolgendo la propria attenzione) in quanto è ben noto che gli stimoli presentati in posizioni spaziali non sottoposte ad attenzione spesso non vengono percepiti consciamente. Per indagare su questo, uno studio ha presentato uno stimolo di lettere simultaneamente su uno schermo a due posizioni spaziali differenti, ma ai partecipanti è stato chiesto di osservare solamente una di queste località e di rispondere ogni volta che una lettera, pre-specificata, è stata presentata in questa posizione. I risultati hanno mostrato che la VAN è emersa solo per gli stimoli presentati al luogo di osservazione, suggerendo che l'attenzione spaziale è un prerequisito della percezione cosciente. La variabilità e l'ampiezza delle latenze VAN, così come le influenze selettive dell'attenzione sulle ultime parti del VAN, suggeriscono che la VAN non riflette un singolo processo a tempo, ma un insieme di processi diversi associati alla percezione cosciente. Allo stesso modo, le caratteristiche visive inizialmente elaborate sono in genere pensate per essere vincolate e

potenziate dall'attenzione nelle successive fasi di elaborazione per formare percezioni coscienti coerenti e più dettagliate. [14]

Gli studi ERP implicano che la consapevolezza degli oggetti possa sorgere indipendentemente dall'attenzione volontaria basata sulle caratteristiche e che l'interazione successiva tra l'attenzione sulle caratteristiche e la VAN potrebbe riflettere migliori contenuti nella coscienza. Talvolta questi processi attentivi potrebbero essere essenziali per amplificare la rappresentazione neurale e farla arrivare alla soglia della consapevolezza, il che potrebbe anche spiegare la variabilità delle latenze VAN in diverse condizioni di stimolazione.

Anche se gli studi ERP implicano che le prime fasi dell'elaborazione consapevole si evolvono indipendentemente dall'attenzione basata sulle caratteristiche, mostrano anche che le risorse fornite dall'attenzione spaziale potrebbero essere necessarie per la percezione consapevole. È probabile che l'attenzione spaziale sia necessaria per supportare le nostre rappresentazioni interne dello spazio senza le quali non può verificarsi la consapevolezza visiva di uno stimolo determinando quali contenuti entrano nello stato di consapevolezza, specialmente durante gli alti carichi di attenzione. Sotto carichi attenzionali più bassi, i soggetti possono anche essere consci delle informazioni sensoriali più periferiche e irrilevanti. Questi contenuti periferici e più vaghi danno origine a la VAN, anche se potrebbe essere di ampiezza inferiori rispetto a VAN prodotti da contenuti consapevoli più chiari, che risultano infatti potenziati quando una selezione attenzionale di successo migliora la visibilità dell'oggetto. [14,15]

La VAN quindi sembra essere la prima differenza ERP che si relaziona in modo affidabile con la consapevolezza in quanto rilevata in un gran numero di studi che hanno utilizzato una varietà di metodologie di manipolazione. Si mostra come una deflessione di ampiezza negativa con insorgenza a 100 ms post stimolo, indipendente dall'attenzione non spaziale e generalmente con un picco a 200-250 ms.

Sulla base della latenza stimata dell'attività corticale è stato proposto che interazioni ricorrenti all'interno del sistema visivo possano essere alla base della VAN. La tempistica e la topografia occipitotemporale della VAN suggerisce che i processi che si correlano con la percezione visiva coscia avvengano all'interno del flusso visivo ventrale e non richiedano un'attivazione diffusa su tutta la corteccia. Tuttavia, la VAN non sembra essere un segno di un singolo processo neurale, ma un insieme di eventi che sono alla base della visione coscia.

Per riassumere, una differenza di ampiezza negativa (VAN) che si sviluppa intorno a 200 ms dopo l'insorgenza dello stimolo è stata costantemente osservata correlare con la consapevolezza

visiva. Almeno in situazioni che non richiedono particolare attenzione, le prime parti della percezione visiva coscia possono emergere indipendentemente dall'attenzione volontaria sulle caratteristiche subito dopo 100 ms dall'esordio dello stimolo nelle regioni occipitotemporali. Poco dopo l'inizio della VAN, tuttavia, l'attenzione interagisce con l'elaborazione coscia e durante questo periodo le interazioni neurali si amplificano così che la discriminazione oggettiva, ad esempio, è possibile. [14,15,16]

I risultati di alcuni studi infatti hanno mostrato che i cambiamenti appena rilevati, ma non identificati totalmente, hanno provocato una VAN piccola ma nessuna LP amplificata, suggerendo che il cambiamento è stato registrato solo a livello fenomenale. Le modifiche identificate invece hanno generato sia la VAN che la LP maggiori; i partecipanti avevano una chiara percezione dello stimolo ed erano in grado di recuperare e riportare l'identità dell'oggetto. Pertanto, sebbene i dati ERP suggeriscano che le interazioni neurali alla base della percezione consapevole avvengano all'interno delle regioni occipitotemporali (flusso ventrale), alcune delle risorse fornite dalle aree parietali (flusso dorsale) potrebbero essere necessarie per la percezione coscia.

Più tardi illustreremo infatti che la manipolazione dei contenuti cosci all'interno della memoria di lavoro (consapevolezza riflessa) risulta essere correlata con una positività tardiva nei siti parietali e frontali a circa 300 ms dopo la presentazione dello stimolo riflettendo quindi un'elaborazione cerebrale più sostenuta.

4.5 Late positivity

La terza componente ERP che solitamente viene associata a processi di consapevolezza visiva è una deflessione positiva, P300 (P3), rilevata prevalentemente nelle regioni parietale e centrale, e tipicamente emerge 300 millisecondi dopo la presentazione dello stimolo.

Le stesse iniziali considerazioni che abbiamo fornito per la VAN nella sezione precedente ora vengono riferite a P3. Infatti in studi di consapevolezza visiva che analizzano gli ERP, la componente P3 viene rilevata sia per stimoli che vengono percepiti consapevolmente sia per stimoli che non vengono percepiti consapevolmente. Quindi come è stato fatto con la VAN viene definita una differenza tra queste due condizioni definita positività tardiva (LP, late positivity).

In molti degli studi che abbiamo riportato nella sezione precedente 4.4, la VAN, per stimoli consapevolmente riconosciuti, è quasi sempre stata seguita da una positività tardiva molto ampia che solitamente emergeva 300/400 ms post stimolo, la LP appunto.

Difatti studi che hanno utilizzato metodi di contrasto ridotto, mascheramento, percezione bistabile e rilevamento dei cambiamenti per manipolare la coscienza, tutti metodi già precedentemente descritti in precedenza, hanno infatti quasi sempre rilevato una differenza tardiva positiva (LP), tra stimoli consapevoli e stimoli inconsapevoli, tipicamente nella finestra temporale P3, con massimi nei siti parietali e centrali.

In questa sezione non andremo a riportare nuovamente i risultati dei precedenti studi mostrando che la VAN è stata quasi sempre seguita dalla LP. Al contrario cercheremo di capire quali sono le differenze principali tra VAN e LP e quali processi cerebrali questi due correlati neurali riflettano.

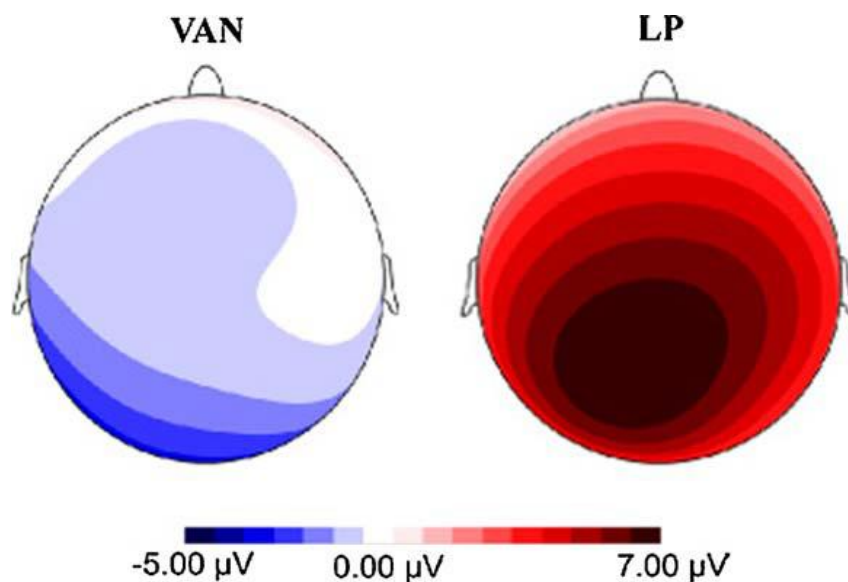


Figura 40: aree neurali correlate alla VAN e alla LP

La VAN e la LP sono infatti i due principali correlati ERP che vengono studiati nei processi di consapevolezza visiva, ma non è ancora del tutto chiaro chi dei due sia il principale responsabile dell'emergere di percezione visiva conscia.

Di seguito riporteremo uno studio che cerca di discriminare il ruolo della VAN dal quello della LP, suggerendo che la LP rifletta l'elaborazione post-percettiva di ciò che è stato osservato, cioè, si verifichi dopo che è già emersa la consapevolezza.

Nello studio che proponiamo sono state utilizzate due condizioni di attività definite come "GO" e "NOGO" le quali differivano nei requisiti di segnalazione della risposta. Nella condizione GO, i

partecipanti premevano un tasto quando erano soggettivamente consapevoli della presenza dello stimolo target (consapevole) e non rispondevano quando non ne erano a conoscenza.

Viceversa nella condizione NOGO rispondevano solamente quando non erano a conoscenza dello stimolo mentre non rispondevano quando ne erano a conoscenza. Le condizioni del compito differivano nella selezione della risposta e nell'esecuzione della risposta, che sono tutte fasi considerate post-percettive.

Pertanto, un NCC elettrofisiologico che è influenzato dalla manipolazione del compito specifico deve verificarsi dopo che la consapevolezza è già emersa e quindi è troppo tardivo per correlare con i processi che causalmente riflettono l'emergere della consapevolezza soggettiva.

Misure ripetute su ampiezze medie nella finestra temporale N200 hanno mostrato che prove consapevoli (potenziale di $-0,16 \mu\text{V}$) erano associati a una maggiore negatività rispetto agli studi inconsapevoli (potenziale di $1,54 \mu\text{V}$). Pertanto, è stato rilevato VAN che ha raggiunto un picco nelle aree occipito-temporali. Ciò che diventa rilevante è che VAN non è stato influenzato dall'esigenza di risposta, ovvero a seconda che la presenza dello stimolo target doveva essere segnalata oppure ignorata. Le ampiezze negli studi di GO consapevole e NOGO consapevole erano entrambe più negative rispetto a quelli nelle due condizioni inconsapevoli, mentre le ampiezze nei due tipi di trial consapevoli non differivano significativamente l'una dall'altra. [17]

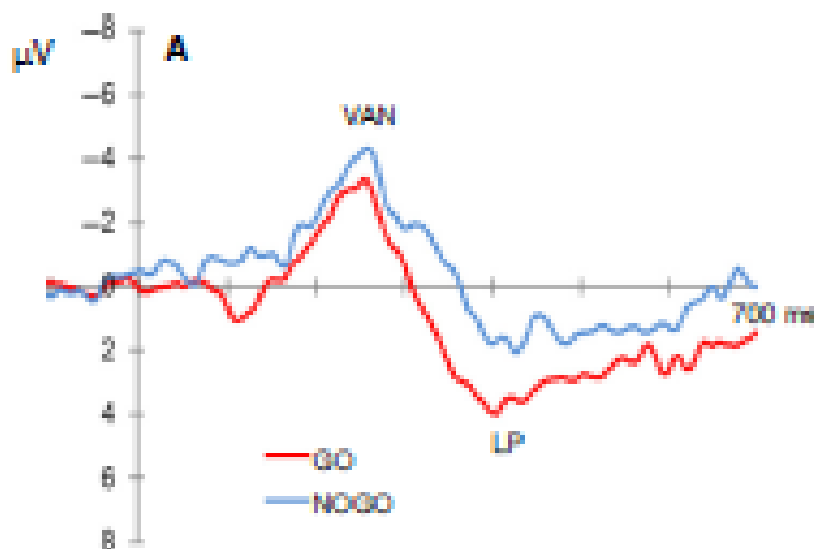


Figura 41: la VAN e la LP in stimoli GO e NOGO

La Figura 6 mostra le onde di differenza (consapevoli - inconsapevoli) medie relative agli elettrodi occipitali e temporali. Le ampiezze nel caso delle risposte consapevolmente riportate sono più negative rispetto alle prove inconsapevoli (VAN) e l'obbligo di risposta (GO vs. NOGO) non ha avuto alcun effetto su di esse.

La VAN è seguita dalla LP, differenza positiva dell'ampiezza P3 tra studi consapevoli e inconsapevoli, maggiore in aree parietali. La differenza principale rispetto alla VAN è che una LP maggiore è stata rilevata quando era necessaria una risposta allo stimolo target, ovvero in condizioni di GO consapevoli rispetto a NOGO consapevoli. P3 era maggiore nei trial GO consapevoli rispetto a trial NOGO consapevoli, sebbene l'unica differenza tra i due tipi di trial fosse la tipologia di risposta.

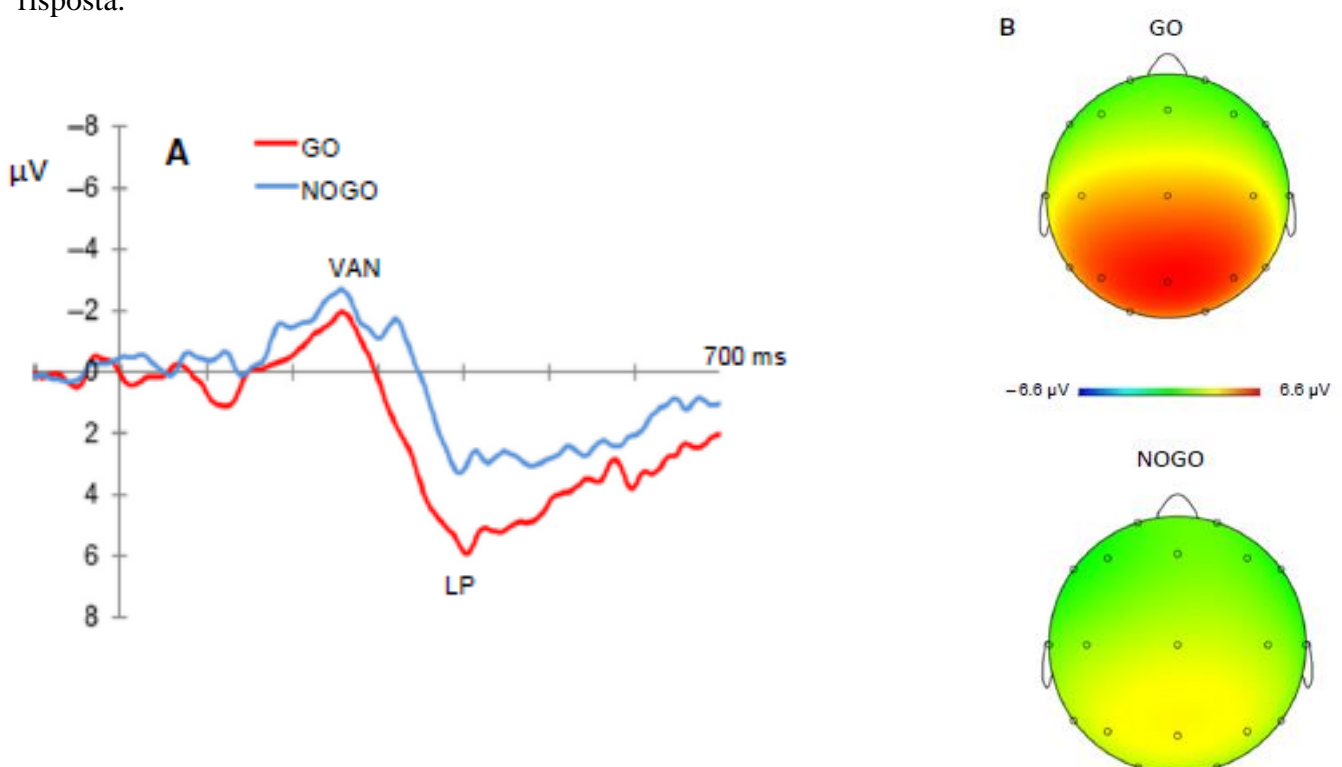


Figura 42: il riquadro A mostra le onde di differenza (consapevoli - inconsapevoli) negli elettrodi parietali. Il riquadro B mostra invece la distribuzione sullo scalpo della LP a 400 ms negli studi GO e NOGO. Le ampiezze P3 erano più positive rispetto alle prove non consapevoli (LP), ma la differenza principale rispetto alla figura 2 è che in questo caso LP era attenuato quando la consapevolezza dello stimolo non aveva bisogno di essere indicata da una risposta, ovvero la LP di stimoli NOGO consapevoli era attenuata rispetto alla LP di stimoli GO consapevoli nei quali era appunto richiesto di riportare l'avvenuta percezione dello stimolo target.

Pertanto, l'effetto della manipolazione della risposta sulle ampiezze nella finestra temporale P3 risulta essere correlato al processo decisionale, alla selezione della risposta o alla preparazione della risposta

motoria, poiché queste sono le uniche differenze tra le due condizioni di studio. La LP e la VAN quindi devono riflettere processi neurali differenti. [17]

Ciò che è importante dal punto di vista del nostro obiettivo, ovvero di dissociare NCC post-percettivi dai precedenti, è il tempismo, ovvero caratterizzare la manipolazione degli ERP modulati che rispondono nella finestra P3 / LP. Poiché la percezione soggettiva della presenza o dell'assenza dello stimolo deve precedere l'aggiornamento della memoria di lavoro e la selezione della risposta, la modulazione di ERP, associati ai requisiti di risposta, nella finestra temporale P3 suggerisce che questi si sono verificati dopo che la consapevolezza era emersa, ovvero, i processi che si verificano 350-450 ms dopo lo stimolo sono post-percettivi. Nella terminologia utilizzata nella ricerca sulla consapevolezza, tali processi post-percettivi appartengono alla consapevolezza riflessiva o di accesso, cioè ad un'ulteriore elaborazione del contenuto percepito consapevolmente, come ad esempio identificazione, categorizzazione, denominazione, processo decisionale, selezione della risposta e comportamento di guida sulla base del contenuto coscivo. Pertanto, i nostri risultati suggeriscono che P3 / LP è sensibile all'elaborazione consapevole, ma non è causalmente coinvolto nel generare consapevolezza fenomenica soggettiva.

Difatti, le "decisioni percettive" e la "percezione consapevole" non si riferiscono alla stessa cosa. Una possibilità alternativa, e più plausibile, è che la consapevolezza visiva emerga gradualmente; dopo l'emergere di una percezione iniziale debole di tipo fenomenico, l'osservatore attende ulteriori prove da accumulare così da poter compiere successivamente processi decisionali più complessi come scelta di una risposta o identificazione e categorizzazione dello stimolo. Secondo questo paradigma, la consapevolezza potrebbe iniziare nella finestra temporale N200, seguita da un accumulo di prove per la decisione e la selezione della risposta nella successiva finestra temporale P3.

Nel nostro esperimento, lo stimolo critico è stato mantenuto costante e quindi la risposta non poteva essere guidata dalle variazioni di stimolo, ma solamente da un'avvenuta o non avvenuta percezione consapevole. I nostri risultati sono in linea con l'idea che P3 sia legato alle decisioni post-percettive, fasi durante le quali la percezione consapevole viene associata alla selezione di risposta, facendo sì che P3 potrebbe riflettere processi quali la fiducia e la certezza nella decisione in caso di stimolo correttamente rilevato.

In altre parole, la LP veniva indotta solo da stimoli che erano rilevanti per il compito e richiedevano risposta; la VAN veniva indotta da tutti i tipi di stimoli visibili indipendentemente dalla rilevanza del compito in esame.

La differenza tra VAN e LP rilevata in questo studio è alla base delle due linee di pensiero che si sono sviluppate nell'analisi dei correlati neurali associati alla consapevolezza. Come già introdotto in questo capitolo una teoria vede l'emergere della consapevolezza come conseguenza di processi neurali tardivi, LP, nella finestra temporale P3. L'accesso alla consapevolezza soggettiva si riferisce a un'attivazione fronto-centro-parietale tardiva e altamente distribuita corrispondente alla componente P3 dell'analisi ERP. Questo tipo di ipotesi è sostenuta dalla teoria dello "spazio di lavoro neurale globale", il quale nega l'esistenza di una coscienza puramente fenomenica affermando che un'attivazione corticale diffusa e processi di attenzione top-down risultano necessari per la coscienza. Secondo questa visione, l'LP, una grande deflessione positiva nell'analisi ERP che si verificava da 300 a 600 ms dopo l'insorgenza dello stimolo, è il correlato primario della coscienza visiva. Secondo questo modello si presume che la caratteristica chiave dei contenuti coscienti sia la loro accessibilità, ovvero uno stimolo raggiunge la consapevolezza o rimane subliminale, non ci sono passaggi intermedi, anche se alcune informazioni potrebbero essere preconscie, in altre parole, proprio sotto la soglia della coscienza. [18]

Molti studi che sostengono questo tipo di modello non rilevano nessuna attività neurale precedente a P3 il che porta inevitabilmente a pensare che P3 sia il correlato principale di consapevolezza. In molti casi però, questo può essere attribuito al fatto che l'LP è una grande e ampia deflessione molto più facile da rilevare, il che porta spesso a trascurare componenti precedenti, le quali vengono considerate come correlate a processi neurali inconsci ma che possono essere invece molto rilevanti. [16]

Ecco perché ultimamente ha sempre preso più importanza un'altra linea di pensiero che si discosta dalla precedente non solo su quali correlati neurali sembrano riflettere processi consapevoli, ma anche su differenze sostanziali di questioni largamente filosofiche (concetto di consapevolezza).

Secondo questo modello, che considera coscienza fenomenica e riflessiva come due stadi che possono essere ritenuti separabili, VAN è stata suggerita per marcare le interazioni neurali alla base della coscienza fenomenica mentre la LP è stato associato alla coscienza riflessiva. Secondo questa interpretazione, l'LP non è un correlato diretto della coscienza fenomenica, ma piuttosto un segno di processi cognitivi post-fenomenici durante i quali l'informazione fenomenicamente cosciente entra nella memoria di lavoro dove viene concettualizzata, denominata, trasformata e abilitata ad accedere a meccanismi di output come segnalazione verbale del contenuto.

La positività tardiva (LP), la terza deflessione ERP spesso osservata come correlata con la percezione cosciente, non è causata dall'attività neurale direttamente sottostante l'insorgenza della consapevolezza visiva fenomenica degli stimoli, ma successivamente dalla manipolazione cognitiva e dall'elaborazione dei contenuti della percezione cosciente.

Il disaccordo tra i due punti di vista non è puramente empirico, cioè basato solamente su quello che mostrano i risultati dei dati raccolti, ma dipende in parte da ciò che viene considerato "coscienza visiva" o "percezione cosciente".

4.6 Analisi tempo-frequenza in paradigmi di percezione conscia ed inconscia

Fino a questo punto la ricerca dei correlati di consapevolezza visiva è stata effettuata considerando i potenziali ERP da un solo punto di vista restringendo l'analisi solamente al dominio del tempo. Come è già stato sufficientemente introdotto nel secondo capitolo, il dominio del tempo non è il solo dominio all'interno del quale i segnali biologici, quali segnale EEG e potenziali ERP da esso derivati, possono essere studiati. Il loro contenuto in frequenza potrebbe essere rilevante per l'analisi e potrebbe aiutare ad orientarsi con maggiore precisione ed accuratezza all'interno dei complessi processi cerebrali che si generano in risposta ad uno stimolo visivo esterno.

Tuttavia, i segnali biologici, sono non stazionari, ovvero il loro contenuto in frequenza varia nel tempo, ecco perché il dominio tempo-frequenza ha acquistato sempre più importanza nell'analisi di segnali cerebrali. Grazie all'analisi tempo-frequenza è possibile rilevare in che istante di tempo una certa componente di frequenza appare e per quanto tempo tale componente è presente nel segnale.

Di seguito illustreremo due studi [19], [20] che hanno concentrato la loro attenzione sulla ricerca dei correlati neurali di consapevolezza (NCC), analizzando le risposte cerebrali a stimoli visivi nel dominio tempo-frequenza e conciliando allo stesso tempo i risultati dell'analisi delle componenti ERP nel dominio del tempo. La combinazione dei diversi metodi applicati (analisi ERP nel dominio del tempo e analisi dell'attività gamma indotta nel dominio tempo frequenza) consente una caratterizzazione più dettagliata dei processi cerebrali che diversificano una percezione conscia da una inconscia.

Il primo studio [19], ha effettuato tre esperimenti differenti; di seguito però ne riporteremo solamente uno, dal momento che i risultati riportati sono simili in tutti e tre gli esperimenti. Nel secondo dei tre esperimenti lo stimolo visivo presentato ai soggetti che prendevano parte al test consisteva in una griglia iniziale di dimensioni 20×20 di segmenti di linea bianchi. La griglia non era fissa e i segmenti di linea al suo interno o cambiavano orientamento o cambiavano colore. L'esperimento quindi consisteva nel saper rilevare un certo colore o una certa forma assunta dai vari segmenti di linea. Per il compito del colore, a metà dei soggetti è stato richiesto di premere un tasto di risposta ogni volta

che vedevano 3 macchie di colore, mentre per l'altra metà dei soggetti ogni volta che vedevano 4 macchie di colore.

Per il compito di forma invece, a metà dei soggetti sono stati presentati rettangoli verticali mentre l'altra metà ha ricevuto rettangoli orizzontali come stimolo target. Dopo aver terminato l'esperimento ai soggetti è stato fornito un breve questionario nel quale dovevano riportare di aver percepito non solo gli stimoli target di interesse (3/4 macchie di colore o rettangoli verticali/orizzontali) per i quali era richiesta una risposta esplicita, ma anche di aver colto stimoli che non erano strettamente rilevanti per il compito in esame (cioè per i quali non era richiesta una risposta), come ad esempio forme diverse da rettangoli e stimoli random casuali. Questo assicurava che i soggetti non ~~erano~~ fossero solamente consapevoli degli stimoli target necessari al compito, ma anche di stimoli non target che non avevano nessuna rilevanza per il test in questione. Nell'esperimento infatti i soggetti dovevano riportare solamente la presenza degli stimoli target, mentre stimoli non target o casuali dovevano essere ignorati anche se venivano rilevati.

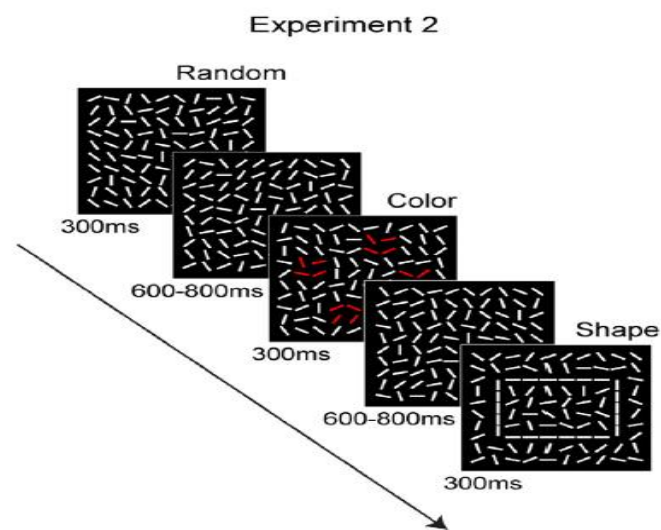
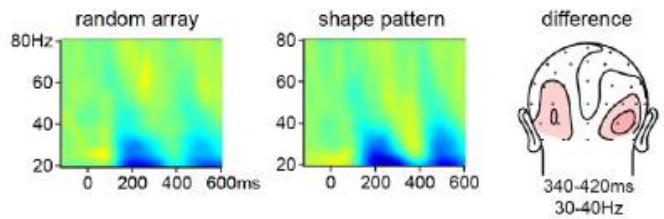
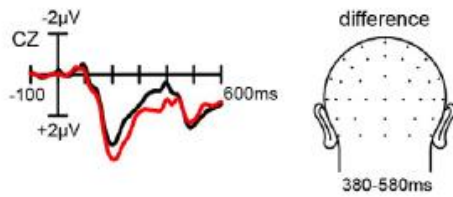


Figura 43: stimolo visivo utilizzato nello studio riportato. Tratta da [19]

Lo studio ha rilevato una componente ERP, P3, e un'attività gamma indotta intensi in risposta a stimoli consapevolmente percepiti e rilevanti per il compito del test, mentre stimoli che sono stati percepiti consapevolmente, ma che però non erano rilevanti per il compito visivo presentavano un'ampiezza della componente P3 e dell'attività gamma indotta inferiore (Fig. 44).

Experiment 2

shapes task-irrelevant



shapes task-relevant

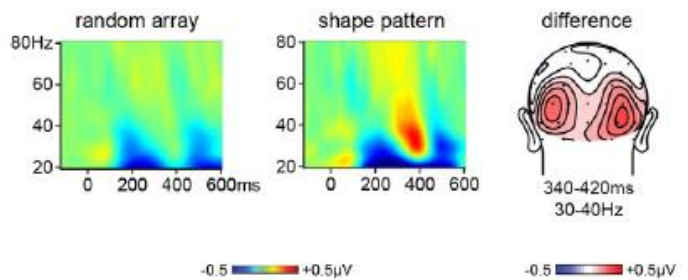
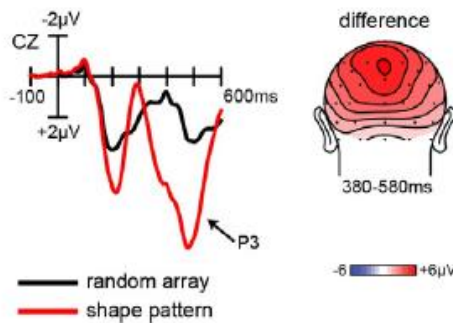


Figura 44: A sinistra è riportata la componente ERP mediata su tutti i soggetti di un elettrodo rappresentativo (Cz), e la differenza (shape-random) nella topografia ERP nel caso di stimoli rilevanti e irrilevanti per il task corrente. A destra sono stati riportati l'analisi tempo-frequenza (mediata su tutti i soggetti) e la differenza di topografia nel caso di stimoli rilevanti e irrilevanti per il task corrente. Tratta da [19]

Una delle difficoltà maggiori nella ricerca dei correlati neurali di consapevolezza è quella di cercare di separare quali di questi correlati sono strettamente necessari per l'emergere di consapevolezza e quali invece non sono causalmente legati alla consapevolezza, ma riflettono processi neurali ancora preconsoci o post percettivi.

I risultati riportati in Figura 44 sono relativi al compito di riconoscimento di forme di rettangoli, ma risultati analoghi sono stati riportati per il compito di riconoscimento del colore.

Forme, ovvero rettangoli, che venivano consapevolmente riconosciute ed erano rilevanti per il compito, ovvero la loro presenza doveva essere segnalata con una risposta da parte dei partecipanti, hanno generato una componente ERP, P3, a latenza di circa 300 ms post stimolo maggiore rispetto a stimoli non rilevanti la cui presenza non doveva essere riportata.

Questo risultato supporta risultati trovati in altri studi e riportati in precedenza; la componente ERP P3 non sembra essere associata in modo diretto all'emergere di consapevolezza visiva, piuttosto

sembra riflettere processi post-percettivi quali l'aggiornamento della memoria di lavoro, capacità di compiere una scelta tra più opzioni o la capacità, come in questo caso, di segnalare una risposta tramite opportuni meccanismi di output.

L'esperimento del presente studio è stato specificamente progettato per garantire la visibilità degli stimoli irrilevanti. Gli stimoli irrilevanti al compito sono stati presentati per 300 ms, senza alcuna competizione spaziale o temporale di altri stimoli e la percezione conscia di questi stimoli è stata confermata tramite un questionario post-test.

Questi risultati sono coerenti con altri studi che rilevano P3 in stretta relazione con i meccanismi di fiducia dei soggetti nell'aver percepito gli stimoli durante i compiti visivi attivi. Tuttavia questa componente positiva era inferiore in ampiezza quando venivano presentati stimoli visivi irrilevanti al compito, anche se tali stimoli erano ben al di sopra della soglia di consapevolezza. I risultati dello studio attuale insieme a quelli di studi precedenti sembrano suggerire che la componente P3 non è sia una diretta manifestazione di percezione conscia ma che rifletta processi successivi all'emergere di consapevolezza visiva.

All'analisi della componente ERP P3 a 300 ms post stimolo è seguita un'analisi dell'attività indotta in banda gamma.

L'attività gamma indotta rilevata in questo studio è caratterizzata da una banda relativamente stretta, in quanto si è presentata massima in una banda di frequenza di 30-40 Hz e in un intervallo di tempo compreso tra 340 e 440 ms post stimolo.

Le stesse considerazioni effettuate in precedenza per la componente P3 possono essere estese anche all'attività gamma indotta. Come si può ben notare dai grafici nel dominio tempo-frequenza in Figura 44 un'intensa attività gamma nel segnale EEG è stata rilevata per stimoli consapevolmente riconosciuti e che erano rilevanti per il compito visivo, mentre un'attività in banda gamma meno intensa è stata rilevata per stimoli che sono stati percepiti consapevolmente ma che allo stesso tempo non erano rilevanti per il compito in esame.

Nel range di frequenza 30-40 Hz (frequenze corrispondenti all'attività gamma) ad una latenza di 300-400 ms post stimolo è stata rilevata un'intensa attività di ampiezza positiva. La scala di colori, nel grafico tempo-frequenza a tre dimensioni (frequenza, tempo, ampiezza), è stata utilizzata per riportare l'ampiezza delle componenti di segnale ad una certa frequenza ed un certo intervallo di tempo. Difatti, in corrispondenza dell'attività gamma indotta a 30-40 Hz la vasta area di colore rosso identifica la presenza di una componente di segnale di ampiezza positiva di circa 5 microvolt.

In questo esperimento lo stimolo fisico non è mai stato fatto variare, ma è sempre rimasto lo stesso; tuttavia è stata manipolata la rilevanza del compito e si è osservato che la risposta gamma indotta, a 30-40 Hz centrata a 300-400 ms post stimolo era inferiore quando gli stimoli erano irrilevanti per il compito.

I risultati dell'esperimento supportano la visione che sì l'attività gamma indotta risulta un correlato neurale di consapevolezza (NCC), ma una maggiore ampiezza di tale attività a 350 ms post stimolo in banda di frequenza 30-40 Hz era presente solo quando gli stimoli erano direttamente rilevanti per l'attività in corso.

I risultati di questo studio [19] suggeriscono che l'attività nella banda gamma rifletta processi post-percettivi successivi all'emergere di consapevolezza visiva.

Lo studio in esame, dunque, quali componenti EEG/ERP suggerisce essere associati all'emergere di una percezione visiva conscia?

In questo studio, precedentemente a P3, un altro componente ERP è stato rilevato. In particolare è stata rilevata una componente negativa ad una latenza di circa 200 millisecondi dopo la presentazione dello stimolo. Questa negatività posteriore, anche se di ampiezza inferiore rispetto a P3, sembra essere in stretta correlazione con i meccanismi di percezione consapevole. Questa componente, etichettata come Nd2 perché si trattava della seconda componente negativa osservata, è stata rilevata solamente quando i soggetti hanno percepito consapevolmente lo stimolo target proposto mentre era assente quando i soggetti non hanno rilevato lo stimolo.

Dai grafici tempo frequenza, vedi Figura 44, si rileva una vasta area di colore blu in corrispondenza a basse frequenze ad una latenza di circa 200 ms post stimolo; questo risultato indica la presenza di una componente a bassa frequenza che compare 200 millisecondi dopo la presentazione dello stimolo di ampiezza negativa (circa -5 microvolt).

Ciò che contraddistingue Nd2 da P3 e dall'attività gamma indotta è che Nd2 è stata rilevata indipendentemente dal fatto che lo stimolo fosse rilevante per il compito o meno. Nd2 è stata registrata per ogni stimolo consapevole, sia esso target o random, e non era influenzata in alcun modo dalla successiva richiesta di risposta. In Figura 44 si nota facilmente che sia stimoli random casuali, sia forme rilevanti per il compito e sia forme irrilevanti per il task in esame che sono stati consapevolmente percepiti hanno generato una componente negativa a 200 ms post stimolo indipendentemente dal fatto che la loro comparsa necessitasse di un reporting da parte dei partecipanti.

Precedenti studi già presentati in questo elaborato hanno riportato una maggiore negatività ERP con distribuzioni e latenze molto simili a quelle del Nd2 in relazione a condizioni stimolo consapevoli ed inconsapevoli.

La latenza a 200 ms post stimolo, la topografia in zone posteriori del sistema nervoso e la sua maggiore ampiezza in condizioni di stimolo consapevolmente percepito rispetto a stimoli non rilevati (inconsapevoli) suggeriscono che Nd2 corrisponda a quanto precedentemente definito come la VAN, Visual Awareness Negativity.

Come precedentemente illustrato altri studi hanno attribuito proprio alla VAN il ruolo di correlato ERP necessario per l'emergere di consapevolezza visiva. Allo stesso modo, questo studio conferma che una negatività precoce in corrispondenza a regioni posteriori sembra essere associata all'emergere di una consapevolezza fenomenica indipendente dai requisiti di risposta, mentre i processi di elaborazione post-percettivi sembrano essere associati ad una maggiore ampiezza della componente ERP P3 e ad una più intensa attività gamma indotta nel segnale EEG.

In base allo studio precedente (si veda Figura 44), sebbene l'attività indotta in banda gamma sia più evidente in caso di stimoli (forme) rilevanti per il task corrente, si osserva anche quando vengono riconosciute forme irrilevanti per il task corrente (si noti la regione di colore giallo in corrispondenza circa 300-400 ms e 30-40 Hz nel plot tempo-frequenza in alto a destra ('shape pattern')). Tale attività gamma indotta non è invece presente nel caso di stimoli di tipo 'random array', in cui cioè nessuna forma è riconosciuta. A tal proposito, può essere interessante osservare che numerosi studi hanno messo in relazione il ritmo gamma a meccanismi neurali che collegano l'elaborazione in aree cerebrali differenti per dare origine ad una percezione coerente e costruire una rappresentazione interna degli oggetti [si veda 6 per una review estesa su questo]. A titolo di esempio, si riportano i risultati di un esperimento [tratto da 6] in cui ai soggetti venivano presentati quattro stimoli diversi: i triangoli illusori di Kanizsa (Figura 45 A, riquadri primo in alto e ultimo in basso) e il triangolo vero (secondo riquadro dall'alto) erano stimoli coerenti, che portavano una percezione coerente attraverso un processo di 'binding' cioè di collegamento di feature dello stimolo. Lo stimolo 'no-triangle' serviva come controllo. I soggetti dovevano contare silenziosamente il numero di volte in cui si presentava lo stimolo target (il triangolo illusorio curvo di Kanizsa) e segnalare tale numero alla fine di ogni blocco di registrazione. Questo compito, se correttamente eseguito, assicurava che i soggetti percepissero correttamente i triangoli illusori e mantenessero l'attenzione durante l'intera sessione di registrazione. Come si osserva dai grafici tempo-frequenza (Figura 45 (B)), che mostrano la potenza all'elettrodo Cz (mediata su tutti i soggetti partecipanti), si osserva che sia in seguito alla presentazione del triangolo illusorio che del 'no-triangolo' si verificava una attività oscillatorio

intorni 100 ms e 40 Hz. Non mostrando tale attività differenze tra i due tipi di stimolo, non sembra riflettere processi neurali di 'binding' spaziale richiesto per percepire i triangoli. Diversamente, invece, una seconda attività gamma indotta si osservava a circa 280 ms e tra 30 e 60 Hz, più prominente nel caso di presentazione di stimolo coerente (cioè il triangolo illusorio). Questa attività gamma indotta potrebbe quindi riflettere i processi neurali che legano spazialmente le caratteristiche elementari dell'immagine in modo da costruire una rappresentazione coerente del triangolo.

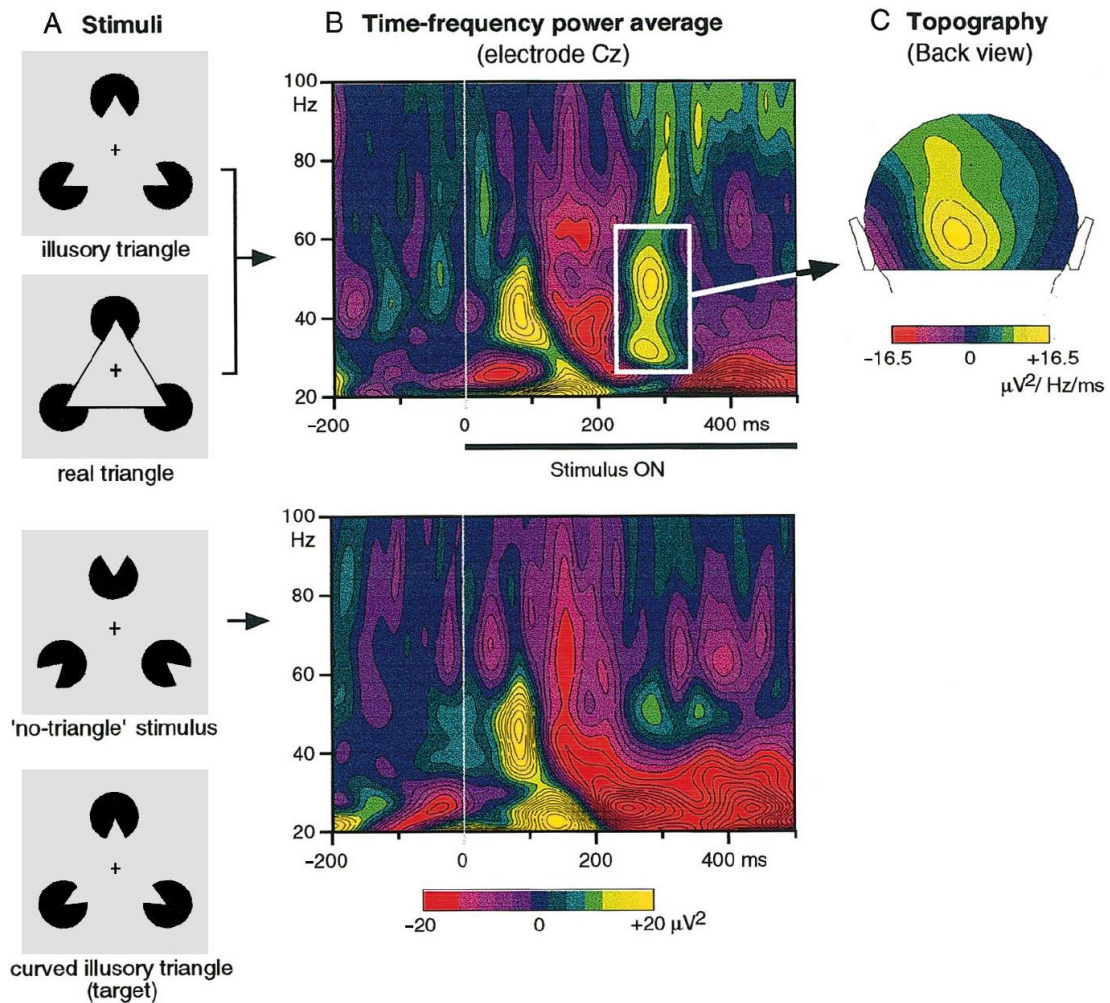


Figura 45: Colonna A: tipo di stimoli presentati ai soggetti. Colonna B: Analisi tempo-frequenza della componente ERP (media della scomposizione tempo-frequenza di ciascun trial, successivamente mediata su tutti i soggetti, per evidenziare anche l'attività indotta), in caso di presentazione del triangolo illusorio di Kanisza (in alto) e in caso di presentazione dello stimolo 'no-triangolo' (a destra). Pannello C: Topografia della potenza gamma mediata tra 250 e 350 ms e 30 e 60 Hz, in risposta al triangolo illusorio. L'attività massima è osservata in corrispondenza a elettrodi occipitali. Tratta da [6].

Infine, un ulteriore studio [20] ha cercato di studiare la relazione tra l'attività gamma indotta e la consapevolezza visiva. In questo studio ad un paziente emianoptico (con danno nella corteccia occipitale sinistra) veniva presentato nell'emicampo destro uno stimolo visivo di cui veniva fatto variare l'orientamento. Il paziente emianoptico è quindi stato testato su un compito di discriminazione dell'orientamento usando stimoli stazionari con un livello di contrasto vicino alla soglia.

È stato rilevato che l'attività oscillatoria nella banda gamma (44-66 Hz) nella regione occipito-parietale sinistra correlava significativamente con la consapevolezza, in quanto questo tipo di attività era più intensa quando il paziente rilevava lo stimolo presentato rispetto a quando invece lo stimolo non veniva rilevato.

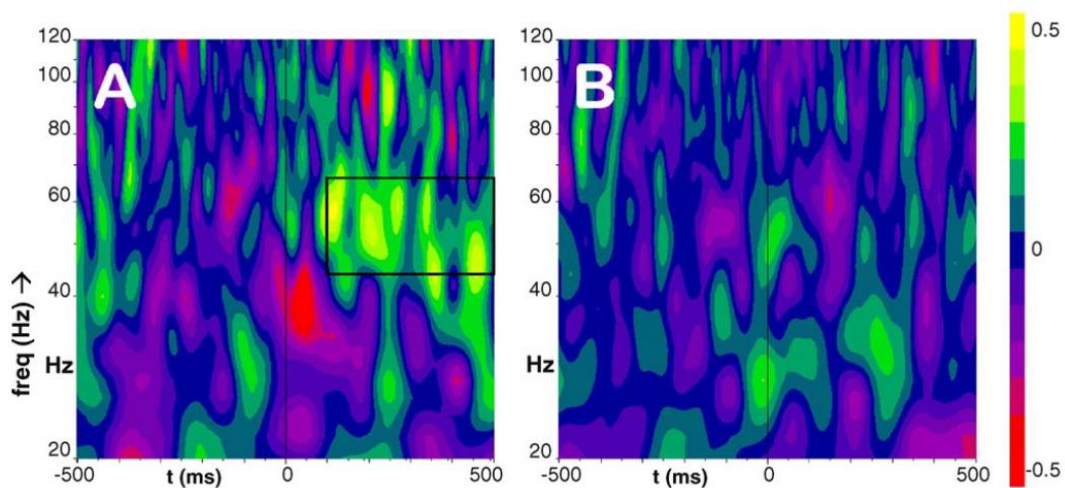


Figura 46: nel grafico tempo-frequenza di sinistra, riquadro A, è riportata l'attività in banda gamma in corrispondenza di stimoli consapevolmente percepiti da parte del paziente emianoptico. Nel riquadro B è raffigurata l'attività in banda gamma in condizioni di stimolo non rilevati. Tratta da [20]

Come si può notare l'attività indotta in banda gamma risulta molto più intensa in corrispondenza di stimoli consapevoli rispetto a stimoli che invece non sono stati rilevati.

In base ai risultati ottenuti, gli autori del lavoro [20] suggeriscono che l'attività indotta in banda gamma possa preannunciare "entrata" di una rappresentazione neurale attiva (in questo caso la sensazione che "qualcosa è accaduto") in una attività neurale più globale che può essere considerato metaforicamente come "l'arena" per la consapevolezza. Questo è in linea con i risultati precedenti in quanto sembrerebbe che una maggiore attività in banda gamma sia correlata a processi di consapevolezza visiva.

Come però già sottolineato da studi precedenti, una maggiore attività in banda gamma non sembra riflettere solamente processi neurali alla base di una percezione conscia, ma potrebbe riflettere anche elaborazioni neurali più elevate quali riconoscimento dello stimolo visivo presentato (inteso come capacità di collegare le caratteristiche elementari dello stimolo per dare origine a una rappresentazione coerente) e processi decisionali.

Conclusioni

Nel seguente lavoro abbiamo focalizzato la nostra attenzione sull'analisi delle componenti e dei ritmi ERP in correlazione ai processi neurali che generano consapevolezza visiva. La metodologia ERP è rilevante per studiare i meccanismi cerebrali che permettono l'emergere di una percezione consapevole, in quanto sono in grado di fornire informazioni circa la dinamica dei processi neurali con una elevata risoluzione temporale (dell'ordine del millisecondo). L'analisi di potenziali evento correlati permette di seguire con un'elevata precisione il decorso temporale dei processi neurali alla base della consapevolezza visiva.

Un primo aspetto da sottolineare, emerso dallo studio svolto, è che l'investigazione dei processi di consapevolezza visiva richiede la definizione di paradigmi sperimentali anche sofisticati in modo da creare condizioni nelle quali il soggetto è in grado di rilevare consapevolmente lo stimolo solo in alcune delle prove eseguite (tipicamente il 50%) e non rilevarlo nelle prove rimanenti, a fronte degli stessi stimoli visivi presentati; ciò per garantire che differenze rilevate nelle risposte elettrofisiologiche siano correlabili a differenze di consapevolezza (e quindi a processi neurali sottostanti) e non a differenze nella stimolazione applicata.

In molti degli studi sui correlati neurali della consapevolezza visiva, lo stimolo fisico viene dunque mantenuto costante e i trial sono suddivisi tra consapevoli e inconsapevoli sulla base del report volontario (verbale o motorio) dei partecipanti. Ciò solleva una questione centrale, ovvero il problema che i correlati elettrofisiologici dei processi che costituiscono la consapevolezza possono essere confusi con l'attività cerebrale che è associata ai processi post-percettivi richiesti nel riportare la consapevolezza. Pertanto, una delle problematiche principali è quella di distinguere i requisiti neurali legati causalmente alla consapevolezza dalle conseguenze post-percettive.

Nel seguito si riassumono i principali risultati estratti dai lavori investigati.

Componente P100 dell'ERP - Una componente candidata come correlato elettrofisiologico della consapevolezza visiva è una amplificazione della positività di P1 intorno a 100-130 ms. L'amplificazione di positività della componente P1 legata alla consapevolezza emerge in risposta a stimoli di contrasto ridotti, rilevamento dei cambiamenti o durante la percezione di stimoli bistabili.

P1 è una componente esogena, generata in aree extrastriate, la cui ampiezza è rafforzata dall'attenzione spaziale selettiva. Pertanto un P1 maggiore per gli stimoli rilevati consapevolmente in

metodi di contrasto ridotto suggerisce che l'elaborazione sensoriale sia più efficiente per stimoli o cambiamenti che hanno raggiunto la consapevolezza rispetto a quelli che non lo hanno fatto. Pertanto, una P1 potenziata potrebbe riflettere un maggiore coinvolgimento delle risorse attentive in uno stadio precoce dell'elaborazione, che non indica direttamente l'apparizione dell'evento sensoriale nella consapevolezza. Piuttosto, potrebbe riflettere il successo dell'allocazione delle risorse attentive verso lo stimolo e un'amplificazione sufficiente del segnale affinché raggiunga la soglia della consapevolezza. La nostra revisione quindi attribuisce a P1 un contributo pre-conscio che riflette l'allocazione delle risorse attentive, e che può essere un prerequisito per il successivo emergere della consapevolezza [14].

Visual Awareness Negativity - emersa in molti studi è una amplificazione della negatività intorno ai 200 ms nei siti temporale e occipitale posteriore, effetto denominato Visual Awareness Negativity (VAN). Questo effetto può avere la sua insorgenza già 100 ms dopo la presentazione dello stimolo e si sovrappone tipicamente con le componenti P1, N1, P2 e N2. La latenza è ritardata a 300-400 ms, se la difficoltà del compito visivo è più complessa. La finestra temporale e la topografia posteriore del VAN sembrerebbero supportare l'idea che la VAN sia generata lungo la via visiva ventrale durante l'elaborazione ricorrente (feedforward-feedback). Infatti, il segnale neurale generato da uno stimolo visivo raggiunge V1 entro 40 ms e le aree extrastriate superiori nella via ventrale entro 100 ms. Non appena l'attività feedforward ha raggiunto un'area, inizieranno i processi ricorrenti con l'area e le aree precedenti. La latenza della VAN è troppo lunga per riflettere la propagazione feedforward, ma i tempi delle interazioni ricorrenti si adattano bene al decorso temporale della VAN (ovvero intorno ai 200 ms).

Late Positivity (LP) - La Visual Awareness Negativity è seguita da una componente P3 più ampia in prove consapevoli rispetto a prove inconsapevoli, con maggiore evidenza nei siti parietali e frontali. Questo effetto è detto "late positivity" (LP) ed è stato associato ad una diffusione dell'attività verso regioni frontali/parietali che danno anche accesso a sistemi di output (report verbali/motori) e processi cognitivi più complessi come l'aggiornamento della memoria di lavoro. Un risultato riportato da alcuni studi è stato che la LP fosse modulata anche dai requisiti di risposta, in particolare risultava maggiore quando il compito visivo richiedeva un compito di risposta, mentre si attenuava quando non era richiesto nessun compito di risposta.

Queste manifestazioni elettrofisiologiche (VAN e LP) osservate in prove consapevoli rispetto a prove inconsapevoli, vengono interpretate in modo differente da teorie differenti, che si basano anche su concettualizzazioni differenti di 'consapevolezza'.

In particolare, teorie che accettano la distinzione tra coscienza fenomenica e coscienza riflessiva, interpretano la Visual Awareness Negativity come un correlato elettrofisiologico della consapevolezza visiva fenomenica o, più precisamente, come indicante i processi neurofisiologici che permettono di raggiungere una consapevolezza delle informazioni dello stimolo presentato. Mentre, la LP sembrerebbe essere il correlato elettrofisiologico che riflette l'accesso delle informazioni dello stimolo alla coscienza riflessiva (cioè i contenuti dello stimolo vengono ulteriormente elaborati e hanno accesso a sistemi di output e sistemi cognitivi di più alto livello). Questa interpretazione sembra essere supportata dal fatto che la LP, in funzione della sua latenza e della sua topografia, è strettamente correlata alla componente P3 la quale si ritiene rifletta processi cognitivi più complessi come l'aggiornamento della memoria di lavoro e processi post-percettivi.

Infatti, uno dei risultati riportati dagli studi è che l'ampiezza di P3, era modulata dai requisiti di risposta suggerendo che P3 si verificerebbe durante la fase post-percettiva di elaborazione e che quindi è una componente troppo tardiva per essere correlata causalmente nei processi di generazione di consapevolezza visiva. È quindi opinione di molti studi sopra riportati che P3 / LP rifletta l'elaborazione post-percettiva e la rilevanza del compito. [17]

Alcuni degli studi che abbiamo citato in questo lavoro affermano quindi che i meccanismi neurali che generano la consapevolezza visiva emergano prima della LP (ovvero a livello temporale della VAN, e nelle regioni visive ventrali attraverso processi ricorrenti feedback feedforward in queste aree visive). Quando i contenuti della consapevolezza fenomenica vengono ulteriormente elaborati, entrano nei processi post-percettivi (coscienza riflessiva o di accesso), che si riflettono nella successiva attività ampiamente diffusa (che coinvolge le regioni parieto-occipitali) segnalata nell'ERP da P3 e dalla LP. La LP pertanto rifletterebbe la manipolazione dei contenuti della consapevolezza fenomenica e il loro accesso a sistemi cognitivi di output e di livello superiore.

Tuttavia altri studi hanno attribuito a P3/LP il ruolo di correlato elettrofisiologico necessario per l'emergere di una percezione consapevole. Secondo la teoria del *global neuronal workspace* infatti una maggiore attività, nei siti parietali e frontali, a circa 300 ms dopo la presentazione dello stimolo in corrispondenza di stimoli percepiti consapevolmente rispetto a stimoli che invece non sono stati rilevati sembra essere direttamente e necessariamente correlata con i processi neurali che danno origine a consapevolezza visiva. Alla base delle differenze delle due teorie vi è una divergenza su che cosa si intenda con il termine "consapevolezza visiva". I sostenitori del *global neural workspace* affermano che non può esserci nessuna percezione conscia se il soggetto non è in grado di riportare, tramite opportuni meccanismi di output, l'avvenuto rilevamento dello stimolo. Chi sostiene invece che VAN sia il correlato ERP causalmente correlato a processi di consapevolezza, distingue la

consapevolezza in due forme distinte: consapevolezza fenomenica e consapevolezza riflessiva, sostenendo che la capacità da parte del soggetto di segnalare l'avvenuta percezione dello stimolo ricada nel secondo tipo di consapevolezza che è stata strettamente correlata ad una maggiore ampiezza della componente P3.

Infine un'ulteriore analisi è stata svolta per quegli studi che hanno riportato una maggiore attività indotta in banda gamma in risposta a stimoli consapevolmente percepiti. I grafici nel dominio tempo-frequenza hanno rilevato una più intensa attività gamma, in banda di frequenza 30-60 Hz in una finestra temporale da 200 a 500 ms post stimolo, in corrispondenza di stimoli che i soggetti percepivano consapevolmente.

Un aumento di ampiezza o potenza spettrale in banda gamma sembra essere correlato con i meccanismi neurali di consapevolezza visiva. Sulla base della distinzione tra consapevolezza fenomenica e riflessiva, alcuni studi, sopra riportati, però affermano che una maggiore attività in banda gamma non sia necessariamente correlata all'emergere di consapevolezza visiva, ma sembrerebbe riflettere elaborazioni più complesse rispetto ad una semplice percezione di tipo fenomenico, quali ad esempio riconoscimento degli oggetti, capacità di compiere una scelta o fornire una risposta quando il task visivo lo richiedeva.

Una questione centrale per gli studi futuri sui correlati neurali della consapevolezza sarà proprio quello di chiarire sia il ruolo delle aree corticali frontali/parietali e sia quello dell'attività indotta in banda gamma nella percezione consapevole di stimoli visivi. Processi neurali direttamente e necessariamente correlati alla consapevolezza visiva dovranno essere dissociati da processi ritenuti post percettivi che riflettono un'ulteriore elaborazione da parte del soggetto. Dovrà essere chiarito inoltre se una percezione consapevole può essere rilevata indipendentemente dal reporting verbale/motorio da parte del soggetto o se i due meccanismi sono strettamente legati tali da non poter essere considerati dissociati. L'investigazione di questi aspetti potrà avvantaggiarsi di recenti sofisticate tecniche di elaborazione dei segnali, come la risoluzione del problema inverso e la ricostruzione dell'attività nella corteccia cerebrale a partire da registrazioni EEG (questo ha il vantaggio di stimare informazioni sull'attività nelle regioni corticali con elevata risoluzione temporale) e attraverso modelli di reti neurali che simulano la dinamica dei processi neurali e possono aiutare ad interpretare i risultati sperimentali.

Bibliografia:

- [1] Juri D. Kropotov, “functional neuromarker for psychiatry”, 2016
- [2] JL Voss, KA Paller, in Learning and Memory: A Comprehensive Reference, 2008
- [3] Coles M.H. & Rugg M. D. “Event-related brain potentials: An introduction”, Capitolo 1 in “*Electrophysiology of mind: Event-Related Brain potentials and Cognition*”, Oxford University Press, 1996
- [4] Luck S. J. “An introduction to event-related potentials and their neural origins”, Capitolo 1 in “*An introduction to the Event-Related Potential Technique*”, The MIT Press, 1995
- [5] Hermann C.S. et al “Time-Frequency analysis of event-related potentials: A brief tutorial”, *Brain Topography*, 27: 438-450, 2014
- [6] Tallon-Baudry C. & Bertrand O. “Oscillatory gamma activity in humans and its role in object representation”, *Trends in Cognitive Science*, 3(4): 151-162, 1999
- [7] Polikar R. “The Wavelet Tutorial”, <http://web.iitd.ac.in/~sumeet/WaveletTutorial.pdf>
- [8] Gao R. X. & Yan R. “From Fourier Transform to Wavelet Transform: A Historical Perspective”, Capitolo 2 in “Wavelets – Theory and Application for Manufacturing”, Springer US, 2011
- [9] Sito web [<http://www.sigmaplot.co.uk/products/autosignal/tutorials/tutorial5.php>]
- [10] Quian Quiroga et al. “Wavelet Transform in the analysis of the frequency composition of evoked potentials”, *Brain Research Protocols*, 8:16-24, 2001
- [11] Frank Tong, “primary visual cortex and visual awareness”
- [12] Javier Sanchez-Lopez, Caterina A. Pedersini, Francesco Di Russo, Nicolò Cardobi, Cristina Fonte, Valentina Varalta, Massimo Prior, Nicola Smania, Silvia Savazzi, Carlo A. Marzi; “Visually evoked responses from the blind field of hemianopic patients”

[13] Jon Drive, Patrik Vuilleumier, Martin Eimer and Geraint, “Functional Magnetic Resonance Imaging and Evoked Potential Correlates of Conscious and Unconscious Vision in Parietal Extinction Patients”

[14] Mika Koivisto, Antti Revonsuo, “Event-related brain potential correlates of visual awareness”

[15] Henry Railo, Mika Koivisto, Antti Revonsuo, “Tracking the processes behind conscious perception: A review of event-related potential correlates of visual consciousness”

[16] Delphine Pins and Dominic ffytche, “The Neural Correlates of Conscious Vision”

[17] Mika Koivisto, Niina Salminen-Vaparanta, Simone Grassini, Antti Revonsuo, “Subjective visual awareness emerges prior to P3”

[18] Dominique Lamy, Moti Salti e Yair Bar-Haim, “Neural Correlates of Subjective Awareness and Unconscious Processing: An ERP Study”

[19] Michael A. Pitts, Jennifer Padwal, Daniel Fennelly, Antígona Martínez, Steven A. Hillyard, “Gamma band activity and the P3 reflect post-perceptual processes, not visual awareness”

[20] Aaron Schurger, Alan Cowey, Catherine Tallon-Baudry, “Induced gamma-band oscillations correlate with awareness in hemianopic patient GY”

Ringraziamenti

Un grande ringraziamento alla mia famiglia che mi ha sempre sostenuto e ha sempre creduto in me durante questo percorso. Ringrazio anche la professoressa Elisa Magosso che mi ha aiutato enormemente nello svolgimento di questo lavoro e che è sempre stata disponibile per chiarire qualsiasi mio dubbio.

Infine un particolare ringraziamento va ad Irene Incerti, la persona dalla quale ho preso ispirazione per portare a termine questo percorso di studi. Grazie per avermi sopportato durante questi anni, senza di te oggi non sarei qua.