

LEGS

LINGUISTICA
E GLOTTODIDATTICA SPERIMENTALE

1

LEGS

LINGUISTICA E GLOTTODIDATTICA SPERIMENTALE

Collana scientifica Open Access coordinata da Stefano Rastelli

URL <<http://www.paviauniversitypress.it/collana/LEGS/14/>>

Comitato scientifico

Adriana Belletti (Università degli Studi di Siena)

Maria Teresa Guasti (Università degli Studi di Milano-Bicocca)

Andrea Moro (Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia)

Maria Pavesi (Università degli Studi di Pavia)

Antonella Sorace (University of Edinburgh)

Francesco Vespignani (Università degli Studi di Trento)

Comitato dei valutatori

Camilla Bardel (University of Stockholm)

Alessandro Benati (University of Greenwich)

Camilla Bettoni (Università di Verona)

Bruno Di Biase (University of Western Sydney)

Ernesto Macaro (University of Oxford)

Gabriele Pallotti (Università degli Studi di Modena e Reggio)

Vito Pirrelli (Istituto di Linguistica Computazionale-CNR)

Ineke Vedder (Universiteit van Amsterdam)

Redazione

Valentina Bambini (Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia)

Arianna Zuanazzi (Università degli Studi di Trento)

LEGS pubblica esclusivamente testi scientifici sottoposti a doppio referaggio e approvati dal Comitato scientifico.

**LA RICERCA
SPERIMENTALE
SUL LINGUAGGIO:
ACQUISIZIONE,
USO, PERDITA**

a cura di **STEFANO RASTELLI**



Pavia University Press

La ricerca sperimentale sul linguaggio: acquisizione, uso, perdita / a cura di Stefano Rastelli. - Pavia, Pavia University Press, 2013. - XVI, 201 p. ; 22 cm. - (LEGS - Linguistica e glottodidattica sperimentale ; 1)

<http://purl.oclc.org/paviauniversitypress/LEGS-01>

ISBN 9788896764480 (brossura)

ISBN 9788896764497 (e-book PDF)

1. Linguaggio - Apprendimento - Ricerche

I. Rastelli, Stefano

401.93 CDD 22 - PSICOLINGUISTICA. Acquisizione del linguaggio

© Pavia University Press, 2013 – Pavia

ISBN: 978-88-96764-48-0



Opera sottoposta a peer review
secondo il protocollo UPI

Peer reviewed work in
compliance with UPI protocol

<http://www.universitypressitaliane.com>

I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica, di riproduzione e di adattamento anche parziale, con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i paesi.

La fotocoproduzione per uso personale è consentita nei limiti e con le modalità previste dalla legislazione vigente.

Progetto grafico della copertina © Piezo

Prima edizione: ottobre 2013

Pubblicato da: Pavia University Press – Edizioni dell'Università degli Studi di Pavia
Via Luino, 12 – 27100 Pavia, Italia

<http://www.paviauniversitypress.it> – unipress@unipv.it

Stampato da DigitalAndCopy S.a.S., Segrate (MI)

Printed in Italy

Sommario

Introduzione

La ricerca sperimentale sul linguaggio

Stefano Rastelli.....VII

La raccolta e l'analisi dei dati linguistici

Mirta Vernice..... 1

Gli ERP nello studio dei processi di comprensione frasale

Francesco Vespignani..... 15

*Il contributo della stimolazione cerebrale alla comprensione
dell'organizzazione del linguaggio*

Zaira Cattaneo, Joseph T. Devlin, Carlotta Lega, Tomaso Vecchi 69

La neuropsicologia del linguaggio: il contributo della patologia

Stefano Cappa 101

Lo studio del linguaggio con la risonanza magnetica funzionale

Giovanna Egidi, Uri Hasson..... 109

La spettroscopia nel vicino infrarosso funzionale (fNIRS) nello studio del linguaggio

Silvia Bisconti, Teresa Farroni 143

Lo studio dei tracciati oculari (eye-tracking) nella ricerca sul linguaggio

Marco Porta, Stefano Rastelli..... 165

Autori..... 199

Abstract..... 202

Introduzione. La ricerca sperimentale sul linguaggio

Stefano Rastelli, Università degli Studi di Pavia

1. 'Deve essere così'

La ricerca sperimentale non è l'unico tipo di ricerca a proporre spiegazioni per i fenomeni linguistici, ma è l'unica che lo fa invocando principi astratti non vincolati al criterio di attestazione o di contingenza storica. Anche i linguisti non sperimentali cercano le spiegazioni del perché le lingue sono fatte come sono fatte e vengono usate come vengono usate: ma i principi esplicativi che invocano sono diversi. Il linguista tipologico Martin Haspelmath¹ distingue due modi di fare ricerca scientifica sul linguaggio: il modo darwiniano e il modo galileiano. Lui propone di identificare il modo darwiniano con quello della ricerca storicotipologica. Per convinzione – e non per semplice esclusione – proporrei di appaiare il modo della ricerca sperimentale a quello galileiano. Leggendo i contributi presenti in questo volume è abbastanza evidente che i loro autori – se consultati – concorderebbero con questa ipotetica scelta di campo che io aprioristicamente attribuisco loro. Vale la pena di leggere l'intero capoverso dall'articolo di Haspelmath (che contiene anche una citazione da un altro autore non linguista):

Thus, by incorporating a theory of diachronic adaptation, linguistics can answer why questions, and is not limited to how questions. In this respect, it is more like biology than like physics, more Darwinian than Galilean. Ridley (1994) puts it as follows: "In physics, there is no great difference between a why question and a how question. How does the earth go round the sun? By gravitational attraction. Why does the earth go round the sun? Because of gravity. Evolution, however, causes biology to be a very different game, because it includes contingent history [...] Every living creature is a product of its past. When a neo-Darwinian asks 'Why?', he is really asking 'How did this come about?' He is a historian." (Ridley 1994, pp. 16-17)

In much the same way, I argue, a linguist who asks 'Why?' must be a historian. (Haspelmath 1999, p. 205)

¹ Haspelmath (1999).

Diversamente da quanto sostiene Haspelmath, anche il linguista sperimentale si chiede ‘perché’, pur non essendo uno storico né aspirando a diventarlo. Secondo Haspelmath, il linguista che cerca spiegazioni deve essere uno storico perché le spiegazioni dei fenomeni linguistici sono sempre vincolate alla storia contingente, visibile e reale, dei fenomeni stessi. Quello che c’è adesso è spiegabile solo alla luce del suo legame con quello che c’era prima al suo stesso posto, con la sua stessa funzione (anche se magari con una forma differente). Le forme viventi sono come sono oggi a causa del loro passato e in virtù delle forze esterne (culturali, sociali, ambientali) che hanno plasmato il primato di un carattere ereditario sopra altri caratteri. Il linguaggio è una forma vivente e come tale è vincolato alla sua storia contingente. La storia linguistica è contingente perché l’accumulo di forme e di funzioni linguistiche attestate storicamente si riflette o comunque interagisce (in modi tutti da scoprire) con le forme e le funzioni attestate sincronicamente. I principi del linguista non sperimentale – per quanto astratti – hanno sempre effetti visibili, una realizzazione contingente in forme storicamente attestate.

Il modo di agire scientifico di Galileo Galilei non è quello dello scienziato evolucionista (perlomeno, così come lo descrive Haspelmath). La scoperta del principio del moto uniformemente accelerato è stata possibile perché Galileo: (a) ha immaginato in modo ‘puramente teorico’ – cioè irrealizzabile in pratica – due esperimenti² le cui conclusioni (se gli esperimenti fossero stati possibili) avrebbero falsificato la teoria aristotelica secondo la quale la velocità di caduta è direttamente proporzionale alla massa del corpo; (b) ha immaginato la condizione impossibile (per l’epoca³) dell’assenza di aria e di attrito; (c) ha immaginato che la caduta libera dei gravi fosse da considerare solamente il caso-limite del comportamento degli stessi gravi sul piano inclinato. Galileo ha immaginato condi-

² In un corso di Fisica per i licei gli esperimenti ideali sono descritti così: «immagina di far cadere due oggetti diversi dalla stessa altezza; secondo Aristotele, quando arrivano a terra il più pesante ha una velocità v_p maggiore della velocità v_l di quello più leggero. Poi immagina di legare i due oggetti insieme con una corda sottile. Puoi aspettarti che quello più leggero e lento ostacoli il moto dell’altro e sia tirato da esso. Quindi la velocità comune con cui i due arrivano a terra dovrebbe essere compresa tra v_p e v_l . Ma si può ragionare in un altro modo: i due oggetti uniti formano un unico corpo, più pesante di ciascuno dei due. Stando così le cose, la velocità comune con cui i due arrivano a terra dovrebbe essere maggiore di v_p . Due ragionamenti diversi ma corretti, entrambi basati sulla teoria di Aristotele, portano a risultati incompatibili tra loro. Ciò è inaccettabile e quindi dobbiamo ammettere che l’idea di partenza è sbagliata». (U. Amaldi, *L’Amaldi 2.0*, [online], URL: <<http://online.scuola.zanichelli.it/amaldi/>>, [ultimo accesso: 24/09/2013]).

³ Verificata da Robert Boyle solo dopo la metà del ‘600.

zioni controfattuali, che deponevano tutte contro la comune esperienza (e le sue attestazioni) e contro il senso comune (stratificazione di esperienze condivise). Le condizioni sperimentali proposte da Galileo non erano vincolate allo spettro del visibile contingente, ma erano determinate da inferenze che astraevano decisamente da ogni possibile osservazione del fenomeno in esame. Galileo non spiega la caduta dei gravi in base all'osservazione di come i corpi cadono a terra. Non dice «è così perché lo vedo», ma «in base ai miei calcoli, anche se non si vede, 'deve essere' così (proprio il contrario di quello che si vede)».

L'importanza del fattore 'visivo' delle scoperte galileiane – rispetto al fattore 'calcolo astratto' – è stato inoltre molto ridimensionato in anni recenti. Galileo nel 1609 aveva messo a punto il cannocchiale col quale avrebbe compiuto le osservazioni che lo portarono alla scoperta dei satelliti di Giove e – nel 1611 – delle macchie solari. Il cannocchiale di Galileo misurava circa 1 metro e 20 centimetri ed era fatto di legno, carta e rame. Il migliore tra i cannocchiali da lui costruiti consentiva meno di una ventina di ingrandimenti. Tutti i suoi cannocchiali presentavano tuttavia seri problemi di risoluzione in conseguenza della forte aberrazione sferica e cromatica e visualizzavano un campo molto limitato. Tipicamente, il cannocchiale di Galileo poteva inquadrare solo una piccola porzione del corpo lunare.⁴ Non è un dato storico molto conosciuto il fatto che diversi altri astronomi dell'epoca avevano imparato a usare il cannocchiale e facevano altrettante 'osservazioni empiriche' sui corpi celesti, alcune delle quali contraddicevano quelle di Galileo. Galileo spesso non confutava la validità delle osservazioni dei suoi colleghi, ma la loro incapacità di riconoscere le regolarità nelle osservazioni discordanti e l'incapacità di organizzare razionalmente le divergenze nei risultati che spesso si potevano dedurre da queste osservazioni. Il primato di Galileo risiedeva nel suo metodo e nei suoi calcoli, non nella nitidezza delle immagini che vedeva con il suo cannocchiale. La lezione di Galilei risiede tuttora nel metodo e nella capacità di interpretare il molteplice visibile (e spesso discordante) alla luce del calcolo (geometrico e matematico). La spiegazione dei fenomeni viene dalla teoria, non dai fenomeni. Principi astratti di questo genere guidano anche la ricerca sperimentale sul linguaggio. Questi principi non sono vincolati al criterio di attestazione e di contingenza storica delle forme linguistiche. Anche per il linguista sperimentale, il metodo e la teoria hanno il primato sull'osservazione perché è la teoria che permette di 'vedere veramente' i dati, non viceversa (si veda Paragrafo 2). Dunque il linguista sperimentale di tipo

⁴ Tutte le informazioni sono prese dal Museo Virtuale Galilei, sito web: URL: <<http://catalogo.museogalileo.it/indice.html>>, [ultimo accesso: 24/09/2013].

galileiano volentieri continua a confondere il 'perché' con il 'come',⁵ cioè continua a rimanere prudentemente agnostico sul fatto che la ragion d'essere delle lingue sia da ricercare solo nei dati visibili attestati (o ricostruiti), cioè nella loro storia.

2. La natura delle ipotesi sperimentali sul linguaggio

La differenza tra ricerca sperimentale e non sperimentale non riguarda la natura dei dati. Qualche volta si sente dire che una o l'altra disciplina fa uso o non fa uso di 'dati empirici'. Come è facile dimostrare leggendo i contributi presenti in questo volume, tutti gli studi sperimentali – come gli studi non sperimentali – utilizzano dati 'empirici', cioè dati che sono ricavati dall'esperienza del linguaggio. La differenza tra ricerca sperimentale e non sperimentale sul linguaggio non riguarda nemmeno l'uso delle tecnologie, di database e di corpora (si veda Paragrafo 3). Moltissimi ricercatori – a prescindere dall'orientamento teorico – ormai nei loro studi sul linguaggio usano tecnologie ingegneristiche e medicali, tecniche statistiche e corpora di riferimento.⁶ Ciò che fa la differenza tra ricerca sperimentale e ricerca non sperimentale sul linguaggio è la natura delle ipotesi. Per il linguista sperimentale, il dato inesistente, il dato non attestato, la non-occorrenza non corrisponde a un punto di arresto e al declino fallimentare dell'ipotesi formulata. La teoria può sopportare e addirittura prevedere l'esistenza di un dato che non si vede, che non ricorre. La ricerca sperimentale si differenzia da altri tipi di ricerca sul linguaggio perché le sue ipotesi incorporano principi astratti non necessariamente basati su dati contestualmente osservabili o storicamente attestati. In questo preciso carattere, la ricerca sperimentale sul linguaggio si avvicina – per esempio – alla ricerca nella fisica moderna e a

⁵ L'autobiografia dell'astrofisica Margherita Hack – scomparsa di recente – si intitola *Il perché non lo so* (Milano, Sperling & Kupfer, 2013).

⁶ La descrizione che Levinson e Evans (2010, pp. 2746-2747) fanno delle metodologie utilizzate dai linguisti generativisti è caricaturale e gravemente male informata. Secondo questi autori, la ricerca linguistica in campo generativista si limita a utilizzare come dati le intuizioni dei parlanti e al massimo i giudizi di accettabilità. Levinson e Evans non hanno mai preso in mano e sfogliato riviste come per esempio «Cortex», «Nature Neuroscience», «Neuroimage», «Second Language Research», «Language Acquisition». Non c'è numero di queste riviste che non contenga almeno uno studio in cui ipotesi direttamente o indirettamente riconducibili alle idee generali della Grammatica Universale non vengano testate nei loro correlati neuroanatomici e neurofunzionali e anche nelle loro basi comportamentali e *performance-driven* mediante costruzione o consultazione dei corpora di riferimento.

quella contemporanea. Nel paradigma delle scienze fisiche, il modello teorico ha priorità metodologica sul dato osservato. Il modello teorico infatti è in grado di comprendere anche il dato non ancora osservato in quanto identifica i limiti (tecnologici, ambientali, sperimentali) superati o minimizzati i quali il dato cruciale – fino a oggi solo postulato – può diventare anche visibile e quindi venire osservato dagli strumenti. La ricerca sperimentale sul linguaggio non si limita a studiare quello che i parlanti hanno detto e fatto con il linguaggio. Cerca di fare ipotesi su quello che i parlanti sanno dire (anche se non lo dicono) e sanno fare (anche se non lo fanno). Nella ricerca scientifica, ciò che è postulabile non corrisponde necessariamente a ciò che è attestato. In questo consiste il ‘carattere storico’ della ricerca sperimentale. Non c’è ricerca sperimentale dove la performance linguistica è l’unica variabile osservata e dove le ragioni di efficienza funzionale della performance sono gli unici principi esplicativi a essere proposti.

3. *D-Linguistics* e metodo sperimentale

Sarebbe un errore etichettare come sperimentale o non-sperimentale un tipo di ricerca basandosi solo sull’approccio teorico che la informa. Tuttavia è un dato di fatto che gli approcci storico-tipologici allo studio del linguaggio – per le ragioni spiegate sopra – sono per natura più inclini degli approcci universalisti a dare più importanza al ‘principio di attestazione’ e ai costrutti teorici che ne derivano. Evans, Levinson (2009) e Levinson, Evans (2010) – in due articoli molto controversi e anche molto citati – distinguono gli approcci linguistici che mettono la diversità al centro dell’agenda (tipologi, funzionalisti) dagli approcci che vedono la diversità come un epifenomeno (la linguistica generativa). Gli autori distinguono la natura dei principi esplicativi che vengono più spesso invocati negli studi sperimentali utilizzati nei due approcci. Le spiegazioni ultime invocate dai *D-linguists* (*Diversity-linguists*) alla fine vanno sempre ricondotte al tipo statistico: «since the distribution of attested structural types across the design space reflects the *likelihood* of the evolutionary pathways that would engender them, rather than specific constraints on the structure themselves» (Levinson, Evans 2010, p. 2734). Secondo Levinson, Evans (2010), poiché i metodi statistici più recenti e potenti (cui viene applicato il calcolo probabilistico bayesiano) permettono di estrarre pattern linguistici da enormi masse di dati, la diversità linguistica «must be taken at face value», cioè va accettata così com’è. Gli unici principi astratti che possono essere postulati per spiegarla sono quelli che riguardano le ipotesi sui valori culturali e sui vincoli cognitivi che hanno plasmato e selezionato darwinianamente gli usi linguistici

storicamente attestati e sedimentati. Per Levinson, Evans (2010), in una prospettiva darwiniana, non è possibile pensare che le strutture astratte abbiano qualche priorità o che possa esistere una conoscenza linguistica che non sia ricondotta a un uso linguistico. L'unica spiegazione valida per il linguaggio è l'uso del linguaggio. Come abbiamo già detto (Paragrafo 2), la ricerca sperimentale – per essere tale – non può essere vincolata all'unico principio di attestazione e non può guardare solo all'uso concreto che delle lingue fanno i parlanti. Nel paragrafo successivo approfondiamo questo punto.

4. Il ruolo dei corpora e dei dati di performance nella linguistica sperimentale

Diversamente da quanto spesso si legge (e in netta contraddizione con il quadro dipinto da Levinson, Evans 2010) nella linguistica sperimentale – anche in quella di orientamento innatista, modulare e generativista – si fa sempre più ampio e più frequente uso di corpora di riferimento di lingua scritta e parlata. Per esempio, in moltissimi studi che utilizzano ERP e fMRI pubblicati negli ultimi cinque anni, il rango di frequenza delle parole utilizzate nelle frasi sperimentali non solo è stato controllato, ma è entrato come variabile indipendente nell'analisi della covarianza.⁷ La differenza tra l'utilizzo dei corpora nella linguistica sperimentale e in quella non sperimentale è la seguente. Il linguista sperimentale non ricorre ai corpora e ai dati di performance per il valore intrinseco della frequenza, cioè perché ritiene che gli schemi statistici lo possano improvvisamente mettere nel mezzo di qualche verità emergente dai dati. Il dato statistico – che venga da procedure di elicitazione o dall'analisi dei corpora – nella ricerca sperimentale sul linguaggio è utile nella fase di osservazione iniziale. I dati di performance – e il loro trattamento statistico – servono per suggerire le ipotesi di partenza che vengono poi verificate sperimentalmente mediante le procedure descritte nei contributi presenti in questo volume. Perché i dati statistici sono utilizzati per formulare le ipotesi e per controllare l'impatto della frequenza ma non possono essere usati come prova? Charles Yang (2010) spiega – molto più semplicemente di quanto abbia mai fatto lo stesso Chomsky – il motivo per il quale non si può inferire nulla sulla competenza linguistica dei parlanti se si guarda solo alla performance linguistica. Yang dice che i dati di performance e dei *language corpora* sono pieni di falsi positivi e di falsi negativi. I parlanti non dicono qualcosa solo perché (quando) sono capaci di farlo. L'assenza di una attestazione in un corpus non necessariamente indica la presenza di un deficit nella competenza linguisti-

⁷ Si vedano gli studi citati in Nuzzo, Rastelli (2011) e in Rastelli (2013).

ca dei parlanti che informano quel corpus. Di converso, la presenza di un'attestazione (specialmente nei corpora di apprendimento di prime e seconde lingue) non indica affatto la presenza della competenza linguistica corrispondente. Ci sono tanti motivi per i quali un parlante (specialmente un apprendente) può dire qualcosa anche senza saperla veramente dire e può non dire qualcos'altro anche se lo sa dire (Townsend, Bever 2001). La ricerca sperimentale sul linguaggio ha l'obiettivo di scoprire quello che i parlanti sanno del linguaggio. La decisione di usare come prova solo quello che i parlanti dicono comporta una doppia assunzione implicita: (a) i parlanti dicono sempre quello che sanno dire: (b) i parlanti non dicono perché non sanno. Si tratta di due postulati non falsificabili. Come tali non possono essere accettati in nessuna procedura che si ispiri al metodo sperimentale.

5. In questo volume

Nel giugno 2012 l'Università di Pavia ha ospitato un ciclo di seminari dal titolo *La ricerca sperimentale sul linguaggio: acquisizione, uso, perdita*. Tra il pubblico, formato da studenti, dottorandi e docenti di varie Facoltà, qualcuno ha suggerito che gli atti dei seminari venissero pubblicati. Sarebbe stata un'occasione unica per leggere – radunate tutte assieme per la prima volta in lingua italiana – descrizioni accurate, aggiornate e attendibili di tecniche e metodi ancora poco conosciuti presso il pubblico dei linguisti e degli psicologi non specialisti. La maggior parte dei relatori ai seminari ha aderito all'invito e la Pavia University Press ha accettato di fare del presente il primo titolo della collana LEGS.

Il volume si apre con il contributo di Mirta Vernice, intitolato *La raccolta e l'analisi dei dati linguistici*. L'autrice descrive in maniera molto chiara e autorevole la struttura interna degli esperimenti che permettono di isolare e studiare uno specifico processo linguistico e che permettono di indagarlo in un contesto controllato. La costruzione di un esperimento presuppone l'elaborazione di una domanda di ricerca che possa essere testata sperimentalmente, la creazione di un disegno sperimentale appropriato e la scelta di un adeguato metodo di indagine. Mirta Vernice descrive come va impostato un esperimento che permetta di studiare un fenomeno linguistico mediante alcuni paradigmi sperimentali di tipo comportamentale. Vengono introdotte le tecniche statistiche più adeguate per analizzare i dati raccolti e vengono anche presentate alcune delle modalità più utilizzate in ambito psicolinguistico per studiare la comprensione e la produzione del linguaggio. Il contributo di Mirta Vernice è una lettura da consigliare sia a

chi inizia a fare linguistica sperimentale sia a chi ha bisogno di una rassegna concisa e informativa sugli standard scientifici più recenti.

Il contributo di Francesco Vespignani (*Gli ERP nello studio dei processi di comprensione frasale*) descrive in maniera molto chiara, scientificamente rigorosa e aggiornata la tecnica dei potenziali evento-correlati. Questa tecnica misura l'evoluzione nel tempo delle differenze di potenziale elettrico registrate sullo scalpo anche in relazione a stimoli linguistici. L'autore descrive ampiamente gli aspetti tecnici relativi all'estrazione e alla ripulitura del segnale e anche i risvolti scientifico-metodologici degli ERP, nonché i vantaggi e gli svantaggi del loro utilizzo per lo studio del linguaggio. Tra i vantaggi evidenti vengono annoverati l'alta risoluzione temporale e la multidimensionalità degli indici. Gli svantaggi sono dovuti invece per esempio alla metodologia di *averaging*. Molto risalto è dato anche alla descrizione dei paradigmi per lo studio della comprensione frasale e all'interpretazione delle diverse forme d'onda o 'componenti', che tanto dibattito continua a suscitare tra i linguisti sperimentali. L'autore si sofferma anche sui metodi statistici principalmente utilizzati per analizzare i dati ERP.

Infine, sono descritti i principali quadri interpretativi in cui le diverse componenti dagli ERP sono collegate a moduli neurocognitivi differenti che nel complesso contribuiscono a fasi specifiche del processo di comprensione frasale.

Zaira Cattaneo, Joseph Devlin, Carlotta Lega e Tomaso Vecchi presentano uno studio intitolato *Il contributo della stimolazione cerebrale alla comprensione dell'organizzazione del linguaggio*. Diversamente dalle tecniche di neuroimmagine e dagli ERP, le tecniche di stimolazione cerebrale – quali la stimolazione magnetica transcranica (TMS) o la stimolazione a correnti dirette continue (tDCS) – consentono di stabilire un nesso causale (e non solo una correlazione) tra l'attivazione in una determinata regione cerebrale e un particolare compito. Gli autori forniscono una breve descrizione dei principi di funzionamento della TMS e della tDCS. Successivamente analizzano più nello specifico come queste tecniche si siano rivelate importanti per lo studio dei correlati neurali delle funzioni linguistiche. Nel loro contributo, estremamente denso di informazioni, ricco e articolato, gli autori sottolineano come la TMS si sia dimostrata uno strumento utilissimo non solo per mappare le singole funzioni percettive, attentive o cognitive, ma anche per tracciare una 'cronometria' del contributo di diverse aree cerebrali in un determinato processo cognitivo (linguaggio compreso).

Il contributo di Stefano Cappa (*La neuropsicologia del linguaggio: il contributo della patologia*) spiega come – nonostante gli sviluppi delle tecniche di indagine del funzionamento cerebrale in condizioni di normalità – lo studio della patologia del linguaggio mantenga inalterato il suo ruolo centrale nella ricerca sulla neurobiologia del linguaggio, sia come generatore di ipotesi che come terreno di verifica di

modelli psicolinguistici o neurofisiologici. Nel suo contributo, Cappa si sofferma su come il dato sul processo patologico, indipendentemente dalla sua natura (lesione vascolare, tumorale, degenerativa), quando coinvolge le aree cerebrali specializzate, può rappresentare una 'finestra' sull'organizzazione cerebrale del linguaggio.

Giovanna Egidi e Uri Hasson presentano un importante contributo dal titolo *Lo studio del linguaggio con la risonanza magnetica funzionale*. La risonanza magnetica funzionale è una tecnica di neuroimmagine per lo studio dell'attività di regioni cerebrali associate a funzioni cognitive, percettive e motorie che è stata applicata allo studio del linguaggio fin dai primi anni '90. Essa permette di registrare l'attivazione all'unisono di più regioni cerebrali, evidenziando così insieme di regioni che si coattivano e interagiscono nello svolgere una determinata funzione. Il capitolo di Egidi e Hasson introduce il lettore alla tecnica e alla metodologia sperimentale della risonanza magnetica funzionale applicata allo studio di fenomeni linguistici. Gli autori sottolineano anche alcuni *caveat* interpretativi utili per districarsi nella sempre più ricca letteratura sul linguaggio basata su questo metodo sperimentale.

Silvia Bisconti e Teresa Farroni presentano un contributo intitolato *La spettroscopia nel vicino infrarosso funzionale (fNIRS) nello studio del linguaggio*. Negli ultimi decenni la spettroscopia nel vicino infrarosso (fNIRS) è stata applicata nella mappatura funzionale del cervello influenzando in maniera significativa lo studio delle funzioni cognitive sia negli adulti che negli infanti. La fNIRS è una tecnica di neuroimmagine sicura e non invasiva. I diversi vantaggi che la fNIRS offre nello studio del linguaggio hanno consentito di approfondire ampiamente i meccanismi neurali in un ambiente confortevole, silenzioso e naturale. Nel capitolo Bisconti e Farroni descrivono la tecnica fNIRS in maniera estremamente semplice e nel contempo dettagliata e informativa, mettendone in luce gli aspetti positivi e anche gli inconvenienti. Sono anche presentati e discussi alcuni studi fNIRS che hanno contribuito allo studio dello sviluppo, della comprensione e della produzione del linguaggio.

Il volume si chiude con il contributo di Marco Porta e Stefano Rastelli intitolato *Lo studio dei tracciati oculari (eye-tracking) nella ricerca sul linguaggio*. La prima parte del capitolo è dedicata alla fisiologia e anatomia dell'occhio umano e alla descrizione delle tecniche che hanno reso possibile nel corso degli ultimi tre decenni la tracciatura sempre più precisa dei movimenti della pupilla. Nella prima parte sono anche descritte le principali applicazioni dell'*eye-tracking* nel campo biomedico, nel marketing, nel supporto della lettura di soggetti con deficit neurocognitivi. La seconda parte del contributo è dedicata all'utilizzo dell'*eye-tracking* nello studio sul linguaggio. Le metriche di lettura vengono riportate ai modelli

della comprensione della lingua scritta e parlata. Questi modelli vengono poi vagliati per la loro importanza rispetto alle teorie sull'acquisizione della prima e della seconda lingua

Ringrazio la Pavia University Press e in particolar modo la dott.ssa Annalisa Doneda per la pazienza e la competenza che ha sempre dimostrato in ogni fase di lavorazione del volume. Un ringraziamento particolare va anche alla dott.ssa Arianna Zuanazzi che ha curato la redazione dei contributi e a Piezo per la bellissima copertina. Sono profondamente grato a tutti gli autori che hanno aderito all'invito di pubblicare per questa collana scientifica in modalità on-line ad accesso gratuito. Spero che il volume sia consultato, scaricato e condiviso liberamente da molti studenti, docenti e persone interessate. Così ne sarà valsa la pena.

Garniga Terme (TN), 12 agosto 2013

Bibliografia

- Evans N., S. Levinson (2009), *The myth of language universals: Language diversity and its importance for cognitive science*, «Behavioral and Brain Science», 32(5), pp. 429-492.
- Haspelmath M. (1999), *Optimality and diachronic adaptation*, «Zeitschrift für Sprachwissenschaft», 18(2), pp. 180-205, doi: 10.1515/zfsw.1999.18.2.180.
- Levinson S., N. Evans (2010), *Time for a sea-change in linguistics: Response to comments on 'The Myth of Language Universals'*, «Lingua», 120, pp. 2733-2758.
- Nuzzo E., S. Rastelli (2011), *Glottodidattica Sperimentale*, Roma, Carocci.
- Rastelli S. (2013), *Il Processing nella seconda lingua. Teorie, dati, didattica*, Roma, Carocci.
- Ridley M. (1994), *The red queen: Sex and the evolution of human nature*, London, Penguin.
- Townsend D., T. Bever (2001), *Sentence Comprehension*, Cambridge MA, MIT Press.
- Yang C. (2010), *Who's afraid of George Kingsley Zipf?*, [online], URL: <<http://www.ling.upenn.edu/~ycharles/papers.html>>, [ultimo accesso: 23/09/2013].

La raccolta e l'analisi dei dati linguistici

Mirta Vernice, Università degli Studi di Milano-Bicocca

1. Variabili dipendenti e indipendenti

Ogni esperimento parte da una domanda di ricerca. Per esempio, ci potremmo chiedere se la lunghezza di una parola influenzi il tempo che impieghiamo per leggerla. Per rispondere a una simile domanda si può predisporre un esperimento molto semplice. Innanzitutto dovremmo creare due liste di parole, una contenente solo parole bisillabe e una contenente solo trisillabe. Poi potremmo chiedere a lettori adulti di leggere le parole di entrambe le liste. Infine, confrontando i tempi di lettura delle due liste, potremmo verificare se le parole bisillabe sono lette più velocemente di quelle trisillabe.

Come suggerisce il nostro esempio, un esperimento permette di valutare in quale misura un fattore (in questo caso la lunghezza delle parole) influenza un comportamento umano misurabile (il tempo di lettura). Un esperimento consiste pertanto nel manipolare un aspetto del materiale linguistico, nel nostro esempio la lunghezza delle parole, e nell'osservare come questa manipolazione influenzi un comportamento umano (il tempo di lettura). Per riassumere, chiamiamo variabile indipendente quella proprietà linguistica che viene manipolata dallo sperimentatore. Nel nostro esempio la variabile indipendente è la lunghezza delle parole in sillabe (bisillabe vs. trisillabe). Il comportamento umano che misuriamo rappresenta invece la variabile dipendente (il tempo di lettura). Diremo che la variabile indipendente ha un effetto sulla variabile dipendente se osserviamo una differenza significativa nei tempi medi di lettura delle parole bisillabe e di quelle trisillabe. In altre parole, si potrà concludere che la variabile indipendente influenza la dipendente se osserviamo una differenza nei risultati (per esempio, nei tempi di lettura) che otteniamo nelle diverse condizioni sperimentali. Naturalmente potremo stabilire se tale differenza è significativa soltanto mediante un'analisi statistica della quale parleremo in seguito in questo capitolo.

Soffermiamoci adesso sulla diversa natura che può assumere una variabile (sia essa dipendente o indipendente). Nel nostro esempio ci siamo chiesti se occorra più tempo per leggere parole bisillabe rispetto a parole trisillabe; la variabile indipendente era in tal caso di natura categorica su due livelli (bisil-

laba vs. trisillaba). Nelle variabili categoriche infatti i dati sono distribuiti in categorie. Immaginiamo invece di chiederci se parole acquisite prima durante l'età evolutiva siano lette più velocemente di parole acquisite più tardi. In questo caso l'età di acquisizione delle parole (si consideri che una parola può essere acquisita a 2;6 anni, a 3 o a 5 anni) sarà di natura continua. Nelle variabili continue i dati si riferiscono a una scala numerica continua caratterizzata da intervalli uguali tra le singole osservazioni o scala a intervalli, di cui parleremo in seguito.

Si noti che anche la variabile dipendente può essere sia di natura continua (per esempio, tempi di lettura o tempi di reazione) che categorica (per esempio, accuratezza: giusto vs. sbagliato). Le variabili dipendenti continue spesso si riferiscono a misure on-line, ovvero a misure relative al processo che si intende studiare nel momento stesso in cui sta occurring (es. durata delle fissazioni, tempi di lettura, etc.). Al contrario, le variabili dipendenti categoriche implicano misure off-line, ovvero misure che rappresentano il prodotto finale del processo (per esempio, la risposta scelta in un compito di accettabilità grammaticale, o la struttura sintattica, attiva o passiva, usata per descrivere un evento in un compito di descrizione di immagini).

2. Il disegno sperimentale: misure ripetute e non ripetute

In un esperimento è necessario ridurre tutte le fonti di variabilità associate ai partecipanti e al materiale usato, parole o frasi (che chiameremo item sperimentali). Si noti infatti che i partecipanti potrebbero variare per ragioni individuali (QI, esperienza precedente, etc.) e contestuali (motivazione, stanchezza fisica, etc.). Per controllare la variabilità tra partecipanti si può fare in modo che ogni soggetto sia esposto a tutte le condizioni sperimentali. In altre parole, per tornare al nostro esempio, tutti i partecipanti dovrebbero leggere gli item di entrambe le liste (bisillabe e trisillabe). Una manipolazione di questo tipo viene definita *within subjects* (entro soggetti) o a misure ripetute. In base a questa manipolazione tutti i partecipanti sono esposti a tutte le condizioni sperimentali.

Immaginiamo invece di far leggere a un gruppo di partecipanti solo le bisillabe, mentre a un altro gruppo solo le trisillabe; in altre parole supponiamo che ogni soggetto veda gli item in una sola condizione sperimentale. Tale manipolazione viene definita *between subjects* (tra soggetti) o a misure non ripetute. Una manipolazione di questo tipo non permette di controllare se le eventuali differenze ottenute tra le due condizioni sperimentali possano essere do-

vute a differenze (individuali e contestuali) tra i soggetti che appartengono ai due gruppi sperimentali, o alla manipolazione della variabile indipendente.

Possiamo applicare un discorso simile agli item. Si consideri come esempio la frequenza delle parole bisillabe e trisillabe del nostro esperimento. Tale variabile potrebbe rappresentare una fonte non controllata di variabilità tra condizioni sperimentali. Come sappiamo infatti, parole più frequenti sono riconosciute e lette più velocemente di parole meno frequenti. Lo sperimentatore dovrebbe quindi accertarsi del fatto che le parole delle due liste varino solo rispetto al numero delle sillabe, e che siano invece equivalenti in termini di frequenza. Pertanto, per evitare che ci sia una differenza sistematica nel tipo di materiale usato in una condizione o nell'altra (per esempio che le parole trisillabe siano consistentemente meno frequenti rispetto alle bisillabe) si dovrebbero scegliere in entrambe le condizioni sperimentali parole con frequenza equivalente.

Si noti che con un certo tipo di materiali sperimentali, per esempio frasi, si può ovviare a questo problema facendo in modo che tutti gli item occorranza in tutte le condizioni sperimentali. Questa manipolazione viene definita *within items* o entro item. Un esempio di disegno sperimentale *within items* ci è offerto dallo studio di Van Gompel e Majid (2004). Questi studiosi si sono chiesti se la frequenza lessicale di un antecedente velocizzasse il tempo di lettura della corrispondente espressione anaforica, realizzata mediante un pronome o un NP ripetuto. Gli studiosi hanno manipolato come variabili indipendenti: I) il tipo di espressione anaforica usata (NP ripetuto vs. pronome); II) la frequenza lessicale dell'antecedente (frequente vs. non frequente). Pertanto diremo che questo studio sperimentale implica due variabili indipendenti di natura categorica (tipo di anafora e frequenza dell'antecedente) e ciascuna di esse ha due livelli. Gli autori hanno manipolato le due variabili nella stessa frase, che può quindi presentarsi in (2x2) quattro versioni distinte. Definiamo il 'quartetto' di frasi riportato di seguito (1a-d) un set sperimentale in cui la stessa frase occorre in quattro condizioni sperimentali diverse. Per completezza riportiamo la traduzione sotto al set di frasi sperimentali:

1. NP ripetuto - antecedente non frequente
The constables suspected the arsonist of the break-in.
They searched in the arsonist's bag for evidence.
2. NP ripetuto - antecedente frequente
The constables suspected the criminal of the break-in.
They searched in the criminal's bag for evidence.

3. Pronome - antecedente non frequente
The constables suspected the arsonist of the break-in.
They searched in his bag for evidence.
4. Pronome - antecedente frequente
The constables suspected the criminal of the break-in.
They searched in his bag for evidence.

Trad. I poliziotti hanno sospettato il piromane/il criminale dell'irruzione.
Hanno cercato le prove nella (sua) borsa (del piromane/del criminale).

Si noti che le quattro frasi differiscono solo nel tipo di antecedente, che può essere lessicalmente poco frequente ('arsonist', piromane; frasi 1 e 3) o più frequente ('criminal', criminale; frasi 1b e 1d), e nel tipo di espressione anaforica usata per riferirsi all'antecedente: NP ripetuto (frasi 1 e 2) o pronome (frasi 3 e 4).

Per fare in modo che tutti i soggetti vedano ogni singolo item in una sola condizione (ovvero, che non leggano tutte le versioni dello stesso item), e che siano esposti a tutte le condizioni sperimentali nel corso dell'esperimento, gli autori hanno controbilanciato l'ordine di presentazione degli item nelle diverse condizioni sperimentali secondo una modalità che viene definita disegno *latin square*, esemplificata di seguito (Tavola 1). La Tavola 1 indica il tipo di condizione sperimentale nella quale occorre ogni item per ogni partecipante. Per semplicità abbiamo chiamato la condizione 'NP ripetuto - antecedente non frequente' come 'NP non freq', 'NP ripetuto - antecedente frequente' come 'NP freq', 'Pronome - antecedente non frequente' come 'Pronome non freq', 'Pronome - antecedente frequente' come 'Pronome freq'.

	Partecipante 1	Partecipante 2	Partecipante 3	Partecipante 4
item 1	NP non freq	NP freq	Pronome non freq	Pronome freq
item 2	NP freq	Pronome non freq	Pronome freq	NP non freq
item 3	Pronome non freq	Pronome freq	NP non freq	NP freq
item 4	Pronome freq	NP non freq	NP freq	Pronome non freq

Tavola 1.

Come si osserva in Tavola 1, il partecipante 1 vedrà l'item 1 in condizione 'NP ripetuto - antecedente non frequente' (e quindi leggerà la frase 1a), il partecipante 2 vedrà l'item 1 in condizione 'NP ripetuto - antecedente frequente' (e leggerà la frase 1b), il partecipante 3 lo vedrà in condizione 'Pronome - antecedente non frequente' (frase 1c), mentre il partecipante 4 vedrà l'item 1 in condizione 'Pronome - antecedente frequente' (frase 1d), e così per l'item 2 e per i successivi.

Siamo consapevoli del fatto che la manipolazione *within items* non è possibile per una serie di materiali. Per esempio, per confrontare i tempi di lettura di verbi e nomi, metà degli item dovranno necessariamente essere nomi e metà verbi. In altre parole, ogni singolo item, come è ovvio, occorrerà solo come nome o verbo. Un disegno di questo tipo è definito *between items* o tra item.

Per riassumere, si è visto che occorre controllare per quanto possibile la variabilità insita negli item e nei soggetti. Per fare questo è auspicabile seguire le seguenti indicazioni:

- a. Scegliere una manipolazione *within subjects*, facendo sì che tutti i soggetti siano esposti a tutte le condizioni sperimentali. Questo implica avere per lo stesso soggetto più misure relative a tutte le condizioni sperimentali.
- b. Fare in modo che gli item sperimentali occorranza in tutte le condizioni sperimentali, ovvero optare per una manipolazione *within items*. Questo permetterà di avere per ciascun item una misura relativa a tutte le condizioni sperimentali.

Infine, ricordiamo che le liste di presentazione degli item dovranno variare in modo random per ogni partecipante. Per esempio, il partecipante 1 potrebbe vedere l'item 1 in posizione 5, il partecipante 2 lo potrebbe vedere in posizione 20, il partecipante 3 in posizione 9. L'ordine in cui un item occorre in una lista sperimentale viene definito ordine di presentazione dei trial e deve variare in modo casuale per ogni soggetto.

3. Filler

Finora si è parlato di manipolazione sperimentale sottolineando il fatto che senza di essa non c'è esperimento. Tuttavia è necessario che il partecipante non sia consapevole di quale sia l'oggetto della nostra manipolazione. Infatti un partecipante 'non-naïf' potrebbe modificare il proprio comportamento di proposito. Per ovviare a questo problema è necessario includere dei filler. I filler sono item che assomigliano a quelli sperimentali, pur non presentando nessuna manipolazione. Per esempio, si immagini di voler confrontare il tempo di lettura in frasi attive ('La mamma lava la camicia') e passive ('La mela è mangiata dalla mamma'). Per far sì che i partecipanti non leggano solo frasi transitive, si potrebbero aggiungere anche strutture intransitive ('il bambino cammina') che presentino un contenuto lessicale e semantico diverso dalle fra-

si sperimentali. I filler pertanto sono creati per nascondere ogni manipolazione sperimentale osservabile nei nostri item.

Il numero di filler può essere variabile e dipendere dal numero di item e dalla durata totale del nostro esperimento. Per esempio, in esperimenti di produzione del linguaggio sugli adulti (come un compito di *naming* o un *continuation task*), si potrà aggiungere tre volte il numero di item sperimentali presenti nell'esperimento, perciò se i partecipanti vedranno 24 item sperimentali, dovremo includere 72 filler. Se invece si tratta di un esperimento di lettura (*eye-tracking* o *self-paced reading*), composto già da 48 item sperimentali, si potrà optare per l'inclusione di altrettanti filler. Ovviamente il numero di item totali (sperimentali e filler) di cui consta l'esperimento dipende anche dal tipo di partecipanti sperimentali che si vuole testare. Si consideri infatti che un esperimento psicolinguistico (di lettura, produzione o comprensione) non dovrebbe mai durare più di 30-40 minuti, tempo oltre il quale la soglia di attenzione e concentrazione cala notevolmente. Inoltre, studi di acquisizione del linguaggio rivolti a bambini di età prescolare spesso non si avvalgono dell'uso di filler. In alternativa questi studi possono presentare un numero molto limitato di filler a fronte di un numero altrettanto ridotto di item sperimentali. Per esempio, se l'esperimento è destinato a una popolazione di partecipanti di tre anni, è consigliabile tenere un numero basso di item sperimentali (12-16) e aggiungere non più di 4 o 6 filler. Nel caso dei bambini infatti la soglia attentiva è ulteriormente ridotta e l'esperimento non dovrebbe durare più di 10-15 minuti.

4. Conduzione dell'esperimento: interazione con i partecipanti

Per condurre l'esperimento è necessario implementarlo in programmi adeguati. Esistono molti programmi gratuiti che permettono di svolgere esperimenti di psicolinguistica (per esempio, DMXD, software che permette di mostrare sia stimoli visivi che acustici, e Linger, programma che consente di condurre esperimenti di *self-paced reading*). Non è tuttavia lo scopo di questo paragrafo fornire dettagli sui programmi che vengono utilizzati per svolgere gli esperimenti. Ci si soffermerà solo su alcuni aspetti pratici, ma tuttavia importanti, nella somministrazione dell'esperimento. Innanzitutto, sia in una somministrazione collettiva che individuale, si raccomanda di accertarsi del fatto che le istruzioni per lo svolgimento dell'esperimento siano chiare e precise. A tale proposito, si suggerisce di darle sia in forma orale che scritta prima di iniziare. In aggiunta è necessario prevedere una serie di item di prova, da 3 a 5, prima dell'inizio dell'esperimento vero e proprio, che definiamo *practice trials*. Durante questa

fase il partecipante può manifestare tutti gli eventuali dubbi, che verranno chiariti dallo sperimentatore. Una volta iniziato l'esperimento, lo sperimentatore non dovrebbe più intervenire in alcun modo durante lo svolgimento del compito. Dopo che ci si è assicurati del fatto che il partecipante ha compreso il compito ed è in grado di svolgerlo autonomamente, lo sperimentatore dovrebbe allontanarsi dalla vista del soggetto per tutta la durata dell'esperimento.

Prima di ogni esperimento è buona norma parlare con il partecipante per avere informazioni circa il suo background (es. chiedere se è bilingue o dialettotono, se ha un disturbo specifico dell'apprendimento, etc.). Similmente, alla fine dell'esperimento, si raccomanda di scambiare poche parole chiedendo come è andata, se ha capito che cosa si stava testando, e naturalmente per spiegarli nel caso si dimostri interessato.

5. Analisi dei dati

Una volta condotto l'esperimento e raccolti i dati dobbiamo valutare se la variabile indipendente esercita un effetto sulla variabile dipendente. Tornando all'esempio di Van Gompel e Majid, inizieremo con l'osservare le Medie e le Deviazioni Standard dei tempi totali di lettura (in millisecondi) nelle diverse condizioni. I dati di lettura riferiti all'area dove è presente il pronome suggeriscono che quando l'antecedente è meno frequente (come nel caso di 'piromane') il pronome viene letto più velocemente (362 ms) di quando è più frequente (cf. 'criminale'; 373 ms) (vedi Tavola 2). Al contrario, nell'area dove è presente un NP ripetuto si osserva che un antecedente non frequente elicit tempi di lettura maggiori (450 ms) rispetto a un antecedente frequente (379 ms).

	Media (Deviazione Standard)
NP Ripetuto – antecedente non frequente	450 (13)
NP Ripetuto – antecedente frequente	379 (9)
Pronome – antecedente non frequente	362 (10)
Pronome – antecedente frequente	373 (11)

Tavola 2. Media dei tempi totali di lettura per condizione riferiti all'area dove è presente l'espressione anaforica

Come emerge dal nostro esempio, è essenziale che la prima valutazione delle osservazioni raccolte in tutte le condizioni sperimentali parta dai dati descrittivi (Media e Deviazione Standard). Tali dati potrebbero essere anche visualizzati mediante grafici come istogrammi o grafici a linea. Tuttavia, considerare solo

Media e Deviazione Standard non è sufficiente per trarre conclusioni a partire dai dati ottenuti. È necessario eseguire un'analisi di statistica inferenziale per determinare se le differenze osservate tra le condizioni sperimentali sono 'statisticamente significative', ovvero se possono essere generalizzate all'intera popolazione. Infatti solo se l'analisi statistica rileva una differenza significativa tra due condizioni sperimentali possiamo essere certi del fatto che testando altri partecipanti o usando item diversi potremo osservare nuovamente una differenza tra le condizioni sperimentali.

I test statistici più usati in psicolinguistica sono il T test e l'ANOVA. Di recente si stanno imponendo all'attenzione i modelli misti generalizzati (Baayen 2008) come metodo di analisi che garantisce una adeguata solidità dal punto di vista statistico. Si rimanda a testi di statistica per maggiori dettagli relativi a queste analisi (Baayen 2008; Field 2009). In questo capitolo ci soffermeremo sull'uso che lo psicolinguista fa di questi test e sulle informazioni che queste analisi possono fornire sui dati.

T test e ANOVA sono test parametrici. La prima condizione che deve essere rispettata per applicare tali test è che sia possibile calcolare sui dati raccolti dei 'parametri' quali appunto la Media e la Deviazione Standard. Per fare ciò, è necessario che i punteggi si collochino su una scala a intervallo (ovvero una scala numerica continua caratterizzata da un intervallo uguale tra i diversi valori e che dispone di una unità di misura costante che permette di effettuare operazioni basate sulle differenze tra i numeri associati ai diversi punti della scala) in cui si assume ci siano intervalli uguali tra le osservazioni (si pensi ad esempio ai tempi di reazione). In secondo luogo, i dati osservati dovrebbero essere distribuiti normalmente; in altre parole dovrebbero tendere a raggrupparsi in modo simmetrico attorno alla media. Ne consegue che prima di analizzare dei dati che non sono distribuiti normalmente, dovremo sottoporli a una trasformazione (per esempio logaritmica o inversa) per essere certi del fatto che non violino l'assunto di normalità. Infine, è essenziale che la variabilità dei punteggi in ogni condizione sperimentale sia simile. Tale requisito viene denominato 'omogeneità della varianza'. Se questi tre criteri sono soddisfatti è possibile condurre un test parametrico.

Il T test valuta la misura delle differenze tra le medie in due condizioni sperimentali. Tale test permette di confrontare gli effetti di un solo fattore su due livelli (per es. tempo di lettura in condizione antecedente frequente vs. non frequente). Con l'ANOVA è possibile confrontare tra loro i livelli di ogni fattore, anche quando il fattore presenta più di due livelli sperimentali e quando si desidera valutare l'effetto di più di un fattore in un'unica analisi. Inoltre, rispetto al T test, l'ANOVA permette di testare la relazione tra fattori, o meglio

di valutare le eventuali interazioni. L'interazione implica che la presenza di una variabile determini cambiamenti nei valori dell'altra. I risultati dell'ANOVA includono F (che rappresenta il rapporto tra la variabilità dovuta alla manipolazione sperimentale e la variabilità associata a fattori puramente casuali) e p , ovvero, la probabilità associata alla statistica F . Il p (o *p-value*) rappresenta la probabilità che i dati siano dovuti al caso; per questa ragione si vuole che il valore di p sia basso e la soglia convenzionale è di 0.05.

Naturalmente, quando conduciamo un esperimento vogliamo che la variabilità tra le diverse condizioni sia dovuta in gran parte alla nostra manipolazione e solo in piccola parte a fattori casuali che non possiamo controllare (per esempio, variabilità tra i soggetti). Pertanto, più grande sarà F , cioè il rapporto tra queste due fonti di variabilità tra le condizioni, più potremo dire che gran parte della variabilità è dovuta alla manipolazione della variabile indipendente, mentre solo una piccola porzione della variabilità è associata a fattori casuali, che non possiamo controllare. Se il rapporto, e quindi il nostro F , è abbastanza grande da essere improbabile che i nostri risultati siano dovuti a fattori casuali, diremo che la differenza tra le condizioni sperimentali può essere considerata significativa e che è dovuta alla manipolazione della variabile indipendente.

Si noti che in psicolinguistica è prassi comune calcolare per ogni effetto un ANOVA per partecipanti (o *by subjects*) e per item (o *by items*), indicati rispettivamente come F_1 e F_2 (Forster, Dickinson 1976). Secondo questa procedura, l'analisi *by subjects* permette di stimare quanto è attendibile un certo effetto tra i partecipanti, mentre l'analisi *by items* stima l'attendibilità di un effetto tra gli item. Un effetto è considerato statisticamente consistente quando risulta significativo sia nell'ANOVA *by items* che in quello *by subjects*.

Torniamo allo studio di Van Gompel & Majid. Quali risultati potremo aspettarci? Per rispondere a tale domanda è necessario osservare il disegno sperimentale e i fattori manipolati. Ricordiamo che questi autori avevano costruito un disegno 2 (NP vs. pronome) \times 2 (antecedente frequente vs. antecedente non frequente) a misure ripetute, ovvero con una manipolazione *within items* e *within subjects*. Potremo pertanto farci tre domande:

1. Gli NP sono letti più velocemente o più lentamente dei pronomi?
2. L'espressione anaforica (un pronome o un NP ripetuto) è letta più velocemente quando si riferisce a un antecedente meno frequente rispetto ad un antecedente più frequente?
3. C'è un effetto di frequenza dell'antecedente che vale egualmente sia per un'anafora NP che per un'anafora pronome?

Per rispondere alle prime due domande sarà necessario vedere se ci sono effetti dei fattori 'tipo di anafora' e 'frequenza dell'antecedente'. In altre parole vedremo se il p associato a F risulta inferiore a 0.05. In tal caso diremo che c'è un 'effetto principale' di questi fattori. Per rispondere alla terza domanda è invece necessario valutare se vi è una interazione tra i due fattori principali. Mediante l'ANOVA sarà quindi possibile studiare le interazioni che risultano dagli effetti combinati delle diverse variabili indipendenti.

Veniamo adesso ai modelli misti generalizzati o semplicemente *mixed-effects models* che ultimamente si stanno imponendo come metodo di analisi in modo sempre più preponderante nella psicolinguistica sperimentale (Barr *et al.* 2012; Jaeger 2008). L'obiettivo di questo metodo statistico è quello di costruire dei modelli matematici in grado di descrivere il pattern dei nostri risultati, includendo oltre ai fattori che abbiamo manipolato (che definiamo effetti fissi), presenti anche nell'ANOVA, anche gli effetti di variabili non presenti nel disegno sperimentale ma che possono influenzare i dati (per es., item e partecipanti). Tali effetti vengono definiti random perché, per esempio, si presuppone che ogni partecipante sia diverso dall'altro, e così per gli item. Tali modelli vengono quindi definiti misti proprio perché includono nell'equazione sia gli effetti fissi (ovvero le variabili indipendenti) che gli effetti random (di item e partecipanti).

Uno dei maggiori vantaggi dei modelli a effetti misti possono essere applicati a dati che non sono distribuiti normalmente (per esempio, dati di corpus) e a variabili dipendenti categoriche. Inoltre, grazie alla possibilità di includere fattori di diversa natura (categorica o continua), è possibile considerare un ampio range di effetti fissi: le variabili indipendenti che manipoliamo, l'età dei partecipanti, la frequenza degli NP, etc., in una singola analisi.

Per apprendere in modo appropriato questo tipo di analisi rimandiamo alla letteratura di riferimento (Baayen 2008). Concludiamo ricordando che talvolta i risultati dell'ANOVA *by items* e *by subjects* potrebbero non essere equivalenti a quelli dei *mixed-effects models*. Infatti i *mixed-effects models* rappresentano una tecnica di analisi meno conservativa dell'ANOVA, ma molto robusta statisticamente.

6. Tecniche comportamentali per studiare il linguaggio

La psicolinguistica si avvale di molti metodi comportamentali d'indagine sperimentale. In questo paragrafo presenteremo alcuni dei metodi più comunemente usati in letteratura per valutare specifici meccanismi linguistici.

6.1. Le tecniche di *priming*

Le tecniche sperimentali che implicano l'uso di un paradigma di *priming* partono dal presupposto che la precedente esposizione a uno stimolo linguistico influenzi il successivo comportamento verbale di un partecipante. I metodi di *priming* vengono usati per indagare molti tipi di processi tra cui il riconoscimento visuale e uditivo di parole, l'elaborazione frasale, la produzione lessicale. Tutti gli esperimenti di *priming* (lessicale, semantico o sintattico) prevedono la presenza di un *prime* (l'item a cui il soggetto viene esposto e che lo sperimentatore manipola) e di un *target* (l'item che segue il *prime*, a livello del quale si misura la variabile dipendente).

Per esempio, si immagini di voler studiare quali fattori interferiscono con un compito di denominazione, rallentandolo o velocizzandolo. Questo quesito sperimentale può essere testato mediante un *prime word interference task*. In questo compito si misura il tempo di denominazione della parola 'dog' (*target*) dopo essere stati esposti a parole come 'cat' (*prime* semantico), 'door' (*prime* fonologico), o 'dogs' (*prime* morfologico). Manipoleremo quindi la vicinanza semantica, fonologica o morfologica del *prime* rispetto al *target*. La variabile dipendente, misurata a livello del *target*, sarà il tempo di denominazione della parola 'dog'. Questo esperimento permetterà di chiarire se la vicinanza semantica tra *prime* e *target* rallenta il tempo di denominazione, o se *prime* fonologici o morfologici velocizzano la denominazione del *target*.

Nella produzione del linguaggio si ricorre ad un altro metodo di *priming*, noto come '*Priming Sintattico*'. Questo fenomeno può essere descritto come la tendenza a ripetere la struttura sintattica di frasi già ascoltate. Nella più classica delle procedure sperimentali create per indagare questo fenomeno (Bock 1986), i soggetti, occupati in un compito di descrizione di immagini che rappresentano eventi transitivi (per esempio, 'il bambino bagna il cane'), vengono esposti a intervalli regolari a una frase *prime*, che devono leggere e ripetere ad alta voce. I ricercatori manipolano la forma sintattica delle frasi *prime* che i soggetti devono leggere (Pickering, Branigan 1999). Per esempio, la frase *prime* può essere un attivo ('Un tifoso ha colpito l'arbitro') o un passivo ('L'arbitro è

stato colpito da un tifoso') (Bock 1986). Le immagini target sono disegnate in modo tale da poter essere descritte dal partecipante usando entrambe le forme sintattiche (attivo o passivo; 'Il bambino bagna il cane' oppure 'Il cane è bagnato dal bambino'). I risultati di questi esperimenti suggeriscono che i partecipanti tendono a descrivere il target con un attivo dopo aver letto un *prime* attivo, e con un passivo, dopo essere stati esposti a una frase *prime* passiva. La letteratura sul *priming* sintattico suggerisce pertanto che i processi implicati nella produzione del linguaggio siano soggetti a un apprendimento implicito di specifiche forme strutturali (Chang *et al.* 2000).

6.2. *Self-paced reading*

In questo paradigma sperimentale i lettori devono determinare la velocità con cui il materiale scritto (parole singole o parti della frase) è presentato sullo schermo. Lo sperimentatore misura la velocità con cui il lettore legge una unità della frase e passa alla successiva. La procedura dell'esperimento prevede che il lettore sieda davanti allo schermo e schiacci la barra spaziatrice o il mouse. A ogni click della barra (o del mouse) viene rivelata sullo schermo una nuova unità della frase. È possibile per il partecipante vedere la frase o parola per parola o una struttura frasale per volta, come indicato nella tavola 3.

Le modelle-----
--- ----- che il giornalista -- -----
----- ha incontrato -----
----- alla sfilata -----
----- sono state intervistate

Tavola 3.

La variabile dipendente è rappresentata dal tempo impiegato per leggere una unità di frase (parola o parte di frase, come nel nostro esempio) e a passare alla successiva. Tempi maggiori di lettura su un'unità verbale indicano una maggiore elaborazione e costi cognitivi nel compito di integrazione dell'unità appena letta nella frase.

Naturalmente un metodo molto più sensitivo del tempo di lettura e delle eventuali regressioni che compie l'occhio nell'elaborare una singola parola all'interno di una struttura frasale complessa è *l'eye-tracking*. Si tratta infatti di una metodologia che offre dati più naturali rispetto al *self-paced reading*, dal

momento che i lettori possono vedere l'intera frase in un solo momento. Inoltre è possibile tenere conto dei pattern di regressione in lettura. Per ulteriori dettagli si rimanda al capitolo dedicato a questa metodologia (p. 165).

Bibliografia

- Baayen R.H. (2008), *Analyzing Linguistic Data. A Practical Introduction to Statistics Using R*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Barr D.J., R. Levy, C. Scheepers, H.J. Tily (2013), *Random effects structure for confirmatory hypothesis testing: Keep it maximal*, «Journal of Memory and Language», 68(3), pp. 255-278.
- Bock J.K. (1986), *Syntactic persistence in language production*, «Cognitive Psychology», 18, pp. 355-387.
- Chang F., G.S. Dell, K. Bock, Z.M. Griffin (2000), *Structural priming as implicit learning: A comparison of models of sentence production*, «Journal of Psycholinguistic Research», 29(2), pp. 217-229.
- Field A.P. (2009³), *Discovering statistics using SPSS*, London-Cambridge, Sage.
- Forster K. (2009), *DMDX*. Retrieved March 28, 2013, [online], URL: <<http://www.u.arizona.edu/~jforster/dmdx/official.htm>>, [ultimo accesso: 16/09/2013].
- Forster K., R. Dickinson (1976), *More on the language-as-fixed effect: Monte-Carlo estimates of error rates for F1, F2, F0, and minF0*, «Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior», 15, pp. 135-142.
- Jaeger T.F. (2008), *Categorical data analysis: Away from ANOVAs (transformation or not) and towards logit mixed models*, «Journal of Memory and Language», 59, pp. 434-446.
- Pickering M.J., H.P. Branigan (1999), *Syntactic priming in language production*, «Trends in Cognitive Science», 3, pp. 136-141.
- Rohde D. (2002), *Linger: A flexible platform for language processing experiments version 2.94*. Retrieved March 28, 2013, [online], URL: <<http://tedlab.mit.edu/~dr/Linger/>>, [ultimo accesso: 16/09/2016].
- Van Gompel R.P.G., A. Majid (2004), *Antecedent frequency effects during the processing of pronouns*, «Cognition», 90, pp. 255-264.

Ringraziamenti

L'autrice è riconoscente a Patrice Rusconi e Davide Crepaldi per i preziosi commenti forniti durante la stesura del capitolo.

Gli ERP nello studio dei processi di comprensione frasale

Francesco Vespignani, Università degli Studi di Trento

1. La tecnica ERP

1.1. Tecniche on-line

I potenziali evocati o potenziali evento-relati, dall'inglese *event related potentials* (ERP), sono una particolare misura dell'elettroencefalogramma (EEG), ovvero uno dei possibili modi di estrarre informazioni relate a specifici processi mentali a partire dall'evoluzione nel tempo delle differenze di potenziale elettrico registrate sullo scalpo (forme d'onda).

Tale metodologia, assieme ad altre metodologie di studio dei processi cognitivi che utilizzano il dato elettroencefalografico, è una tecnica on-line in quanto permette di valutare indici, informativi dell'attività mentale, in assenza di ritardo. All'interno delle tecniche on-line sviluppate per studiare i processi cognitivi e più in particolare i processi di comprensione linguistica, si annoverano anche metodi che fanno uso di indici comportamentali, in particolare la lettura autoregolata (*self-paced reading*) e l'analisi dei movimenti oculari. Tali tecniche si contrappongono alle tecniche off-line, ovvero a quelle tecniche che forniscono indici relativi ad un dato processo cognitivo o stato mentale con un certo ritardo temporale da quando l'evento oggetto di indagine è avvenuto. Un esempio è l'utilizzo di giudizi di parlanti relativamente alla grammaticalità o meno di una frase letta, metodologia diffusamente utilizzata in linguistica. Tali metodi, basati su indici off-line, sono utili a definire la competenza linguistica di specifici parlanti, le proprietà della lingua o comparare complessità semantiche o strutturali di differenti costruzioni. Sono invece molto meno interessanti quando lo scopo è quello di costruire un modello cognitivo della sequenza di operazioni mentali che portano a comprendere un messaggio convogliato da una frase a partire dalla percezione di sequenze organizzate di suoni o segni grafici. A testimonianza dell'importanza che gli studiosi del settore attribuiscono alle misure on-line vale la pena citare un passo di Don Mitchell che afferma che «ogni metodo che sia basato sul sondaggio di eventi dopo un ritardo è soggetto alla critica che possa essersi perso lo show» (T.d.A. da Mitchell 2004, p.16), o il titolo del contributo di Lee Osterhout al *millennium issue* di *Brain & Language: On space,*

time and language: For the next century, timing is (almost) everything (Osterhout 2000). È chiaro che il complesso dei processi necessari alla comprensione del linguaggio coinvolge praticamente tutte le facoltà cognitive (attenzione, percezione, memoria di lavoro, memoria a lungo termine, ragionamento) in rapida sequenza e sono svolti immediatamente, in modo ciclico e incrementale durante la percezione delle singole parole (Frazier, Clifton 1996). L'importanza quindi di sviluppare misure on-line è particolarmente cogente per questo specifico ambito di ricerca e spiega il successo della tecnica ERP negli studi di comprensione frasale.

1.2. Vantaggi e svantaggi

Ingenuamente, si tende spesso a pensare che tecniche più moderne, costose o tecnologicamente sofisticate siano genericamente migliori. Questo è un falso concetto: in generale la ricerca scientifica dispone, per ogni specifico ambito, di una serie di metodologie (strumenti, tecniche e paradigmi sperimentali), ciascuna delle quali si può rivelare migliore delle altre per rispondere a specifici quesiti.

I vantaggi della metodologia ERP nello studio della comprensione del linguaggio rispetto ad altre tecniche sono principalmente la risoluzione temporale e la multidimensionalità degli indici (delle variabili dipendenti). La tecnica permette infatti di avere informazioni con una risoluzione temporale nominale dell'ordine del millisecondo (ms), senza alcun ritardo (i segnali elettrici prodotti dai neuroni sono trasferiti all'apparato di misura alla velocità della luce) e con continuità, durante l'elaborazione mentale dello stimolo linguistico. La multidimensionalità è data invece dal fatto che l'indice, ovvero la differenza di potenziale elettrico rispetto a un dato sito di riferimento può essere sia positiva che negativa (polarità) e viene misurata in differenti siti dell'encefalo tramite molteplici elettrodi posti sullo scalpo (distribuzione topografica). Tale multidimensionalità implica la possibilità di ottenere degli indici che sono in grado, come vedremo nel dettaglio in questo capitolo, non tanto di stimare se una data condizione sperimentale si differenzia dall'altra in termini di difficoltà di elaborazione (più difficile o facile da elaborare) ma piuttosto se difficoltà di elaborazione introdotte da differenti fattori linguistici si qualificano in termini di coinvolgimento di differenti substrati neurali e, conseguentemente, in termini di differenti operazioni mentali.

A questi vantaggi, chiari per chi voglia studiare l'architettura e i meccanismi cognitivi sottesi all'elaborazione del linguaggio, si contrappongono anche

degli svantaggi, sempre relativamente ai classici metodi della linguistica e delle altre metodologie esposte in questo volume. Lo svantaggio principale consta nella rumorosità del dato. Fino a Berger (1929) e anche negli anni immediatamente successivi gli scienziati nutrivano forti dubbi relativamente al fatto che si potessero ottenere misure legate all'attività neurale dell'essere umano misurando differenze di potenziale elettrico fra elettrodi semplicemente apposti sulla superficie dell'encefalo (scalpo) e non all'interno dell'encefalo (registrazioni intracraniche). Già dalle ricerche di Volta e Galvani era noto che i segnali elettrici sono alla base della fisiologia umana e ricerche sull'animale avevano permesso di scoprire che il funzionamento delle cellule che compongono il sistema nervoso centrale (SNC) avviene tramite variazioni del potenziale elettrico dell'ordine del millesimo di Volt (mV). Ciò che appariva sorprendente è che le differenti cariche e scariche dei singoli neuroni potessero generare delle differenze di potenziali coese e sufficientemente ampie da poter essere rilevate sulla superficie di un volume formato da sostanze che ben conducono l'elettricità, quali quelle che compongono l'encefalo umano.

Effettivamente le variazioni di potenziale elettrico rilevabili sullo scalpo sono di circa tre ordini di grandezza inferiori rispetto alle differenze di potenziali esprimibili da un singolo neurone. La misurazione di differenze di potenziale dell'ordine del microvolt (μV , milionesimo di Volt) richiede una forte amplificazione del segnale. Tale amplificazione fa sì che anche altri deboli segnali elettrici prodotti sia dagli altri organi dell'essere umano che da altri apparati elettrici presenti nell'ambiente di misura o dall'apparato di misura stesso siano mescolati con il segnale di interesse (le differenze di potenziale dovute all'attività cognitiva sotto indagine).

La conseguenza di ciò è che il segnale a cui siamo interessati è in qualche modo nascosto all'interno di una ampia gamma di segnali di origine differente. Questo specifico svantaggio della tecnica è tecnicamente indicato in termini di basso rapporto segnale-rumore della misura fisica di partenza (l'EEG). Il metodo che permette di fare emergere il segnale di specifico interesse che presentiamo in questo capitolo è fondato sullo svolgimento di misure ripetute, ovvero sulla ripetizione, con materiale linguistico differente dello stesso evento mentale. La necessità tecnica di presentare un gran numero di ripetizioni della stessa situazione è un forte vincolo di paradigma che porta allo svantaggio pratico di non poter indagare molte condizioni sperimentali in uno stesso esperimento e non poter studiare fenomeni particolari della lingua per i quali, ad esempio, il numero limitato degli elementi lessicali non consente la creazione di un numero sufficiente di stimoli.

Una ulteriore peculiarità della tecnica rispetto alle tecniche comportamentali o perfusionali (come fMRI e NIRS), che va considerata uno svantaggio, consiste nell'arbitrarietà dell'interpretazione del dato. Un allungamento dei tempi di reazione o del numero e delle durate delle fissazioni oculari o una maggior perfusione in una data area cerebrale a seguito di una data manipolazione sperimentale è quantomeno interpretabile come una maggior difficoltà o intensità di elaborazione indotta dalla manipolazione stessa (per un commento al significato dei tempi di reazione nell'*eye-tracking* si veda Porta, Rastelli in questo volume). Il fatto invece che due condizioni sperimentali differiscano per una deflessione positiva o negativa dell'EEG in un dato intervallo di tempo e in determinati siti di misura posti in precise posizioni sullo scalpo, non è interpretabile di per sé in termini di maggior o minor attività neurale in una condizione o nell'altra. L'unica caratteristica dell'EEG che si può interpretare senza ulteriori ipotesi al contorno riguarda il decorso temporale (*timing*) dell'effetto, ovvero che le due condizioni sono elaborate in maniera differente dal cervello (con l'utilizzo di maggiori, minori o differenti risorse computazionali) in quel dato intervallo di tempo, relativamente alla stimolazione o alla richiesta di risposta del paradigma sperimentale.

L'informazione sul decorso temporale dell'effetto è spesso di per sé interessante (anzi abbiamo visto essere una delle principali qualità che contraddistinguono la tecnica) ma la distribuzione topografica dell'effetto e la sua polarità (positiva o negativa) sono ulteriori informazioni, sulle quali inferenze più ricche relativamente al quesito teorico possono essere tratte. Questo effettivamente avviene in quanto lo sviluppo della psicofisiologia, utilizzando altre conoscenze oltre al dato grezzo, sia relative all'organizzazione interna della mente (e del linguaggio), sia integrando il dato EEG con le conoscenze derivanti dalla neuropsicologia e da esperimenti comportamentali, hanno costruito un quadro interpretativo delle singole componenti dei potenziali evento-relati (ERP). Se quindi da un lato la arbitrarietà iniziale nell'interpretazione del dato sperimentale è chiaramente da considerarsi uno svantaggio, l'interdisciplinarietà dei costrutti teorici che permettono di costruire tale interpretabilità e il percorso scientifico con il quale si giunge a tale scopo rendono il campo di ricerca estremamente interessante e per alcuni più affascinante di altri, proprio in quanto nella pratica di questo lavoro, si esplicita quanto sia inestricabile la relazione fra mente e cervello. Nel prosieguo di questo capitolo andrò a descrivere nel dettaglio la tecnica, cercando di esplicitare la natura delle limitazioni e dei vantaggi fin qui descritti nell'ambito delle ricerche sui processi di comprensione frasale e accennando da ultimo alle principali conoscenze relative alle componenti ERP che emergono durante i processi di lettura di frasi.

2. Cos'è l'EEG

L'EEG è la misura, ripetuta (campionata) nel tempo, delle differenze di potenziale elettrico fra differenti punti dello scalpo. Tipicamente negli studi di psicologia sperimentale si utilizzando configurazioni monopolari, ovvero si misura la differenza di potenziale elettrico di molti siti di misura rispetto ad un unico sito di riferimento. Chiaramente tali differenze dipendono dal sito di riferimento scelto arbitrariamente. La grandezza fisica misurata è intrinsecamente differenziale ed è quindi impossibile attribuire un valore 'assoluto' della variabile misurata in uno specifico sito posto sullo scalpo e questa è una prima caratteristica che fa delle misure ERP variabili relative. Stante che i tessuti che compongono l'encefalo sono ottimi conduttori di elettricità, differenze di potenziale si possono generare solo a seguito di correnti elettriche (movimento di ioni positivi e negativi all'interno dei tessuti) che generano un temporaneo sbilanciamento di cariche elettriche all'interno dell'encefalo caratterizzato da posizione, ampiezza e direzione nello spazio (dipoli elettrici). Il funzionamento del sistema nervoso centrale (SNC) avviene tramite scambi elettrici fra le cellule che lo compongono (neuroni). All'interno dei fenomeni elettrici che presiedono al funzionamento del cervello, solo alcuni possono dare luogo a potenziali sufficientemente ampi e sostenuti nel tempo da poter essere riflessi in differenze di potenziale misurabili apponendo elettrodi sulla cute dello scalpo. I fisiologi hanno individuato come sorgente principale dell'EEG i potenziali postsinaptici generati dalle cellule piramidali della materia grigia del cervello.¹ Le condizioni per le quali l'attività neurale generi ampi dipoli sono infatti che i dipoli siano generati da cellule di grandi dimensioni, allineate lungo una specifica direzione spaziale (configurazione a campo aperto) e che l'attività elettrica sia coerente e sostenuta nel tempo (Pennisi, Sarlo 1998, Capitolo 3; Kutas, Dale 1997, per una approfondita trattazione fisica si veda Nunez, Srinivasan 2006). Oltre a ciò, dato un dipolo all'interno dell'encefalo, l'ampiezza delle deflessioni EEG che esso produce dipende anche dalla sua posizione e dal suo orientamento rispetto alla superficie dell'encefalo sulla quale avviene la misura. A parità di ampiezza del dipolo esso dà luogo a de-

¹ Ci riferiamo qui ai generatori neurali della maggior parte delle differenze di potenziali che compongono l'EEG, in casi particolari è invece possibile ottenere dall'EEG segnali generati da altri fenomeni elettrici, anche legati alla trasmissione di informazione da organi periferici al SNC (si veda ad esempio potenziali elettrici acustici precoci, *auditory brainstem response*). Per quel che riguarda però i potenziali evocati cognitivi usati per lo studio del linguaggio è lecito assumere siano generati unicamente da potenziali post-sinaptici.

flessioni più ampie se posto vicino alla superficie ed è orientato perpendicolarmente ad esso. Siccome le cellule piramidali hanno direzione ortogonale alla superficie del parenchima cerebrale, l'attività maggiormente visibile con l'EEG è quella della materia grigia dei giri cerebrali mentre quella dei solchi, parallela alla superficie di misura, emerge in termini di deboli differenze in siti dello scalpo distali rispetto alla sorgente. Ciò esclude molte attività neuronali che danno luogo a una sommazione nulla delle attività elettriche che si svolgono all'interno di un dato volume del SNC e questo fatto va tenuto in considerazione nell'interpretazione della assenza di differenze nell'EEG. In generale è possibile infatti che esistano differenze nell'elaborazione cognitiva realizzate tramite specifiche configurazioni e meccanismi neurali o in aree cerebrali con orientamenti tali rispetto allo scalpo che non diano un risultato netto in termini di differenza di potenziale visibile sullo scalpo. Non è quindi impossibile che differenze di elaborazione che possono essere rese evidenti da altre tecniche di misura (comportamentali o perfusionali) non diano luogo a differenze misurabili dell'EEG. Anche relativamente alle differenze individuali, variazioni anatomiche e nello specifico variazioni della morfologia delle convoluzioni cerebrali e delle caratteristiche elettriche dei tessuti possono dar luogo ad ampie differenze nei pattern EEG fra gli individui, a parità di meccanismi neurali di esecuzione di una data computazione.

Un'ulteriore variabile della differenza di potenziale che costituisce il segnale EEG è la polarità (positiva o negativa). Anche in questo caso è impossibile associare tale variabile fisica a uno specifico meccanismo neurale. Anche limitandosi al segnale generato dai potenziali post-sinaptici delle cellule piramidali della sostanza grigia (che abbiamo visto è la componente principale dei potenziali evocati di interesse per lo studio del linguaggio) è possibile che potenziali eccitatori o inibitori generino sia deflessioni positive sia deflessioni negative sullo scalpo, in funzione dello strato della sostanza grigia nel quale agiscono le afferenze provenienti da altre aree e strutture cerebrali (Pennisi, Sarlo 1998, p. 50). Non è quindi a priori possibile interpretare una negatività o una positività nell'EEG in termini di maggior attivazione o inibizione di una struttura cerebrale. Anche se tradizionalmente le negatività erano interpretate in termini di attivazione e le positività in termini di inibizione e di qui la convenzione, tuttora largamente utilizzata, di rappresentare graficamente le forme d'onda con l'asse delle ordinate invertito, ovvero con la negatività verso l'alto, l'interpretazione di una deflessione in termini di attivazione o inibizione è possibile solo a seguito dell'integrazione del dato empirico con teorie indipendenti sul meccanismo neurale sotteso alla deflessione EEG sviluppate in base ad altre conoscenze neurofisiologiche spesso basate su misurazioni intracraniali.

che. In generale tali interpretazioni esistono per i potenziali evocati sensoriali e meno per le componenti cognitive tardive di maggior interesse per lo studio del linguaggio.

Finora non abbiamo considerato la questione della posizione all'interno dell'encefalo della sorgente di una deflessione EEG. Misurando le differenze di potenziale su differenti siti dello scalpo chiaramente siamo in possesso di una informazione di tipo spaziale, ad esempio una data deflessione può essere chiaramente più ampia in certi punti dello scalpo. È quindi lecito chiedersi se tale distribuzione spaziale è indicativa dell'area cerebrale che genera tale effetto. Le leggi fisiche dell'elettromagnetismo ci dicono che una data distribuzione di potenziale elettrico sulla superficie di un corpo solido può essere generata da differenti configurazioni interne di cariche e correnti elettriche. Quindi la localizzazione della sorgente elettrica di specifiche caratteristiche del segnale EEG (detto problema inverso) è un problema che offre infinite soluzioni matematiche. Il problema cosiddetto diretto ha invece soluzione: ovvero data una distribuzione di cariche elettriche e correnti all'interno dell'encefalo è possibile stimare la distribuzione di potenziale elettrico sullo scalpo utilizzando un modello fisico semplificato della testa (tipicamente tre sfere concentriche con differenti caratteristiche elettriche ma anche modelli più realistici). Il problema inverso può essere affrontato con specifici algoritmi che adattano direzione, posizione e intensità di un sistema di sorgenti al fine di riprodurre la distribuzione topografica di potenziale sullo scalpo misurata (si veda Michel *et al.* 2004, per una rassegna dei metodi di localizzazione delle sorgenti). I metodi di localizzazione delle sorgenti di attività EEG sono tipicamente informati sia da vincoli di tipo fisiologico relativamente alle sorgenti che da altre conoscenze relative a quali siano le possibili aree cerebrali che generano l'effetto che si intende localizzare. La possibilità di localizzazione delle sorgenti EEG è quindi assai limitata e in generale essa varia in funzione del tipo di segnale che si intende localizzare. In generale per i potenziali evocati cognitivi e in particolare quelli che emergono nello studio dell'elaborazione frasale la localizzazione della sorgente di una particolare componente o effetto non è semplice da affrontare (si veda comunque, ad esempio, l'utilizzo della tecnica Loreta applicata alla localizzazione delle sorgenti di N400 e P600 descritta in Osterhout *et al.* 2004, pp. 278-281) e spesso si discute sulla plausibilità dell'attribuzione di una data distribuzione topografica con una data sorgente, anche in relazione a evidenze raccolte con altre tecniche (neuroimmagini, TMS, studi su pazienti con lesioni).

3. Come si misura l'EEG

La misura dell'elettroencefalogramma si esegue tramite l'amplificazione e la digitalizzazione delle differenze di potenziale fra differenti posizioni dello scalpo. Il segnale viene raccolto da elettrodi che sono tipicamente apposti sulla cute per mezzo dell'ausilio di cuffie elastiche e posti in contatto tramite gel elettroconduttore (esistono anche altri sistemi come il sistema *Geodesic*, della ditta EGI, che realizzano il contatto tramite spugnette bagnate, particolarmente indicato per neonati non richiedendo abrasione della cute). Esistono in commercio differenti combinazioni di elettrodi e gel conduttore; in generale è importante per evitare che si creino potenziali di contatto che tutti gli elettrodi siano dello stesso materiale, che venga usato lo stesso tipo di gel e che l'area di contatto fra elettrodo e cute sia omogenea. Spesso è necessario procedere a una pulitura o leggera abrasione della cute e spostamento dei capelli sottostanti all'elettrodo. Il posizionamento degli elettrodi in siti di misura standard avviene usando cuffie di taglia variabile, centrando il sito Cz sul vertice della testa e controllando la posizione di alcuni degli elettrodi rispetto a punti di riferimento standard (*inion*, *nasion*, fossette preauricolari). Esistono differenti standard di posizionamento evoluti a partire dal sistema tradizionale (10/20, Jasper 1958) che conteneva nomenclature per soli 21 siti, spesso sono utilizzati gli standard 10%, 10/10, e 10/5 che estendono lo standard originale a un numero maggiore di siti (Jurcak, Tsuzuki, Dan 2007). In Figura 1 è riportato uno schema con alcuni dei siti dello standard tradizionale 10/20. Ogni pubblicazione scientifica dovrebbe citare il particolare standard di posizionamento e nomenclatura utilizzato o, nel caso si utilizzano siti non standard, le coordinate rispetto a un sistema di riferimento standard (Picton *et al.* 2000, p. 133).

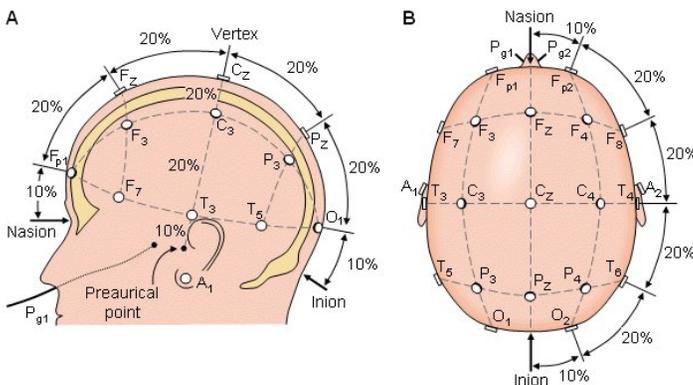


Figura 1. Esempio di posizionamento degli elettrodi

Come già sottolineato l'EEG è una misura di una quantità fisica differenziale (la differenza di potenziale) e quindi sono necessari almeno due elettrodi per ottenere un segnale. Nelle applicazioni cognitive si utilizza un montaggio monopolare ovvero si ha un unico sito di riferimento relativamente al quale sono misurate le differenze di potenziale in differenti punti dello scalpo. Montaggi bipolari, per i quali per ogni sito di misura attivo si ha un riferimento indipendente, sono talvolta utilizzati per il monitoraggio dei movimenti oculari ponendo elettrodi sopra e sotto gli occhi e amplificando la differenza fra questi siti. La scelta del riferimento è arbitraria: in linea di principio il riferimento dovrebbe essere distante dai siti di interesse in quanto le differenze fra siti contigui sono più piccole e risentono quindi maggiormente di artefatti e rumore di amplificazione, d'altra parte se tale sito è distante catturerà non solo l'attività elettroencefalografica ma anche quella di altri organi fra il riferimento e i siti attivi. Anche se si possono utilizzare riferimenti non encefalici, i riferimenti maggiormente utilizzati sono i lobi dell'orecchio, la punta del naso o il vertice della testa (Cz). In generale la maggior parte degli studi sulla comprensione frasale utilizza il lobo dell'orecchio o l'osso mastoide dietro l'orecchio. Una volta raccolti i dati è possibile manipolarli tramite semplici combinazioni lineari per rappresentarli come se fossero stati raccolti con un riferimento differente, ma tale procedura ha sempre un costo in termini di rapporto segnale-rumore. Nella maggior parte degli studi sul linguaggio si utilizza in fase di analisi il riferimento alla media dell'attività dei mastoidi (destro e sinistro), ricalcolato a partire da una acquisizione con uno dei mastoidi come riferimento effettivo e l'altro come sito attivo (un'alternativa talvolta usata è un collegamento hardware tramite una resistenza degli elettrodi posti sui mastoidi in modo da ottenere una registrazione originale riferita alla media dei due mastoidi, ma si veda a proposito Miller, Lutzenberger, Elbert 1991). In generale è importante che il contatto elettrico sia stabile e buono per il sito di riferimento ed è consigliabile scegliere il riferimento utilizzato dalla letteratura scientifica con la quale si intende confrontare i dati di uno specifico esperimento. Oltre ai siti attivi e al sito di riferimento, è necessario un ulteriore sito di terra (*ground*) per l'amplificazione differenziale dei segnali che è tipicamente anch'esso un sito encefalico. La scelta dello specifico sito di terra non influenza la distribuzione topografica del segnale. Oltre ai siti attivi di interesse è bene utilizzare elettrodi attivi attorno agli occhi per monitorare gli artefatti oculari che sono, come vedremo, fra gli artefatti più complessi da evitare e trattare. La bontà del contatto elettrico è tipicamente verificata misurando la resistenza al passaggio di una debolissima corrente alternata, detta impedenza che di norma va tenuta sotto i 5/10 k Ω , e dalla visualizzazione del segnale a monitor prima dell'esecuzione dell'esperimento.

Gli strumenti di registrazione sono amplificatori differenziali che anticamente venivano direttamente connessi a poligrafi che disegnavano su carta il segnale. La possibilità di estrarre dal segnale EEG i potenziali evocati è legata all'avvento dei computer e della possibilità di digitalizzare (trasformare un segnale analogico in numeri) i segnali. Le caratteristiche principali dei sistemi di registrazione EEG sono:

- a. avere un alto guadagno che permette di portare l'ampiezza del segnale dal microvolt a qualche frazione di volt (ampiezza necessaria per poter essere utilizzato da schede di conversione analogico-digitali);
- b. una elevata impedenza di ingresso (resistenza al passaggio di una corrente alternata) che impedisce alla misura di perturbare il sistema generando correnti che modificano la distribuzione di potenziale;
- c. una sufficiente risoluzione di voltaggio (numero di bit della scheda di conversione analogico-digitale) che combinata all'amplificazione discrimini la frazione di microvolt.

La digitalizzazione viene ripetuta nel tempo a intervalli costanti e la frequenza dell'operazione di misura è tipicamente di qualche centinaia di ripetizioni al secondo (Hz); questa frequenza permette un'ottima ricostruzione di variazioni che si sviluppano in qualche decina di ms, tipiche dei potenziali evocati cognitivi.

Il segnale deve essere filtrato prima dell'amplificazione in quanto segnali con frequenze comparabili con quella di campionamento possono dare luogo a falsi segnali (tipicamente la frequenza più alta acquisita è al massimo un quarto di quella di campionamento); spesso si filtrano anche i segnali lenti con un filtro basso-alto che rimuove lenti cambiamenti che non sono di interesse per lo specifico esperimento; tali sono ad esempio le differenze di potenziale dovute a variazioni delle caratteristiche fisiche del contatto cute-gel-elettrodo che possono portare, nel tempo, a una saturazione dell'amplificatore (che è caratterizzato da un range massimo di differenze di potenziale misurabili).

L'alta amplificazione necessaria a misurare adeguatamente i segnali di origine cerebrale fa sì che il sistema amplifichi anche altri segnali elettrici, sia generati dal corpo umano (artefatti fisiologici), che dell'ambiente. In particolare i cavi fra l'amplificatore e gli elettrodi catturano i campi elettromagnetici ambientali prodotti dall'impianto elettrico dell'edificio ed eventuali strumenti elettronici utilizzati per la stimolazione.

Chi fosse interessato ad approfondire gli aspetti tecnici legati alla registrazione del segnale EEG può consultare i seguenti testi di Luck (2005) e Todd (2005), oltre alle guidelines della rivista *Psychophysiology* (Picton *et al.* 2000).

Per permettere l'estrazione dal segnale EEG dei potenziali evento-relati, ovvero le variazioni dell'attività elettroencefalografica relate a particolari eventi è necessaria la sincronizzazione della registrazione EEG con gli eventi di interesse, nel nostro caso la presentazione di specifiche parole in specifiche posizioni frasali. Tale sincronizzazione avviene tipicamente acquisendo tramite la stessa scheda di digitalizzazione del segnale analogico EEG uno o più segnali digitali che permettono di marcare il segnale con specifici codici.

Ciò permette in fase di analisi di selezionare i vari tipi di eventi all'interno del disegno sperimentale. I segnali digitali devono essere trasmessi al sistema EEG dal sistema di stimolazione che presenta le parole, tipicamente un PC dotato di appositi software e una uscita digitale (tipicamente è sufficiente una porta parallela) che permettono una buona sincronizzazione.

4. Come si estraggono i potenziali evocati (ERP)

Il segnale elettroencefalografico è composto da una sovrapposizione lineare di segnali di differente natura. Oltre ai segnali neurali generati da specifiche operazioni cognitive che si intendono indagare in un esperimento, sono presenti attività neurali di base o comunque legate ad attività cognitive, non strettamente relate agli eventi di interesse.

Sovrapposti ai segnali provenienti dal cervello sono presenti anche altri segnali, definiti nel nostro contesto come artefatti. All'interno di questi si può distinguere fra artefatti fisiologici, ovvero segnali elettrici prodotti da altri organi del corpo e artefatti non fisiologici generati da campi elettromagnetici presenti nell'ambiente di misura e dal sistema di amplificazione. L'idea alla base della procedura di estrazione dei potenziali evento-relati è distinguere fra i segnali che sono sincroni a un dato evento cognitivo e segnali non sincroni.

Tale estrazione avviene tramite una procedura di media (*average*) di segmenti del segnale EEG detti epoche, segmentate attorno a un evento cognitivamente critico (nel nostro caso può essere la presentazione di una specifica parola all'interno della frase). La media viene effettuata fra singole epoche relative a uno stesso tipo di evento in un disegno sperimentale a misure ripetute, ovvero su epoche relative a eventi equivalenti per quel che concerne i processi cognitivi che si intendono indagare (si veda la Figura 2 per una rappresentazione grafica della procedura di *average*).

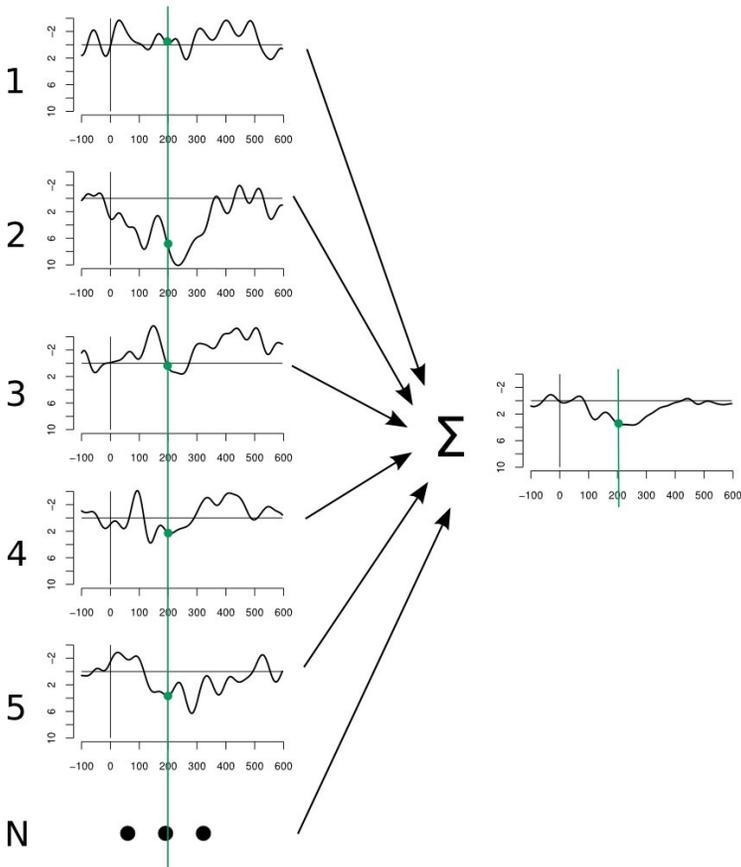


Figura 2. Rappresentazione schematica del processo di *average*

All'interno delle varie ripetizioni degli eventi si può assumere che molti dei segnali artefattuali, così come le attività neurali non strettamente connesse all'evento sotto indagine, abbiano una insorgenza casuale all'interno di ogni singola epoca (non siano *time-locked* all'evento) e quindi tendano a cancellarsi l'un l'altro nella procedura di *average*. Le caratteristiche del segnale elettrico che invece si ripetono sistematicamente con la stessa latenza (intervallo di tempo fra l'evento e la deflessione EEG), polarità (positiva o negativa) e distribuzione topografica sullo scalpo a ogni singola prova tenderanno a sommarsi emergendo in modo più chiaro nella forma d'onda media (*average*) che nelle singole epoche. La procedura di *average* ha quindi lo scopo di far emergere deflessioni sistematiche delle differenze di potenziale elettrico nel tempo rela-

tive a un evento di interesse (di qui il nome di potenziali evento-relati). Stante che l'EEG registra assieme a queste deflessioni anche altri segnali sia cerebrali che non cerebrali (che chiameremo nel complesso 'rumore' in contrapposizione al 'segnale' evento-relato di interesse) e che tale rumore è spesso molto più ampio delle variazioni relate a eventi, l'utilizzo di disegni sperimentali a misurare ripetute è nella maggior parte dei casi necessario per ottenere dei dati interpretabili in termini di processi cognitivi. Per ogni applicazione della tecnica il numero di ripetizioni necessario per ottenere un sufficiente rapporto segnale-rumore dipende da molti fattori, fra i quali i principali sono:

- a. l'ampiezza dell'effetto o componente ERP di interesse (quanto più ampia è la differenza in termini di risorse e processi cognitivi coinvolti nelle due condizioni che si intendono confrontare tanto più ampi tenderanno a essere gli effetti elettroencefalografici della manipolazione);
- b. la tipologia e la quantità di rumore presente nel dato EEG originale;
- c. i limiti imposti dal numero massimo di ripetizioni dell'evento e delle condizioni sperimentali che possono essere presentate a un partecipante all'interno di una singola sessione (una sessione EEG può durare fino ad un massimo di circa 2 ore).

Tipicamente si tenta di agire su tutti questi fattori. I primi studi ERP sulla comprensione frasale (e molti ancora oggi) hanno infatti utilizzato violazioni linguistiche (sintattiche o semantiche), spesso poco presenti nel linguaggio quotidiano, che danno appunto luogo ad ampi effetti ERP.

La logica di questi paradigmi è dettata appunto dalla necessità di avere variazioni importanti dei segnali elettrici prodotti dal cervello, cercando di inferire informazioni sui processi di elaborazione del linguaggio naturale a partire da indici fisiologici legati all'elaborazione di materiale linguistico poco naturale.

Una delle motivazioni di questa scelta sperimentale rispetto all'utilizzo di coppie minime più ecologiche è appunto l'ampiezza degli effetti ERP e quindi la relativa facilità di evidenziarne e misurarne i correlati elettrofisiologici con un buon rapporto segnale-rumore anche con un numero limitato (circa 40) di ripetizioni dell'evento critico.

4.1. Riduzione degli artefatti in fase di acquisizione dei dati

Per quanto riguarda l'ampiezza del rumore si può agire cercando di diminuire in fase di acquisizione o in fase di analisi dei dati sia gli artefatti fisiologici sia gli artefatti non fisiologici. Per limitare gli artefatti in acquisizione è fondamentale stabilire un buon contatto elettrico fra gli elettrodi e la cute (per un approfondimento sulle corrette metodologie di apposizione degli elettrodi si veda Picton *et al.* 2000; Kappenman, Luck 2010). È buona norma utilizzare lo stesso tipo di elettrodi e di accoppiamento gel-elettrodo per ogni sito di misura ed effettuare una buona pulizia della cute tramite alcool o leggera abrasione con apposite paste dermoabrasive. L'impedenza (resistenza elettrica al passaggio di corrente alternata, testata con segnali campione di frequenza simile ai segnali cerebrali, attorno agli 8 Hz) va tipicamente mantenuta sotto i 5 k Ω . Un ulteriore fattore che contribuisce a diminuire gli artefatti non fisiologici è la scelta dell'ambiente di misura: è sempre preferibile l'utilizzo di una cabina di misura dotata di una gabbia di Faraday che scherma dai campi elettromagnetici ambientali, in particolare da quelli generati dagli impianti elettrici degli edifici. Se non si dispone di una gabbia di Faraday è importante comunque scegliere una stanza ove svolgere le misure distante da sorgenti di forti campi elettromagnetici. Ulteriori sorgenti di rumore elettrico che vanno considerate sono gli strumenti utilizzati per la somministrazione degli stimoli (monitor, cuffie, computer); particolarmente insidioso è il segnale prodotto da monitor a raggi catodici (CRT) che producono interferenze alla frequenza di *refresh* del monitor (tipicamente fra i 60 Hz e i 100 Hz) che, essendo sincroni alla presentazione di immagini, non sono eliminati ma anzi amplificati dalla procedura di *average*. La cattura di tali segnali elettromagnetici avviene nei circuiti formati dai cavi che vanno dai siti di misura encefalici all'amplificatore: è buona norma tenere tali cavi raccolti (o intrecciati fra loro) per minimizzare l'area delle spire e quindi la cattura di segnali elettromagnetici ambientali. Esistono oggi in commercio sistemi di registrazione detti a elettrodi attivi che attuano una schermatura dei cavi e/o uno stadio di pre-amplificazione o adattamento di impedenza già sugli elettrodi (si veda, per esempio Metting van Rijn, Peper, Grimbergen 1990). L'utilizzo di questi tipi di hardware mostra i suoi vantaggi soprattutto se è necessario svolgere misure EEG al di fuori da laboratori dedicati o, comunque, in situazioni ove le interferenze elettromagnetiche non sono controllate.

Per quanto riguarda gli artefatti fisiologici essi hanno differenti origini e differenti caratteristiche di ampiezza, frequenza e forma d'onda. I principali artefatti fisiologici sono dovuti alla tensione muscolare, a variazioni delle ca-

ratteristiche elettriche della cute, ai movimenti oculari e *blink* (ammiccamenti: apertura e chiusura delle palpebre), al segnale elettrocardiaco. Oltre questi segnali, prodotti da altri organi vanno considerati anche segnali cerebrali non relati agli eventi cognitivi di interesse e in particolare le onde alfa, ampi segnali periodici con frequenza attorno agli 8 Hz tipicamente generati in stato di veglia rilassata. Nel caso sia richiesta una risposta motoria al compito vanno considerati anche i potenziali elettrici cerebrali premotori (*lateralized readiness potentials*) e motori necessari allo svolgimento del compito. Importante, per minimizzare tali artefatti, è:

- a. utilizzare un paradigma sperimentale che minimizzi tali artefatti, in particolare è preferibile che durante il periodo di registrazione di interesse non siano richieste risposte comportamentali e che gli stimoli non inducano movimenti oculari, di qui l'utilizzo nello studio dei processi di comprensione frasale della presentazione visiva delle parole una alla volta al centro dello schermo e con ritmo di presentazione fisso, evitando che i partecipanti procedano nella lettura tramite pressione di un tasto (procedura di *self-paced reading*);
- b. una corretta informazione e adeguate istruzioni fornite al partecipante prima dell'inizio della fase sperimentale: può essere utile mostrare a monitor ai partecipanti l'effetto di movimenti oculari e tensione dei muscoli facciali o del collo per aiutarli a comprendere l'importanza di evitare movimenti durante le fasi di raccolta di dati. In particolare è utile chiedere ai partecipanti di non muovere gli occhi o chiudere le palpebre (*blink*) durante la presentazione del materiale linguistico. In alcuni casi si utilizza uno stimolo che richiede ai soggetti di ammiccare in momenti di pausa fra una prova e l'altra, in altri si utilizzano dei brevi blocchi di prove e nelle pause i partecipanti possono muoversi e rilassarsi.

Un'ulteriore tipologia di artefatto particolarmente insidioso per la misura dei potenziali evocati cognitivi relati all'elaborazione del linguaggio sono lente variazioni del potenziale dovuti a variazioni della conduttanza cutanea o delle proprietà fisiche del contatto gel-elettrodo; tali potenziali che possono essere generati da risposte emotive sono generati anche dalla sudorazione, è pertanto consigliabile evitare la raccolta di dati EEG in ambienti caldi e umidi. A proposito si veda Kappenman e Luck (2010) che mostrano come tali parametri siano almeno altrettanto importanti quanto il livello di impedenza.

Da ultimo vanno menzionate le onde alfa, di origine cerebrale, che aumentano in ampiezza in stato di veglia rilassata; siccome spesso per evitare stimoli distraenti gli esperimenti vanno svolti in un ambiente silenzioso e con illuminazione moderata è possibile, specialmente se la sessione ha durata superiore ai 30 minuti che emerge una certa sonnolenza nel partecipante con conseguente aumento delle onde alfa. Per limitare questo problema è utile inserire delle pause all'interno della sequenza di stimolazione durante le quali è consigliabile parlare con il partecipante.

4.2. Riduzione degli artefatti in fase di analisi dei dati

Nonostante tali accorgimenti è comunque possibile che durante le epoche di interesse si presentino ampi artefatti per i quali la procedura di *average* non è sufficientemente efficace. Per migliorare ulteriormente il rapporto segnale-rumore è possibile adottare specifiche procedure di elaborazione del segnale in fase di analisi.

L'analisi dei dati EEG viene tipicamente svolta tramite software dedicati e prevede un certo numero di passaggi che andremo a presentare brevemente (per trattazioni più dettagliate dell'analisi dei dati si veda Picton *et al.* 2000; Luck 2005). Oltre a numerosi software commerciali spesso forniti dalle stesse ditte che producono l'hardware per l'acquisizione dei dati sono disponibili gratuitamente alcuni toolbox di MATLAB, in particolare vogliamo citare EEGLAB (Delorme, Makeig 2004) che congiuntamente al pacchetto ERPLAB sono strumenti largamente utilizzati dalla comunità scientifica, dotati di ampia documentazione e tutorial e di interfaccia grafica e adatti quindi anche a utenti non esperti in programmazione e analisi dei segnali. Un ulteriore toolbox disponibile gratuitamente è FieldTrip (Oostenveld *et al.* 2011) che offre un maggior numero di algoritmi (soprattutto per altre tipologie di analisi dei dati EEG) e una maggior facilità di estensione essendo proprio stato pensato come un framework per sviluppare nuovi algoritmi piuttosto che un pacchetto di facile utilizzo per non addetti ai lavori.

Come detto, in fase di analisi dei dati, è possibile utilizzare ulteriori strategie per il miglioramento del rapporto segnale-rumore. Queste sono: il filtraggio di frequenza, l'esclusione di prove contenenti artefatti, la correzione di artefatti tramite modelli.

4.2.1. Filtraggio di frequenza

Il filtraggio di frequenza permette di eliminare dal tracciato variazioni in determinati range di frequenza; si distingue fra filtri passa-alto che riducono l'ampiezza delle variazioni del segnale lente e filtri passa-basso che eliminano le variazioni di alta frequenza (sono chiaramente possibili combinazioni di filtri, detti passa-banda che permettono il passaggio di un dato intervallo di frequenze ed elimina-banda o *notch* che permettono l'abbattimento del segnale in un dato intervallo o in un intorno di una specifica frequenza). Non è matematicamente concepibile un filtro che permetta il passaggio inalterato del segnale fino a una data frequenza e l'annullamento dello stesso per valori superiori. I filtri sono quindi caratterizzati da una funzione di trasferimento il cui parametro principale è la frequenza di taglio ovvero la frequenza alla quale un segnale di ingresso è ridotto di un fattore $\sqrt{2}$ (ovvero circa 1.43) e da una pendenza, tipicamente misurata in dB che descrive con che rapidità varia (nella sua parte lineare) la riduzione di ampiezza del segnale in funzione della frequenza. Ogni filtro distorce comunque il segnale, sia in ampiezza che in fase, per deflessioni aventi frequenze vicine alla frequenza di taglio del filtro e va quindi usato con cautela; rimando a Luck (2005), Capitolo 5, e Todd (2005), Capitolo 5, per una trattazione dettagliata delle tipologie di filtri digitali e di come questi vadano utilizzati propriamente all'interno dell'analisi dati EEG. L'efficacia dell'utilizzo dei filtri di frequenza nell'eliminare artefatti dipende dalla differenza in frequenza fra i segnali di interesse (componenti ERPs) e degli artefatti: tanto maggiore è tale differenza tanto più l'utilizzo di filtri di frequenza sarà efficace nell'eliminazione dei segnali artefactuali senza portare a distorsioni del segnale di interesse. Nell'ambito degli studi sulla comprensione frasale le componenti di interesse sono abbastanza lente ovvero caratterizzate da variazioni che si sviluppano in qualche decina di millisecondi, nel range di circa 10 Hz, e quindi i filtri devono essere scelti in modo da non ridurre o alterare significativamente i segnali attorno a tali frequenze. Un'ulteriore considerazione relativamente ai filtri di frequenza è che questi vanno ad alterare anche i segnali artefactuali e tale alterazione può rendere difficoltoso il loro riconoscimento in successive fasi di analisi. Ad esempio le saccadi dei movimenti oculari sono caratterizzate da un rapido cambiamento del segnale nei siti di misura vicini agli occhi e possono essere facilmente riconosciuti in quanto caratterizzati da scalini nel segnale. L'utilizzo di un filtro passa-basso può 'arrotondare' tali scalini e renderne più difficile il riconoscimento sia tramite algoritmi automatici che tramite ispezione visiva.

È quindi consigliabile utilizzare inizialmente, ove necessario, un filtraggio molto blando, eseguire le altre operazioni di eliminazione o riduzione degli artefatti che vedremo nel prossimo paragrafo e solo successivamente applicare un filtro più forte per eliminare segnali che hanno frequenze distanti da quelle dei segnali di interesse.

4.2.2. Scarto di epoche con artefatti

Un ulteriore passo di analisi per il miglioramento del rapporto segnale-rumore consiste nello scarto di epoche affette da artefatti. L'identificazione delle epoche affette da ampi artefatti può essere svolta sia in modo automatico, tramite la selezione sulla base di alcuni parametri del tracciato, che tramite ispezione visiva da parte di un operatore esperto. Esistono vantaggi e svantaggi per entrambe le opzioni: da un lato l'ispezione da parte di un operatore esperto è superiore in capacità di discriminazione rispetto ad algoritmi di *pattern detection*, dall'altra lo scarto automatico è maggiormente riproducibile, esente da possibili bias dello sperimentatore e più veloce in quanto appunto svolto automaticamente. Le due scelte sono a mio avviso egualmente giustificate anche se in differenti ambiti di ricerca la comunità di studiosi ha spesso sviluppato una preferenza per l'una o l'altra tecnica. Tra gli studi sulla comprensione frasale ve ne sono i cui autori rimuovono – in modo manuale o automatico – le epoche compromesse da artefatti.

Stante che gli artefatti più ampi e insidiosi sono quelli generati dagli occhi (movimenti oculari e *blink*) è possibile, nel caso siano stati raccolti più siti in posizioni opposte rispetto agli occhi il calcolo di canali differenziali fra canali posti sui lati opposti degli occhi: la differenza fra il canale di sinistra e quello di destra equivale al segnale che sarebbe stato raccolto con un montaggio bipolare elettro-oculografico orizzontale. Analogamente la differenza fra il segnale di un elettrodo posto sopra l'occhio e il segnale di un elettrodo posto sotto l'occhio permette il calcolo di un elettro-oculogramma verticale. Tali segnali bipolari (non più riferiti al riferimento comune) sono particolarmente utili per evidenziare segnali di origine oculare, altri segnali (cerebrali) simili ai due lati opposti degli occhi sono infatti cancellati nella differenza mentre segnali di origine oculare avendo polarità opposta ai due lati dell'occhio vengono amplificati dalla procedura. Tali canali differenziali sono particolarmente utili per mettere in evidenza artefatti di natura oculare sia nelle procedure di scarto manuale che automatico.

Nello scarto manuale è importante che lo scarto sia svolto da uno stesso operatore e utilizzando lo stesso criterio per ogni partecipante. I criteri di scarto devono essere definiti a priori e lo scarto di ogni epoca deve essere giustificato da chiara evidenza relativamente alla presenza di uno specifico artefatto. Il ricercatore deve tenere nota di quali tipologie di artefatti sono considerate nella scelta di accettare o scartare un'epoca e tali criteri andrebbero riportati esplicitamente all'interno delle pubblicazioni, rendendo così la procedura maggiormente replicabile in successivi studi. Un ulteriore miglioramento della replicabilità della procedura è quella di fare svolgere indipendentemente la reiezione degli artefatti da due operatori esperti indipendenti e verificare che la maggior parte delle epoche scartate siano le stesse e, in generale, la percentuale di epoche scartate non differisca significativamente. Sarebbe inoltre importante che durante l'ispezione non fossero presenti indicazioni sulla condizione sperimentale dell'epoca ispezionata per evitare che (anche implicitamente) il ricercatore sia influenzato nelle scelte dalle specifiche ipotesi dello studio.

Per lo scarto automatico sono disponibili vari algoritmi e parametri che possono essere usati nello scarto di epoche 'devianti' rispetto al pool di dati disponibili per un soggetto anche se tipicamente si preferisce utilizzare criteri più semplici e indipendenti dalle caratteristiche del segnale raccolto dal singolo soggetto. Il criterio maggiormente usato negli studi sulla comprensione frasale è il criterio di superamento di una soglia massima di differenza di potenziale di una singola epoca o in un periodo del tracciato dell'epoca. La logica di tale procedura è che se per un singolo canale la differenza fra valore minimo e massimo del segnale in un dato periodo di tempo supera una data soglia è altamente probabile che l'epoca sia affetta da un artefatto di ampiezza rilevante. La scelta della soglia è funzione di molte variabili; fra queste possono essere elencate la lunghezza dell'epoca o del periodo scelto per il calcolo (più lunga è l'epoca più la soglia deve essere ampia in quanto segnali lenti cerebrali possono generare differenze più ampie), il canale sul quale si opera la misura (se si hanno a disposizione segnali oculari differenziali, può essere utilizzata una soglia più bassa su tali siti per essere sicuri di rimuovere artefatti oculari), la qualità generale dei dati (se i segnali sono in generale rumorosi, una soglia troppo bassa può portare ad una eliminazione di molte epoche con artefatti che possono essere anche efficacemente rimossi dalla procedura di *average*), il tipo di filtraggio di frequenza che è stato adottato prima della procedura di scarto (più i dati sono stati filtrati più bassa può essere posta la soglia, con il rischio però che anche gli artefatti siano stati ridotti e quindi la procedura possa eliminare anche dati utili). In generale è consigliabile utilizzare parametri di scarto simili a quelli utilizzati dalla letteratura di riferimento dello specifico

studio, a meno che non ci siano motivi particolari per modificarli (particolarità della registrazione o del paradigma sperimentale o specifiche e giustificate critiche metodologiche alle scelte svolte da altri ricercatori).

Come si vede, la selezione di epoche, sia automatica che manuale, è un'operazione che richiede scelte piuttosto arbitrarie ed è quindi lo stadio più delicato di analisi dei dati ERPs. In particolare tali scelte sono particolarmente onerose nell'ambito degli studi sulla comprensione frasale. Rispetto ad altre ricerche ERPs dei processi cognitivi (attenzione, memoria, elaborazione di parole isolate) il numero di prove che possono essere somministrate in una sessione sperimentale è limitato in quanto leggere una frase parola per parola richiede molto più tempo rispetto a compiti più semplici. Tipicamente sono infatti presentate solamente fra le 30 e le 60 frasi per ogni condizione sperimentale, quindi un eccessivo scarto di epoche può facilmente comportare uno sbilanciamento del disegno sperimentale e un insufficiente numero di epoche per la procedura di *average*. Per lo stesso motivo anche nel caso l'artefatto sia locale ovvero presente solamente in un numero limitato di siti la scelta è di eliminare l'intera epoca in quanto le analisi statistiche successivamente svolte (ANOVA e t-test) richiedono omogeneità e sfericità della varianza ed è quindi da evitare che per alcuni siti siano presenti più epoche che per altri, dando luogo a in-omogeneità del rapporto segnale-rumore. Oltre a questo, nella maggior parte dei casi, è possibile che l'artefatto sia presente in più siti anche se è rilevabile visivamente o tramite algoritmi solamente in alcuni siti. Un caso particolare è il malfunzionamento di singoli elettrodi che può essere dovuto a guasto tecnico o al fatto che il contatto con la cute si deteriora per qualche motivo durante la registrazione. In questi casi è possibile interpolare i dati del sito mancante con i dati dei siti contigui; l'operazione è delicata in quanto mina l'indipendenza lineare dei dati delle forme d'onda dei singoli siti e va quindi considerata con cautela, soprattutto in registrazione con bassa densità di elettrodi (meno di 32 elettrodi).

4.2.3. *Correzione degli artefatti*

Un'ulteriore possibilità di riduzione degli artefatti consiste nella creazione di un modello fisico o statistico dell'artefatto e nella correzione del tracciato tramite sottrazione della componente artefattuale. Tali modelli vanno tarati sul singolo soggetto attingendo ai dati della registrazione EEG e sono quindi affetti da errore essi stessi: è possibile che oltre a ridurre efficacemente il segnale artefattuale eliminino o distorcano anche parte del segnale di interesse e vanno

quindi usati con estrema cautela solo nel caso in cui il particolare paradigma o la qualità generale dei dati lo rendano conveniente. Per gli studi sulla comprensione frasale sono spesso utilizzati per eliminare artefatti oculari o *blink*; questi ultimi in particolare sono insidiosi nel caso si utilizzino come materiale sperimentale frasi piuttosto lunghe. È infatti difficile per un partecipante evitare di sbattere le palpebre per molti secondi e quindi in questo caso la probabilità di avere dei *blink* nell'epoca di interesse può aumentare drasticamente rendendo sconveniente lo scarto delle epoche artefattuate. Il metodo statistico più utilizzato è l'ICA (*Independent Component Analysis*) che permette di scomporre il segnale in topografie (pesi dati ai singoli siti) che sovrapposte con opportune funzioni di sommazione nel tempo (decorso temporale della componente) descrivono il segnale originale (Jung *et al.* 2000). L'algoritmo può essere applicato all'intero tracciato EEG, alle epoche o (meglio) a segmenti della registrazione ricchi degli artefatti di interesse (per movimenti oculari può essere utile registrare l'attività EEG mentre i partecipanti leggono le istruzioni presentate a monitor). Nella scomposizione è possibile individuare (manualmente o automaticamente) le topografie relative all'artefatto di interesse e ricostruire il segnale omettendo tali componenti. Siccome il numero di componenti in cui il segnale viene scomposto dipende dal numero di siti è consigliabile utilizzare tali algoritmi solo se si ha una densità di siti di registrazione medio-alta (sopra i 32, meglio se attorno ai 64 siti) in quanto, se il numero di componenti è basso, aumenta la possibilità che la componente catturi sia segnali artefattuali che neurali. In ogni caso anche in questo tipo di reiezione dei dati è importante che ogni componente scartata sia ricondotta con sicurezza a uno specifico tipo di artefatto tramite l'analisi della topografia e del decorso temporale della stessa.

Un metodo differente, in linea di principio migliore ma meno utilizzato, è quello proposto da Berg e SHERG (1989) che consiste nella costruzione di un modello fisico dei segnali di origine oculare. Esso richiede una fase di calibrazione nella quale è chiesto ai partecipanti di muovere gli occhi in determinate posizioni dello spazio ed eseguire dei *blink*. Tali dati sono utilizzati per fissare i parametri liberi del modello, il quale è costituito da due dipoli positivi corrispondenti alla posizione degli occhi. Essi sono rivolti verso l'esterno della testa e inseriti in tre sfere concentriche di materiale conduttore avente differenti caratteristiche elettriche. La simulazione delle variazioni del segnale EEG dovute a variazioni di intensità (*blink*) e posizione (movimento) dei dipoli elettrici oculari sono fittate con i dati sperimentali in modo da fissare i parametri liberi del modello legati a specifici aspetti dell'anatomia e della fisiologia del singolo individuo. L'output del modello consiste in un coefficiente di abbattimento dei segnali elettrooculografici (orizzontale e verticale) per ogni sito di misura e la

correzione dell'intero tracciato EEG può avvenire semplicemente sottraendo i segnali elettrooculografici pesati con tale coefficiente da ogni singolo segnale. Il metodo è meno dipendente dalla densità di siti della registrazione ma richiede una calibrazione e ha soprattutto il vantaggio di considerare artefattuale solo quella parte di segnale che è fisicamente compatibile con l'origine oculare ed è sicuramente da preferire ad altri metodi sottrattivi (Gratton, Coles, Donchin 1985) che calcolano i pesi della sottrazione unicamente sulla base di semplici stime e da considerarsi superati quantomeno in relazione all'utilizzo dell'ICA.

4.2.4. *Correzione della baseline*

Un'ulteriore delicata operazione di analisi, che può essere solo parzialmente considerata un'operazione di riduzione degli artefatti, è la correzione della baseline, l'ultima operazione di analisi prima dell'*average* delle singole epoche. La baseline è un periodo precedente all'evento di interesse per il quale, se il disegno sperimentale è ben congegnato, i processi cognitivi e, di conseguenza, i processi neurali che li realizzano non differiscono nelle differenti condizioni sperimentali sotto indagine. Se tale ipotesi è realizzata (che come vedremo è questione delicata in quanto non sempre realizzata con pienezza) le differenze di potenziale fra i vari siti di misura e fra le varie condizioni non sono di interesse nella particolare ipotesi e possono essere annullate in quanto differenze non rilevanti per lo scopo dell'esperimento o differenze casuali (derivanti da artefatti); la logica dell'estrazione dei potenziali evento relati è infatti quella di identificare i cambiamenti della distribuzione del potenziale elettrico indotti dai processi cognitivi scaturiti da un evento (percettivo o mentale) in differenti condizioni sperimentali, ovvero manipolando una o più delle dimensioni salienti del processo sotto indagine. Per tale motivo si procede alla correzione della baseline ovvero si sottrae a ogni forma d'onda (evoluzione nel tempo della differenza di potenziale di ogni sito rispetto al riferimento) il valor medio del potenziale calcolato in un periodo di base (che solitamente consiste in un periodo precedente all'onset dello stimolo critico della durata di circa un quinto dell'epoca). Successivamente a tale correzione che come vedremo è un'operazione piuttosto discussa nell'ambito dello studio della comprensione frasale, si procede alla media delle forme d'onda per ogni soggetto e condizione sperimentale.

A partire dalle medie sui singoli partecipanti si procede successivamente alla media delle stesse medie per tutti i soggetti, ottenendo delle forme d'onda

dette 'grandi medie', in inglese *grand-average*, che sono poi analizzate a livello qualitativo prima di procedere alle analisi statistiche sui valori medi delle differenze di potenziale nei vari siti di misura, per le varie condizioni ripetute sui soggetti.

Se i metodi per la registrazione e per l'estrazione degli ERP fin qui delineati, pur nell'ampia variabilità delle scelte cui abbiamo brevemente accennato, sono abbastanza simili nei vari ambiti delle scienze cognitive, le tipologie di analisi qualitativa e statistica dei dati tendono ad essere differenti in funzione dei differenti tipi di potenziali che si vanno a studiare e quindi limiterò l'esposizione di tali argomenti all'ambito della comprensione frasale dopo aver brevemente accennato ai tipici disegni sperimentali utilizzati.

5. I paradigmi per lo studio della comprensione frasale

Così come in linguistica e nelle altre tecniche psicolinguistiche per lo studio della comprensione frasale (si veda il capitolo di Vernice in questo volume), anche con l'utilizzo della tecnica ERP vanno individuate delle coppie minime di frasi che differiscano per lo specifico aspetto che si intende studiare. I primi lavori ERP sulla comprensione frasale hanno utilizzato il paradigma della violazione, come nell'esempio 1., tratto da Kutas *et al.* (1984) o come nell'esempio 2., tratto da Osterhout e Mobley (1995), per i quali i potenziali evocati sono misurati in relazione a una parola critica (sottolineata in 1. e 2.) che rende la frase incoerente dal punto di vista semantico (vedi 1.b.) o sintattico (vedi 2.b.), rispetto alle relative condizioni di controllo corrette 1.a. e 2.a.

- 1.a. The pizza was too hot to eat.
La pizza era troppo calda da mangiare.
- 1.b. The pizza was too hot to drink.
La pizza era troppo calda da bere.
- 2.a. The elected officials hope to succeed.
Gli eletti funzionari sperano di avere successo.
- 2.b. * The elected officials hopes to succeed.
Gli eletti funzionari spera di avere successo.

Tale scelta è giustificata dal fatto che il segnale ERP è alquanto rumoroso ed è quindi più facile mettere in luce delle differenze se i processi cognitivi nelle due condizioni sperimentali sono alquanto differenti. Nonostante alcune critiche al fatto che si possano trarre inferenze valide sul funzionamento del sistema cognitivo nell'elaborazione di frasi corrette a partire da dati ottenuti utilizzando frasi scorrette dal punto di vista semantico, come in 1., o sintattico, co-

me in 2., il paradigma delle violazioni si è mostrato molto utile perché differenti tipologie di violazione non inducono effetti simili, più o meno ampi, ma deflessioni qualitativamente differenti in termini di: (a) latenza dell'effetto rispetto alla presentazione della parola critica (sottolineata in 1. e 2.), (b) polarità (deflessioni positive o negative) e (c) distribuzione topografica (siti sullo scalpo ove le differenze emergono con maggior ampiezza). Questa proprietà degli ERP è il vantaggio maggiore della tecnica, accanto all'alta risoluzione temporale, rispetto a tecniche comportamentali come la lettura autoregolata o i movimenti oculari. Anche in queste tecniche, differenti manipolazioni possono dar luogo a effetti qualitativamente differenti. Per esempio, nella lettura autoregolata a volte l'effetto emerge in modo più ampio in termini di spill-over altre volte in termini di rallentamenti immediati. Invece con i movimenti oculari differenti manipolazioni possono incidere maggiormente in misure di primo passaggio o in termini di regressioni o riletture (si veda il capitolo di Porta e Rastelli in questo volume). In ogni modo gli effetti si riferiscono sempre a differenze nella velocità di lettura nel momento in cui il lettore sperimenta una difficoltà. Quindi, in linea di principio, le differenze potrebbero essere a carico di uno stesso sistema neuro-cognitivo. Il fatto invece che negli ERP si abbiano deflessioni differenti in termini di topografia e polarità garantisce che le differenti manipolazioni incidono su sistemi neuro-cognitivi differenti, impedendo di attribuirli a uno stesso meccanismo (o modulo) cognitivo.

Nella costruzione del materiale sperimentale ci sono delle particolarità della tecnica che vanno considerate già in fase di progettazione dell'esperimento. Innanzitutto, stante il basso rapporto segnale rumore, è necessario comporre differenti frasi che presentino le caratteristiche della manipolazione sperimentale (vedi 1.b. e 2.b.) e delle condizioni di controllo (vedi 1.a. e 2.a.). L'efficacia della procedura di *average* richiede infatti un minimo di 30/50 epoche per condizione sperimentale. Congiuntamente a ciò spesso è necessario inserire all'interno delle liste sperimentali delle frasi filler (di riempimento) per evitare che l'elaborazione di frasi con strutture o elementi molto simili rendano eccessivamente prevedibile il materiale presentato. Siccome la presentazione di una frase, sia in modalità acustica che visiva, dura qualche secondo, il numero massimo di frasi che si possono presentare in una sessione della durata di circa un'ora (oltre la quale il partecipante può accusare stanchezza) è di poche centinaia e quindi il numero di coppie minime che si possono includere in un esperimento ERP è assai limitato.

Altro accorgimento, ormai entrato nella tradizione degli studi ERP di comprensione frasale, è l'utilizzo di un disegno sperimentale a misure ripetute a quadrato latino. Siccome la ripetizione di una stessa frase o anche solamente di una stessa parola contenuta nella stessa sessione sperimentale porta a una

alterazione dei processi cognitivi a causa di una riattivazione della traccia mnestica relativa alla frase elaborata in precedenza (si veda Kutas, Van Petten 1994 per una analisi approfondita degli effetti ERP della ripetizione di parole sia all'interno che al di fuori di un contesto frasale) si ritiene necessario evitare che le due versioni di una stessa frase (per es. 1.a. e 1.b. o 2.a. e 2.b.) siano presentate a uno stesso partecipante. Allo stesso tempo è necessario che ogni partecipante veda uno stesso numero di frasi (differenti) nelle differenti condizioni sperimentali e che sia la frase 1.a. sia la frase 1.b. siano presentate nell'esperimento. Tale obiettivo si raggiunge componendo liste di frasi differenti nelle condizioni sperimentali di interesse e presentando versioni differenti a differenti partecipanti secondo lo schema del quadrato latino. Supponiamo di voler studiare gli effetti della violazione di numero fra articolo e nome in italiano; a questo scopo comporremo un numero sufficiente di frasi corrette differenti come negli esempi 3-6.

- 3.a. Il gatto corre nel corridoio.
- 4.a. Il cane nasconde il suo osso.
- 5.a. Il mestolo è caduto dal tavolo.
- 6.a. Il ragazzo ha fissato un appuntamento con lei.

A partire dalle versioni corrette si derivano altre 3 versioni, una corretta al plurale e 2 violazioni di numero come negli esempi 3.b.-d.

- 3.b. I gatti corrono nel corridoio.
- 3.c. * I gatto corre nel corridoio.
- 3.d. * Il gatti corrono nel corridoio.

Supponendo di non essere interessati a effetti di marcatezza (singolare versus plurale) nella procedura di *average* verranno contrastate le medie delle epoche delle condizioni corrette al singolare e al plurale (versioni a. e b.) e le due violazioni di numero (versioni c. e d.). Per la composizione delle liste il metodo del quadrato latino prevede la costruzione di quattro liste distinte come in Tabella 1.

Lista 1	Lista 2	Lista 3	Lista 4
(3) a. Il gatto	(3) b. I gatti	(3) c. * I gatto	(3) d. * Il gatti
(4) b. I cani	(4) c. * I cane	(4) d. * Il cani	(4) a. Il cane
(5) c. * I mestolo	(5) d. *Il mestoli	(5) a. Il mestolo	(5) b. I mestoli
(6) d. * Il ragazzi	(6) a. Il ragazzo	(6) b. I ragazzi	(6) c. * I ragazzo
	...		

Tabella 1. Esempio di costruzione di liste sperimentali con la rotazione delle condizioni sugli items con lo schema del quadrato latino

In questo modo ogni partecipante vede una sola versione di un dato item (frase), evitando effetti dovuti alla ripetizione di parole contenute o della intera frase, e inoltre vede le stesse proporzioni di frasi nelle differenti condizioni sperimentali; altro vantaggio è che le variabili lessicali (frequenza, numero di lettere, fonemi, vicini ortografici etc.) delle parole target sono bilanciate fra i soggetti. Il fatto che il bilanciamento delle variabili lessicali avvenga fra i soggetti e non sul singolo soggetto è in qualche modo problematico in quanto un soggetto che vede la lista 1 è possibile mostri maggiori effetti negli ERP della lunghezza o della frequenza rispetto a un soggetto della lista 2, sia per fattori cognitivi che per fattori individuali legati alla morfologia e alle caratteristiche elettriche dell'encefalo.

Per tale motivo è importante che il numero di soggetti non sia troppo piccolo in modo che tali differenze inter-soggettive casuali non diventino importanti. La scelta all'interno del pool di quali frasi vadano nella lista 1 in una data condizione permette, se ritenuto necessario, di bilanciare alcune variabili che si ritengono importanti anche a livello del singolo soggetto, come potrebbe essere nell'esempio che abbiamo visto l'animatezza: è infatti possibile che sia più semplice analizzare in posizione di soggetto a inizio frase un nome che si riferisce a un ente animato (gatto, cane, ragazzo) rispetto a un inanimato (mestolo) che è più probabile sia oggetto diretto o indiretto (si è infatti rilevato che l'N400 a parità di altri fattori lessicali è maggiore per un soggetto inanimato a inizio frase, Weckerly, Kutas 1999). Se possibile potrebbe essere conveniente controllare che all'interno di una lista non appaia un numero sproporzionato di inanimati in condizione di violazione e di animati in condizione corretta.

Chiaramente il disegno a quadrato latino fa sì che in una differente lista la proporzione sia rovesciata ma tali differenze introducono comunque delle ulteriori differenze fra i soggetti (rumore, varianza non spiegata dalla manipolazione), rendendo più difficile ottenere risultati significativi con un numero limitato di partecipanti.

Utilizzando questo disegno sperimentale, la motivazione a raccogliere dati da più partecipanti non ha tanto come scopo validare i risultati a livello inter-soggettivo o di popolazione ma è piuttosto uno stratagemma per aumentare il rapporto segnale rumore (stante che non è plausibile raccogliere dati per decine di ore da uno stesso partecipante) e per ottenere un bilanciamento globale del materiale sperimentale fra i soggetti. In questo senso si deve assumere che i processi cognitivi e i potenziali evocati sotto indagine siano simili nei vari partecipanti e quindi il reclutamento deve tenere conto di possibili differenze sia a livello cognitivo e linguistico come la competenza linguistica e il livello di istruzione, sia a livello fisiologico, come ad esempio il range di età (special-

mente durante lo sviluppo) e la lateralizzazione emisferica per il linguaggio che solitamente correla con la preferenza manuale.

Per un approfondimento sulla selezione dei partecipanti in un esperimento ERP si veda Picton *et al.* (2000, pp. 130-132).

Chiaramente è possibile studiare anche differenze nell'elaborazione di frasi in differenti soggetti (sani e pazienti, monolingui e bilingui, differenti range di età durante lo sviluppo) ma tale confronto è spesso svolto confrontando gruppi differenti omogenei al loro interno piuttosto che singoli individui, a meno che l'effetto ERP di interesse non sia sufficientemente ampio da emergere sul singolo soggetto in modo abbastanza chiaro (si veda, ad esempio, per una analisi che correla ampiezze di indici ERPs con variabili individuali, il recente lavoro di Tanner *et al.* in press).

Un'ultima annotazione sui disegni sperimentali riguarda l'utilizzo di statistiche differenti dall'analisi *by-subject* (per es. ANOVA o t-test con misure ripetute sui soggetti) comunemente usate in psicolinguistica come l'analisi *by-item* ove le medie sono calcolate fra i soggetti per ogni singolo item (frase, nel nostro caso) e poi trattate considerando gli item come variabile casuale o i modelli misti che consentono di svolgere l'analisi statistica senza operare alcuna media considerando sia gli items che i soggetti come variabili random (Baayen, Davidson, Bates 2008).

L'analisi per item non viene tipicamente svolta su dati ERP. Alcune ragioni di questa scelta possono essere i costi sia in termini di tempo che di risorse umane per la preparazione dei soggetti che tendono a limitare il numero di partecipanti a un singolo esperimento a 20 o 30 al massimo e le differenze inter-individuali nella morfologia cerebrale e nelle caratteristiche elettriche dei tessuti che rendono molto differenti ERP di persone differenti: per ottenere un buon rapporto segnale rumore in una media per item sarebbe quindi necessario un numero maggiore di partecipanti (probabilmente fra 40 e 50).

Una ulteriore ragione, forse più pratica, è che i software standard di analisi dei dati ERP lavorano separatamente sui singoli partecipanti e quindi sarebbe necessario sviluppare specifiche routine per ottenere le medie per item (spesso non direttamente codificati nei trigger che il sistema di stimolazione invia al sistema di registrazione EEG). Lo stesso dicasi per i modelli misti, che non sono infatti ad oggi ancora utilizzati su dati ERP, nonostante il fatto che tale tecnica si stia affermando come lo standard per l'analisi di tempi di reazione in ambito psicolinguistico.

Non vedo ostacoli di tipo teorico a tale applicazione ed è auspicabile che nei prossimi anni si sviluppino delle ricerche metodologiche approfondite a riguardo.

Oltre a questo, nella costruzione del materiale vanno chiaramente controllate altre variabili che influenzano i processi di accesso lessicale e integrazione non oggetto della manipolazione sotto indagine, quali il numero di lettere, la frequenza d'uso della parola target, eventuali ripetizioni della parola target all'interno dell'esperimento, variabili distribuzionali quali la *cloze-probability*.

In generale è necessario controllare sia il prefisso frasale (contesto presentato prima della parola target) che le caratteristiche lessicali o distribuzionali della parola target anche se chiaramente una coppia minima deve contenere una qualche differenza. Prendiamo ad esempio lo studio di Kim e Osterhout (2005) che ha voluto verificare i correlati ERP di una violazione detta di rovesciamento semantico (*semantic reversal*) con due differenti condizioni di controllo come nell'esempio 7.

- 7.a. * The hearty meal was devouring the kids.
Il sostanzioso pasto stava divorando i bambini.
- 7.b. The hearty meal was devoured by the kids.
Il sostanzioso pasto era divorato dai bambini.
- 7.c. The hungry boy was devouring the cookies.
L' affamato ragazzo stava divorando i biscotti.

In generale sono possibili due tipologie di manipolazione: da un lato è possibile confrontare due condizioni con prefisso identico e parola target differente come per il contrasto fra le frasi 7.a. e 7.b. oppure confrontare prefissi differenti a una stessa parola target (*devouring* nell'esempio) come per il contrasto fra le frasi 7.a. e 7.c.

La prima scelta ha il vantaggio che l'ipotesi relativa al fatto che i processi cognitivi (e i potenziali evocati) nel periodo precedente alla presentazione del target (e a livello quindi della correzione della baseline) siano analoghi e perfettamente controllati è chiaramente verificata in quanto il materiale è identico; ogni differenza è dovuta unicamente a rumore casuale. In tali circostanze non è però sempre possibile controllare le variabili lessicali della parola target (nel confronto fra 7.a. e 7.b. le flessioni verbali sono chiaramente differenti).

La strategia del confronto fra 7.a. e 7.c. mostra invece il chiaro vantaggio che si vanno a confrontare (fra soggetti, usando il quadrato latino) ERP elicitati da stimoli perfettamente identici (la parola target è identica) e quindi eventuali effetti non sono attribuibili a proprietà non controllate della parola mentre è più discutibile l'ipotesi di equivalenza dei processi cognitivi (e dell'attività

EEG) nel periodo precedente la presentazione del target in quanto differenze non controllate nei prefissi utilizzati in 4.a. e 4.c. (per esempio che in un caso il soggetto è animato, nell'altro no) possono emergere in termini di differenze sistematiche dell'attività EEG nel periodo precedente la presentazione della parola target e rendere la correzione della baseline dannosa, dando luogo a effetti fittizi negli ERP.

Chiaramente se si ritrovano gli stessi effetti di una violazione come la condizione 7.a. sia rispetto alla condizione di controllo 7.b. che rispetto alla condizione 7.c., come hanno di fatto trovato Kim e Osterhout (2005), o con un disegno bilanciato per entrambi i fattori target e prefisso (come l'esempio in Tabella 1), il risultato è da considerarsi più solido da un punto di vista empirico rispetto a una comparazione con un'unica condizione di controllo.

Il problema della baseline quando si utilizza solamente un controllo con parola target identica e differenti prefissi è molto rilevante se la parola immediatamente precedente il target è alquanto differente nelle due condizioni sperimentali, per esempio parola funzione in un caso e parola contenuto in un altro, come nell'esempio in tedesco (8) nel quale una violazione di struttura sintagmatica si ottiene presentando un participio verbale immediatamente dopo una preposizione omettendo un nome che è altamente predicibile in tedesco a seguito di una preposizione.

8.a. * Die Bluse wurde am gebügelt.

La camicia fu di stirata.

8.b. Die Bluse wurde am Montag gebügelt.

La camicia fu di lunedì stirata.

Il paradigma che utilizza le strutture dell'esempio 8 è stato diffusamente utilizzato dal gruppo di Friederici (vedi Friederici 2002; Steinhauer, Drury 2012), mettendo in luce effetti estremamente precoci relativi all'elaborazione di violazioni di struttura sintattica (*eLAN*).

Tali evidenze sono state fortemente criticate sia a livello metodologico che teorico (si veda ad esempio Osterhout *et al.* 2004; Steinhauer, Drury 2012) e un punto particolarmente importante è proprio quello relativo all'asimmetria del paradigma e alla correttezza dell'ipotesi di equivalenza dell'attività neurale nel periodo precedente alla presentazione della parola target.

Il problema relativo alla presenza di effetti sulla parola precedente in relazione all'utilizzo della correzione della baseline che si basa invece sull'assunzione che non esistano effetti precedenti all'onset della parola critica è graficamente illustrato in Figura 3.

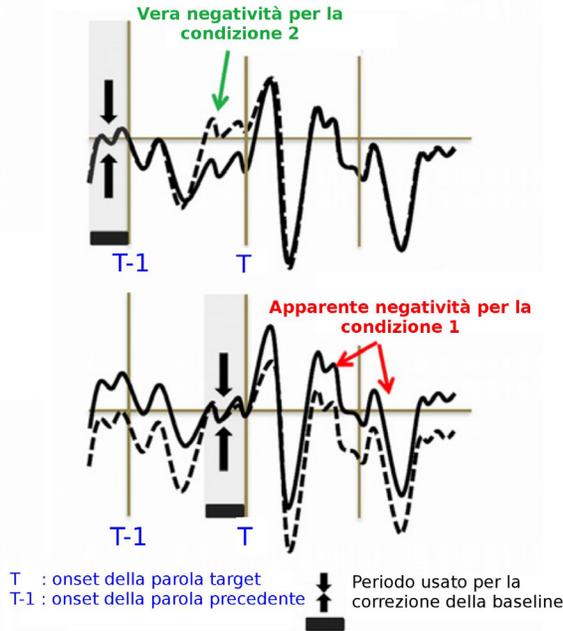


Figura 3. Problema della baseline (Steinhauer, Drury 2012)

Simili osservazioni valgono per le parole presentate successivamente al target. Stante che gli effetti sui processi di elaborazione e integrazione di una parola possono durare fino a più di un secondo dopo la presentazione della parola target (per es. la componente P600 elicitata da violazioni sintattiche), è necessario che il ritmo di presentazione delle parole e le variabili psicolinguistiche principali siano controllate anche sulle parole successive alla parola target per un periodo di tempo sufficiente a garantire che gli effetti ERP studiati non possano essere attribuiti a differenze nel materiale linguistico presentato successivamente.

Relativamente a questo alcuni studiosi preferiscono studiare ERP relativi a parole che siano poste a fine frase ma anche questa scelta è criticabile (De Vincenzi *et al.* 2003) in quanto è noto che a fine frase oltre ai processi on-line legati all'elaborazione della sequenza di parole (accesso lessicale e integrazione

semantica e sintattica all'interno del contesto frasale fino a quel punto elaborato) si possano sovrapporre altri processi sia specifici della comprensione del linguaggio, come i processi di riavvolgimento (*wrap-up*), ipotizzati da Just e Carpenter (1980), sia processi legati all'elaborazione del messaggio o all'esecuzione di un eventuale compito annesso alla comprensione. Quando possibile, risulta quindi conveniente porre la manipolazione di interesse in una posizione non finale in modo da poter valutare separatamente sia gli effetti on-line immediati, tramite la valutazione degli ERP elicitati dalla parola target all'interno della frase, che a fine frase, tramite la valutazione degli ERP elicitati dall'ultima parola della frase nelle due condizioni (De Vincenzi, Di Matteo 2004, p. 19).

Per quanto riguarda la modalità di presentazione delle frasi in un esperimento ERP, essa può essere svolta sia in modalità visiva sia in modalità acustica. La modalità visiva ha come vantaggi la maggior semplicità nella preparazione degli stimoli, la possibilità di regolare in modo semplice la velocità della presentazione e richiede il controllo di un numero minore di variabili. Ad esempio in modalità acustica vanno controllate la dimensione della coorte e il punto di unicità di una parola, le durate di sillabe e parole, la prosodia di parole precedenti e successive al target, soprattutto per frasi contenenti violazioni; anche le caratteristiche della voce dello speaker possono avere delle influenze. D'altro canto in modalità scritta vanno evitati i movimenti oculari e altri artefatti motori; per tale motivo le frasi vengono solitamente presentate parola per parola a un ritmo di presentazione fisso al centro dello schermo; la dimensione dei font, la distanza dal monitor e la lunghezza massima delle parole presentate devono essere tali che le parole possano essere lette adeguatamente senza saccadi. Il ritmo di presentazione deve essere tale da permettere una buona lettura e al contempo minimizzare la sovrapposizione dei processi cognitivi e dei potenziali evocati di una parola e della successiva. Tipicamente la presentazione avviene lasciando ogni parola sullo schermo per una durata fra i 200 ms e 300 ms seguita da un *blank* (schermo vuoto) di ugual durata. In questo modo la latenza fra la presentazione di una parola e la successiva è di circa mezzo secondo, permettendo una relativa separazione temporale dei correlati ERP delle singole parole e mantenendo al contempo un ritmo di lettura piuttosto naturale. Chiaramente tale modalità di presentazione è innaturale in quanto sia parole corte e frequenti che lunghe e infrequenti sono presentate per la stessa durata mentre nella lettura naturale brevi parole funzione sono lette in tempi molto inferiori se non percepite in posizione parafoveale durante la lettura libera (vedi Porta, Rastelli in questo volume).

Per quel che riguarda la modalità acustica la difficoltà principale consiste nel decidere quale sia il punto di presentazione della parola all'interno del

continuum fonico, alcuni autori scelgono l'*onset* del primo fonema della parola, altri il punto di unicità ovvero il fonema dopo il quale la parola può essere univocamente selezionata. In entrambi i casi va controllato che non vi sia una ampia variabilità all'interno delle parole target nelle varie condizioni e fra i vari item che compongono la lista sperimentale fra l'istante di inizio di presentazione della parola e punto di unicità; il controllo di tale variabile è spesso complesso e, in generale in modalità acustica è da preferire un disegno che modifichi il prefisso frasale e lasci costante la parola target nelle differenti condizioni. Un vantaggio della presentazione acustica è che la durata di presentazione delle singole frasi è tipicamente più breve ed è quindi possibile presentare un numero maggiore di frasi e condizioni in una stessa condizione sperimentale; di contro la maggior velocità di presentazione porta a una maggior sovrapposizione dei correlati ERP elicitati dai processi di elaborazione di una singola parola e delle successive, forzando a un maggior controllo delle caratteristiche fisiche e linguistiche delle parole che seguono la parola target nel caso, in special modo se si sia interessati ai potenziali a latenza più lunga come la P600 la cui durata può estendersi fino a un secondo o più.

Un'ulteriore variabile di paradigma consiste nel compito assegnato ai partecipanti. Chiaramente se lo scopo è lo studio dei processi di comprensione frasale dal punto di vista cognitivo sarebbe preferibile non assegnare alcun compito aggiuntivo e richiedere semplicemente in fase di istruzione una lettura attenta delle frasi che vengono presentate. D'altra parte negli studi ERP è consigliato, anche se non strettamente necessario assegnare ai partecipanti un compito comportamentale per verificare che essi effettivamente svolgano il compito loro assegnato (Picton *et al.* 2000, p. 129). Un buon compromesso è quello di presentare casualmente ogni 5 o 10 frasi in media una semplice domanda di comprensione relativamente all'ultima frase letta. È comunque possibile utilizzare compiti a ogni singola frase ed essi possono essere, in funzione del quesito della specifica ricerca, domande di comprensione o giudizi (binari o su una scala di valori) di accettabilità o grammaticalità. I correlati neurali dei processi necessari alla comprensione dovrebbero avere carattere di generalità relativamente alle variabili cognitive di più alto livello quali il compito ma in realtà in alcuni casi componenti ERP possono essere sensibili al compito (Osterhout, Mobley 1995).

Queste osservazioni porterebbero a pensare che il compito di semplice lettura sia sempre preferibile ma in realtà anche l'utilizzo di compiti metalinguistici più specifici mostra alcuni vantaggi. Il fatto che ci sia un preciso compito da svolgere a ogni frase richiede un processo di lettura più attento, oltre a questo un compito più preciso rende maggiormente omogeneo l'atteggiamento dei

partecipanti e inoltre i dati comportamentali possono essere utilizzati per valutare con maggior precisione se i partecipanti hanno effettivamente svolto il compito di lettura in modo accurato. Nella mia personale esperienza tutti questi fattori fanno sì che, anche per quegli effetti ERP che si è esplicitamente dimostrato sono presenti con ampia generalità relativamente allo specifico compito assegnato, il numero di epoche e partecipanti necessari per evidenziare in modo statisticamente significativo un effetto è solitamente molto minore utilizzando compiti di accettabilità rispetto all'utilizzo di semplici istruzioni di lettura attenta. Ha quindi senso, soprattutto quando si va a studiare un fenomeno linguistico nuovo, utilizzare un compito metalinguistico esplicito per aumentare la possibilità di ottenere degli effetti ERP. Nella discussione di tali effetti, nel caso siano stati ottenuti solo in un esperimento che utilizza uno specifico compito metalinguistico, le inferenze in termini di generalità del processo e del significato del correlato neurofisiologico dovrebbero tenere conto del fatto che il correlato potrebbe essere legato a processi accessori relativi all'esecuzione del compito ed eventualmente replicare il dato se tale generalità riveste un importante ruolo teorico. Questo aspetto della generalità di un correlato ERP (Cacioppo, Tassinari, Brentson 2007) è stato accuratamente tenuto in considerazione negli studi pionieristici che hanno definito il significato funzionale dei classici correlati delle violazioni semantiche (N400) e sintattiche (P600) mentre oggi è spesso sottovalutato; ad esempio le evidenze relative all'emergere di P600 per violazioni semantiche di rovesciamento di ruoli di soggetto e oggetto sono state ottenute solamente con compiti di accettabilità come notato da Kuperberg (2007) e l'interpretazione di tali effetti dovrebbe tenere maggiormente conto di questo aspetto. Un interessante esempio di come il fattore compito possa giocare in modo differenziale su differenti tipi di violazioni si trova in Osterhout e Mobley (1995) ove per violazioni di accordo fra soggetto e verbo (*agree*) la P600 è presente sia in esperimenti che utilizzano un compito metalinguistico che, anche se con ampiezza ridotta, in esperimenti che utilizzano la lettura attenta mentre per violazioni di accordo fra pronomi e antecedente (*bind*) la P600 emerge solamente se è richiesto un compito di accettabilità.

Va notato come i vincoli metodologici imposti dalla tecnica fin qui delineati mostrano come la definizione di un paradigma sperimentale ERP per lo studio di un dato fenomeno linguistico richiedono un'attenta analisi relativa alla costruzione del disegno e del materiale sperimentale considerando sia gli aspetti qui discussi che altre possibili limitazioni. Questi aspetti del disegno sono fondamentali per trarre delle inferenze valide. Effetti ERP che possono plausibilmente essere attribuiti al fenomeno linguistico oggetto dello studio

possono invece risultare dovuti anche ad artefatti del paradigma e a variabili linguistiche e cognitive non considerate con sufficiente attenzione durante la messa a punto del paradigma. Un ulteriore corollario delle osservazioni sviluppate in questo paragrafo è che alcuni fenomeni linguistici non possano essere studiati in modo adeguato e valido con l'utilizzo delle tecniche ERP perché i limiti del paradigma non lo consentono, e che taluni fenomeni possono essere studiati meglio in una lingua che in un'altra a causa delle differenze nell'ordine delle parole o nei modi nei quali determinati tratti sono espressi (parole funzione, flessioni, morfemi etc.). Le differenze delle lingue del mondo sono quindi una risorsa di estrema importanza non solo per la comparazione cross-linguistica per sé (Bornkessel, Schlesewsky 2006) ma anche per ampliare il range dei possibili fenomeni che possano efficacemente essere studiati con la tecnica ERP.

6. L'interpretazione dei dati e l'analisi statistica

L'interpretazione cognitiva delle deflessioni ERP si fonda principalmente sul concetto di componente, sviluppato nell'ambito della tradizione della psicofisiologia cognitiva. All'interno di tale tradizione si distingue fra i concetti di picchi e componenti (Kutas, Van Petten 1994; Kutas, Van Petten, Kluender 2006; Luck 2005).

Gli ERP appaiono tipicamente in termini di una successione di picchi di polarità positiva e negativa, spesso denominati con una sigla composta da P o N che indica la polarità (positiva o negativa) e seguita da numeri che possono corrispondere all'ordine nella sequenza (P1, N1, P2 etc.) o alla latenza in ms dall'evento critico (N200, P200, N400, P600...). La stessa nomenclatura è spesso usata anche per indicare le corrispondenti componenti le quali possono essere denominate anche con sigle che si riferiscono ad altre caratteristiche o al significato funzionale delle stesse (per es. *MMN Mismatch Negativity*, *LAN Left Anterior Negativity* etc.).

Anche se la nomenclatura non distingue chiaramente fra picchi e componenti questi concetti sono assai differenti: se un picco è semplicemente la descrizione fisica di una porzione della forma d'onda, la componente corrisponde a una caratteristica della forma d'onda a cui è possibile assegnare un significato funzionale. Secondo la definizione di Luck (2005) per componente si deve intendere «Attività neurale registrata sullo scalpo che è generata da un dato modulo neuroanatomico quando viene svolta una specifica operazione computazionale» (trad. it. da Luck 2005, p. 59). In generale per parlare di com-

ponente è quindi necessario sia assegnata una interpretazione in termini cognitivi; meno chiaro è se sia possibile o auspicabile che all'interno di tale descrizione debba o possa rientrare una descrizione dettagliata del 'modulo neuroanatomico' che la genera. Come abbiamo visto nella prima parte del capitolo, dal solo dato ERP non è possibile dedurre l'area cerebrale che genera una data deflessione e nemmeno i meccanismi neurali alla base di tali differenze di potenziale. Ciò nonostante Kutas, Van Petten e Kluender (2006) sostengono che la caratterizzazione funzionale dovrebbe essere offerta dagli psicologi e quella neurale dai fisiologi ma che tali circostanze sono piuttosto ideali in quanto una caratterizzazione neurale tipicamente richiede evidenze convergenti da modelli animali, pazienti neurologici, procedure cliniche invasive e registrazioni EEG su pazienti con danni cerebrali.

Un'ulteriore fonte di confusione terminologica viene dall'utilizzo del termine componente all'interno di tecniche statistiche utilizzate anche nella ricerca ERP (PCA: *Principal Component Analysis* o ICA: *Independent Component Analysis*). Anche se tali metodi statistici di scomposizione delle forme d'onda in 'componenti' possono in talune circostanze isolare componenti cognitive nella forma d'onda, il termine componente in psicofisiologia cognitiva si riferisce primariamente a una caratteristica fisica della forma d'onda a cui sia stata assegnata un'interpretazione funzionale cognitiva e, auspicabilmente, un'interpretazione in termini di meccanismo neurale.

In generale, per trarre inferenze corrette relativamente alla corrispondenza fra la variazione di un indice fisiologico (nel nostro caso determinate caratteristiche o picchi delle forme d'onda ERP) e un dato costruito psicologico o cognitivo va specificata, tramite accurate indagini empiriche, la natura di tale relazione: se si è mostrato che la manipolazione del costruito psicologico ψ induce una variazione dell'indice fisiologico ϕ ciò non consente di inferire che registrando una variazione ϕ si possa dedurre un coinvolgimento del costruito ψ , in quanto è possibile che un differente costruito psicologico ψ' possa anch'esso indurre la stessa reazione fisiologica ϕ . In breve, nulla assicura che le relazioni fra costrutti psicologici e indici fisiologici siano univoche o multi-a-uno o uno-a-molti.

Tale variabile del modello inferenziale è definita in psicofisiologia (Cacioppo, Tassinary, Brentson 2007) come 'specificità della relazione', un'ulteriore variabile da tenere in considerazione è la generalità, ovvero anche data una corrispondenza uno-a-uno fra costruito psicologico e indice fisiologico è possibile che l'elicitazione della variazione fisiologica dipenda da alcune variabili di contorno, ovvero dal contesto; si parla in questo caso di 'generalità della relazione' in quanto ad esempio alcuni indici dipendono dalla modalità, visiva o acustica, della stimolazione (per es. componenti ERP esogene) o ne sono indipendenti

(per es. componenti ERP endogene) o dalla presenza o meno di un esplicito compito comportamentale richiesto al soggetto. Cacioppo, Tassinary e Brenston (2007) propongono una tassonomia delle relazioni psicofisiologiche basate su tale distinzione (vedi Figura 4).

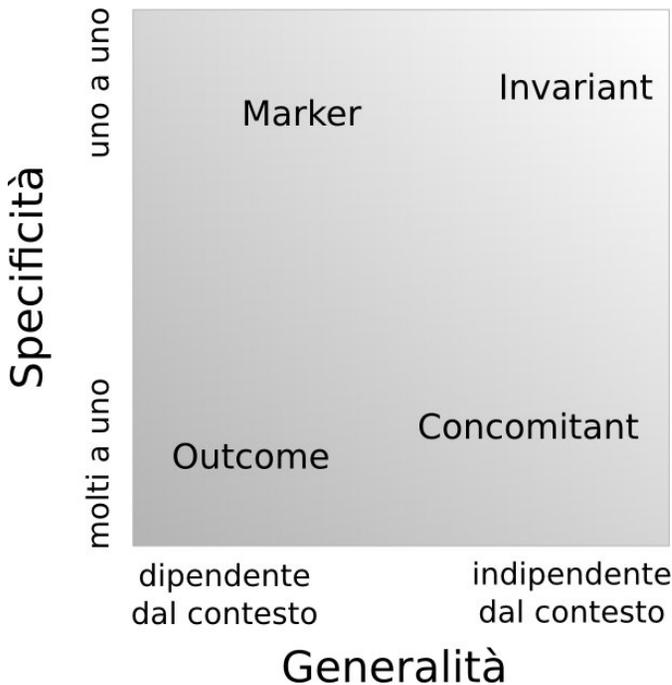


Figura 4. Tassonomia Cacioppo

Al di là delle possibili formalizzazioni, queste osservazioni dovrebbero essere sufficienti a chiarire come un singolo esperimento che manipolando una data dimensione psicologica determina una specifica variazione di un indice fisiologico non è sufficiente ad assegnare un chiaro significato funzionale all'indice.

Ulteriori studi devono seguire per chiarire il significato funzionale e la tipologia della relazione. Questo lungo e piuttosto oscuro lavoro empirico, da Luck (2005) denominato 'ERPologia', è stato svolto per le principali componenti ERP legate alla comprensione frasale, come ad esempio N400 e P600, verificandone l'indipendenza o meno da modalità e velocità di presentazione, la dipendenza dal compito, la tipologia di manipolazioni linguistiche che la inducono.

La costruzione quindi di un significato funzionale di un indice fisiologico in generale e di una componente ERP in particolare è principalmente di tipo empirico e cumulativo: empirico in quanto, come si è chiarito nella prima parte di questo capitolo, il fatto che il potenziale elettrico sia più positivo o più negativo in una certa zona dello scalpo non consente a priori di dedurre una specifica interpretazione in termini di meccanismi neurali e tanto meno cognitivi; cumulativo in quanto l'accumulazione di evidenze empiriche permette di meglio specificare il carattere della relazione fra costrutti psicologici (e linguistici) e indice fisiologico.

Chiaramente la potenza inferenziale di un dato ERP dipende da quanto e come il significato funzionale dell'indice è stato chiarito dalla letteratura precedente. Se in un esperimento una data manipolazione mette in luce una differenza fra le forme d'onda ERP che, per le sue caratteristiche fisiche, non può essere fatto corrispondere a una componente ERP nota si parla di 'effetto' ERP e chiaramente l'interpretazione funzionale in termini di specifici costrutti psicologici, cognitivi o linguistici dovrà essere necessariamente vaga e le inferenze dovranno essere principalmente fondate sull'informazione di latenza, ovvero su quanto tempo passa fra la presentazione dell'informazione rilevante e l'emergere di una reazione cerebrale, variabile temporale che ha una interpretabilità diretta.

Per tali motivi, studi che hanno come scopo non tanto lo sviluppo della metodologia (scoperta o miglior caratterizzazione funzionale di componenti più o meno note) quanto l'utilizzo della tecnica per studiare i processi cognitivi dovrebbero, fin dal momento della messa a punto del paradigma sperimentale, sviluppare le ipotesi dello studio in termini di una specifica componente e porsi nelle migliori condizioni per poterla misurare in modo adeguato (relativamente a questo molto utili sono le regole, principi e strategie suggerite da Luck 2005, Capitolo 2).

Per uno studio organizzato secondo tale schema la analisi dei dati inizia primariamente con una analisi qualitativa delle forme d'onda del *grand-average*, atta a verificare se all'interno delle differenze fra le condizioni sperimentali emergono visivamente quelle ipotizzate in termini delle caratteristiche fisiche che caratterizzano le componenti (latenza, polarità, distribuzione topografica) oppure altre deflessioni non ipotizzate ma riconducibili a componenti note.

In Figura 5 è riportato un grafico di *grand-average* di dati ERP relativi a uno studio di comprensione frasale sul quale si esegue l'analisi qualitativa.

Tale analisi qualitativa ha anche la funzione di determinare quale sia l'analisi statistica più adeguata da utilizzare per mettere in luce gli effetti visivamente rilevati e i vari parametri liberi della stessa.

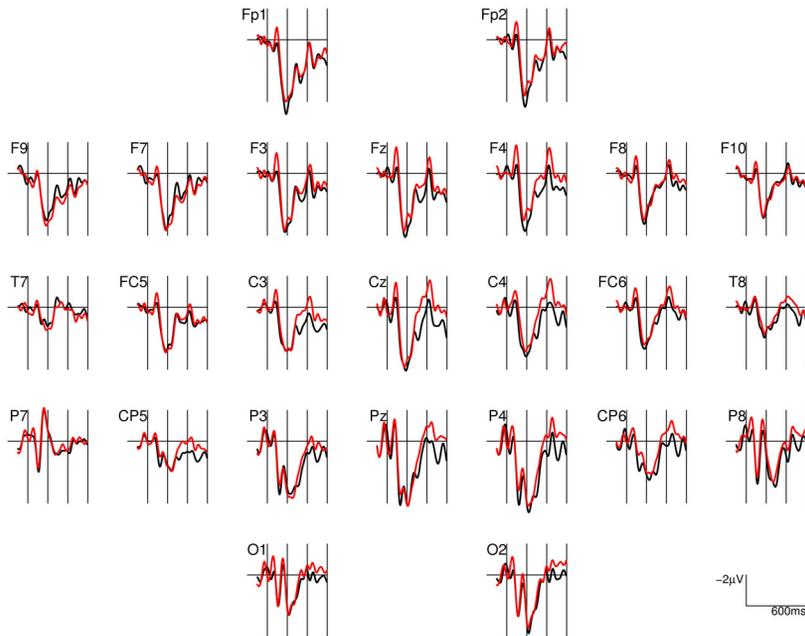


Figura 5. Esempio ERP *grand-average*

Le tipologie di analisi statistica differiscono in vari ambiti di ricerca ERP, in particolare componenti esogene o, più in generale precoci, sono spesso caratterizzate da un alto rapporto segnale-rumore e da una localizzazione topografica più limitata e in tale caso l'analisi può limitarsi ai siti EEG per i quali è noto che l'effetto sotto indagine è massimo. Per gli studi sulla comprensione frasale le componenti di maggiore interesse sono componenti endogene tardive che tipicamente hanno un'ampia distribuzione sullo scalpo e in questi casi è consigliabile svolgere una unica analisi che consideri dati provenienti da tutti i siti di misura. La tipica analisi statistica in questo ambito è infatti l'analisi della varianza (ANOVA) a misure ripetute (soggetti) sull'ampiezza media del po-

tenziale calcolata in un dato intervallo temporale di interesse sui vari siti di misura (fattore topografico). Esistono alcuni parametri 'liberi' all'interno di tale analisi dei quali il primo è l'intervallo temporale da considerare: tipicamente si utilizzano intervalli precedentemente utilizzati in letteratura per la caratterizzazione statistica di quella specifica componente. Detto questo, l'analisi qualitativa di cui sopra può suggerire di adattare l'intervallo ai dati dello specifico esperimento se sono evidenti variazioni di latenza dell'effetto relativamente alle latenze tipicamente rilevate in letteratura oppure riducendo o ampliando l'intervallo in funzione di ampiezza e durata della componente nel particolare esperimento. Ad esempio l'N400 può in differenti modalità di presentazione (visiva o acustica) avere latenze differenti (Kutas, Van Petten 1994, p. 107). Una volta stabilito l'intervallo temporale e calcolate le medie per ogni sito, soggetto e condizione sperimentale, lo schema topografico più semplice consiste nel considerare nell'ANOVA un unico fattore topografico con i singoli siti di misura (o canali) come livelli di tale fattore. In tal modo un'eventuale interazione fra la manipolazione sperimentale e tale fattore garantisce che l'effetto ERP (differenze fra le condizioni sperimentali) non è omogeneo su tutto lo scalpo ma differente su siti di misura differenti. Per interpretare quale sia il sito o i siti nei quali l'effetto è maggiormente evidente, è quindi necessario svolgere successive analisi statistiche i termini di ANOVA o t-test con adeguate correzioni per confronti multipli sui singoli siti di misura. Uno schema di analisi di più diretta interpretazione, spesso preferito, è l'organizzazione di un sottoinsieme di siti in differenti fattori topografici ortogonali in funzione di parametri anatomici come la caudalità (siti anteriori, centrali, posteriori), la lateralizzazione (destra e sinistra) e la ventralità/dorsalità (distanza dalla linea mediale dell'encefalo). Tale strategia di analisi può essere attuata su un sottoinsieme di siti che possono essere organizzati all'interno di tali fattori ad esempio omettendo la linea centrale (Fz, Cz, Pz, Oz) per la quale non è possibile assegnare un valore alla variabile lateralizzazione e può essere analizzata in una differente ANOVA con un unico fattore topografico (longitudine). L'analisi può anche essere svolta su gruppi di elettrodi contigui, nei quali gli effetti di interesse sono omogenei, per i quali viene calcolata la media del potenziale prima di eseguire l'ANOVA, strategia utile a ridurre il numero di gradi di libertà soprattutto quando si eseguono misure a densità di siti di misura medio-alta (>32) e gli effetti non hanno una topografia estremamente localizzata. Utilizzando un disegno con multipli fattori topografici, le eventuali interazioni fra le condizioni sperimentali e i differenti fattori topografici possono essere interpretate direttamente e rendere meno importanti eventuali test svolti sui singoli canali o gruppi di canali. Ad esempio la LAN e l'N400 sono

due componenti che hanno la stessa polarità (componenti negative) e latenza (fra 300 ms e 500 ms) e si differenziano unicamente per la distribuzione topografica; in questo caso se la negatività appare massima nei siti anteriori sinistri e risulta significativa l'interazione della manipolazione sperimentale con i fattori topografici longitudine e lateralizzazione, allora la caratterizzazione dell'effetto in termini di LAN piuttosto che di N400 emerge direttamente dall'ANOVA senza rendere necessarie ulteriori analisi. Una nota di cautela relativamente all'utilizzo dell'ANOVA con dati ERP è quella relativa alle assunzioni che tali analisi statistiche richiedono e non sempre sono realizzate con dati ERP. L'ANOVA assume infatti l'omogeneità e sfericità della varianza. L'omogeneità si riferisce al fatto che la varianza nelle differenti celle sperimentali è identica, la sfericità si riferisce invece all'omogeneità della covarianza. I dati ERP per loro natura tendono tipicamente a violare entrambi gli assunti in quanto il rumore non è tipicamente omogeneo nei vari siti sia perché il rumore ambientale catturato dipende della distanza dal sito di riferimento sia perché differenti zone dello scalpo sono più o meno vicine a muscoli e occhi che producono artefatti casuali (aumentando la varianza del dato); inoltre le forme d'onda di siti vicini sono chiaramente più simili fra loro (covariano) rispetto a siti distali. L'ANOVA è relativamente solida rispetto a deviazioni dall'omogeneità, meno relativamente a deviazioni dalla sfericità. Per tale motivo è consigliato l'utilizzo di procedure di correzione dell'inomogeneità della varianza come quella di Greenhouse-Geisser (Luck 2005, p. 258).

In generale, proprio perché il potere inferenziale di un dato ERP è proporzionale a quanto il dato può essere messo in relazione con precedenti studi che hanno caratterizzato la componente da un punto di vista funzionale, la tecnica risulta essere piuttosto 'conservatrice' a innovazioni relative alle metodologie di analisi che rendono meno diretto il confronto con dati ottenuti in studi precedenti e quindi la comunità scientifica di riferimento può apparire a volte eccessivamente conservatrice soprattutto relativamente alle metodologie di analisi statistica dei dati. L'utilizzo quindi delle modalità di analisi dei dati della letteratura di riferimento per una particolare componente, eventualmente affiancate da analisi innovative, è altamente consigliato.

7. Principali componenti ERPs durante la comprensione frasale

Gli studi classici degli anni '80 e '90 del secolo scorso hanno messo in luce due principali componenti ERP relate a difficoltà di elaborazione a livello della frase: la N400 e la P600. Inizialmente si è mostrato che violazioni semantiche

come nell'esempio 1.b. mostrano una N400 rispetto alla condizione di controllo dell'esempio 1.a. (Kutas, Hillyard 1984) e violazioni sintattiche come nell'esempio 2.b. mostrano una P600 rispetto all'esempio 2.a. (Osterhout, Holcomb 1992; Hagoort, Brown, Groothusen 1993). Successivi studi hanno meglio chiarito il significato funzionale delle componenti e verificato la loro generalità relativamente a una serie di variabili del compito. Per una rassegna si veda (Kutas, Van Petten 1994 e Kutas, Van Petten, Kluender 2006).

L'N400 è una componente con polarità negativa e con latenza fra i 200 ms e 600 ms e mostra il suo massimo, in studi di comprensione frasale con presentazione visiva, attorno a 400 ms; ha un'ampia distribuzione centro-posteriore tipicamente massima attorno al vertice (Cz), bilaterale o leggermente lateralizzata a destra. Non si riscontra solo per violazioni ma la sua ampiezza modula con continuità relativamente al *fit* di una parola con il contesto fino a quel punto analizzato; si è mostrato infatti che la sua ampiezza è inversamente proporzionale alla *cloze-probability* ovvero alla probabilità che tale parola appaia in un test 'carta e penna' di completamento frasale.

Relativamente alla generalità dell'effetto, si è potuto mostrare come la componente abbia simile latenza e topografia sia che il materiale sia presentato in modalità acustica sia che venga presentato in modalità visiva.

La componente viene elicitata non solamente all'interno dell'elaborazione frasale ma anche in paradigmi di coppie di parole (priming) e può essere elicitata anche da stimoli non linguistici (disegni, suoni), mantenendo sempre la sua caratteristica, cioè che la sua ampiezza varia in funzione del fit delle caratteristiche semantiche dello stimolo con il contesto.

Anche in assenza di un contesto si sono potute misurare variazioni dell'N400: infatti alla presentazione di parole contenuto a inizio frase la sua ampiezza varia inversamente alla frequenza d'uso della parola (più una parola è rara più ampia sarà l'N400).

Alcuni studi (per es. Van Petten, Kutas 1991) hanno portato tradizionalmente ad assumere che l'N400 sia elicitata solo da parole contenuto o, alternativamente, sia estremamente depressa nell'elaborazione di parole funzione.

Ciò è coerente con un'interpretazione dell'indice in termini di accesso al significato di una parola e di integrazione/composizione dello stesso all'interno del contesto frasale. Più recentemente si sono però rilevate chiare modulazioni dell'N400 su articoli nel caso essi esprimano dei tratti che li rendono compatibili o meno con un costituente altamente atteso a quel punto della frase (Wicha *et al.* 2003; van Berkum *et al.* 2003; DeLong, Urbach, Kutas 2005).

Ad esempio DeLong, Urbach, Kutas (2005) hanno presentato frasi come al punto 9. All'interno di una frase come in 9.a. il contesto permette al lettore di anticipare «kite».

- 9.a. The day was breezy so the boy went outside to fly a kite.
 La giornata era ventosa così il ragazzo uscì fuori a far volare un aquilone.
- 9.b. The day was breezy so the boy went outside to fly an airplane.
 La giornata era ventosa così il ragazzo uscì fuori a far volare un aeroplano.

Alla presentazione dell'articolo 'an' in 9.b. (presentazione visiva parola per parola) il sistema è già in grado di determinare l'incompatibilità della continuazione con la continuazione attesa ed emerge una N400 rispetto alla presentazione dell'articolo 'a' in 9.a., compatibile invece con la continuazione attesa.

Questi e altri risultati hanno portato a sviluppare due differenti modi di guardare all'N400 (Federmeier 2007): in termini di correlato di un processo di integrazione bottom-up (*integration view*) e in termini di correlato di un processo di verifica di aspettative sviluppate in modo top-down (*prediction view*).

La P600 è invece una componente con polarità positiva con onset attorno ai 500 ms che può durare anche fino a 1200 ms con distribuzione tipicamente posteriore, massima sui siti posti sopra i lobi parietali (Pz) e visibile anche sui siti occipitali.

Tipicamente la componente è bilaterale. Inizialmente è stata rilevata per violazioni sintattiche. A seguito delle prime ricerche sulle violazioni sintattiche si è sviluppato un acceso dibattito sulla sua interpretazione funzionale fra chi la riteneva un correlato specifico dell'elaborazione sintattica (Osterhout, Hagoort 1999; Osterhout, *et al.* 1996) e chi riteneva fosse una componente cognitiva più generale, una P3b ritardata (Coulson, King, Kutas 1998; Gunter, Stowe, Mulder 1997).

Studi ERP sull'attenzione hanno mostrato come esista una componente dei potenziali evocati specificamente sensibile alla detezione di eventi rari e rilevanti per il compito, la P3b (caratterizzata da un picco positivo bilaterale massimo in zone centro-posteriori dello scalpo con latenza attorno ai 300 ms per stimoli semplici da categorizzare ma la cui latenza può essere ritardata in funzione del tempo necessario alla categorizzazione dell'evento) ed è quindi possibile una contaminazione o sovrapposizione di tale componente ai correlati specifici per i processi di elaborazione linguistica. Riguardo a ciò è interessante il dibattito sviluppatosi a seguito della individuazione del principale correlato delle violazioni sintattiche, la P600 che ha appunto polarità positiva e

topografia simile alla P3b ma latenza molto maggiore, che inizialmente è stata interpretata da alcuni autori (Coulson, King, Kutas 1998) come una P3b ritardata negandone il carattere di correlato di un processo cognitivo specifico per il linguaggio. Istruttivo, relativamente all'importanza del compito e della composizione delle liste è il dibattito sviluppatosi attorno a questa ipotesi (Osterhout, Hagoort 1999), anche in relazione al fatto che si possa avere una sovrapposizione di P600 e P3b (Osterhout *et al.* 1996). La P3b è infatti una componente attentiva che si sviluppa a seguito di svariate tipologie di stimoli, anche non linguistici, in funzione della loro rarità all'interno della sequenza di stimoli e della rilevanza della caratteristica che li rende rari all'interno di processi di categorizzazione rilevanti per il compito assegnato. La lettura dei lavori originali (Osterhout, Hagoort 1999 e riferimenti ivi citati) è particolarmente istruttiva per comprendere in che modo si sviluppa l'interpretazione funzionale di una componente ERP in base alle risultanze di esperimenti specificamente pensati a tale scopo.

Queste ed altre ricerche hanno comunque mostrato come l'ampiezza della componente P600, anche a causa della possibile sovrapposizione di altre positività tardive (P3b e *slow wave*), è sensibile al compito (più ampia quando a seguito della presentazione di una frase è richiesto un giudizio metalinguistico rispetto a lettura attenta con domande di comprensione) e alla proporzione di frasi corrette e di frasi contenenti violazioni all'interno della lista sperimentale; di qui la prescrizione per esperimenti di questo tipo ad utilizzare dei filler e bilanciare sempre il numero di frasi corrette e contenenti violazioni.

Successivi studi hanno mostrato come la P600 possa essere elicitata, oltre che da violazioni di accordo, anche da altri tipi di difficoltà di elaborazione sintattica quali continuazioni non preferite o manipolazioni della complessità sintattica (De Vincenzi, Di Matteo 2004, Capitolo 4) e di ruoli tematici (Kuperberg 2007).

A differenza della N400 pare essere una componente caratteristica dell'elaborazione frasale: interessante a tale rispetto è lo studio di Barber e Carreiras (2005), che riguarda violazioni di numero e di genere grammaticale in coppie di parole in spagnolo come, ad esempio, *el-piano (il-pianoforte) o faro-alto (faro-alto)*.

Se presentate all'interno di un compito di comprensione frasale, queste violazioni elicitano una P600 (preceduta da una LAN) mentre se presentate con identica modalità in isolamento con un compito di giudizio metalinguistico di grammaticalità elicitano una N400 (vedi Figura 6). Alcuni studi hanno suggerito che la P600 possa essere 'scomposta' in due sotto-componenti, una più precoce e distribuita anche sui siti centrali e frontali, l'altra più tardiva e

più chiaramente distribuita sui siti posteriori. Tentativi di caratterizzare chiaramente il significato funzionale di tali sotto-componenti non hanno ad oggi raggiunto una sufficiente convergenza fra gli studiosi (si veda Molinaro, Barber, Carreiras 2011 e i riferimenti ivi contenuti).

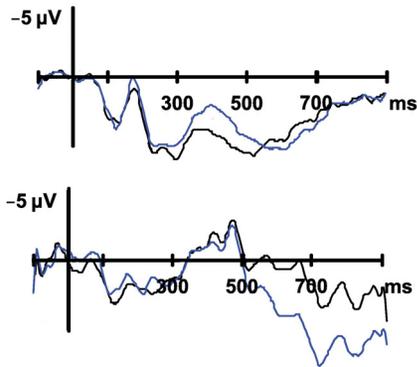


Figura 6. N400 e P600 in Barber, Carreiras

Oltre alla P600 un'ulteriore componente che viene elicitata da violazioni sintattiche è la LAN: una componente negativa con latenza molto simile alla N400, quindi con un picco fra i 350 ms e i 450 ms dalla presentazione della parola che realizza la violazione sintattica, essa si distingue dalla N400 per la sua distribuzione topografica che è anteriore e tipicamente più ampia sui siti di sinistra rispetto a quelli di destra.

L'ampiezza di tale componente è molto inferiore rispetto alla P600 e la sua topografia non è sempre così chiaramente lateralizzata a sinistra, apparendo a volte bilaterale o addirittura lateralizzata a destra. In alcuni casi la topografia di effetti negativi fra 300 ms e 500 ms non permette una chiara classificazione dell'effetto fra N400 e LAN.

Per una recente rassegna degli studi che hanno analizzato i correlati di violazioni di accordo con particolare attenzione alla variabilità di insorgenza e topografia della LAN, si veda Molinaro, Barber, Carreiras (2011).

Un ulteriore elemento di variabilità all'interno di tali negatività anteriori sinistre è legato alla latenza: se per violazioni di accordo la LAN si presenta come detto con latenza simile all'N400 per violazioni di struttura sintagmatica (come nel già citato esempio 8) si sono evidenziate negatività anteriori sinistre molto più precoci, anche 150 ms dalla presentazione della parola (Neville *et al.* 1991). Una violazione di struttura sintagmatica è operativamente definita come

una violazione per la quale all'interno della sequenza di parole che costituisce la frase, non è solo la parola presentata a non consentire una continuazione grammaticale in una data lingua, ma nemmeno nessun'altra parola di quella categoria grammaticale (nome, verbo, determinante, preposizione, etc.). Stante che la differenza fra una violazione di accordo e di struttura sintagmatica è qualitativa, si è preferito denominare tale componente in modo distinto: *eLAN* (*early Left Anterior Negativity*). Il fatto che tale effetto preceda chiaramente effetti semantico-lessicali (N400) è stato utilizzato come un forte argomento a favore dei modelli *syntax-first*, si veda sull'argomento il volume De Vincenzi e Di Matteo (2004, Capitolo 2). Le evidenze a favore di tali effetti precoci sono stati molto criticati dal punto di vista metodologico e in particolare il recente lavoro di Steinhauer e Drury (2012) rende difficile considerare ad oggi le evidenze empiriche relative alla *eLAN* scevre da seri dubbi sia di carattere empirico che teorico.

La LAN è stata tradizionalmente interpretata come un indice della detezione da parte del sistema cognitivo di una violazione di accordo (De Vincenzi, Di Matteo 2004; Friederici 2002; Bornkessel, Schlesewsky 2006). Alcuni autori (ad esempio Kluender, Kutas 1993) hanno proposto un'interpretazione differente, associando tale negatività anteriore sinistra a un maggior carico di memoria di lavoro. Le due interpretazioni non sono assolutamente incompatibile in quanto, soprattutto nell'ambito dei modelli *garden-path* di comprensione frasale, materiale non strutturato sintatticamente richiede uno sforzo di memoria di lavoro per essere conservato. In tale dibattito alcuni autori hanno comunque suggerito la possibilità che negatività anteriori sinistre legate a carico di memoria di lavoro e alla detezione di violazioni sintattiche abbiano caratteristiche differenti (Fiebach *et al.* 2002). Molinaro, Barber e Carreiras (2011) hanno analizzato nel dettaglio le differenze nella topografia delle negatività fra 300 ms e 500 ms (LAN e/o N400) elicitate in un numero di studi che hanno analizzato violazioni di accordo, giungendo a proporre che la LAN è stabilmente elicitata da violazioni di accordo per le quali i tratti siano esplicitamente espressi in termini morfologici, suggerendo un'interpretazione della LAN più propriamente legata all'elaborazione morfosintattica.

Altre componenti o effetti ERP di interesse nell'ambito della comprensione frasale sono quelle caratteristiche dell'elaborazione di parole funzione che tipicamente non elicitano N400 (Van Petten, Kutas 1991) se non in contesti ove predizioni relative a successive parole contenuto rendono poco probabile un dato tratto espresso dal lessico funzionale (per esempio Wicha *et al.* 2003).

Per parole funzione si è individuata una risposta bifasica composta di due successive negatività lateralizzate a sinistra: una prima con latenza attorno a

280 ms è denominata N280 (Neville, Mills, Lawson 1992) o *lexical processing negativity*, LPN (King, Kutas 1998; Kutas 1997), ed è stata associata alla difficoltà nell'accesso lessicale all'interno del lessico funzionale, una seconda negatività sostenuta che si mantiene fino alla presentazione della parola successiva, denominata N400-700 (Van Petten, Kutas 1991) è stata associata (Brown, Haagoort, ter Keurs 1999) a processi di aspettativa (solitamente correlati a negatività denominate CNV, *contingent negativity variation*) relativi alla parola contenuta successiva in lingue con ordine testa-complemento. Interessante in tale contesto è lo studio di Molinaro *et al.* (2008) che ha mostrato come in violazioni all'interno di complessi preposizionali come in (10) si assiste ad una riduzione dell'N400-700 alla parola *per* in 10.b. rispetto al controllo *di* in 10.a. ma non della precedente LPN.

10.a. Esistono molte prove a sostegno di quella ipotesi.

10.b. * Esistono molte prove a sostegno per quella ipotesi.

Un ulteriore importante ambito di applicazione degli ERP nello studio dell'elaborazione frasale ha analizzato effetti di coerenza a livello del discorso (ad esempio Burkhardt 2006; Van Berkum 2008). All'interno di questa breve rassegna accenno unicamente a una componente denominata *Nref* con onset attorno a 400 ms e di ampia durata, con distribuzione anteriore bilaterale, che emerge nel caso di ambiguità di un riferimento a livello del discorso. Ad esempio una frase come 'Il preside ha detto al docente' mostra una ampia *Nref* elicitata dalla parola docente se nel contesto del discorso sono presenti due docenti (ambiguità del riferimento) relativamente al caso nel quale ne sia presente uno solo (Nieuwland, Otten, Van Berkum 2007). La relazione fra tali negatività frontali sostenute ed altri effetti di questo tipo già riscontrati in letteratura (King, Kutas 1995; Ferretti, Schwint, Katz 2007) richiede a mio avviso ulteriori approfondimenti per chiarirne nel dettaglio il significato funzionale.

Recenti sviluppi hanno reso più complessa la chiara dicotomia delle origini fra N400 come correlato dell'elaborazione semantica e P600 (preceduta da LAN) e reso quindi più complesso assegnare una chiara interpretazione funzionale alle componenti. Un esempio è legato alle P600 elicitate dalle violazioni di semantic reversal o di inversione dei ruoli tematici (Kim, Osterhout 2005; Kolk *et al.* 2003; Kuperberg *et al.* 2003; Kuperberg 2007). Nello studio di Kim e Osterhout (2005), a seguito della presentazione della parola «devouring» nell'esempio 11.a. qui riportato per comodità, emerge una P600 relativamente ai controlli 11.b. e 11.c. senza che tale effetto, tradizionalmente interpretato come correlator di difficoltà di elaborazione sintattica, sia preceduto da una N400 e ciò nonostante la frase sia grammaticalmente corretta.

- 11.a. * The hearty meal was devouring the kids.
 Il sostanzioso pasto stava divorando i bambini.
- 11.b. The hearty meal was devoured by the kids.
 Il sostanzioso pasto era divorato dai bambini.
- 11.c. The hungry boy was devouring the cookies.
 L'affamato ragazzo stava divorando i biscotti.

Un differente esempio, sempre legato all'assegnazione dei ruoli tematici, viene da completamenti non preferiti come negli esempi in strutture tedesco con verbo finale e argomenti (nomi propri e plurali senza articolo) ambigui per l'assegnazione del caso tematico studiate da Bornkessel *et al.* (2004). Le continuazioni negli esempi 12.a. e 12.c. sono preferite in funzione della strategia di assegnare il ruolo di soggetto al primo argomento (Maria), mentre per gli esempi 12.b. e 12.c. (entrambe grammaticali ma marcate in tedesco) il numero del verbo, che accorda con il secondo elemento, forza a una revisione della struttura. Se il confronto fra le forme d'onda ERP elicitate dal verbo finale in 12.b. rispetto a 12.a. mostrano, come atteso, una P600, il contrasto della condizione 12.d. rispetto a 12.c. elicitava una N400. Il risultato, sorprendente in quanto in entrambi i casi si hanno frasi grammaticali non preferite e ci si poteva dunque attendere un analogo processo di revisione strutturale, è spiegato dagli autori all'interno di un articolato modello (Bornkessel, Schlesewsky 2006), assumendo che la revisione avvenga tramite processi distinti in funzione delle proprietà argomentali del verbo: «establish agreement» (12.b., P600) versus «compute linking» (12.d., N400).

- 12.a. ... dass Maria Sängerinnen besucht ... (SO acc)
 ... che MariaAMB.SG cantantiAMB.PL visitaACC.SG
 '... che Maria visita le cantanti'
- 12.b. ... dass Maria Sängerinnen besuchen ... (OS acc)
 ... che MariaAMB.SG cantantiAMB.PL visitanoACC.PL
 '... che le cantanti visitano Maria'
- 12.c. ... dass Maria Sängerinnen flogt ... (SO dat)
 ... che MariaAMB.SG cantantiAMB.PL segueACC.SG
 '... che Maria seguì (al)le cantanti'
- 12.d. ... dass Maria Sängerinnen flogen ... (OS dat)
 ... che MariaAMB.SG cantantiAMB.PL seguonoACC.PL
 '... che le cantanti seguirono (a) Maria'

La relazione P600-sintassi e N400-semanticità è messa dunque in crisi da queste osservazioni, legate soprattutto all'elaborazione della struttura tematica dei

verbi e della relazione fra il verbo e i suoi argomenti. Questa crisi è dovuta in parte a una divisione troppo schematica e superficiale fra i costrutti linguistici di semantica e sintassi soprattutto nell'elaborazione dei verbi, dove le interconnessioni fra restrizioni semantico-lessicali e struttura sono particolarmente complesse. L'attuale rielaborazione del significato funzionale delle componenti ERP legate all'elaborazione frasale, si vedano ad esempio i lavori di Brouwer, Fitz, Hoeks (2012), Lau, Philipps e Poeppel (2008), Kutas, Federmeier (2010), Bornkessel-Schlesewsky *et al.* (2011), rende ancor più interessante il fatto empirico che in funzione di differenti tipologie di difficoltà di elaborazione durante il processo di comprensione frasale il sistema cognitivo attiva moduli neurocognitivi differenti, indicizzati negli ERP dalle componenti con differente polarità, latenza e distribuzione topografica. L'interpretazione di tali deflessioni in termini di specifici processi rimane quindi una risorsa e al contempo una sfida per tutti i modelli cognitivi di comprensione frasale.

Bibliografia

- Baayen R.H., D.J. Davidson, D.M. Bates (2008), *Mixed-effects modeling with crossed random effects for subjects and items*, «Journal of Memory and Language», 59, pp. 390-412.
- Barber H., M. Carreiras (2005), *Grammatical Gender and Number Agreement in Spanish: An ERP Comparison*, «Journal of Cognitive Neuroscience», 17(1), pp. 137-153.
- Berg P., M. Scherg (1989), *Dipole models of eye-movements and blink artifacts*, «Psychophysiology», 23, pp. 354-364.
- Berger H. (1929), *Über das Elektroencephalogramm des Menschen*, «Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheit», 87, pp. 555-574.
- Birbaumer N., T. Elbert, A.G.M. Canavan, B. Rockstroh (1990), *Slow potentials of the cerebral cortex and behavior*, «Physiological Reviews», 70, pp. 1-41.
- Bornkessel I., B. McElree, M. Schlewsky, A.D. Friederici (2004), *Multi-dimensional contributions to garden path strength: Dissociating phrase structure from case marking*, «Journal of Memory and Language», 51, pp. 495-522.
- Bornkessel I., M. Schlewsky (2006), *The extended argument dependency model: A neurocognitive approach to sentence comprehension across languages*, «Psychological Review», 113, pp. 787-821.
- Bornkessel-Schlewsky I., F. Kretzschmar, S. Tune, L. Wang, S. Genç, M. Philipp, D. Roehm, M. Schlewsky (2011), *Think globally: Cross-linguistic*

- variation in electrophysiological activity during sentence comprehension*, «Brain and Language», 117, pp. 133-152.
- Brouwer F., J. Hoeks (2012), *Getting real about Semantic Illusions: Rethinking the functional role of the P600 in language comprehension*, «Brain Research», 1446, pp. 277-293.
- Brown C. M., P. Hagoort, M. ter Keurs (1999). *Electrophysiological signatures of visual lexical processing: Open- and closed-class words*, «Journal of Cognitive Neuroscience», 11, pp. 261-281.
- Burkhardt P. (2006), *Inferential Bridging Relations Reveal Distinct Neural Mechanisms: Evidence from Event-Related Brain Potentials*, «Brain and Language», 98(2), pp. 159-168.
- Cacioppo J.T., L.G. Tassinary, G.G. Brentson (2007³), *Psychophysiological science: Interdisciplinary approaches to classic questions about the mind*, in J.T. Cacioppo, L.G. Tassinary, G.G. Brentson (eds.), *Handbook of Psychophysiology*, New York, Cambridge Academic Press, pp. 1-18.
- Caffarra S. (2008), *Comprendere un enunciato negativo: indagine tramite potenziali evocati sull'elaborazione on-line della negazione*, Tesi di Laurea in Psicologia Clinica, Facoltà di Psicologia, Università degli Studi di Padova.
- Coulson S., J. King, M. Kutas (1998), *Expect the unexpected: Event-related brain responses to morphosyntactic violations*, «Language and Cognitive Processes», 13, pp. 21-58.
- De Vincenzi M., R. Job, R. Di Matteo, A. Angrilli, B. Penolazzi, L. Ciccarelli, F. Vespignani (2003), *Differences in the perception and time course of syntactic and semantic violations*, «Brain and Language», 85, pp. 280-296.
- De Vincenzi M., R. Di Matteo (2004), *Come il cervello comprende il linguaggio*, Bari, Laterza.
- DeLong K.A., T.P. Urbach, M. Kutas (2005), *Probabilistic word pre-activation during language comprehension inferred from electrical brain activity*, «Nature Neuroscience», 8, pp. 1117-1122.
- Delorme A., S. Makeig (2004), *EEGLAB: An open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics*, «Journal of Neuroscience Methods», 134, pp. 9-21.
- Federmeier K.D. (2007), *Thinking ahead: The role and roots of prediction in language comprehension*, «Psychophysiology», 44, pp. 491-505.
- Ferretti T.R., C.A. Schwint, A.N. Katz (2007), *Electrophysiological and Behavioral Measures of the Influence of Literal and Figurative Contextual Constraints on Proverb Comprehension*, «Brain and Language», 101, pp. 38-49.
- Fiebach C.J., M. Schlesewsky, A.D. Friederici (2002), *Separating syntactic memory costs and syntactic integration costs during parsing: The processing of German WH-questions*, «Journal of Memory and Language», 47(2), pp. 250-272.

- Friederici A.D. (2002), *Towards a neural basis of auditory sentence processing*, «Trends in Cognitive Sciences», 6(2), pp. 78-84.
- Frazier L., C. Clifton Jr. (1996), *Construal*, Cambridge (MA), MIT Press.
- Gunter T.C., L.A. Stowe, G. Mulder (1997), *When syntax meets semantics*, «Psychophysiology», 34, pp. 660-676.
- Gratton G., M.G.H. Coles, E. Donchin (1985), *A new method for the off-line removal of ocular artifact*, «Electroencephalography and Clinical Neurophysiology», 55, pp. 468-484.
- Hagoort P., C. Brown, J. Groothusen (1993), *The syntactic positive shift (SPS), as an ERP measure of syntactic processing*, «Language and Cognitive Processes», 8, pp. 439-483.
- Jasper H.H. (1958), *The ten–twenty electrode system of the International Federation*, «Electroencephalogr Clin Neurophysiol», 10, pp. 367-380.
- Jung T.P., S. Makeig, C. Humphries, T.W. Lee, M.J. McKeown, V. Iragui, T.J. Sejnowski (2000), *Removing Electroencephalographic Artifacts by Blind Source Separation*, «Psychophysiology», 37, pp. 163-78.
- Jurcak V., D. Tsuzuki, I. Dan (2007), *10/20, 10/10, and 10/5 systems revisited: Their validity as relative head-surface-based positioning systems*, «Neuroimage», 34, pp. 1600-1611.
- Just M.A., P.A. Carpenter (1980), *A theory of reading: From eye fixations to comprehension*, «Psychological Review», 85, pp. 109-130.
- Kappenman E.S. , S.J. Luck, (2010), *The effects of electrode impedence on data quality and statistical significance in ERP recordings*, «Psychophysiology», 47, pp. 888-904.
- Kim A., L. Osterhout (2005), *The independence of combinatory semantic processing: Evidence from event-related potentials*, «Journal of Memory and Language», 52, pp. 205-225.
- King J., M. Kutas, (1992), *ERPs to sentences varying in syntactic complexity for good and poor comprehenders*, «Psychophysiology», 29(4A), S44.
- King J.W., M. Kutas (1995), *Who did what and when? Using word- and clause-level ERPs to monitor working memory usage in reading*, «Journal of Cognitive Neuroscience», 7(3), pp. 376-395.
- King W.K., M. Kutas (1998), *Neural plasticity in the dynamics of human visual word recognition*, «Neuroscience Letters», 244, pp. 61-64.
- Kluender R., M. Kutas (1993), *Bridging the gap: Evidence from ERPs on the processing of unbounded dependencies*, «Journal of Cognitive Neuroscience», 5(2), pp. 196-214.

- Kolk H.H.J., D.J. Chwilla, M. van Herter, P.J.W. Oor (2003), *Structure and limited capacity in verbal working memory: A study with event-related potentials*, «Brain and Language», 85, pp. 1-36.
- Kuperberg G.R., T. Sitnikova, D. Caplan, P. Holcomb (2003), *Electrophysiological distinctions in processing conceptual relationships within simple sentences*, «Cognitive Brain Research», 17, pp. 117-129.
- Kuperberg G.R. (2007), *Neural mechanisms of language comprehension: Challenges to syntax*, «Brain Research», 1146, pp. 23-49.
- Kutas M., S.A. Hillyard (1984), *Brain potentials during reading reflect word expectancy and semantic association*, «Nature (London)», 307, pp. 161-163.
- Kutas M., T.E. Lindamood, S.A. Hillyard (1984), *Word expectancy and event-related brain potentials during sentence processing*, in Kornblum S., J. Requin (eds.), *Preparatory states and processes*, Hillsdale (NJ), Erlbaum, pp. 217-237.
- Kutas M., C. Van Petten (1994), *Psycholinguistics electrified: Event-related brain potential investigations*, in Gernsbacher M.A. (ed.), *Handbook of Psycholinguistics*, San Diego (CA), Academic Press, pp. 83-143.
- Kutas M. (1997), *Views on how the electrical activity that the brain generates reflects the functions of different language structure*, «Psychophysiology», 34, pp. 383-398.
- Kutas M., A. Dale (1997), *Electrical and magnetic reading of mental functions*, in Rugg M.D., *Cognitive Neuroscience*, Cambridge (MA), MIT Press.
- Kutas M., K.D. Federmeier (2011), *Thirty years and counting: Finding meaning in the N400 component of the event related brain potential (ERP)*, «Annual Review of Psychology», 62, pp. 621-647.
- Kutas M., C. Van Petten, R. Kluender (2006²), *Psycholinguistics electrified II: 1994-2005*, in Traxler M., M.A. Gernsbacher (eds.), *Handbook of Psycholinguistics*, New York, Elsevier, pp. 659-724.
- Lau E.F., C. Phillips, D. Poeppel, (2008), *A cortical network for semantics: (de)constructing the N400*, «Nature Reviews Neuroscience», 9(12), pp. 920-933.
- Luck S.J. (2005), *An Introduction to the event-related potential technique*, Cambridge (MA), MIT Press.
- Malmivuo J., R. Plonsey (1995) *Bioelectromagnetism-Principles and Applications of Bioelectric and Biomagnetic Fields*, New York, Oxford University Press, [online], URL: <<http://www.bem.fi/book>>, [ultimo accesso: 25/09/2013].
- Metting van Rijn A.C., A. Peper, C.A. Grimbergen (1990), *High quality recording of bioelectric events. I: Interference reduction, theory and practice*, «Med & Biol Eng & Comput 1990», 28, pp. 389-397.
- Miller G.A., W. Lutzenberger, T. Elbert (1991), *The linked-reference issue in EEG and ERP recording*, «Journal of Psychophysiology», 5, pp. 273-276.

- Michel C.M., M. Murray, G. Lantz, S. Gonzalez, R. Grave de Peralta (2004), *EEG Source Imaging*, «Clinical Neurophysiology», 115, pp. 2195-2222.
- Mitchel D.C. (2004), *On-line methods in language processing: Introduction and historical review*, in Carreiras M., C. Clifton Jr., *The on-line study of sentence comprehension: Eyetracking, ERPs and beyond*, New York (NY), Psychological Press, pp. 15-32.
- Molinaro N., F. Vespignani, P. Canal, S. Fonda, C. Cacciari (2008), *Cloze probability does not only affect N400 amplitude: The case of complex prepositions*, «Psychophysiology», 45, pp. 1008-1012.
- Molinaro N., H.A. Barber, M. Carreiras (2011), *Grammatical agreement processing in reading: ERP findings and future directions*, «Cortex», 47, pp. 908-930.
- Neville H., J.L. Nicol, A. Barss, K.I. Forster, M.F. Garrett (1991), *Syntactically based sentence processing classes: Evidence from event-related brain potentials*, «Journal of Cognitive Neuroscience», 3(2), pp. 151-165.
- Neville H.J., D.L. Mills, D.S. Lawson (1992), *Fractionating language: Different neural subsystems with different sensitive periods*, «Cerebral Cortex», 2, pp. 244-258.
- Nieuwland M.S., M. Otten, J.J.A. Van Berkum (2007²), *Who are you talking about? Tracking discourse-level referential processing with event-related brain potentials*, «Journal of Cognitive Neuroscience», 19(2), pp. 228-236.
- Nunez P.L., R. Srinivasan (2006), *Electric Fields in the brain*, New York (NY), Oxford University Press.
- Oostenveld R., P. Fries, E. Maris, J. Schoffelen (2011), *FieldTrip: Open Source Software for Advanced Analysis of MEG, EEG, and Invasive Electrophysiological Data*, «Computational Intelligence and Neuroscience», doi: 10.1155/2011/156869.
- Osterhout L., P.J. Holcomb (1992). *Event-related brain potentials elicited by syntactic anomaly*, «Journal of Memory and Language», 31, 785-806.
- Osterhout L., L.A. Mobley (1995), *Event-related brain potentials elicited by failure to agree*, «Journal of Memory and Language», 34, pp. 739-773.
- Osterhout L., R. McKinnon, M. Bersick, V. Corey (1996), *On the language-specificity of the brain response to syntactic anomalies: Is the syntactic positive shift a member of the P300 family?*, «Journal of Cognitive Neuroscience», 8, pp. 507-526.
- Osterhout L., P. Hagoort (1999), *A Superficial Resemblance Does Not Necessarily Mean You Are Part of the Family: Counterarguments to Coulson, King and Kutas (1998)*, in the *P600/SPS-P300 Debate*, «Language and Cognitive Processes», 14(1), pp. 1-14.

- Osterhout L. (2000), *On space, time and language: For the next century, timing is (almost) everything*, «Brain and Language», 71, pp. 175-177.
- Osterhout L., J. McLaughlin, A. Kim, R. Greenwald, K. Inoue (2004), *Sentences in the brain: Event related potentials as real time reflections of sentence comprehension and language learning*, in Carreiras M., J. Clifton (eds.), *The on-line study of sentence comprehension: Eye-tracking. ERP and Beyond*, London-New York, Psychology Press.
- Pennisi P., M. Sarlo (1998), *Indici elettrofisiologici in psicologia*, Padova, CLEUP Editrice.
- Picton T.W., S. Bentin, P. Berg, E. Donchin, S.A. Hillyard, R. Johnson Jr., (2000), *Guidelines for using human event-related potentials to study cognition: Recording standards and publication criteria*, «Psychophysiology», 37, pp. 127-152.
- Pfurtscheller G., F.H. Lopes da Silva (1999), *Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: Basic principles*, «Clinical Neurophysiology», 110, pp. 1842-1857.
- Steinhauer K., J.E. Drury (2012), *On the early left-anterior negativity (ELAN) in syntax studies*, «Brain and Language», 120, pp. 135-162, doi: 10.1016/j.bandl.2011.07.001.
- Tanner D., K. Inoue, L. Osterhout (2013) (in press), *Brain-based individual differences in on-line L2 sentence comprehension*, «Bilingualism: Language and Cognition», 16, pp. 367-382.
- Todd C.H. (2005), *Event Related Potentials, a method handbook*, Cambridge (MA), MIT Press.
- Van Berkum J.J.A., P. Zwitserlood, P. Hagoort, C.M. Brown (2003), *When and how do listeners relate a sentence to the wider discourse? Evidence from the N400 effect*, «Cognitive Brain Research», 17, pp. 70-718.
- Van Berkum J.J.A. (2008), *Understanding sentences in context: What brain waves can tell us*, «Current Directions in Psychological Science», 17(6), pp. 376-380.
- Van Petten C., M. Kutas (1991), *Influences of semantic and syntactic context on open- and closed-class words*, «Memory and Cognition», 19, pp. 95-112.
- Weckerly J., M. Kutas (1999), *An electrophysiological analysis of animacy effects in the processing of object relative sentences*, «Psychophysiology», 36, pp. 559-570.
- Wicha N.Y., E.A. Bates, E.M. Moreno, M. Kutas (2003), *Potato not pope: Human brain potentials to gender expectation and agreement in Spanish spoken sentences*, «Neuroscience Letters», 346, pp. 165-168.

Il contributo della stimolazione cerebrale alla comprensione dell'organizzazione del linguaggio

Zaira Cattaneo,¹ Joseph T. Devlin,² Carlotta Lega,¹ Tomaso Vecchi³

¹Università degli Studi di Milano-Bicocca, ²University of Oxford,

³Università degli Studi di Pavia

1. La stimolazione magnetica transcranica (TMS)

La TMS si basa sull'applicazione di un campo magnetico sullo scalpo mediante una bobina (*coil*). Grazie al fenomeno dell'induzione magnetica descritto per la prima volta da Faraday nel 1831, il tessuto neuronale sottostante il *coil* è soggetto a un flusso di corrente che provoca la depolarizzazione neuronale; tale attività elettrica modula quindi temporaneamente l'attività cerebrale della regione stimolata (Jahanshahi, Rothwell 2000; Pascual-Leone *et al.* 2000). La stimolazione introduce un rumore transiente – una sorta di 'lesione virtuale' – nell'elaborazione neurale che sta avvenendo: ciò si traduce in reazioni osservabili a livello comportamentale. Per esempio, se viene stimolata un'area che è necessaria all'esecuzione di un compito in atto, la stimolazione può tradursi a livello comportamentale in tempi di risposta più lunghi o in un maggior numero di errori nel compito (Pascual-Leone *et al.* 1999; Walsh, Rushworth 1999); questo di fatto suggerisce una relazione causale tra la regione che viene stimolata e il compito comportamentale che è eseguito.

Affinché la stimolazione di un'area che ha un ruolo critico in un determinato compito porti a un cambiamento effettivo nel livello di prestazione è necessario che:

- a. il *coil* sia posizionato correttamente per stimolare il sito desiderato;
- b. la stimolazione sia data al momento giusto;
- c. la stimolazione sia sufficientemente intensa da introdurre un 'rumore' nell'elaborazione dell'informazione che avviene in quell'area.

Quindi, il primo problema da un punto di vista pratico consiste proprio nell'individuare un'area target; il posizionamento del *coil* può essere fatto sulla base di criteri funzionali, anatomici o euristici. La localizzazione funzionale prevede di spostare il *coil* in vari punti all'interno di un'area predefinita fino a quando non si trova un effetto: ad esempio, la corteccia motoria e visiva primaria possono essere localizzate cercando la posizione del *coil* ottimale per produrre rispettivamente l'attivazione dei muscoli della mano controlaterale (Rossini *et al.* 1994) o la visione di fosfeni (i.e., 'qualia' visivi/*flashes* di luce che si percepiscono generalmente a occhi chiusi quando viene stimolata la corteccia visiva) (Ro *et al.* 2003; Ro *et al.* 2004; Boyer *et al.* 2005). Una volta osservato l'effetto della TMS, il sito viene segnato e usato per i test successivi (Guogh *et al.* 2005). Alternativamente la localizzazione anatomica si basa sull'utilizzo di immagini strutturali ad alta risoluzione (risonanze magnetiche anatomiche), il posizionamento del *coil* avviene quindi basandosi sull'anatomia corticale di ciascun soggetto. Infine, si può adottare un approccio di tipo euristico: in questo caso è possibile utilizzare un set di coordinate standardizzate, ovvero il sistema Internazionale 10-20, comunemente utilizzato per il posizionamento degli elettrodi negli studi ERP (Drager *et al.* 2004). In alternativa la localizzazione si può eseguire riferendosi a punti craniometrici standard, come il *vertex* (i.e., il centro della testa), l'*inion* (i.e., la protuberanza occipitale esterna che si percepisce toccando la parte posteriore della testa) o il *nasion* (i.e., il punto centrale sopra il naso) (Stewart *et al.* 2001b).

Il secondo problema riguarda l'individuare il momento giusto per la stimolazione. Quando si è certi che un'area intervenga in un determinato compito in un momento preciso (per es. 100 millisecondi dopo la comparsa di uno stimolo), allora è possibile erogare un impulso singolo di TMS esattamente nel momento critico. Tuttavia, se non si hanno – come spesso succede – ipotesi temporali precise rispetto a quando un'area è coinvolta in un certo compito, un approccio possibile è quello di utilizzare un singolo impulso a diversi intervalli di tempo, per vedere quale è la finestra temporale più efficace nel portare a una modifica del comportamento, oppure di utilizzare la TMS ripetitiva (rTMS), che consiste nell'applicazione di una sequenza di impulsi di breve durata che consentono di 'coprire' un intervallo temporale più lungo e quindi aumentano la probabilità di interferire con quell'area nel momento in cui essa diventa importante per il compito. Molto spesso, per indagare la causalità e il timing di un'area, inizialmente si stabilisce se una certa area è necessaria all'esecuzione di un compito mediante rTMS (larga finestra temporale), e poi si esegue uno studio di cronometria mediante impulso singolo per stabilire in quale intervallo temporale tale area è necessaria. Quando la stimolazione viene data, come nei

casi sopra descritti, durante l'esecuzione del compito si parla di paradigmi on-line. Nei paradigmi off-line invece un'area viene stimolata con TMS ripetitiva (a basse frequenze, generalmente 1 Hz, e per un periodo prolungato, anche per 10-20 minuti) prima dell'esecuzione di un compito (Walsh, Pascual-Leone 2003).

Infine, quando l'area di stimolazione è stata correttamente identificata, è necessario che essa sia sufficientemente forte da indurre una risposta fisiologica. Non esiste un metodo sistematico per determinare a priori l'intensità appropriata. Spesso si utilizza un'intensità di stimolazione fissa (per es. il 65-70% della potenza massima dello stimolatore). In alternativa, è possibile stimare l'intensità di stimolazione per ciascun soggetto ricorrendo a misure osservabili quali la produzione di movimenti della mano che segue la stimolazione della corteccia motoria o la percezione di fosfeni che segue (anche se non in tutti i soggetti) la stimolazione della corteccia visiva. Nel primo caso si misura quindi la soglia motoria individuale (MT o *motor threshold*), che viene stabilita in maniera approssimativa come il livello di stimolazione necessario a elicitare un movimento osservabile nei muscoli della mano il 50% delle volte (ad es., per 10 stimoli di TMS il movimento deve essere osservato almeno 5 volte), oppure con criteri più precisi utilizzando l'elettromiogramma (Wassermann *et al.* 1999). Nel secondo caso si misura la soglia dei fosfeni, utilizzando il criterio approssimativo descritto per la soglia motoria (i.e., intensità tale che su 10 impulsi 5 portano alla percezione di fosfeni). Tuttavia, questo criterio non risulta sempre così affidabile se si stimola fuori dalle aree motorie e visive (Stewart *et al.* 2001b), in quanto ogni regione dello scalpo si caratterizza per un diverso spessore dei tessuti e per un diverso orientamento dei neuroni sottostanti, e quindi risponde diversamente a una stimolazione di uguale intensità. A riprova di ciò, basti pensare che non vi è una relazione sistematica tra la soglia motoria e la soglia dei fosfeni.

Nel valutare gli effetti della stimolazione, vale la pena precisare che una lesione virtuale si manifesta prevalentemente con un aumento dei tempi di risposta più che agire sull'accuratezza di un compito, come avviene invece per i pazienti con una reale lesione cerebrale. Infatti, la TMS non 'disattiva' una regione come può fare una lesione, ma piuttosto causa una scarica temporanea nei neuroni che produce un 'rumore' durante l'elaborazione dell'informazione; a questo punto l'informazione che rimane intatta è sufficiente per prevalere sul rumore, ma questo processo richiede più tempo e si manifesta con tempi di reazione più lenti. Inoltre, il termine 'lesione virtuale' è parzialmente fuorviante, in quanto la TMS può anche potenziare una regione, 'preattivandola', determinando quindi una reazione di facilitazione del compito. Per esempio, in un compito di denominazione di immagini, Mottaghy *et al.* (1999) hanno

riscontrato che una stimolazione con rTMS a 20 Hz per 2 secondi sull'area di Wernicke diminuisce la latenza di denominazione (non inficiando l'accuratezza). Il fatto che né l'accuratezza né i tempi di reazione fossero influenzati dalla stimolazione dell'area di Broca o della corteccia visiva ha portato a ipotizzare che una stimolazione a bassa intensità 'preattiva' l'area di Wernicke, dimostrando un suo coinvolgimento nel compito di denominazione.

Infine, un aspetto rilevante da tenere in considerazione quando si decide di intraprendere uno studio di TMS è di scegliere la 'baseline' corretta. La TMS può, infatti, aumentare l'*arousal* generale del cervello attraverso meccanismi di facilitazione intersensoriale (per es. il 'click' associato alla stimolazione può rendere i soggetti più veloci); questi effetti non specifici sono piuttosto comuni (Flitman *et al.* 1998; Kohler *et al.* 2004; Nixon *et al.* 2004; Shapiro *et al.* 2001; Wasserman *et al.* 1999) e potenzialmente problematici poiché possono nascondere effetti specifici. In questo caso non basta una condizione senza stimolazione per valutare quanto l'effetto trovato stimolando una certa area sia specifico o aspecifico. Infatti, gli effetti inibitori possono risultare molto deboli se confrontati con una condizione senza stimolazione, ma apparire molto più chiari se confrontati invece con un sito di controllo o con una stimolazione *sham*, ovvero una stimolazione 'finta', di controllo, che si ottiene per esempio girando il *coil* di 90° rispetto allo scalpo: così facendo il soggetto sente il contatto del *coil* sullo scalpo, ne sente il 'click' e avverte anche una leggera stimolazione superficiale legata all'impulso, ma la stimolazione non è effettiva in quanto il campo magnetico è indirizzato fuori dallo scalpo.

Come ogni altra tecnica in uso nelle neuroscienze cognitive, la TMS offre vantaggi e svantaggi. In termini pratici, l'uso della TMS permette di ovviare ad alcune problematiche tipicamente legate agli studi su pazienti e che talvolta inficiano o rendono di difficile interpretazione i risultati ottenuti. Quando si considerano le prestazioni dei pazienti per trarne un nesso tra localizzazione della lesione e funzione studiata, va tenuto presente che una lesione cerebrale è accompagnata da fenomeni compensatori più o meno robusti resi possibili dalla neuroplasticità. In altre termini, a seguito di una lesione, si assiste a una riorganizzazione delle aree circostanti la lesione (aree perilesionali) o anche di aree lontane dalla lesione che 'vicariano' l'area lesionata, ovvero subentrano al suo posto per svolgere determinate funzioni (anche se ciò il più delle volte non è sufficiente per garantire una normale funzionalità). Ciò significa che la valutazione di quanto un'area sia importante per un determinato compito non è sempre accurata nel caso di pazienti per via dei meccanismi di plasticità sopra descritti. Al contrario, con la TMS è possibile interferire temporaneamente (e in maniera reversibile) col funzionamento di una determinata regione corticale,

senza che fenomeni di plasticità cerebrale abbiano il tempo di intervenire. Ciò rende possibile analizzare in maniera più 'pulita' la funzione di una certa regione. Un secondo limite inerente agli studi sui pazienti riguarda le differenze nelle abilità pre-morbide e le differenze nel tipo e nell'estensione della lesione. I pazienti possono differire molto l'uno dall'altro prima della lesione e quindi analizzarne effetti di 'gruppo' può talvolta essere fuorviante. Inoltre, le lesioni sono ognuna diversa dall'altra per estensione e gravità: conclusioni certe su gruppi di pazienti vanno quindi sempre tratte con cautela e spesso si preferisce analizzare il caso singolo (*single case studies*). Negli studi di TMS invece i partecipanti fungono da soggetti di controllo per se stessi attraverso il confronto tra la prestazione ottenuta 'sotto' stimolazione con quella ottenuta senza stimolazione (o con la stimolazione di un sito di controllo): ciò consente quindi di controllare l'influenza della variabilità inter-individuale (i.e., tra soggetti diversi) nel determinare il pattern di risultati ottenuto. Infine, in contrasto con la grande variabilità nell'ampiezza delle lesioni che occorrono nei pazienti, la 'lesione virtuale' indotta tramite TMS è più circoscritta e ha la medesima localizzazione e dimensione in tutti i soggetti testati.

La TMS presenta anche diversi limiti. Innanzitutto è possibile stimolare solo regioni corticali (i.e., quelle situate più in superficie), in quanto il campo magnetico non è in grado di penetrare in profondità tali da raggiungere le strutture sottocorticali. Inoltre, all'erogazione dello stimolo si accompagna un tipico rumore ('click') che ne rende a volte difficile l'utilizzo con materiale uditivo (interferendo con l'ascolto di suoni). La TMS induce anche – in funzione anche dell'intensità della stimolazione e dell'area stimolata – sensazioni somatosensoriali (contrazione dei muscoli, leggero formicolio, etc.) che possono talvolta essere fastidiose per il soggetto e nel complesso influenzarne il comportamento (Walsh, Rushworth 1999). Nonostante questi limiti, la TMS si è dimostrata uno strumento utilissimo non solo per mappare le singole funzioni percettive, attentive o cognitive, ma anche per tracciare una 'cronometria' del contributo di diverse aree cerebrali in un determinato processo. In altri termini, variando il *timing* della stimolazione su una medesima area e studiandone man mano gli effetti sul comportamento, la TMS consente di verificare quando – durante lo svolgimento di un determinato compito – una certa area entra in gioco. Inoltre, stimolando due aree in sequenza (studi di *paired-pulses* TMS) e verificando l'effetto della stimolazione dell'una sull'altra, è possibile studiare il funzionamento non solo di singole aree ma anche di network neurali più complessi. La TMS è stata utilizzata anche su pazienti a scopo riabilitativo (per es. la TMS è usata

nella cura della depressione, dell'emicrania, dei sintomi del Parkinson, etc.) ed ha permesso di studiare i fenomeni di plasticità cerebrale in pazienti neurologici al fine di mettere a punto migliori protocolli riabilitativi.

2. Stimolazione a correnti elettriche dirette (tDCS)

Il meccanismo di azione della tDCS si basa sulla modulazione dell'attività neuronale spontanea. La tDCS induce infatti modificazioni dell'eccitabilità corticale che perdurano al termine della stimolazione. La tDCS è quindi considerata una tecnica di neuromodulazione e non di neurostimolazione vera e propria poiché, diversamente dalla TMS, non induce un potenziale d'azione nelle membrane neuronali, ma polarizza i tessuti esposti e modifica la spontanea eccitabilità e attività neuronale attraverso un'iperpolarizzazione o una depolarizzazione del potenziale di membrana a riposo.

La corrente viene trasmessa attraverso una coppia di elettrodi – anodo e catodo – di dimensione variabile tra i 25 e i 35 cm². Gli elettrodi vengono rivestiti da spugne inumidite in una soluzione salina, quale il cloruro di sodio, così da diminuire l'impedenza del flusso elettrico.

L'efficacia della tDCS dipende da alcune variabili:

- densità della corrente: definisce la forza dei campi elettrici ed è direttamente proporzionale alla dimensione dell'elettrodo (Nietsche, Paulus 2000);
- durata della stimolazione: mantenendo costante l'intensità, ma aumentando la finestra temporale di esposizione alla corrente, si manipola la durata e l'intensità degli effetti successivi (Nietsche, Paulus 2000);
- orientamento del campo elettrico: generalmente viene definito dalla posizione e dalla polarità degli elettrodi. A livello corticale ciò che si osserva è che l'anodo porta a un aumento dell'eccitabilità della corteccia sottostante, mentre il catodo porta a una riduzione dell'eccitabilità, sebbene gli effetti della stimolazione catodica siano meno chiari di quella anodica. Per quanto riguarda il posizionamento degli elettrodi, l'elettrodo 'attivo' (anodo se si vuole aumentare l'attivazione dell'area o catodo se la si vuole ridurre) viene localizzato sull'area target, mentre l'elettrodo di riferimento viene generalmente posizionato o sull'area sopraorbitale oppure sull'avambraccio (deltoide).

È stato dimostrato da numerosi studi che la stimolazione transcranica a correnti dirette di differenti aree corticali è in grado di modificare le funzioni percettive, cognitive e comportamentali. Interessanti ai fini di questo capitolo sono gli studi riguardanti le abilità linguistiche, in quanto si è osservata la possibilità di indurre un potenziamento delle funzioni linguistiche in campioni di soggetti neurologicamente sani. Ad esempio, una stimolazione anodica somministrata sull'area di Wernicke (Sparing *et al.* 2008) e sulla corteccia prefrontale dorsolaterale (Fertonani *et al.* 2012) ha portato alla riduzione dei tempi di reazione in un compito di denominazione di figure. Risultati simili sono stati riportati in casi di trattamento con tDCS in pazienti afasici in seguito a stimolazione anodica della corteccia frontale sinistra (Baker *et al.* 2010; Monti *et al.* 2008).

Il principale vantaggio della tDCS rispetto alla TMS è quello di essere generalmente meglio tollerata dai soggetti; inoltre, non inducendo potenziali d'azione, ha meno controindicazioni della TMS (per es. in soggetti a rischio di epilessia, etc.). Fra i vantaggi di ordine 'pratico' va anche sottolineato che la tDCS è facilmente trasportabile in una valigetta ed ha costi di acquisto minori rispetto alla TMS. Tuttavia la stimolazione con tDCS è meno focale di quella con TMS, perdendo quindi in precisione. Inoltre, trattandosi di una stimolazione 'continua', la tDCS non consente di studiare aspetti cronometrici.

3. TMS, tDCS e basi neurali delle funzioni linguistiche

3.1. *Speech arrest*

La tecnica di Wada è stata sviluppata negli anni '50 da John Wada e Theodore Rasmussen a Montreal per valutare la localizzazione emisferica del linguaggio in pazienti gravemente epilettici. Essa consiste nell'iniettare nella carotide interna di destra o di sinistra, raggiunta attraverso un sondino periferico, un anestetico barbiturico ad azione ultra-rapida come l'Amytal sodico. L'assunto è che se i centri del linguaggio sono localizzati a sinistra, per qualche minuto dopo l'iniezione nella carotide di sinistra il paziente è incapace di produrre o comprendere il linguaggio. Poiché si tratta di una tecnica molto invasiva, si è pensato di utilizzare la TMS come tecnica alternativa per stabilire quale emisfero sia dominante per il linguaggio. Negli anni '90, Pascual-Leone e colleghi (1991) hanno indotto per la prima volta un arresto del linguaggio in pazienti epilettici tramite TMS. In particolare, i ricercatori hanno applicato treni (10 s) di rTMS a 8, 16 e 25 Hz su 15 diverse aree intorno alla corteccia perisilviana in ciascun emisfero. Dopo 4-6 secondi dalla stimolazione sulla corteccia frontale inferiore sinistra, questi ricercatori hanno osservato un arresto del linguaggio in ognuno

dei sei pazienti testati. Al contrario, non hanno osservato alcun effetto in seguito a stimolazione dell'emisfero di destra. Poiché il test di Wada aveva rivelato una dominanza dell'emisfero di sinistra per il linguaggio in tutti i sei pazienti, essi conclusero che la TMS potesse essere una valida alternativa al test di Wada per accertare la lateralizzazione delle funzioni linguistiche.

Tuttavia studi successivi non riuscirono a replicare i risultati ottenuti da Pascual-Leone e colleghi e il metodo fu messo in discussione. Michelucci e colleghi (1994) produssero uno *speech arrest* in soli 7 soggetti su 14, mentre Jennum e colleghi (1994) indussero un arresto completo del linguaggio in 14 pazienti su 21, riportando una concordanza del 95% tra TMS e test di Wada solo se veniva considerato come effetto anche un rallentamento nella produzione linguistica. Questa discordanza tra i diversi studi è probabilmente imputabile ai parametri di stimolazione scelti (Epstein *et al.* 1996). In effetti, si è successivamente constatato che intensità alte di stimolazione inducono un effetto molto forte nell'arresto del linguaggio; inoltre, meno intuitivamente, si è osservato che l'effetto è più marcato con frequenze non molto alte (4-8 Hz) o comunque più basse di quelle utilizzate in studi precedenti (16-32 Hz, Jennum *et al.* 1994; Michelucci *et al.* 1994; Pascual-Leone *et al.* 1991). Infatti, alte frequenze inducono con maggior facilità contrazioni dei muscoli facciali che rendono l'arresto del linguaggio più difficile da determinare; al contrario, frequenze più basse interferiscono anche con la lettura e il linguaggio spontaneo. Anche seguendo questi criteri, Epstein e colleghi in uno studio su pazienti epilettici (Epstein *et al.* 2000) hanno dimostrato che, rispetto al test di Wada, la rTMS sovrastimava il coinvolgimento dell'emisfero di destra e prediceva con meno rigore le difficoltà linguistiche post-operatorie.

Nonostante questo, la TMS ha l'indiscutibile vantaggio di essere maggiormente focale rispetto al test di Wada, nel quale gli effetti coinvolgono ampie regioni di un emisfero per diversi minuti. I risultati di uno studio più recente (Aziz-Zadeh *et al.* 2005) hanno aiutato a spiegare l'alta variabilità tra i diversi studi e il motivo per il quale in alcuni di essi si è riscontrata una correlazione molto alta tra test di Wada e TMS (Jennum *et al.* 1991), ma non in altri (Epstein *et al.* 2000; Michelucci *et al.* 1994). Questi ricercatori hanno dimostrato che l'arresto del linguaggio può essere indotto da due siti differenti della corteccia frontale inferiore: stimolare con TMS un sito più anteriore provoca uno *speech arrest* solo sull'emisfero sinistro, dovuto a interferenza linguistica *per se*. Stimolare siti più posteriori sia dell'emisfero destro che sinistro provoca uno *speech arrest* con effetto maggiore a sinistra, ma l'effetto in questo caso è imputabile principalmente a interferenze motorie su mascella e bocca (per stimolazione di aree motorie e premotorie).

3.2. Elaborazione semantica e fonologica

Si è soliti pensare che l'area di Broca sia specializzata nell'elaborazione della struttura sintattica. Questo è vero, ma diversi studi hanno dimostrato un coinvolgimento dell'area di Broca anche nell'elaborazione dei suoni, del significato e in molte funzioni non linguistiche (Hagoort *et al.* 2004; Levy, Anderson 2002; Zurif *et al.* 1972). L'uso della stimolazione cerebrale ha chiarito alcune funzioni dell'area di Broca. Per esempio, uno studio condotto dal nostro gruppo (Cattaneo *et al.* 2011) ha dimostrato che la stimolazione anodica di questa regione tramite tDCS può aumentare la performance in compiti di fluenza sia fonemica che semantica in soggetti neurologicamente indenni, aprendo interessanti possibilità per il trattamento delle funzioni linguistiche in pazienti afasici. In questo esperimento un compito di controllo di attenzione spaziale ha confutato l'ipotesi che i risultati ottenuti fossero dovuti a un effetto non specifico della tDCS sui livelli generali di attivazione e di attenzione, sostenendo la specificità dell'effetto della stimolazione sul linguaggio. In un esperimento successivo (Cattaneo *et al.* 2012) la stimolazione anodica sull'area di Broca portava a una diminuzione significativa del livello di interferenza semantica tra parole semanticamente collegate in un compito di denominazione di immagini, mentre la stimolazione anodica del giro temporale superiore (STG) sinistro aumentava l'interferenza. Questi dati confermano l'esistenza di una rete corticale estesa coinvolta nel recupero lessicale, in cui sia l'area di Broca che il STG sinistro giocano un ruolo chiave. In particolare, l'area di Broca sembra essere il locus corticale dove viene risolto il conflitto tra rappresentazioni lessicali competitive, mentre il STG sinistro è l'area in cui sono depositate le rappresentazioni lessicali, e dove avviene la competizione tra queste rappresentazioni durante il recupero lessicale.

Studi di neuroimmagine funzionale hanno suggerito, nel giro frontale inferiore sinistro (area di Broca), una divisione rostro-caudale per l'elaborazione semantica e fonologica. Gli studi di TMS che verranno di seguito presentati non solo confermano questa divisione, ma chiariscono anche i contributi di ciascuna regione nell'elaborazione fonologica e semantica. Devlin *et al.* (2003) e Kohler *et al.* (2004) hanno studiato il ruolo della regione rostrale del giro frontale inferiore sinistro. In particolare, il primo gruppo di ricercatori ha indagato le conseguenze di una stimolazione (10 Hz per 300 ms) di questa regione in un compito di decisione semantica (decidere se le parole presentate visivamente appartengono alla categoria 'oggetti artificiali' o 'oggetti naturali'). Rispetto alla condizione di controllo hanno riscontrato che la TMS aumenta significativamente i tempi di reazione nel compito semantico. Risultati simili sono stati riscontrati dal secondo gruppo di ricercatori (Kohler *et al.* 2004) che, stimolando la medesima regione

tramite rTMS (7 Hz per 600 ms), ha evidenziato un rallentamento significativo in un compito di decisione basata sul significato. Entrambi questi studi sembrano pertanto dimostrare il coinvolgimento della regione rostrale del giro frontale inferiore sinistro nell'elaborazione semantica. Le funzioni linguistiche sottese dalla regione caudale dell'area di Broca sono state investigate tra gli altri da Nixon e colleghi (2004). I soggetti vedevano una parola sullo schermo di un computer (per esempio 'knees') ed erano istruiti, con un ritardo di 1-2 secondi, a decidere se la parola presentata successivamente fosse fonologicamente simile alla prima (per esempio 'neaze'). Durante il periodo di ritardo avveniva la stimolazione tramite rTMS (10 Hz per 500 ms), e ciò determinava un aumento significativo del numero di errori nel compito fonologico.

Questi studi nel loro complesso sembrano dimostrare che la regione rostrale sia necessaria per l'elaborazione semantica mentre quella caudale per l'elaborazione fonologica. Rimane però ancora da capire se l'area di Broca agisca come una singola regione (necessaria per l'elaborazione semantica e fonologica) con uno spostamento nel picco di attivazione o se effettivamente ci siano due sotto-regioni specializzate per i due processi. Un elegante studio di TMS di Goug e colleghi (2005) ha cercato di rispondere a questo interrogativo. I partecipanti a questo esperimento vedevano due stringhe di lettere presentate contemporaneamente sullo schermo di un computer e dovevano decidere se erano semanticamente ('idea'-/'notion'), fonologicamente ('nose'-/'knows') o visivamente ('fwtsps'-/'fwtsps') uguali. I risultati hanno evidenziato che la TMS sulla regione rostrale aumenta selettivamente i tempi di risposta quando i soggetti si concentrano sul significato delle parole, ma non quando invece si concentrano sul suono; il pattern esattamente opposto si osserva quando viene stimolata la regione caudale. Nel compito di controllo visivo, la stimolazione in nessuna delle due aree interferisce sui tempi di reazione. Questi ricercatori hanno dimostrato la presenza di una doppia dissociazione, suggerendo l'esistenza di due regioni distinte (separate da meno di 3 cm) responsabili dei processi semantici e fonologici.

La parte più rostrale dell'area di Broca non è però la sola coinvolta nell'elaborazione semantica. Vi sono altre regioni implicate nell'elaborazione del significato e alcune di esse sembrano addirittura attivate selettivamente da categorie semantiche specifiche, come ad esempio 'animali', 'frutta', 'verdura' o 'manufatti' (Caramazza, Mahnon 2003), suggerendo un grado di specializzazione neuroanatomica estremamente preciso. La corteccia premotoria ventrale sinistra (PMv) per esempio è preferibilmente attivata dagli esemplari di oggetti. In un altro studio del nostro gruppo (Cattaneo *et al.* 2010) è stata utilizzata la TMS in questa regione con lo scopo di studiare il ruolo causale di

queste rappresentazioni neuronali categoria-specifiche nella decodifica delle parole di oggetti. Il paradigma sperimentale prevedeva la presentazione di un *prime* (attrezzi o animali) prima della stimolazione di TMS e prima della presentazione dello stimolo *target*, con l'obiettivo di modulare l'attivazione iniziale della PMv. Nei paradigmi di *priming*, quello che si osserva a livello comportamentale è che i soggetti sono più veloci a rispondere a uno stimolo apparente alla categoria che è stata 'pre-attivata' (per esempio, sono più veloce a rispondere a 'cane' se è stata preattivata la categoria animali rispetto alla categoria utensili). I risultati dello studio hanno evidenziato che quando la parola *target* apparteneva alla categoria 'attrezzi' ma non alla categoria 'animali', la TMS sulla PMv interferiva con l'effetto *priming*, dimostrando quindi uno specifico coinvolgimento della corteccia premotoria ventrale nella codifica di utensili.

3.3. Lettura

Pochi studi di TMS hanno investigato il processo di lettura. Alcuni di essi hanno utilizzato la TMS a singolo impulso, con lo scopo di indagare l'analisi temporale del processo di riconoscimento visivo di parole. Questi studi di neurocronometria della lettura hanno riscontrato che la stimolazione della corteccia visiva tra 40 e 120 ms dall'onset (i.e., comparsa) dello stimolo interferisce con il riconoscimento di lettere (Amassian 1989; Beckers, Homberg 1991), mentre impulsi sul giro frontale inferiore sinistro a 250 ms dall'onset dello stimolo rallentano le risposte in un compito di *reading-for-meaning* (i.e., leggere e decidere del significato di una parola) (Devlin *et al.* 2003).

Questi studi forniscono informazioni rilevanti circa la natura dell'elaborazione neurale nella lettura, poiché permettono di identificare la finestra temporale necessaria per l'elaborazione del processo in atto. In questo senso la tecnica della TMS risulta essere vantaggiosa rispetto ad altre tecniche, come gli ERP o la MEG. Infatti, l'attività neuronale sincronizzata, necessaria a produrre il segnale ERP o MEG, può essere ritardata rispetto alla sorgente fisiologica che l'ha generata (Walsh, Cowey 2000). La TMS offre quindi il vantaggio di essere anatomicamente e temporalmente più accurata.

Rispetto al riconoscimento visivo delle parole, molti studi oggi sembrano sostenere una rappresentazione corticale della fovea spostata, piuttosto che bilaterale (*split-fovea theory*). Questo modello di lettura propone che il riconoscimento visivo di parole presentate centralmente sia mediato da uno spostamento dell'immagine della fovea, con le lettere a sinistra del punto di

fissazione che vengono proiettate all'emisfero destro e quelle a destra all'emisfero di sinistra. Questa teoria è sostenuta da alcuni studi sull'*orthographic neighborhood effect* (N): questo effetto si riferisce al fatto che parole che sono ortograficamente simili a una parola target (per es. che hanno lo stesso numero di lettere e differiscono per un'unica lettera) competono con essa durante il riconoscimento visivo, e il livello di competizione varia in funzione della frequenza relativa della parola target e dei suoi competitori (Coltheart *et al.* 1977). Lavidor e Walsh (2003) hanno dimostrato che stimolando a 8 Hz per 500 ms la corteccia visiva destra, ma non sinistra, si estingue il normale fenomeno N. In generale, il fatto che la stimolazione della corteccia visiva di destra interferisca con l'*orthographic neighborhood effect* dimostra che essa è implicata nella capacità di rispondere alle lettere iniziali delle parole, supportando così la *split-fovea theory*.

Oltre alla corteccia visiva, alcuni studi si sono concentrati sul coinvolgimento della corteccia parietale posteriore nel processo di lettura e, prima ancora, nel riconoscimento delle lettere. Leff e colleghi (2001) hanno dimostrato che a una stimolazione (10 Hz per 1.5 s) della corteccia parietale posteriore sinistra (PPC) determina un rallentamento dei movimenti degli occhi tra le parole, suggerendo che quest'area sia necessaria per guidare le saccadi durante il processo di lettura. Altri ricercatori (Braet, Humphreys 2006) hanno riscontrato che una stimolazione (20 Hz per 150 ms) sulla PPC destra porta ad una significativa interferenza per parole presentate con lettere miste (per esempio 'CaSa'), suggerendo che questa regione sia importante nell'allocazione di risorse attentive necessarie al riconoscimento visivo delle parole. Infine, sembra che l'attivazione della corteccia parietale posteriore sinistra sia responsabile della decodifica delle lettere indipendentemente dalla loro forma visiva, come dimostrato da un nostro studio di TMS (Cattaneo, Rota *et al.* 2009). In quello studio abbiamo utilizzato una tecnica di adattamento visivo per manipolare lo stato iniziale di attivazione dei neuroni per alcune lettere prima della stimolazione di TMS. La fase di adattamento era seguita da un compito di detezione delle medesime lettere usate nell'adattamento (ma presentate in un carattere differente) o di lettere nuove. I risultati hanno dimostrato che la TMS a singolo impulso sulla PPC sinistra (ma non destra) modificava l'effetto di adattamento facilitando la detezione di lettere cui i soggetti erano stati adattati (e alle quali rispondevano più lentamente), mentre non aveva nessun effetto sulle lettere non adattate. Questi dati confermano non solo una selettività astratta per le lettere della PPC sinistra ma, poiché le lettere adattate e quelle target venivano presentate in diversi caratteri, anche un suo ruolo causale nell'elaborazione di lettere indipendentemente dalla loro forma visiva.

3.4. Sintassi

Dallo studio del paziente 'tan tan' di Paul Broca nel 1861, numerosi studi successivi su pazienti hanno dimostrato una relazione tra deficit grammaticali e lesioni prefrontali sinistre (per es. Shapiro, Caramazza 2003; Zurif *et al.* 1972). Questa evidenza è poi stata confermata anche da numerosi studi di neuroimmagine e, recentemente, anche studi di TMS hanno contribuito a una comprensione sempre maggiore di questa relazione. Sakai e colleghi (2002) hanno utilizzato un compito di validazione di frasi con lo scopo di verificare se e quando l'area di Broca è coinvolta in processi sintattici. Tutte le frasi utilizzate in questo esperimento avevano la semplice costruzione nome-verbo, dove il verbo veniva presentato 200 ms dopo il nome. Di queste frasi, i soggetti dovevano identificare se fossero corrette oppure scorrette da un punto di vista grammaticale o semantico. La TMS veniva applicata sull'area di Broca a 0, 150 o 350 ms dopo la presentazione del verbo. I risultati hanno evidenziato che, rispetto alla stimolazione *sham* di controllo, la TMS facilitava i tempi di reazione per le decisioni sintattiche (ma non semantiche). Inoltre, poiché l'effetto era specifico per la finestra temporale di 150 ms, si può ipotizzare un coinvolgimento causale dell'area di Broca nel processo di elaborazione sintattica.

Con la TMS si è inoltre cercato di studiare i processi e le aree neurali coinvolte nell'elaborazione di differenti classi grammaticali. Sia studi neuropsicologici (Caramazza, Hillis 1991) che elettrofisiologici (Federmeier *et al.* 2000) suggeriscono infatti la possibilità che i nomi e i verbi vengano elaborati da substrati neurali differenti. Per spiegare i meccanismi che sottostanno ai deficit dissociati tra nomi e verbi sono state proposte due principali ipotesi. La prima suggerisce che il deficit prevalente per nomi o verbi sarebbe causato dal peso relativo delle caratteristiche percettive e funzionali che sottostanno a nomi e verbi (Bird *et al.* 2000). Secondo questa ipotesi le conoscenze concettuali che sottostanno ai nomi sarebbero prevalentemente visive, mentre quelle sottostanti i verbi prevalentemente funzionali e quindi legate alle azioni. La seconda ipotesi di Caramazza e colleghi (2002) attribuisce la causa del disturbo selettivo per nomi o verbi ad un livello lessicale più periferico, dove le etichette di queste due classi grammaticali sarebbero rappresentate separatamente.

In linea con la prima ipotesi, Cappa e colleghi (2002) hanno utilizzato la TMS per studiare il ruolo della corteccia prefrontale dorso-laterale (DLPFC) sinistra nella denominazione di azioni. Ai soggetti venivano presentate delle immagini di oggetti comuni e veniva loro chiesto di riferire sia il nome dell'oggetto (ad esempio 'telefono'), sia l'azione ad esso associata ('telefonare'). I risultati hanno evidenziato che una rTMS (20 Hz per 500 ms) sulla DLPFC

sinistra aumenta il tempo di denominazione per i verbi, se confrontata con la stimolazione *sham* o a destra; al contrario, la denominazione di oggetti rimane inalterata. Questi autori suggeriscono che il deficit selettivo per i verbi sia prevalentemente causato da lesioni frontali sinistre perché un danno alla DLPFC influisce sull'osservazione e sulla rappresentazione di azioni, più strettamente legate ai verbi, piuttosto che ai nomi. Shapiro e colleghi (2001) hanno però messo in discussione questa interpretazione, la quale spiega i risultati ottenuti come conseguenza delle differenze di significato tra nomi e verbi. Questi ricercatori hanno pertanto condotto due esperimenti: nel primo esperimento hanno utilizzato delle parole reali e hanno chiesto ai partecipanti di produrre la forma plurale e singolare di nomi regolari (ad esempio 'songs'-'song') e la terza persona plurale e singolare di verbi (ad esempio 'sing'-'sings') prima o dopo la stimolazione a 1 Hz sulla DLPFC sinistra. In questo caso, in linea con i risultati ottenuti da Cappa e colleghi, si evidenziano tempi di reazione ritardati solo con i verbi, ma non con i nomi. Nel secondo esperimento il compito era il medesimo, ma in questo caso venivano utilizzate delle 'pseudoparole' sia in funzione di nome che di verbo (ad esempio 'flonk'-'flonks'), prive pertanto di rappresentazione semantica. L'ipotesi è che se la DLPFC è deputata al recupero di informazioni grammaticali relative ai verbi, allora la produzione di 'pseudoverbi' dovrebbe essere ritardata come per i verbi reali. Poiché tale ipotesi viene verificata, i ricercatori hanno interpretato questo dato come indice del fatto che DLPFC sinistra è una base neuroanatomica per le categorie grammaticali *per se*, indipendentemente dal loro significato.

Oltre alla selettività neuroanatomica tra verbi e nomi, sono stati riportati casi di doppia dissociazione tra deficit per oggetti naturali e artificiali, tra nomi concreti e astratti e tra parole grammaticali e parole a contenuto. È stato ipotizzato che anche il genere grammaticale dei nomi, maschile e femminile, possa essere in qualche modo elaborato in regioni cerebrali specifiche. In un nostro studio (Cattaneo, Devlin *et al.* 2009a) abbiamo investigato questa ipotesi studiando il possibile ruolo causale del giro frontale inferiore sinistro (area di Broca) nella decodifica del genere grammaticale in soggetti neurologicamente sani. Lo scopo specifico era quindi verificare se l'area di Broca contenesse delle rappresentazioni neurali distinte che rispondono in modo preferenziale alle diverse classi del genere grammaticale. L'esperimento prevedeva inizialmente un paradigma di saturazione, un fenomeno di adattamento di alto livello per il quale la ripetizione del nome di una categoria riduce l'accesso alla categoria stessa (Smith 1984; Smith, Klein 1990; Fillenbaum 1964; Pilotti *et al.* 1997; Shimokido 2003; Lindquist *et al.* 2006). Successivamente, veniva applicata la TMS a singolo impulso e veniva poi chiesto ai soggetti di classificare una parola

target nella categoria 'naturali' o 'artificiali'; le parole target erano metà di genere femminile e metà di genere maschile. I risultati hanno evidenziato che nella condizione di controllo di non stimolazione, i soggetti sono più lenti a rispondere agli esemplari della categoria saturata, mentre l'applicazione della TMS sull'area di Broca sembra rimuovere l'effetto comportamentale legato alla saturazione. Nel complesso questi dati suggeriscono che rappresentazioni neurali del genere grammaticale dei nomi siano almeno in parte dissociabili e dimostrano il ruolo causale del giro frontale inferiore sinistro nell'elaborazione del genere grammaticale.

4. Eccitabilità motoria, discorso e linguaggio

Una delle prime applicazioni della TMS in ambito clinico ha riguardato la verifica dell'integrità del sistema motorio, in particolare del tratto cortico-spinale. Un singolo impulso di TMS sulla corteccia motoria primaria produce una contrazione involontaria dei muscoli controlaterali, cambiamento che è possibile registrare dal muscolo di interesse attraverso l'elettromiografo (EMG). L'impulso di TMS induce, infatti, la depolarizzazione di interneuroni motori, a cui consegue un'attivazione del tratto cortico-spinale (per via trans-sinaptica). L'attività evocata che viene a generarsi si traduce in *twitches* muscolari, detti Potenziali Motori Evocati o MEP. Evocare un MEP sui muscoli della mano non è particolarmente complesso; ma quando si intende registrare un MEP dai muscoli deputati alla produzione linguistica, come i muscoli della faccia o della lingua, possono intervenire alcuni artefatti.

Una prima difficoltà è legata alla localizzazione anatomica del volto nella corteccia motoria. Pensando all'*homunculus* motorio, la rappresentazione della faccia è più laterale e ventrale rispetto alla rappresentazione della mano ed è inserita nella parte interna del solco centrale. Inoltre, i muscoli del viso raramente si trovano in una condizione ideale di registrazione, ovvero muscoli che sono a completo riposo. Perciò, la stimolazione di queste aree appare più complessa e l'intensità richiesta per elicitarne un MEP nei muscoli del volto è maggiore di quella richiesta per i muscoli della mano.

Un altro aspetto rilevante è legato alla generazione di artefatti. Nei muscoli della mano, la latenza di risposta di un MEP è di circa 20 ms dopo la stimolazione, mentre nei muscoli della faccia e della lingua è significativamente più breve. Questa caratteristica fa sì che il MEP possa facilmente essere oscurato da un artefatto elettromiografico causato da una scarica del *coil* (artefatti simili si possono evidenziare in diversi studi di EEG/TMS). Inoltre, la stimolazione sullo

scalpo può facilmente indurre una stimolazione periferica dei muscoli della testa. Questo accade spesso nel momento in cui si registra da muscoli centrali, come la lingua, o da muscoli circolari, come le labbra. In questo caso, gli artefatti periferici si distinguono dalla loro latenza di risposta particolarmente breve, che può arrivare a meno di 10 ms. I MEP permettono di studiare la via che conduce lo stimolo che nasce nella corteccia cerebrale motoria e che, attraverso il midollo spinale, raggiunge i neuroni motori e quindi i muscoli. L'ampiezza dei MEP non riflette quindi esclusivamente l'aumento di eccitabilità della corteccia attraverso la via corticale, ma anche una facilitazione dei neuroni nel midollo spinale o nel tronco encefalico.

4.1. Produzione linguistica e sistema motorio

I primi lavori che hanno indagato l'eccitabilità corticale durante l'elaborazione linguistica si sono principalmente focalizzati sullo studio della lateralizzazione della produzione del linguaggio (Tokimura *et al.* 1996). In questo studio i ricercatori hanno dimostrato una relazione funzionale tra la produzione linguistica e l'area della mano nella corteccia motoria di sinistra. Nello specifico, sono stati registrati i MEP dei muscoli della mano in risposta a TMS a singolo impulso sull'area della mano della corteccia motoria controlaterale mentre i soggetti erano impegnati in compiti di lettura, lettura silenziosa, produzione spontanea o di produzione di suoni vocali non linguistici. I risultati di questo studio hanno evidenziato un aumento dell'eccitabilità della corteccia motoria sinistra durante il compito di lettura, mentre nessun cambiamento nella condizione di lettura silenziosa o produzione di suoni non linguistici. Infine, nella condizione di produzione spontanea, si è registrato un aumento dell'eccitabilità sia dell'emisfero destro che sinistro. Questa lateralizzazione della relazione tra produzione linguistica e area motoria della mano è stata riscontrata anche in studi più recenti (Lo *et al.* 2003; Meister *et al.* 2003; Seyal *et al.* 1999; Floel *et al.* 2003). La sua specificità anatomica rimane però ancora dubbia, dal momento che alcuni studi (Meister *et al.* 2003) hanno evidenziato che un aumento dell'eccitabilità durante la lettura si osserva esclusivamente nell'area della rappresentazione della mano, mentre altri (Lo *et al.* 2003) hanno riportato una facilitazione dei MEP registrati anche dai muscoli della gamba. Questo *link* funzionale potrebbe quindi essere specifico per l'area della mano oppure potrebbe estendersi fino all'area motoria degli arti inferiori.

Quale che sia la sua localizzazione anatomica, questa relazione potrebbe essere dovuta all'utilizzo dei gesti della mano che quasi inevitabilmente

accompagnano il linguaggio e sembra essere a sostegno dell'ipotesi di un *link* evolutivo tra produzione linguistica e gestualità (Corballis 2003; Rizzolatti, Arbib 1998). Hewes (1973) riporta alcune evidenze a sostegno dell'ipotesi di un'origine gestuale del linguaggio. Prima di tutto lo studio del linguaggio dei segni, che condivide con il linguaggio le sue caratteristiche fondamentali di referenza, generatività, grammatica e prosodia. Lo studio su primati non umani ha dimostrato come essi siano capaci di acquisire un sistema di comunicazione intenzionale basato sui gesti, piuttosto che acquisire un vero e proprio linguaggio; infine, tutto il filone di studi sul sistema dei neuroni a specchio mette in luce il medesimo rapporto tra linguaggio e gestualità. Secondo Wilcox e Armstrong (2007) il linguaggio deve essere evoluto a partire da un grande sistema iconico, con movimenti delle mani che creavano immagini spaziali degli oggetti e delle azioni del mondo reale; una volta che vennero stabilite delle convenzioni e ritualizzazioni ai movimenti corporei, queste rappresentazioni divennero più efficienti e astratte, perdendo la loro natura iconica; a questo punto i segnali non avevano più bisogno di essere veicolati visivamente o manualmente: da questo momento in poi il linguaggio articolato ha rappresentato l'alternativa più economica ed efficiente da un punto di vista energetico. Secondo questi autori, pertanto, il linguaggio stesso deve essere considerato un sistema gestuale, con gesti vocali che gradualmente hanno sostituito quelli manuali. Infatti, probabilmente i gesti facciali hanno assunto sempre maggior importanza (forse perché le mani erano sempre più occupate in altre attività, come la costruzione di utensili). Poiché alcuni gesti oro-facciali non sono accessibili visivamente con facilità, si è assistito all'introduzione di suoni vocali che ne hanno facilitato la comprensione, oltre a offrire altri vantaggi come la trasmissione a lunghe distanze e la capacità di attirare meglio l'attenzione. Questa conversione rimane però incompleta poiché i gesti manuali ancora oggi accompagnano il linguaggio e giocano un ruolo decisivo nel veicolare il significato.

4.2. Percezione linguistica e sistema motorio

La teoria gestuale del linguaggio è stata ripresa negli anni '90 con la scoperta dei neuroni specchio (Di Pellegrino *et al.* 1992; Gallese *et al.* 1996). Scoperti per la prima volta nell'area F5 della corteccia premotoria ventrale delle scimmie, i neuroni specchio sono attivi quando l'animale compie l'azione di afferrare o osserva un altro individuo compiere un movimento simile. Sebbene questi neuroni rispondano ad azioni manuali, è interessante notare che l'area F5 è considerata l'analoga dell'area di Broca umana che, come è noto, è associata alla produzione del linguaggio. L'esteso sistema *mirror* nelle scimmie si sovrappone

quindi largamente agli analoghi circuiti corticali che nell'uomo sono coinvolti nel linguaggio. Ciò che sorprende di più è che non solo la produzione, ma anche la percezione del linguaggio influisce sull'eccitabilità del sistema motorio. In linea con la scoperta dei neuroni specchio nel cervello dei macachi, i primi studi sul cervello umano si sono concentrati sulla percezione visiva delle azioni, con lo scopo di individuare un meccanismo che integrasse osservazione ed esecuzione (Gangitano *et al.* 2004; Strafella, Paus 2000).

Nei primati il sistema *mirror* sembra non rispondere alle vocalizzazioni, che si trovano maggiormente sotto il controllo limbico piuttosto che corticale. Kohler e colleghi (2002) hanno però evidenziato che i neuroni specchio, registrati dalla corteccia premotoria del macaco, rispondono durante la percezione uditiva di azioni e in particolare rispondono ai suoni di quelle azioni manuali che hanno suoni distintivi (come strappare la carta o schiacciare le noci). Un esperimento simile è stato condotto nell'uomo da Aziz-Zadeh e colleghi (2004), i quali hanno utilizzato la TMS evidenziando un aumento dell'eccitabilità del sistema motorio mentre i soggetti erano impegnati nell'ascolto di suoni associati con delle azioni che coinvolgevano l'uso delle mani (strappare la carta o scrivere a macchina). I risultati hanno dimostrato una facilitazione nell'ampiezza dei MEP e che tale effetto era lateralizzato esclusivamente nell'emisfero sinistro. Nel complesso, entrambi questi studi dimostrano che, sia nell'uomo che nelle scimmie, l'ascolto di suoni legati ad azioni manuali è in grado di attivare il corrispondente sistema motorio.

Alcuni studi si sono concentrati sugli effetti della percezione linguistica sul sistema motorio responsabile della produzione del linguaggio. Tra questi, uno studio ha evidenziato un aumento dell'ampiezza dei MEP nei muscoli delle labbra durante l'osservazione di una produzione linguistica che richiedeva movimenti delle labbra (Sundara *et al.* 2001). Ancora più specifico, lo studio di Fadiga e colleghi (2002) ha riscontrato che la presentazione di specifici fonemi attiva i centri motori del linguaggio ad essi corrispondenti. I soggetti ascoltavano passivamente stimoli linguistici con o senza suoni consonantici che richiedevano movimenti della lingua (ad esempio la consonante labiodentale 'R' o la fricativa 'F'). L'ampiezza dei MEP, registrati dai muscoli della lingua, era maggiore quando i soggetti ascoltavano parole e non-parole contenenti il fonema 'R' (che richiede un movimento della lingua) ma non contenenti il fonema 'F'. Infine, in linea con la teoria motoria del linguaggio, Watkins e colleghi (2003) hanno evidenziato che la percezione passiva (visiva o uditiva) induce un'attivazione nei centri motori coinvolti nella produzione linguistica. In questo caso i soggetti ascoltavano suoni linguistici o suoni non verbali (rumore bianco), oppure vedevano movimenti delle labbra o degli occhi. Questi ricercatori non solo hanno riscontrato un aumento dei MEP durante la percezione visiva o uditiva

del linguaggio, ma che tale facilitazione si riscontrava solo per la stimolazione dell'emisfero sinistro.

Questi studi, nel loro complesso, sembrano dimostrare un *link* funzionale tra la percezione e comprensione del linguaggio da una parte e il sistema motorio dall'altra. A questo punto è interessante citare lo studio di Watkins e Paus del 2004 che ha tentato di investigare questa connessione da un punto di vista anatomico, combinando la TMS con la PET. I risultati di questo esperimento dimostrano che durante la percezione uditiva del linguaggio vi è un aumento dell'eccitabilità del sistema motorio responsabile della produzione linguistica e che questo aumento è significativamente correlato con l'attività della parte posteriore del giro frontale inferiore sinistro (area di Broca). Come già sottolineato in precedenza, sembra quindi che l'area di Broca giochi un ruolo decisivo nel legare produzione e percezione del linguaggio, in linea con la teoria che sottolinea l'importanza dell'integrazione senso-motoria nella comprensione del linguaggio (Hickok, Poeppel 2000; Liberman, Mattingley 1985; Scott, Wise 2004).

4.3. Sistema motorio e semantica

Recentemente alcuni studi hanno ulteriormente approfondito la relazione tra linguaggio e sistema motorio, indagando se anche rappresentazioni più astratte delle azioni, mediate dalla semantica, siano in grado di attivare il sistema motorio. Infatti, alcuni studi dimostrano che quando comprendiamo una frase simuliamo il significato ad un livello di dettaglio che ci rende sensibili all'effettore coinvolto nell'azione espressa. Pulvermüller *et al.* (2001) hanno evidenziato delle differenze topografiche nel pattern di attività cerebrale generato da verbi che si riferivano ad azioni eseguite con le gambe, con le braccia, o con la bocca. Risultati molto simili sono stati ottenuti da Hauk e colleghi (2004). I soggetti erano istruiti a leggere passivamente delle parole tipicamente eseguite da diversi effettori, come ad esempio piedi (calciare), mani (prendere) oppure bocca (leccare). Per valutare l'attivazione cerebrale durante questo compito, è stata effettuata una fMRI, la quale ha messo in luce una relazione tra il significato delle parole e i centri motori specifici a eseguire le azioni corrispondenti.

Buccino e colleghi (2005) confermano queste evidenze attraverso uno studio comportamentale e di TMS. In questo caso ai soggetti venivano acusticamente presentate delle frasi relative ad azioni da eseguire con le mani, con i piedi, oppure delle frasi più astratte. Il compito prevedeva di fornire una risposta motoria per le frasi concrete, o con la mano (attraverso una tastiera) o con il

piede (con un pedale), e di non rispondere nel caso delle frasi astratte. I risultati hanno dimostrato che l'ampiezza dei MEP per ogni muscolo effettore era influenzata dall'ascolto delle frasi che si riferivano ad azioni legate a quell'effettore. Anche Pulvermüller e colleghi (2005) hanno dimostrato una relazione funzionale tra azione e sistema linguistico durante l'elaborazione lessicale. Questi ricercatori hanno applicato la TMS sulle aree motorie dell'emisfero sinistro mentre i soggetti erano impegnati in un compito di decisione lessicale per parole collegate ad azioni. Sono stati confrontati i tempi di reazione per le parole che si riferivano ad azioni che coinvolgevano i piedi o le braccia. I risultati hanno evidenziato che la TMS sulle aree motorie delle braccia o dei piedi diminuisce i tempi di reazione nel compito di decisione lessicale per azioni rispettivamente legate alle braccia e ai piedi.

Questi esperimenti nel loro complesso sostengono l'esistenza di una relazione molto stretta tra il significato dei verbi e un aumento dell'eccitabilità della corteccia motoria in aree specifiche. Sembra quindi che l'elaborazione di frasi attivi una simulazione dell'azione che la frase descrive e che tale simulazione sia molto specifica, poiché, come osservato, è sensibile all'effettore coinvolto nell'azione espressa dalla frase.

5. Studi su pazienti neurologici

Tecniche di stimolazione cerebrale quali la TMS e la tDCS sono stati utilizzate anche con pazienti neurologici, con lo scopo principale di stabilire se queste tecniche possano essere di supporto nei protocolli riabilitativi. È risaputo che a seguito di un ictus intervengono nel cervello processi di riorganizzazione importanti (plasticità). In particolare, nella fase acuta si verifica un'inibizione dell'emisfero sano su quello colpito. Questo fenomeno è funzionale e rappresenta un tentativo di controllare l'attività perilesionale, riducendo la richiesta di ossigeno e glucosio nella 'penombra' dell'ictus, ovvero la regione cerebrale criticamente ipoperfusa, ma ancora vitale intorno all'area infartuale irreversibilmente danneggiata, e quindi limitare l'estensione della lesione. Tuttavia, dopo la fase acuta e dopo che il danno si è stabilizzato, l'interazione emisferica dovrebbe passare da inibitoria a eccitatoria, al fine di massimizzare le capacità dei neuroni preservati dalla lesione di guidare il comportamento. Diversamente, se questa inversione non si verifica, si avrà uno scarso recupero comportamentale. Attraverso l'uso della TMS eccitatoria o inibitoria è possibile intervenire, con lo scopo di indirizzare correttamente questi processi.

Tornando al linguaggio, la TMS è stata utilizzata su pazienti con lesioni all'emisfero sinistro per verificare possibili funzioni linguistiche residue dell'emisfero destro. Infatti, Coltheard (1980) sostiene l'emergere di capacità residue di lettura da parte dell'emisfero destro a seguito di ampie lesioni all'emisfero sinistro, limitate però a parole concrete e ad alta frequenza d'uso: una spiegazione in contrasto con l'assunzione di Dèjerine (1914) di una completa cecità verbale dell'emisfero destro. Coslette, Monsul (1994) hanno eseguito un esperimento di TMS per testare l'ipotesi che il processo di lettura possa essere in parte mediato dall'emisfero destro. Questi ricercatori hanno stimolato a singolo impulso sulla giunzione temporo-parietale dell'emisfero destro e sinistro, mentre i soggetti erano impegnati in un compito di lettura ad alta voce di parole presentate visivamente. Se nei pazienti in esame con alessia pura la lettura fosse mediata dall'emisfero destro, una lesione transitoria di quest'ultimo dovrebbe causare un indebolimento nel compito di lettura. I risultati hanno evidenziato che la stimolazione dell'emisfero destro, a differenza del sinistro, è associata ad un significativo peggioramento della performance nei pazienti, ma non nei soggetti di controllo, a supporto dell'ipotesi che la lettura è supportata dalla giunzione temporo-parietale destra principalmente a causa dei processi plastici post-lesionali.

Altri studi hanno investigato il ruolo del giro frontale inferiore destro sia in pazienti con lesioni sinistre a seguito di ictus (Winhuiser *et al.* 2005), sia a causa di tumori cerebrali (Thiel *et al.* 2005). In questi studi la TMS è stata combinata con la tecnica PET; quest'ultima permette, infatti, di identificare l'attivazione del giro frontale inferiore destro e sinistro per ogni paziente mentre svolge un compito di generazione di parole o di associazione parola-immagine. Una volta identificata con precisione l'area anatomica interessata, viene utilizzata la TMS sul sito di attivazione. Nel loro complesso, da questi studi emerge un quadro disomogeneo: in molti pazienti sembra, infatti, che il giro frontale inferiore sinistro rimanga essenziale anche a seguito di lesioni emisferiche sinistre, mentre in altri pazienti sembra essenziale il coinvolgimento dell'emisfero destro.

Questa inter-variabilità così marcata può essere spiegata da differenze pre-morbide nell'organizzazione emisferica del linguaggio. Per verificare questa ipotesi, Knecht e colleghi (2002) hanno inizialmente identificato la dominanza emisferica per il linguaggio in un campione di soggetti neurologicamente sani tramite l'utilizzo della Sonografia Doppler Transcranica (fTCD), per poi indurre una stimolazione di 1 Hz per 10 minuti sull'area di Wernicke di sinistra e l'omologa a destra. I risultati hanno evidenziato che una stimolazione sull'emisfero sinistro produce un rallentamento nell'elaborazione linguistica nei soggetti con dominanza emisferica sinistra, ma non nei soggetti con dominanza opposta. Questi risultati dimostrano che la suscettibilità degli effetti della TMS è

fortemente correlata al grado di lateralizzazione del linguaggio. Queste differenze pre-morbose possono quindi rendere conto del maggior o minor coinvolgimento dell'emisfero destro nel processo di compensazione a seguito di lesioni sinistre.

Gli studi di TMS su pazienti neurologici non solo possono contribuire alla comprensione di alcuni fenomeni di riorganizzazione cerebrale, ma possono anche essere utilizzati a scopo clinico e riabilitativo. In una serie di esperimenti, Naeser, Martin e colleghi (Martin *et al.* 2004; Naeser *et al.* 2004; Naeser *et al.* 2005), hanno indagato la possibilità che la rTMS possa migliorare il recupero in pazienti con afasia non-fluente. Studi di neuroimmagine funzionale su pazienti con afasia non-fluente hanno evidenziato un aumento dell'attivazione corticale dell'emisfero destro nelle aree omologhe deputate all'elaborazione del linguaggio. Questa 'sovrattivazione' rappresenta una strategia maladattiva che può limitare, piuttosto che promuovere, il recupero in pazienti afasici. Questi ricercatori hanno sfruttato la capacità della rTMS a bassa frequenza (1 Hz) di ridurre l'eccitabilità corticale: quando la rTMS è a 1 Hz è applicata su un'appropriata regione corticale, essa è in grado di sopprimere la possibile sovrattivazione e modulare così il network neurale per il linguaggio. In questa serie di studi i ricercatori hanno applicato una rTMS a 1 Hz per 10 minuti in quattro differenti siti della regione peri-silviana dell'emisfero destro: la parte rostrale e caudale del giro frontale inferiore destro (RIFG), la parte posteriore del giro temporale superiore e l'area della bocca nella corteccia motoria primaria. Da questi studi è emerso che a seguito della stimolazione della parte rostrale del RIFG i pazienti sono in grado di nominare correttamente più figure (Martin *et al.* 2004). A seguito di questi risultati, questa regione è stata sottoposta a rTMS a 1 Hz (20 minuti) per 10 giorni. I dati ottenuti hanno confermato un miglioramento significativo in tutti i pazienti; ma il risultato davvero interessante è che questo miglioramento è rimasto stabile nei due mesi successivi senza ulteriori sessioni di TMS (Naeser *et al.* 2005) e in un paziente la performance è rimasta migliore fino a otto mesi dopo la fine del trattamento (Naeser *et al.* 2005). Questi risultati, molto incoraggianti, dimostrano effetti a lungo termine e suggeriscono che in alcuni pazienti afasici la rTMS possa essere considerata un valido supporto alla terapia riabilitativa.

Risultati simili sono stati ottenuti anche tramite l'utilizzo di tDCS. Monti e colleghi (2008) hanno valutato gli effetti della tDCS sull'area fronto-temporale dell'emisfero sinistro in otto pazienti con afasia non-fluente. Anche in questo caso è stata valutata la denominazione di immagini (accuratezza e tempi di reazione) prima e dopo stimolazione anodica, catodica e stimolazione *sham* come condizione

di controllo. I risultati hanno dimostrato un miglioramento significativo associato alla stimolazione catodica.

Come già evidenziato, nei pazienti con ictus è possibile osservare un aumento disfunzionale dell'inibizione interemisferica dall'emisfero intatto su quello affetto (Murase *et al.* 2004). Poiché la stimolazione catodica diminuisce l'eccitabilità dei circuiti inibitori corticali, il miglioramento osservato in questi pazienti può essere spiegato dalla diminuita inibizione indotta dalla tDCS e portare così ad un aumento dell'attività delle aree linguistiche lesionate.

Nel complesso, l'utilizzo della stimolazione cerebrale in pazienti neurologici fornisce da un punto di vista teorico importanti informazioni circa l'organizzazione del linguaggio e da un punto di vista applicativo un contributo rilevante nel processo di riabilitazione.

Conclusioni

In questo capitolo si è cercato di analizzare il contributo che la stimolazione cerebrale può portare alla comprensione delle basi neurali del linguaggio (vedi anche Devlin, Watkins 2008). La TMS e la tDCS sono diventate negli ultimi anni degli strumenti sempre più importanti per studiare il ruolo di specifiche aree cerebrali nei processi mentali associati alle diverse funzioni linguistiche. A differenza delle tecniche di neuroimmagine, TMS e tDCS consentono di stabilire nessi causali tra una determinata area corticale e una determinata funzione linguistica, ovviando anche alle problematiche tipicamente legate agli studi su pazienti. Questi studi hanno contribuito a chiarire il ruolo delle diverse regioni del giro frontale inferiore sinistro nell'elaborazione semantica e fonologica (Gough *et al.* 2005) e a dimostrare come le conseguenze comportamentali di lesioni unilaterali dipendano anche dall'organizzazione pre-morbosa del linguaggio (Knecht *et al.* 2002).

Inoltre, queste tecniche hanno permesso di mettere in luce il forte nesso tra linguaggio e sistema motorio e visivo. Per esempio, grazie alla stimolazione cerebrale è stato possibile dimostrare una relazione tra parole legate ad azioni e programma motorio (Pulvermüller *et al.* 2005), suggerendo la possibilità di un'origine gestuale del linguaggio.

Infine, nell'ultima parte del capitolo si è posto l'accento sulle potenzialità della stimolazione cerebrale in campo clinico attraverso lo studio di pazienti neurologici. I promettenti risultati ottenuti con l'utilizzo della TMS e della tDCS su pazienti depressi, post-ictus o affetti da altre sindromi, quali il morbo di Parkinson, fanno sperare in un loro utilizzo sempre più significativo nel settore riabilitativo.

Bibliografia

- Amassian V.E. (1989), *Suppression of visual perception by magnetic coil stimulation of human occipital cortex*, «Electroencephalography and Clinical Neurophysiology», 74, pp. 458-462.
- Aziz-Zadeh L., M. Iacoboni, E. Zaidel, S. Wilson, J. Mazziotta (2004), *Left hemisphere motor facilitation in response to manual action sound*, «Eur J Neurosci», 19(9), pp. 2609-2612.
- Aziz-Zadeh L., L. Cattaneo, M. Rochat, G. Rizzolatti (2005), *Covert speech arrest induced by rTMS over both motor and nonmotor left hemisphere frontal sites*, «J Cogn Neurosci», 17(6), pp. 928-938.
- Baker J.M., C. Rorden, J. Fridreksson (2010), *Using transcranial direct current stimulation to treat stroke patients with aphasia*, «Stroke», 41(6), pp. 1229-1236.
- Beckers G., V. Homberg (1991), *Impairment of visual perception and visual short term memory scanning by transcranial magnetic stimulation of occipital cortex*, «Exp Brain Res», 87(2), pp. 421-432.
- Bird H., D. Howard, S. Franklin (2000), *Why is a verb like an inanimate object? Grammatical category and semantic category deficits*, «Brain and Language», 72, pp. 246-309.
- Boyer J.L., S. Harrison, T. Ro (2005), *Unconscious processing of orientation and color without primary visual cortex*, «Proc Natl Acad Sci USA», 102, pp. 16875-16879.
- Braet W., G.W. Humphreys (2006), *Case mixing and the right parietal cortex: Evidence from rTMS*, «Exp Brain Res», 168, pp. 265-271.
- Broca P. (1861), *Remarques sur le siège de la faculté du langage articulé; suivies d'une observation d'aphemie*, «Bulletin de la Société Anatomique de Paris», 6, pp. 330-357.
- Buccino G., L. Riggio, G. Melli, F. Binkofski, V. Gallese, G. Rizzolatti (2005), *Listening to action-related sentences modulates the activity of the motor system: A combined TMS and behavioral study*, «Brain Res Cogn Brain Res», 24(3), pp. 355-363.
- Cappa S.F., M. Sandrini, P.M. Rossini, K. Sosta, C. Miniussi (2002), *The role of the left frontal lobe in action naming: rTMS evidence*, «Neurology», 59(5), pp. 720-723.
- Caramazza A., A. Hillis (1991), *Lexical organization of nouns and verbs in the brain*, «Nature», 349, pp. 788-790.
- Caramazza A., B. Rapp (2002), *Selective difficulties with phonologic nouns and written verbs: A single case study*, «Journal of Neurolinguistic», 15, pp. 373-402.

- Caramazza A., B.Z. Mahnon (2003), *The organization of conceptual knowledge: The evidence from category-specific semantic deficits*, «Trends Cogn Sci», 7, pp. 354-361.
- Cattaneo Z., J.T. Devlin, T. Vecchi, J. Silvanto (2009a), *Dissociable neural representations of grammatical gender in Broca's area investigated by the combination of satiation and TMS*, «Neuroimage», 47, pp. 700-704.
- Cattaneo Z., F. Rota, V. Walsh, T. Vecchi, J. Silvanto (2009b), *TMS-adaptation reveals abstract letter selectivity in the left posterior parietal cortex*, «Cereb Cortex», 19(10), pp. 2321-2325.
- Cattaneo Z., J.T. Devlin, F. Salvini, T. Vecchi, J. Silvanto (2010), *The causal role of category-specific neuronal representations in the left ventral premotor cortex (PMv) in semantic processing*, «Neuroimage», 49, pp. 2728-2734.
- Cattaneo Z., A. Pisoni, C. Papagno (2011), *Transcranial direct current stimulation over Broca's region improves phonemic and semantic fluency in healthy individuals*, «Neuroscience», 183, pp. 64-70.
- Cattaneo Z., A. Pisoni, C. Papagno (2012), *Neural correlates of the semantic interference effect: New evidence from tDCS*, «Neuroscience», 223, pp. 56-67.
- Coltheart M., E. Davelaar, J.T. Jonasson, D. Besner (1977), *Access to the internal lexicon*, in Dornic S. (ed.), *Attention and Performance VI: The Psychology of Reading*, London, Academic Press, pp. 535-555.
- Coltheart M. (1980), *Deep dyslexia: A right hemisphere hypothesis*, in Coltheart M., K. Patterson, J.C. Marshall (eds.), *Deep dyslexia*, London, Routledge, pp. 326-386.
- Corballis M.C. (2003), *From mouth to hand: Gesture, speech, and the evolution of right-handedness*, «Behav Brain Sci», 26(2), pp. 199-208.
- Coslett H.B., N. Monsul (1994), *Reading with the right hemisphere: Evidence from transcranial magnetic stimulation*, «Brain Lang», 46(2), pp. 198-211.
- Déjerine J.J. (1914), *Sémiologie des affections du système nerveux*, Paris, Masson.
- Devlin J.T., P.M. Matthews, M.F. Rushworth (2003), *Semantic processing in the left inferior prefrontal cortex: A combined functional magnetic resonance imaging and transcranial magnetic stimulation study*, «J Cogn Neurosci», 15(1), pp. 71-84.
- Devlin J.T., K.E. Watkins (2008), *Investigating language organization with TMS*, in Wasserman E., C. Epstein, U. Ziemann, S. Lisanby, T. Paus, V. Walsh (eds.), *Oxford Handbook of Transcranial Stimulation*, Oxford, Oxford University Press, pp. 479-499.
- Di Pellegrino G., L. Fadiga, L. Fogassi, V. Gallese, V. Rizzolatti (1992), *Understanding motor events. A neurophysiological study*, «Exp Brain Res», 91, pp. 176-180.

- Drager B., C. Breitenstein, U. Helmke, S. Kamping, S. Knecht (2004), *Specific and nonspecific effects of transcranial magnetic stimulation on picture-word verification*, «Eur J Neurosci», 20(6), pp. 1681-1687.
- Epstein C.M., J.K. Lah, K. Meador, J.D. Weissman, L.E. Gaitan, B. Dihenia (1996), *Optimum stimulus parameters for lateralized suppression of speech with magnetic brain stimulation*, «Neurology», 47, pp. 1590-1593.
- Epstein C.M., J.L. Woodard, A.Y. Stringer, R.A. Bakay, T.R. Henry, P.B. Pennell (2000), *Repetitive transcranial magnetic stimulation does not replicate the Wada test*, «Neurology», 55(7), pp. 1025-1027.
- Fadiga L., L. Craighero, G. Buccino, G. Rizzolatti (2002), *Speech listening specifically modulates the excitability of tongue muscles: A TMS study*, «Eur J Neurosci», 15(2), pp. 399-402.
- Federmeier K.D., J.B. Segal, T. Lombrozo, M. Kutas (2000), *Brain responses to nouns, verbs and class-ambiguous words in context*, «Brain», 123(12), pp. 2552-2566.
- Fertonani A., S. Rosini, M. Coltelli, P.M. Rossini, C. Miniussi (2012), *Naming facilitation induced by transcranial direct current stimulation*, «Behav Brain Res», 208, pp. 311-318.
- Fillenbaum S. (1964), *Grammatical class as a variable in verbal satiation*, «J Speech Hear Res», 50, pp. 229-301.
- Flitman S.S., J. Grafman, E.M. Wassermann, V. Cooper, J. O'Grady, A. Pascual-Leone (1998), *Linguistic processing during repetitive transcranial magnetic stimulation*, «Neurology», 50, pp. 175-181.
- Floel A., T. Ellger, C. Breitenstein, S. Knecht (2003), *Language perception activates the hand motor cortex: Implications for motor theories of speech perception*, «Eur J Neurosci», 18(3), pp. 704-708.
- Gallese V., V. Rizzolatti, L. Fadiga, L. Fogassi (1996), *Premotor cortex and the recognition of motor actions*, «Brain Res Cogn», 3(2), pp. 131-141.
- Gangitano M., F.M. Mottaghy, A. Pascual-Leone (2004), *Modulation of premotor mirror neuron activity during observation of unpredictable grasping movements*, «Eur J Neurosci», 20(8), pp. 2193-2202.
- Gough P.M., A.C. Nobre, J.T. Devlin (2005), *Dissociating linguistic processes in the left inferior frontal cortex with transcranial magnetic stimulation*, «J Neurosci», 25(35), pp. 8010-8016.
- Hagoort P., L. Hald, M. Bastiaansen, K.M. Petersson (2004), *Integration of word meaning and world knowledge in language comprehension*. *Science*, 304 (5669), pp. 438-441.
- Hauk O., I. Johnsrude, F. Pulvermuller (2004), *Somatotopic representation of action words in human motor and premotor cortex*, «Neuron», 41(2), pp. 301-307.

- Hewes G.V. (1973), *Primate communication and gestural origin of language*, «Current Anthropology», 14, pp. 5-24.
- Hickok G., D. Poeppel (2000), *Towards a functional neuroanatomy of speech perception*, «Trends Cogn Sci», 4(4), pp. 131-138.
- Jahanshahi M., J. Rothwell (2000), *Transcranial magnetic stimulation studies of cognition: An emerging field*, «Experimental Brain Research», 131(1), pp. 1-9.
- Jennum P., L. Friberg, A. Fuglsang-Frederiksen, M. Dam (1994), *Speech localization using repetitive transcranial magnetic stimulation*, «Neurology», 44, pp. 269-273.
- Knecht S., A. Floel, B. Drager, C. Breitenstein, J. Sommer, H. Henningsen (2002), *Degree of language lateralization determines susceptibility to unilateral brain lesions*, «Nat Neurosci», 5(7), pp. 695-699.
- Kohler E., C. Keysers, M.A. Umiltà, L. Fogassi, V. Gallese, G. Rizzolatti (2002), *Hearing sounds, understanding actions: Action representation in mirror neurons*, «Science», 297(5582), pp. 846-848.
- Kohler S., T. Paus, R.L. Buckner, B. Milner (2004), *Effects of left inferior prefrontal stimulation on episodic memory formation: A two-stage fMRI-rTMS study*, «J Cogn Neurosci», 16(2), pp. 178-188.
- Lavidor M., V. Walsh (2003), *A magnetic stimulation examination of orthographic neighborhood effects in visual word recognition*, «J Cogn Neurosci», 15(3), pp. 354-363.
- Leff A.P., S.K. Scott, J.C. Rothwell, R.J. Wise (2001), *The planning and guiding of reading saccades: A repetitive transcranial magnetic stimulation study*, «Cereb Cortex», 11(10), pp. 918-923.
- Levy B.J., M.C. Anderson (2002), *Inhibitory processes and the control of memory retrieval*, «Trends Cogn Sci», 6(7), pp. 299-305.
- Liberman A.M., I.G. Mattingly (1985), *The motor theory of speech perception- revised*, «Cognition», 21, pp. 1-36.
- Lindquist K.A., L.F. Barret, E. Bliss-Moreau, J.A. Russel (2006), *Language and the perception of emotion*, «Emotion», 6(1), pp. 125-138.
- Lo Y.L., S. Fook-Chong, D.P. Lau, E.K. Tan (2003), *Cortical excitability changes associated with musical tasks: A transcranial magnetic stimulation study in humans*, «Neurosci Lett», 352(2), pp. 85-88.
- Martin P.I., M.A. Naeser, H. Theoret, J.M. Tormos, M. Nicholas, J. Kurland (2004), *Transcranial magnetic stimulation as a complementary treatment for aphasia*, «Semin Speech Lang», 25(2), pp. 181-191.
- Meister I.G., B. Boroojerdi, H. Foltys, R. Sparing, W. Huber, R. Topper (2003), *Motor cortex hand area and speech: Implications for the development of language*, «Neuropsychologia», 41(4), pp. 401-406.

- Michelucci R., F. Valzania, D. Passarelli, M. Santange, R. Rizzi, A.M. Buzzi (1994), *Rapid-rate transcranial magnetic stimulation and hemispheric language dominance: Usefulness and safety in epilepsy*, «Neurology», 44(9), pp. 1697-1700.
- Monti A., F. Cogiamanian, S. Marceglia, R. Ferrucci, F. Mameli, S. Mrakic-Sposta, M. Vergari, S. Zago, A. Priori (2008), *Improved naming after transcranial direct current stimulation in aphasia*, «J Neurol Neurosurg Psychiatry», 4, pp. 79451-79453.
- Mottaghy M.F., M. Hungs, M. Brüggmann, R. Sparing, B. Boroojerdi, H. Foltys, W. Huber, R. Töpper. (1999), *Facilitation of picture naming after repetitive transcranial magnetic stimulation*, «Neurology», 53(8), pp. 1806-1812.
- Murase N., J. Duque, R. Mazzocchio, L.G. Cohen (2004), *Influence of interhemispheric interactions on motor function in chronic stroke*, «Annals of Neurology», 55(3), pp. 400-409.
- Naeser M.A., P.I. Martin, E.H. Baker, S.M. Hodge, S.E. Sczerzenie, M. Nicholas (2004), *Overt propositional speech in chronic nonfluent aphasia studied with the dynamic susceptibility contrast fMRI method*, «Neuroimage», 22(1), pp. 29-41.
- Naeser M.A., P.I. Martin, M. Nicholas, E.H. Baker, H. Seekins, N. Helm-Estabrooks (2005), *Improved naming after TMS treatments in a chronic, global aphasia patient-case report*, «Neurocase», 11(3), pp. 182-193.
- Nietsche M.A., W. Paulus (2000), *Excitability changes induced in the human motor cortex by weak transcranial direct current stimulation*, «Neurotherapeutics», 6, pp. 244-250.
- Nixon P., J. Lazarova, I. Hodinott-Hill, P. Gough, R. Passingham (2004), *The inferior frontal gyrus and phonological processing: An investigation using rTMS*, «J Cogn Neurosci», 16(2), pp. 289-300.
- Pascual-Leone A., J.R. Gates, A. Dhuna (1991), *Induction of speech arrest and counting errors with rapid-rate transcranial magnetic stimulation*, «Neurology», 41, pp. 697-702.
- Pascual-Leone A., D. Bartres-Faz, J.P. Keenan (1999), *Transcranial magnetic stimulation: Studying the brain-behavior relationship by induction of 'virtual lesions'*, «Philosophical Transactions of the Royal Society London B», 354, pp. 1229-1238.
- Pascual-Leone A., V. Walsh, J. Rothwell (2000), *Transcranial magnetic stimulation in cognitive neuroscience-virtual lesion, chronometry, and functional connectivity*, «Current Opinions in Neurobiology», 10(2), pp. 232-237.
- Pilotti M., J.S. Antrobus, M. Duff (1997), *The effect of presemantic acoustic adaptation on semantic 'satiation'*, «Memb Cogn», 25(3), pp. 305-312.

- Price C.J., K.J. Friston (2002), *Functional imaging studies of neuropsychological patients: Applications and limitations*, «Neurocase», 8(5), pp. 345-354.
- Pulvermüller F., M. Harle, F. Hummel (2001), *Walking or talking? Behavioural and neurophysiological correlates of action verb processing*, «Brain and Language», 78, pp. 143-168.
- Pulvermüller F., O. Hauk, V.V. Nikulin, R.J. Ilmoniemi (2005), *Functional links between motor and language systems*, «Eur J Neurosci», 21(3), pp. 793-797.
- Riddoch J., G.W. Humphreys (1990), *Interaction of attention and lexical processes in neglect dyslexia*, «Cognitive Neuropsychology», 7, pp. 479-517.
- Rizzolatti G., M.A. Arbib (1998), *Language within our grasp*, «Trends Neurosci», 21(5), pp. 188-194.
- Ro T., B. Breitmeyer, P. Burton, N.S. Singhal., D. Lane (2003), *Feedback contributions to visual awareness in human occipital cortex*, «Curr Biol», 13, pp. 1038-1041.
- Ro T., D. Shelton, O.L. Lee, E. Chang (2004), *Extra-geniculate mediation of unconscious vision in transcranial magnetic stimulation-induced blindsight*, «Proc Natl Acad Sci U S A», 101, pp. 9933-9935.
- Rossini P.M., A.T. Barker, A. Berardelli, M.D. Caramia, G. Caruso, R.Q. Cracco, M.R. Dimitrijevic, M. Hallett, Y. Katayama, C.H. Lucking, A. Maertens de Noordhout, C. Marsden, N. Murray, J. Rothwell, M. Swash, C. Tomberg (1994), *Non-invasive electrical and magnetic stimulation of the brain, spinal cord and roots: Basic principles and procedures for routine clinical applications: Report of an IFCN committee*, «Electroencephalogr Clin Neurophysiol», 91, pp. 79-92.
- Sakai K.L., Y. Noguchi, T. Takeuchi, E. Watanabe (2002), *Selective priming of syntactic processing by event-related transcranial magnetic stimulation of Broca's area*, «Neuron», 35(6), pp. 1177-1182.
- Scott S.K., R.J. Wise (2004), *The functional neuroanatomy of prelexical processing in speech perception*, «Cognition», 92(1-2), pp. 13-45.
- Seyal M., B. Mull, N. Bhullar, T. Ahmad, B. Gage (1999), *Anticipation and execution of a simple reading task enhance corticospinal excitability*, «Clin Neurophysiol», 110(3), pp. 424-429.
- Shapiro K.A., A. Pascual-Leone, F.M. Mottaghy, M. Gangitano, A. Caramazza (2001), *Grammatical distinctions in the left frontal cortex*, «J Cogn Neurosci», 13(6), pp. 713-720.
- Shapiro K.A., A. Caramazza (2003), *The representation of grammatical categories in the brain*, «Trends Cogn Sci», 7(5), pp. 201-206.
- Shimokido T. (2003), *The effect of semantic satiation on a double lexical decision task*, «Shinrigaku Kenkyu», 74(1), pp. 45-50.

- Smith L.C. (1984), *Semantic satiation affects category membership decision time but not lexical priming*, «Memb Cogn», 12(5), pp. 483-488.
- Smith L.C., R. Klein (1990), *Evidence for semantic satiation: Repeating a category slows subsequent semantic processing*, «JEPLM&C», 16, pp. 852-861.
- Sparing R., M. Dafotakis, I.G. Meister, G.R. Fink (2008), *Enhancing language performance with non invasive brain stimulation-a transcranial direct current stimulation study in health Humans*, «Neuropsychologia», 46, pp. 261-268.
- Stewart L., B. Meyer, U. Frith, J. Rothwell (2001a), *Left posterior BA37 is involved in object recognition: A TMS study*, «Neuropsychologia», 39(1), pp. 1-6.
- Stewart L., V. Walsh, J.C. Rothwell (2001b), *Motor and phosphene thresholds: A transcranial magnetic stimulation correlation study*, «Neuropsychologia», 39(4), pp. 415-419.
- Strafella A.P., T. Paus (2000), *Modulation of cortical excitability during action observation: A transcranial magnetic stimulation study*, «Neuroreport», 11(10), pp. 2289-2292.
- Sundara M., A.K. Namasivayam, R. Chen (2001), *Observation-execution matching system for speech: A magnetic stimulation study*, «Neuroreport», 12(7), pp. 1341-1344.
- Thiel A., B. Habedank, L. Winhuisen, K. Herholz, J. Kessler, W.F. Haupt (2005), *Essential language function of the right hemisphere in brain tumor patients*, «Ann Neurol», 57(1), pp. 128-131.
- Tokimura H., Y. Tokimura, A. Oliviero, T. Asakura, J.C. Rothwell (1996), *Speech-induced changes in corticospinal excitability*, «Ann Neurol», 40, pp. 628-634.
- Wada J., T. Rasmussen (1960), *Intracarotid injection of sodium amytal for the lateralization of cerebral speech dominance: Experimental and clinical observations*, «Journal of Neurosurgery», 17, pp. 266-282.
- Walsh V., M.F.S. Rushworth (1999), *The use of transcranial magnetic stimulation in neuropsychological testing*, «Neuropsychologia», 37, pp. 125-135.
- Walsh V., A. Cowey (2000), *Transcranial magnetic stimulation and cognitive neuroscience*, «Nat Rev Neurosci», 1(1), pp. 73-79.
- Walsh V., A. Pascual-Leone (2003), *Transcranial magnetic stimulation: A neuro-chronometrics of mind*, London, MIT Press.
- Wassermann E.M., T.A. Blaxton, E.A. Hoffman, C.D. Berry, H. Oletsky, A. Pascual-Leone (1999), *Repetitive transcranial magnetic stimulation of the dominant hemisphere can disrupt visual naming in temporal lobe epilepsy patients*, «Neuropsychologia», 37(5), pp. 537-544.
- Watkins K.E., A.P. Strafella, T. Paus (2003), *Seeing and hearing speech excites the motor system involved in speech production*, «Neuropsychologia», 41(8), pp. 989-994.

- Watkins K.E., T. Paus (2004), *Modulation of Motor Excitability during Speech Perception: The Role of Broca's Area*, «J Cogn Neurosci», 16(6), pp. 978-987.
- Wernicke C. (1874), *Der Aphasische Symptomenkomplex*, Breslau, Cohen and Weigert.
- Wilcox S.E., D.F. Armstrong (2007), *The gestural origin of language*, Oxford, Oxford University Press.
- Winhuisen L., A. Thie, B. Schumacher, J. Kessler, J. Rudolf, W.F. Haupt (2005), *Role of the contralateral inferior frontal gyrus in recovery of language function in poststroke aphasia: A combined repetitive transcranial magnetic stimulation and positron emission tomography study*, «Stroke», 36(8), pp. 1759-1763.
- Zurif E.B., A. Caramazza, R. Myerson (1972), *Grammatical judgments of agrammatic aphasics*, «Neuropsychologia», 10(4), pp. 405-417.

La neuropsicologia del linguaggio: il contributo della patologia

Stefano Cappa, Università Vita-Salute e Istituto Scientifico San Raffaele, Milano

Lo studio delle malattie del cervello ha costituito il fondamento storico della neurobiologia del linguaggio, e continua a svolgere un ruolo centrale nello sviluppo delle nostre conoscenze sui rapporti tra linguaggio e cervello. Qualsiasi processo patologico, indipendentemente dalla sua natura (lesione vascolare, tumorale, degenerativa...) che coinvolga le aree cerebrali specializzate può rappresentare una 'finestra' sull'organizzazione cerebrale del linguaggio. La maggior parte degli studi 'classici' riguarda le afasie, ovvero i disturbi acquisiti del linguaggio conseguenti a lesioni acute dell'encefalo. A questo tipo di osservazioni si devono le prime, fondamentali scoperte sulla specializzazione dell'emisfero sinistro per il linguaggio, e sul ruolo di regioni circoscritte in aspetti specifici dell'elaborazione linguistica. Lo studio di pazienti colpiti da lesioni localizzate, in particolare i pazienti divenuti afasici per lesioni vascolari come infarti ed emorragie, ha infatti consentito di dimostrare il legame tra preferenza manuale (nella maggior parte dei soggetti, per la mano destra) e dominanza emisferica per il linguaggio. Tale legame è sistematico per i soggetti destrimani, che presentano quasi universalmente una specializzazione dell'emisfero sinistro per il linguaggio, variabile nei soggetti mancini (meno della metà presenta una dominanza dell'emisfero destro). Questi dati, che dimostrano un legame sistematico, ma non assoluto, tra emisfero dominante per l'azione e emisfero specializzato per il linguaggio, sono stati in seguito confermati attraverso altre metodiche, quali l'*imaging* funzionale cerebrale. Uno studio recente (Cai *et al.* 2013) ha dimostrato in un gruppo di soggetti mancini un legame sistematico tra la dominanza per il linguaggio, e la specializzazione per compiti visuo-spaziali dell'emisfero controlaterale. Questo dato sembra sostenere l'ipotesi di un effettivo vantaggio conferito dalla 'divisione del lavoro' tra i due emisferi, che potrebbe avere quindi assunto un ruolo importante nell'evoluzione.

Tali osservazioni delle conseguenze della patologia cerebrovascolare hanno consentito inoltre di stabilire le prime correlazioni, necessariamente grossolane, tra alcuni aspetti dell'elaborazione linguistica (definite principalmente attraverso

so il profilo di compromissione nelle modalità d'uso del linguaggio, quali produzione, comprensione e ripetizione) e regioni specifiche dell'emisfero dominante. Ad esempio, sulla base della sintomatologia clinica è tradizionale ascrivere alla regione frontale ventrolaterale dell'emisfero sinistro (area di Broca) un ruolo centrale nell'espressione verbale, mentre alla parte posteriore del giro temporale superiore sinistro (area di Wernicke) viene assegnato un ruolo cruciale nella comprensione del linguaggio (per una descrizione delle sindromi classiche, vedi Abutalebi, Cappa 2008). I limiti di questo tipo di approccio 'localizzazionista' divennero presto evidenti agli stessi clinici dell'800. Le diverse modalità d'uso del linguaggio non sono localizzate in singole aree cerebrali, e la descrizione qualitativa delle caratteristiche del deficit linguistico conseguente alla lesione cerebrale dimostra l'enorme variabilità delle manifestazioni cliniche dell'afasia. La convergenza tra l'approccio di tipo psicometrico, e l'introduzione di modelli strutturali dell'organizzazione linguistica, basati sulla distinzione tra livelli (acustico-fonetico, fonologico, lessico-semantico e morfo-sintattico) porta a una profonda revisione delle descrizioni e interpretazioni del deficit linguistico conseguente a lesione cerebrale. A titolo d'esempio, consideriamo il contrasto sopra descritto, tra una cosiddetta 'afasia di espressione' e una 'afasia di comprensione'. Lo sviluppo di test specifici conduce alla dimostrazione che i pazienti etichettati nella prima categoria hanno in realtà anche deficit di comprensione, se questa viene valutata attraverso l'elaborazione di frasi complesse sul piano sintattico (ad esempio, frasi passive reversibili, quali 'il bambino è inseguito dalla bambina'). Per quanto riguarda i pazienti del secondo tipo, al disturbo di comprensione si associa sistematicamente anche la presenza di disturbi nella produzione di parole, con errori che possono coinvolgere la struttura fonologica ('tevolò' al posto di 'tavolo') o l'appropriatezza semantico-lessicale ('sedia' al posto di 'tavolo'). L'analisi qualitativa del deficit linguistico apre la strada alla applicazione dei modelli della neuropsicologia cognitiva, che dominano il campo a partire dagli anni Settanta del secolo scorso (Shallice 1988).

Un ovvio limite della correlazione anatomo-clinica 'classica', praticata dai clinici neurologi sino alla metà del secolo scorso, era l'impossibilità di stabilire a paziente vivente dove la lesione responsabile dell'afasia fosse localizzata nel cervello. L'unica possibilità era infatti di attendere il decesso del paziente ed eseguire un'autopsia. La situazione si modifica con gli sviluppi della neurochirurgia, che consente di correlare il disturbo linguistico con la sede della lesione rilevata all'intervento, e in seguito con gli avanzamenti tecnologici della radiologia, a partire dagli anni '70 del secolo scorso.

Con l'introduzione della tomografia computerizzata (TC) e, in seguito, della risonanza magnetica (RM) diventa possibile individuare sede ed estensione della

lesione cerebrale in vivo, e porre quindi in una correlazione diretta la patologia del cervello con il quadro di deficit linguistico. In un primo tempo la ricerca si indirizza verso la correlazione tra le sindromi classiche, descritte dai clinici dell'800, e la sede della lesione cerebrale. La collaborazione tra neurologi, psicologi e linguisti tuttavia sposta progressivamente l'attenzione dalle sindromi cliniche alle caratteristiche qualitative e quantitative del deficit linguistico. Fondamentali a questo proposito sono gli studi del gruppo di Boston (Goodglass, Kaplan 1983), basati sull'analisi delle caratteristiche della produzione afasica e sui parametri linguistici che influenzano le prestazioni dei pazienti in compiti quali la ricerca e la produzione lessicale o la comprensione di frasi. Parallelamente, lo studio di correlazione si prefigge di individuare i correlati neurali di aspetti specifici dell'elaborazione linguistica, quali le compromissioni del livello fonologico e semantico lessicale, o delle alterazioni della comprensione di frasi sintatticamente complesse (Caplan 1992). Gli sviluppi delle metodiche di analisi dei dati hanno un ruolo importante nell'affinare questo tipo di ricerca, in particolare per quanto riguarda gli studi di gruppo. Le prime tecniche si basavano su metodi di mappaggio manuale, come la sovrapposizione delle lesioni (Mazzocchi, Vignolo 1979). Le lesioni osservate in un gruppo di pazienti con un deficit specifico, ad esempio errori fonologici in produzione, venivano riportate su una rappresentazione schematica dell'emisfero di sinistra, e sovrapposte al fine di rilevare la regione consistentemente compromessa, al di là della variabilità lesionale individuale. Questo tipo di approccio è stato in seguito soppiantato da procedure più precise, che grazie al loro carattere semi-automatizzato consentono di ridurre il margine di errore legato all'operatore o che, negli sviluppi più recenti, vanno verso una completa automatizzazione della procedura di segmentazione che consente di separare l'area cerebrale lesa dal tessuto sano. Ampia diffusione ha avuto in ambito di ricerca il software MRIcro (Rorden *et al.* 2007); molto utile è anche una tecnica che consente di correlare direttamente la presenza di una lesione localizzata con il livello di prestazione a un test specifico (*voxel-based lesion symptom mapping* – VBLSM – Bates *et al.* 2003), consentendo di passare da un'analisi categoriale del disturbo (presente/assente) a un'analisi quantitativa.

Come esempio di approccio basato sullo studio delle lesioni, possiamo considerare le indagini sulle basi cerebrali dei processi di elaborazione semantico-lessicale. Un disturbo nel denominare oggetti e figure costituisce uno degli elementi comuni tra le diverse forme cliniche di afasia, anche se il tipo di errori che i pazienti commettono sono molto differenti. Alcuni pazienti commettono errori che suggeriscono una compromissione della capacità di produrre la struttura fonologica di una parola (parafasie fonemiche), mentre altri producono errori che indicano una disfunzione a livello della selezione lessicale o rappresentazio-

ni concettuali (parafasie verbali o semantiche). Gli studi di correlazione con la sede della lesione in pazienti con lesioni vascolari hanno individuato correlazioni relativamente specifiche. Lesioni delle aree poste all'intorno della scissura di Silvio sono associate a deficit fonologici, mentre le lesioni in aree temporali o parietali extrasilviane sono associate a errori di tipo semantico-lessicale (Cappa *et al.* 1981). Il ruolo importante del lobo temporale di sinistra, in particolare nella sua porzione anteriore, è stato confermato in tempi più recenti da uno studio con la tecnica VBLSM sopra citata (Schwartz *et al.* 2009). Inoltre, lo studio dei pazienti affetti da malattie degenerative che colpiscono le aree del linguaggio (le cosiddette afasie primarie progressive) hanno confermato la distinzione tra i substrati neurali del disturbo fonologico e lessicale-semantic, attraverso il confronto tra la sede lesionale caratteristica di due forme cliniche differenti. I pazienti con variante semantica presentano infatti un prevalente interessamento patologico del lobo temporale, mentre i pazienti con variante logopenica presentano una compromissione temporo-parietale nelle aree perisilviane (Gorno-Tempini *et al.* 2004). La compromissione del sistema semantico che si osserva nei pazienti con variante semantica non è limitata ai compiti verbali, ma si estende anche alla semantica non-verbale, come dimostrato dalle prestazioni deficitarie in compiti di accoppiamento non verbale di figure rappresentanti oggetti che appartengono a differenti categorie semantiche. Queste correlazioni basate sulle osservazioni cliniche sono state in seguito confermate da studi eseguiti sui soggetti normali utilizzando tecniche quali la tomografia a emissione di positroni (PET) e la risonanza magnetica funzionale (vedi Price 2012 per un'estesa revisione). Anche con queste metodiche è possibile osservare, in compiti sia verbali che non verbali che richiedono ai soggetti di accedere a conoscenze concettuali, un'estesa attivazione del cervello, che coinvolge i lobi temporali ma si estende anche ad aree frontali e parietali. Nel caso di compiti che impegnano in particolare l'accesso al lessico, quale la decisione lessicale o la consapevolezza fonologica (giudizi di rima, segmentazione), le attivazioni cerebrali coinvolgono le classiche aree del linguaggio perisilviane, in particolare le aree di Broca e di Wernicke.

Un importante ulteriore contributo allo studio delle basi neurologiche dei processi di elaborazione semantico-lessicale è derivata da altre osservazioni cliniche, basate sullo studio di singoli casi con l'approccio della neuropsicologia cognitiva (Shallice 1988). In particolare, alcune osservazioni hanno dimostrato la possibilità che lesioni cerebrali colpissero in modo relativamente selettivo la capacità di produrre e/o comprendere parole riferite a specifiche categorie semantiche, oppure appartenenti a diverse categorie grammaticali. Nel primo caso, i primi disturbi selettivi sono stati verificati a livello della categoria delle entità biologiche e degli artefatti (Warrington, Shallice 1984). Nel secondo, numerosi

sono gli studi che hanno riportato dissociazioni nella capacità di utilizzare verbi e nomi (Damasio, Tranel 1993). Lo studio della sede della lesione in pazienti con disturbi selettivi per categoria ha dimostrato la presenza di lesioni differenti, correlate con i diversi quadri clinici. Nel caso dei pazienti con disturbi selettivi per categoria semantica, i deficit per le entità biologiche si associano di regola a lesioni del lobo temporale, spesso bilaterali e con estensione alle regioni anteriori. Se ad essere selettivamente interessate sono le entità non biologiche, in genere gli utensili, la sede della lesione è spesso (anche se non invariabilmente) unilaterale sinistra, nelle aree temporoparietali (Gainotti 2000). Nel caso della dissociazione nomi-verbi, la correlazione più frequentemente (anche se non costantemente) riscontrata è tra lesioni frontali o frontoparietali sinistre per i verbi, lesioni temporali per i nomi (Cappa, Perani 2003). Questi risultati lesionali sono stati interpretati come supporto alle teorie che propongono un ruolo importante delle regioni sensorimotorie nei processi di elaborazione semantica lessicale o non-lessicale (Binder, Desai 2011). Nel caso dei verbi, ad esempio, il frequente riferimento all'azione sarebbe in relazione al coinvolgimento di aree motorie e/o premotorie nelle lesioni con pazienti con deficit selettivo. Anche in questo caso gli studi su soggetti normali con i metodi di neuroimmagine funzionale hanno fornito ulteriori contributi alla comprensione delle basi neurali dei deficit specifici per categoria, dimostrando, ad esempio, l'attivazione di aree motorie e/o premotorie durante compiti puramente verbali, come la denominazione o la decisione lessicale (Cappa 2012).

Un analogo processo di convergenza tra i dati lesionali e i risultati delle indagini funzionali in soggetti normali si è osservato anche in altre aree di indagine neurolinguistica, dalla percezione del linguaggio alla elaborazione sintattica. Vale la pena di sottolineare come i dati forniti dagli approcci differenti non costituiscano una semplice conferma, ma manifestino una continua tensione, che porta spesso alla necessità di rivedere ipotesi precedenti, basate su singole fonti di evidenza. Basti pensare, a titolo di esempio, alla profonda revisione del ruolo dell'area di Broca nelle funzioni linguistiche, da 'centro dell'espressione' a componente di complesse reti neurali coinvolte in aspetti specifici della elaborazione fonologica, lessicale e morfosintattica (Friderici, Gierhan 2013).

In conclusione, nonostante gli sviluppi delle tecniche di indagine del funzionamento cerebrale in condizioni di normalità, lo studio della patologia del linguaggio mantiene inalterato il suo ruolo centrale nella ricerca sulla neurobiologia del linguaggio, sia come generatore di ipotesi che come terreno di verifica di modelli psicolinguistici o neurofisiologici.

Bibliografia

- Abutalebi J., S.F. Cappa (2008), *Language disorders*, in Cappa S.F., J. Abutalebi (eds.), *Cognitive Neurology. A Clinical Textbook*, Oxford, Oxford University Press.
- Bates E., S.M. Wilson, A.P. Saygin, F. Dick, M.I. Sereno, R.T. Knight, N.F. Dronkers (2003), *Voxel-based lesion-symptom mapping*, «Nat Neurosci», 6(5), pp. 448-450.
- Binder J.R., Desai R.H. (2011), *The neurobiology of semantic memory*, «Trends Cogn Sci», 15(11), pp. 527-536.
- Cai Q., L. Van der Haegen, M. Brysbaert (2013), *Complementary hemispheric specialization for language production and visuospatial attention*, «Proc Natl Acad Sci USA», 110(4), pp. E322-E330.
- Caplan D. (1992), *Language*, Cambridge MA, MIT Press.
- Cappa S., G. Cavallotti, L.A. Vignolo (1981), *Phonemic and lexical errors in fluent aphasia: Correlation with lesion site*, «Neuropsychologia», 19(2), pp. 171-177.
- Cappa S.F. (2012), *Imaging semantics and syntax*, «Neuroimage», 61(2), pp. 427-431.
- Cappa S.F., D. Perani (2003), *The neural correlates of noun and verb processing*, «Journal of Neurolinguistics», 16, pp. 183-189.
- Damasio A.R., D. Tranel (1993), *Nouns and verbs are retrieved with differently distributed neural systems*, «Proc Natl Acad Sci U S A», 90(11), pp.4957-4960.
- Friederici A.D., S.M. Gierhan (2013), *The language network*, «Curr Opin Neurobiol», 23(2), pp. 250-254.
- Gainotti G. (2000), *What the locus of brain lesion tells us about the nature of the cognitive defect underlying category-specific disorders: A review*, «Cortex», 36, pp. 539-559.
- Goodglass H., E. Kaplan (1983), *Assessment of Aphasia and Related Disorders*, Philadelphia, Lea Febiger.
- Gorno-Tempini M.L., N.F. Dronkers, K.P. Rankin, J.M. Ogar, L. Phengrasamy, H.J. Rosen, J.K. Johnson, M.W. Weiner, B.L. Miller (2004), *Cognition and anatomy in three variants of Primary Progressive Aphasia*, «Annals of Neurology», 55, pp. 335-346.
- Mazzocchi F., L.A. Vignolo (1979), *Localization of lesions in aphasia: Clinical-CT scan correlations in stroke patients*, «Cortex», 15, pp. 627-654.
- Price C.J. (2012), *A review and synthesis of the first 20 years of PET and fMRI studies of heard speech, spoken language and reading*, «Neuroimage», 62(2), pp. 816-847.
- Rorden C., H.O. Karnath, L. Bonilha (2007), *Improving lesion-symptom mapping*, «J Cogn Neurosci», 19(7), pp. 1081-1088.

- Schwartz M.F., D.Y. Kimberg, G.M. Walker, O. Faseyitan, A. Brecher, G.S. Dell (2009), *Anterior temporal involvement in semantic word retrieval: Voxel-based lesion-symptom mapping evidence from aphasia*, «Brain», 132(Pt 12), pp. 3411-3427.
- Shallice T. (1988), *From neuropsychology to mental structure*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Warrington E.K., T. Shallice (1984), *Category-specific semantic impairment*, «Brain», 107, pp. 829-854.

Lo studio del linguaggio con la risonanza magnetica funzionale

Giovanna Egidi,¹ Uri Hasson²

¹Centro Interdipartimentale Mente e Cervello (CIMeC),

²Università degli Studi di Trento

Introduzione

Il capitolo si divide in due parti, una metodologica e una interpretativa. In quella metodologica offriamo una visione d'insieme della tecnica di risonanza magnetica funzionale e della sua applicazione agli studi sul linguaggio. Accenniamo al tipo di esperimenti condotti con questa tecnica e ai principali metodi di analisi dei dati e descriviamo solo quelli più comunemente usati negli studi sul linguaggio. Per un approfondimento degli aspetti qui introdotti e per una prospettiva più ampia sulle possibilità sperimentali e di analisi dei dati con la risonanza magnetica funzionale rimandiamo, in aggiunta ai testi citati nei vari paragrafi, a Sacco (2013) e Huettel *et al.* (2008).

Nella seconda parte del capitolo evidenziamo alcune difficoltà che si possono incontrare nell'interpretare dati raccolti con la risonanza magnetica funzionale in esperimenti sul linguaggio. Nel far ciò, spieghiamo come interpretazioni diverse siano giustificate, basandoci su letteratura recente anche in campi che non sono considerati strettamente linguistici. Come speriamo sia evidente dalle nostre argomentazioni, consigliamo ai nostri lettori di interpretare i risultati degli studi di neuroimmagine sul linguaggio alla luce di una letteratura estesa che non prenda in considerazione solo funzioni linguistiche; una conoscenza più ampia che includa le principali reti neurali coinvolte nelle funzioni cognitive fondamentali, infatti, è indispensabile per comprendere le possibili funzioni delle regioni e reti neurali coinvolte nell'elaborazione del linguaggio.

Anche se ci limitiamo a esporre informazioni introduttive riguardo all'uso della risonanza magnetica per lo studio del linguaggio, ci rivolgiamo però a lettori con una certa esperienza di studi cognitivi. Più specificatamente, ci rivolgiamo a lettori con una generale esperienza di esperimenti di psicolinguistica, con una

conoscenza di base della statistica impiegata in questi esperimenti, dei principali processi cognitivi umani, e delle principali regioni in cui si divide il cervello umano.

Data la vastità dei temi trattati, offriamo in questo capitolo solo un avviamento alla ricerca sul linguaggio con la risonanza magnetica funzionale e non cerchiamo in alcun modo di presentare un quadro esaustivo di nessuna delle tematiche discusse. Cerchiamo di offrire un contesto generale che permetta di apprezzare lo studio degli aspetti principali del linguaggio con la risonanza magnetica funzionale, ma i nostri esempi provengono solo dalla letteratura sulla comprensione studiata tramite esperimenti con partecipanti sani (cioè senza deficit). Inoltre, prestiamo particolare attenzione alla letteratura sulla comprensione del discorso e della frase, perché queste rispecchiano più da vicino il linguaggio di tutti i giorni. Ciò che sappiamo riguardo alla comprensione di unità linguistiche più piccole può infatti non applicarsi a quelle più estese in cui il contesto può giocare un forte ruolo.

1. Considerazioni tecniche e metodologiche

1.1. La tecnica di risonanza magnetica funzionale e il segnale BOLD

La risonanza magnetica funzionale (*fMRI*, che sta per *functional Magnetic Resonance Imaging*) è una tecnica di neuroimmagine che si basa sul misurare il metabolismo dell'ossigeno nei globuli rossi presenti in regioni cerebrali, permettendo così di determinare l'aumento o la diminuzione di attività in queste regioni durante lo svolgimento di specifici comportamenti o funzioni. Più precisamente, la *fMRI* misura cambiamenti locali dei livelli di ossigenazione dell'emoglobina nel flusso sanguigno.

L'emoglobina ossigenata e quella deossigenata emettono diversi segnali magnetici che vengono rilevati dalla macchina di risonanza magnetica, chiamata *scanner*. In ogni esperimento, il partecipante sta sdraiato con la testa bene al centro del magnete dello scanner, dove il campo magnetico è più forte (decine di migliaia di volte maggiore del campo magnetico terrestre). Applicando questo campo magnetico alla testa, la macchina fa in modo che i protoni presenti nei tessuti subiscano una precessione e allineino il loro asse a quello del campo magnetico. Il segnale che si registra si crea applicando un secondo campo magnetico perpendicolarmente al primo. Questo secondo campo magnetico è pulsante, cioè alterna periodi di attività a periodi di inattività. Quando è attivo, esso perturba l'equilibrio di precessione che il primo campo magnetico aveva creato. Quando è inattivo, permette ai protoni di allinearsi di nuovo al primo campo magnetico, in modo da lasciare che l'equilibrio preesistente tenda a

ristabilirsi. Questo processo di riallineamento, o rilassamento, può impiegare diverso tempo a seconda della concentrazione del mezzo contenente i protoni misurati (Jezzard, Clare 2001; Wager *et al.* 2007).

Le immagini di risonanza riflettono il contrasto tra tessuti cerebrali che svolgono una diversa funzione o che hanno una diversa struttura. Per costruire delle *immagini funzionali* (o immagini del funzionamento del cervello) lo scanner misura i tempi di rilassamento dei protoni d'idrogeno contenuti nell'emoglobina, tempi che dipendono dal livello di ossigenazione di quest'ultima. Quando i neuroni in una regione aumentano la loro attività per una funzione cognitiva, sensoriale o motoria, consumano ossigeno facendo così crescere il livello di emoglobina deossigenata nella regione.

Ciò provoca un aumento del flusso sanguigno nella regione, con conseguente aumento anche del livello di emoglobina ossigenata. Il *segnale BOLD* (acronimo per Blood Oxygenation Level Dependent) misura queste variazioni fra emoglobina deossigenata e ossigenata, in virtù del fatto che i protoni d'idrogeno nell'emoglobina ossigenata e deossigenata hanno diversi tempi di rilassamento. Il segnale BOLD riflette perciò il consumo di ossigeno delle regioni del cervello osservate. Questo consumo si interpreta come evidenza della loro attivazione e del loro coinvolgimento nella funzione studiata (Jezzard, Clare 2001; Wager *et al.* 2007).

Per costruire *immagini strutturali* (cioè le immagini anatomiche del cervello), lo scanner misura il rilassamento dei protoni di idrogeno contenuti nelle molecole d'acqua. Poiché diverse strutture hanno diverse concentrazioni d'acqua, la velocità di rilassamento dei protoni è diversa a seconda della struttura cerebrale in cui si trovano. Di conseguenza, le differenze nei segnali che ne risultano riflettono delle differenze strutturali (Jezzard, Clare 2001; Wager *et al.* 2007).

Nelle analisi dei dati di fMRI più comuni, queste immagini strutturali vengono poi allineate alle immagini del funzionamento del cervello per ottenere una mappatura accurata delle regioni in cui si verifica l'attivazione durante il compito sperimentale.

Possono anche essere usate in analisi più sofisticate, come quelle che esaminano la correlazione fra lo spessore corticale di diversi partecipanti o la correlazione dello spessore corticale dei partecipanti con parametri comportamentali (analisi non ancora diffusissime negli studi sul linguaggio).

1.2. La fMRI rispetto ad altre tecniche di misura dell'attività cerebrale

La fMRI permette di rispondere a domande molto diverse rispetto alle altre tecniche che misurano l'attività cerebrale. Rispetto a tecniche come l'elettroencefalografia (EEG o ERP) e la magnetoencefalografia (MEG), la fMRI presenta una minore risoluzione temporale ma una maggiore risoluzione spaziale. Ciò significa che, mentre EEG e MEG permettono di misurare il verificarsi di scariche neurali nell'ordine di decine di millisecondi, la fMRI permette di vedere il risultato di quest'attività con un forte ritardo. Non solo il segnale BOLD registra 1 o 2 secondi di attività cerebrale per volta, ma raggiunge anche un picco massimo in risposta all'attività cerebrale con un ritardo di circa 4 secondi. Se perciò l'interesse del ricercatore è, per esempio, quello di studiare se una certa incongruenza semantica in una frase viene già registrata a livello cerebrale 400 millisecondi dopo la presentazione della parola che crea l'incongruenza, la tecnica da usare non è certamente la fMRI, ma l'EEG.

Tuttavia, mentre EEG e MEG riescono a dare informazioni per una localizzazione della zona in cui l'attività cerebrale si svolge con un errore di diversi centimetri, la risonanza magnetica ne dà una molto più accurata, in cui l'errore varia da un minimo di pochi millimetri a un massimo di circa un centimetro. Per cui, se l'interesse del ricercatore è, per esempio, quello di scoprire se incongruenze semantiche e sintattiche coinvolgono le stesse porzioni del giro frontale inferiore o del solco temporale superiore, le tecniche da usare non sono l'EEG o la MEG ma la fMRI. Recentemente si sta sviluppando anche una tecnica che combina la registrazione simultanea di dati di EEG e di fMRI, permettendo così di usufruire contemporaneamente della buona risoluzione temporale dell'una e della buona risoluzione spaziale dell'altra (Mullinger, Bowtell 2011; Rosenkranz, Lemieux 2010).

Rispetto alla tomografia a emissioni di positroni (PET), altra tecnica di neuroimmagine con risoluzione spaziale maggiore di EEG o MEG, la fMRI presenta una risoluzione spaziale ancora maggiore, è meno invasiva perché non richiede l'ingestione o l'iniezione di un liquido di contrasto, ed è più veloce in quanto il segnale registrato non dipende dai tempi di assorbimento del liquido di contrasto. La fMRI offre anche una risoluzione temporale lievemente maggiore e permette di implementare disegni sperimentali più variati.

Infine, rispetto alla stimolazione magnetica transcranica (TMS), la fMRI è meno efficace per capire se una certa regione ha un ruolo indispensabile o epifenomenico nello svolgere un particolare compito sperimentale. La fMRI offre però la possibilità di registrare l'attivazione all'unisono di più regioni cerebrali, evidenziando così reti neurali (usualmente chiamate *network funzionali* o solo

network), cioè insiemi di regioni che si coattivano e interagiscono nello svolgere una determinata funzione. Questa coattivazione si esprime in una sincronizzazione dell'attività di queste regioni durante lo svolgimento di una certa funzione o, in altre parole, in una correlazione della loro attività nel tempo. Se l'interesse del ricercatore è, per esempio, quello di capire se le stesse regioni del network associato con la comprensione del linguaggio sono coinvolte nell'integrazione di informazione linguistica a livello sintattico e a livello semantico, la tecnica da usare è certamente la fMRI.

1.3. Il tipo di studi in cui si usa la fMRI

Per funzioni cognitive ad alto livello come buona parte dei processi linguistici, il fatto che insiemi di regioni si coattivano nello svolgere una determinata funzione è un fattore molto importante. Bisogna infatti tener presente che solo le funzioni più semplici possono essere localizzate con successo in una o poche regioni. Le funzioni cognitive più complesse vengono svolte da network funzionali. In virtù delle connessioni anatomiche che esistono fra diverse regioni cerebrali, nello svolgimento di una certa attività gruppi neuronali possono mandare segnali inibitori o eccitatori ad altri gruppi di neuroni in altre regioni, dando così il via all'attivazione del network. Si noti che anche le regioni associate alle funzioni più semplici, come le cortecce primarie, sono comunque sensibili a influenze top-down provenienti da altre aree e la loro attività può così essere modulata all'interno di un network (si vedano, per esempio, Petkov *et al.* 2004; Stănişor *et al.* 2013).

Nello svolgere una funzione, non tutte le regioni che sono connesse anatomicamente a una regione attiva si attivano necessariamente anch'esse. Allo stesso tempo, anche regioni che non hanno legami anatomici diretti possono essere coattivate per lo stesso compito, poiché possono ricevere segnali da regioni intermedie (Pessoa 2008). Poiché le stesse regioni possono appartenere a diversi network funzionali, il processo svolto da una regione dipende dal particolare network in cui quella regione è attiva in un momento specifico. È perciò necessario tener presente la configurazione delle altre regioni in concomitanza delle quali una regione si attiva, perché è da questa configurazione che dipenderà la sua funzione (Mesulam 1990; Pessoa 2008). Inoltre, poiché i network possono assumere configurazioni diverse come conseguenza dell'apprendimento (Bassett *et al.* 2011), si deve anche tener presente che la funzione di una stessa regione attiva in due network differenti ma che svolgono funzioni analoghe può essere ben diversa.

Regioni con un alto grado di connettività (e che perciò sono chiamate *hub*) hanno un ruolo importante nel regolare il flusso e l'integrazione d'informazione. Alcune di queste aree occupano una posizione centrale in un gruppo di regioni limitrofe, altre collegano gruppi di regioni anatomicamente distanti (Sporns *et al.* 2007). La ricerca con la fMRI ha contribuito molto alla comprensione di questa organizzazione, per cui una certa regione può essere coinvolta nello svolgimento di diverse funzioni e una stessa funzione può essere svolta dalla collaborazione di più regioni. In generale, il concetto di network usato nelle neuroscienze cognitive deve molte delle sue caratteristiche ai network studiati in teoria delle reti.

Nello studio del linguaggio questo fattore è molto importante poiché, come vedremo, regioni che sono coinvolte nell'elaborazione di stimoli linguistici possono svolgere funzioni linguistiche molto diverse e, allo stesso tempo, svolgere anche altre funzioni non linguistiche. Per esempio, il giro angolare è coinvolto nell'elaborazione di aspetti sia semantici sia sintattici della comprensione di una frase (Humphries *et al.* 2006), ma è anche coinvolto, per esempio, in funzioni di memoria episodica (Vilberg, Rugg 2012) e nell'immaginazione di eventi futuri (Addis *et al.* 2007). I network che svolgono queste diverse funzioni e che includono il giro angolare non sono ovviamente gli stessi.

1.4. Disegni e approcci sperimentali

I disegni sperimentali utilizzati per la fMRI sono concettualmente gli stessi che si usano in altri esperimenti comportamentali o di neuroscienze, basati sull'idea che delle variabili indipendenti provochino delle variazioni nella variabile dipendente (il segnale BOLD). Si usano spesso alternanze di periodi di attività e di riposo (per esempio, Ferstl, Von Cramon 2001; Ferstl *et al.* 2005; Humphries *et al.* 2006; Mason, Just 2004). Nei periodi di attività i partecipanti all'esperimento sono coinvolti nel completamento di un certo compito che coinvolge la funzione cognitiva interessata e le conseguenti risposte comportamentali (per esempio ascolto o lettura di parole o frasi, e risposte a domande di comprensione premendo un bottone su una pulsantiera). Nei periodi di riposo si chiede ai partecipanti di non far niente, così da permettere al segnale BOLD di tornare alla sua attività di partenza, prima del coinvolgimento della funzione cognitiva che si studia.

Per la presentazione degli stimoli durante gli esperimenti, si possono usare sia disegni *a blocchi* sia disegni *evento-correlati*. I disegni a blocchi consistono nella presentazione dello stesso tipo di stimoli o stimoli che richiedono lo stesso compito comportamentale uno dopo l'altro, distanziati solo da qualche secondo

di riposo. Negli studi sul linguaggio questo si fa in genere quando ai partecipanti si presentano diversi tipi di stimoli con lo stesso compito. Per esempio, il disegno a blocchi usato da Xu e colleghi (2005) consiste nella presentazione di una serie di storie, una serie di frasi, una serie di parole e una serie di stringhe di lettere con le istruzioni di leggere attentamente. Il disegno a blocchi si usa anche quando si varia il compito da effettuare sugli stimoli come, per esempio, nel caso di Ferstl e von Cramon (2002) che hanno presentato ai partecipanti delle coppie di frasi e in un primo blocco hanno chiesto loro di valutare se ci fosse una connessione logica fra le due frasi. In un secondo blocco hanno poi chiesto ai partecipanti di immedesimarsi con le persone descritte nelle coppie di frasi.

Il disegno evento-correlato, invece, consiste nel mescolare la presentazione di stimoli appartenenti a diverse condizioni sperimentali in ordine generalmente casuale. Ciascuna presentazione può essere separata dalla successiva da intervalli di tempo variabili. Molto usato è il disegno evento-correlato di tipo rapido, con pochi secondi di pausa fra la presentazione di uno stimolo e il successivo, in cui si verifica una sovrapposizione del segnale BOLD risultante dalle diverse presentazioni degli stimoli, che si dispiega poi in fase di analisi dei dati. Un esempio di disegno evento-correlato è quello usato da Hasson e colleghi (2006), in cui ai partecipanti sono state presentate frasi di diverso tipo (frasi contenenti o no subordinate e frasi grammaticalmente scorrette) in ordine casuale, alcune delle quali sono state anche ripetute in ordine casuale.

Uno dei vantaggi principali del disegno evento-correlato è la sua flessibilità, poiché permette di organizzare gli eventi dell'esperimento in categorie diverse anche dopo l'esperimento, per esempio in base alle risposte del partecipante (in base a errori, giudizi, etc.). Permette inoltre la randomizzazione di stimoli e compiti in modo da impedire che gli eventi successivi non siano prevedibili, che l'attività associata a un evento non influenzi quella degli eventi successivi, che i partecipanti non adottino un atteggiamento mentale strategico.

I vantaggi dell'uso del disegno a blocchi sono una maggiore semplicità nell'esecuzione per i partecipanti, un migliore rapporto fra segnale e rumore, una maggiore potenza statistica nell'identificare aree attive durante lo svolgimento di un compito particolare e nel catturare differenze di attività associate a compiti diversi. Tuttavia disegni a blocchi puri sono sconsigliati per lo studio del linguaggio e non sono fra i più comunemente usati, in quanto lo svolgere lo stesso compito su una serie di stimoli non randomizzati permette l'adozione di una strategia di elaborazione dell'informazione, anche inconscia, che può non rispecchiare il modo naturale di svolgere quella funzione. Più usati sono esperimenti che mescolano il disegno a blocchi con quelli evento-correlati.

Per esempio, Suzuki e Sakai (2003) hanno presentato ai partecipanti tre gruppi di frasi, il primo con il compito di valutare se ogni frase fosse corretta dal punto di vista sintattico, il secondo con il compito di valutare se ogni frase fosse corretta dal punto di vista semantico, e il terzo con il compito di valutare se ogni frase fosse corretta dal punto di vista fonologico. Ogni blocco così costituito, tuttavia, presentava in ordine casuale frasi contenenti diversi tipi di anomalie. In questo modo si è preservata la semplicità del disegno a blocchi per il compito sperimentale, ma si è reso impossibile prevedere le caratteristiche dello stimolo successivo.

Due possibili approcci alla ricerca vengono usati nella fMRI. Il primo e più comune è quello cosiddetto *confermativo*, in cui si parte da un'ipotesi formulata secondo un modello teorico e si cerca di falsificarla tramite l'esperimento. Questo è il caso degli studi di fMRI sul linguaggio condotti coi metodi psicolinguistici più tradizionali, in cui si cerca di avere un forte controllo sugli stimoli, sulle condizioni in cui viene condotto l'esperimento e sui tempi di presentazione, in modo che qualsiasi effetto si rilevi nei dati possa essere attribuito alle variabili indipendenti senza ombra di dubbio (per esempio, Heim *et al.* 2009; Kuperberg *et al.* 2000; Zhu *et al.* 2012).

Esiste anche un secondo approccio, che sta diventando sempre più comune nella letteratura, chiamato *esplorativo*, in cui la relazione fra le variabili indipendenti e dipendenti non è stabilita da un modello teorico preesistente, ma emerge dall'analisi dei dati. Quest'analisi viene condotta con metodi chiamati di *data mining*, tramite algoritmi che cercano nei dati configurazioni di regolarità o relazioni fra le variabili e che permettono in questo modo di inferire rapporti di causalità. Il data mining permette di sostituire sofisticate tecniche di analisi a un alto livello di controllo sulle variabili indipendenti.

Questo metodo è usato più spesso in studi sul linguaggio di approccio più naturalistico (anche se questi studi usano spesso anche il metodo confermativo), che usano stimoli complessi ed ecologicamente validi in situazioni sperimentali non completamente controllate (per esempio, Dick *et al.* 2010; Schmithorst *et al.* 2006; Wilson *et al.* 2008).

L'idea è quella di lasciar 'parlare' i dati senza costringerli ad aderire a un modello preordinante, così da evitare possibili distorsioni interpretative imposte dalla teoria del ricercatore.

1.5. L'analisi dei dati di fMRI

Un metodo abbastanza standard e molto usato negli studi sul linguaggio è quello di condurre un'analisi in due livelli (si vedano, per esempio, Cooper *et al.* 2011; Graves *et al.* 2010; Groen *et al.* 2010; Moody, Gennari 2010; Zhu *et al.* 2012). L'analisi del primo livello calcola i parametri d'interesse per ogni partecipante singolarmente, considerando la variazione fra le misurazioni ottenute dal singolo partecipante. Essa si applica ai dati raccolti per ogni *voxel*, l'unità di misura volumetrica usata durante la scansione (per esempio, un caso comune è quello di voxel isomorfi di $3 \times 3 \times 3$ mm, ma se ne possono usare anche di molto più piccoli e non isomorfi). Essa consiste in un'analisi a effetti fissi per i dati raccolti da ogni partecipante, secondo un modello di regressione lineare: $Y = X_1\beta_1 + X_2\beta_2 + X_n\beta_n + E$. In questo modello, X_1 , X_2 , X_n sono regressori separati, ognuno dei quali indica la configurazione di attività che si pensa sia evocata dai diversi tipi di stimoli presentati, e β_1 , β_2 , β_n sono i coefficienti di regressione da stimare.

La serie temporale del segnale BOLD (il segnale raccolto Y), pertanto, riflette l'azione delle varie condizioni sperimentali espresse come un prodotto dell'effetto previsto per ogni condizione (X_1 , X_2 , X_n) e dei coefficienti di regressione (β_1 , β_2 , β_n) che indicano la quantità di segnale spiegato da ogni condizione. Un valore beta più alto indica una risposta più forte a un dato stimolo. Il segnale Y riflette anche la quantità di segnale che non deriva dalle condizioni sperimentali e che viene perciò chiamato *errore* o *rumore* (E) e viene generalmente attribuito ad artefatti dovuti a movimenti della testa, cambiamenti fisiologici, disomogeneità nel campo magnetico o anche variazioni nell'attività cognitiva del partecipante che non sono considerate dal modello delle variabili indipendenti dell'esperimento.

A questo livello, l'applicazione di altri test statistici del Modello Lineare Generale (GLM), come per esempio t-test e ANOVA possono rispondere a diverse domande. Per esempio, possono mostrare in quale *voxel* i coefficienti di regressione sono significativi statisticamente o in quali *voxel* c'è una differenza significativa nella risposta a diverse condizioni. Generalmente, però, i risultati riportati nella letteratura sono quelli del gruppo, non quelli del singolo partecipante; le analisi di primo livello sono riportate solo per studi di casi o circostanze particolari.

L'analisi di secondo livello, anche chiamata 'analisi di gruppo', consiste nel calcolare la variazione fra le misurazioni ottenute da tutti i partecipanti, con l'idea che essi siano stati scelti a caso e che perciò le differenze fra i loro dati riflettano differenze effettive nella popolazione da cui sono stati estratti. In questo modo i

risultati possono essere generalizzati all'intera popolazione. L'analisi di secondo livello richiede che i dati di tutti i partecipanti dell'esperimento vengano riportati a uno spazio anatomico comune come, per esempio, quello convenzionale Talairach (Talairach, Tournoux 1988). L'analisi a questo livello consiste nel condurre un'analisi *voxel* per *voxel* a livello del gruppo per stabilire se i coefficienti di regressione per una data condizione sono positivi o negativi e se ci sono differenze tra coefficienti di regressione di condizioni diverse. Si possono poi considerare i risultati dell'intero cervello (*whole-brain analysis*), così da individuare ampi network di attivazione, o quelli di regioni individuali (*region-of-interest analysis* o più comunemente *ROI analysis*) se si hanno ipotesi specifiche sul ruolo di queste regioni nello svolgimento della funzione studiata.

Poiché nelle analisi di primo livello e in quelle *whole-brain* di secondo livello il GLM si applica a tutti i *voxel* di ciascun partecipante, che sono decine di migliaia, la probabilità che si verifichino falsi positivi è molto alta. Per esempio, se si adotta il livello tipico di falso positivo del 5%, considerando che il test si applica a 40.000 *voxel* circa, 2.000 di questi possono dare un falso positivo. Per questa ragione, nell'analisi di gruppo *whole-brain* si usano metodi di correzione per confronti multipli. Una tecnica che sta prendendo sempre più piede negli studi sul linguaggio consiste nell'identificare non *voxel* singoli che mostrano un effetto sperimentale, ma gruppi di *voxel* contigui che mostrano l'effetto. Questo metodo è basato su tecniche di simulazione (come, per esempio, simulazioni Monte Carlo, Forman *et al.* 1995) che permettono di individuare a priori il numero minimo di *voxel* contigui che devono passare una soglia statistica prestabilita al livello del *voxel* e del gruppo di *voxel* perché la probabilità di incorrere in falsi positivi sia ragionevole. I gruppi di *voxel* attivi individuati con questo metodo (o altri) sono riportati negli articoli col nome di *cluster* e l'operazione di individuazione di questi cluster è chiamata *clusterizzazione* (per l'uso di simulazioni di Monte Carlo per clusterizzazioni in studi sul linguaggio si vedano, per esempio, Dick *et al.* 2012; Graves *et al.* 2010; Kuperberg *et al.* 2006; Yarkoni *et al.* 2008; Yue *et al.* 2013). I risultati riportati negli articoli di fMRI sono pertanto mappe statistiche che mostrano come zone colorate i cluster individuati dall'analisi di secondo livello.

Prima di essere analizzati statisticamente, i dati vengono sottoposti a operazioni cosiddette di *pre-processing*, che includono ricostruzione delle immagini, riduzione del rumore (soprattutto i movimenti della testa), varie fasi di co-allineamento delle immagini funzionali e strutturali, normalizzazione e *smoothing* (una forma di filtraggio spaziale) per ciascun partecipante individualmente. Poiché consiste nel calcolo di una media dei segnali raccolti su *voxel* adiacenti, la fase di *smoothing* in

particolare può presentare delle difficoltà, in quanto filtraggio eccessivo può fondere i dati di diverse regioni funzionali e così risultare in inesattezze.

Per gli studi sul linguaggio, questo può comportare dei problemi in zone come, per esempio, il piano sopratemporale, in cui alcune aree poco estese e adiacenti svolgono funzioni molto diverse (uditiva primaria e di associazione).

Al livello dell'analisi di gruppo, si possono creare inesattezze anche durante l'allineamento dei dati dei singoli partecipanti a uno spazio anatomico comune. I metodi più diffusi per quest'allineamento non sono infatti molto precisi e allineamenti imperfetti possono risultare in uno scarso differenziamento fra regioni poco estese e adiacenti. Recentemente si stanno sviluppando metodi più accurati sia di allineamento che di *smoothing* per questi casi (per esempio, Tahmasebi *et al.* 2009). Per ovviare a questi problemi nello studio del linguaggio è stato anche suggerito di far uso di ROI funzionali al livello del singolo partecipante (Fedorenko *et al.* 2010).

È possibile evitare questi problemi anche spostando l'analisi dal dominio tridimensionale a quello bidimensionale, proiettando l'attività BOLD sulla sola superficie corticale. Ciò permette una più accurata distribuzione dell'attività nelle zone corticali, ma comporta una perdita d'informazione riguardo all'attività subcorticale.

Per lo studio del linguaggio, tuttavia, le analisi nel dominio bidimensionale sono vantaggiose in quanto la maggior parte delle regioni associate con l'elaborazione semantica o sintattica di alto livello sono aree corticali.

Lo *smoothing* sulla superficie della corteccia è più accurato rispetto a quello effettuato nello spazio tridimensionale perché calcola una media sull'attività di *vertici* (che corrispondono ai *voxel* dello spazio tridimensionale) adiacenti solo sulla superficie della corteccia, mentre lo *smoothing* nello spazio tridimensionale calcola una media fra *voxel* adiacenti nel volume. In questo modo, mentre lo *smoothing* nello spazio tridimensionale può erroneamente risultare in una configurazione di attività che si estende, per esempio, dal piano sopratemporale ad aree dorsali al di là della fessura silviana, questo non può accadere nello spazio bidimensionale poiché queste regioni non sono adiacenti sulla corteccia.

Infine, anche i software che compiono l'allineamento dei dati dei vari partecipanti a uno spazio anatomico comune riescono a produrre un allineamento più preciso su una rappresentazione bidimensionale, soprattutto se questa rappresentazione è una superficie calcolata dalla media delle superfici cerebrali dei partecipanti all'esperimento (Argall *et al.* 2006; Desai *et al.* 2005).

1.6. La connettività funzionale

Per una maggiore comprensione del funzionamento dei network cerebrali è anche utile esaminare se e come varie regioni comunicano fra loro. Le analisi che abbiamo descritto fino a questo punto rivelano quali regioni rispondono in modo simile al contrasto fra due condizioni, a una variabile sperimentale, o all'interazione di più variabili. Lo studio della connettività funzionale rende possibile però anche esaminare se diverse regioni variano simultaneamente la loro attivazione, con l'assunto che la variazione simultanea di attivazione riflette lo stesso coinvolgimento nello svolgere una certa funzione. Regioni che variano simultaneamente la loro attivazione si dicono perciò funzionalmente connesse. Nello studio del linguaggio, la connettività funzionale è stata esaminata, per esempio, per capire più a fondo il ruolo di particolari regioni dei network del linguaggio durante dei compiti specifici (per esempio, Yue *et al.* 2013) oppure per esaminare variazioni nel lavoro simultaneo di certe regioni apportate da cambiamenti linguistici come, per esempio, l'apprendimento di parole nuove (Ghazi Saidi *et al.* 2013).

Generalmente, lo studio della connettività funzionale consiste nel misurare la correlazione dell'andamento del segnale nel tempo in diverse regioni del cervello. Un metodo di analisi molto comune consiste nello scegliere una o più ROI, chiamate *seme*, e calcolare le correlazioni delle serie temporali in quelle regioni con quelle di altre regioni prescelte o di tutti i *voxel* del cervello. Le regioni in cui si rilevano correlazioni alte (positive o negative) si considerano funzionalmente connesse alle regioni seme.

È anche possibile calcolare la connettività funzionale a riposo, quando cioè il partecipante all'esperimento non sta svolgendo nessun compito cognitivo (si vedano, per esempio, Koyama *et al.* 2010; Tomasi, Volkow 2012). L'idea è che network la cui funzione è ben definita mantengono la propria connettività funzionale anche quando non stanno svolgendo quella funzione. In alcuni casi, la connettività funzionale a riposo è vista come un prerequisito: rende possibile la coattivazione di quelle regioni durante lo svolgimento della funzione (per esempio, si veda Smith *et al.* 2009). In altri casi, la connettività funzionale è vista come una conseguenza: dipende dalla ripetuta coattivazione di certe regioni durante l'esercizio frequente della funzione e riflette una stabilizzazione così ottenuta delle connessioni fra quelle regioni (per esempio, si veda Hasson *et al.* 2009). Negli studi sul linguaggio lo studio della connettività a riposo è stato usato per individuare generali connessioni fra le varie regioni coinvolte in diverse funzioni linguistiche e specificare differenze di ampiezza delle connessioni fra le varie regioni che le compongono.

2. Considerazioni interpretative

2.1. I network della comprensione del linguaggio

La ricerca di neuroimmagine sulla comprensione del linguaggio ha individuato diversi network associati all'elaborazione del linguaggio, che si estendono principalmente in zone corticali (come, per esempio, in Figura 1).

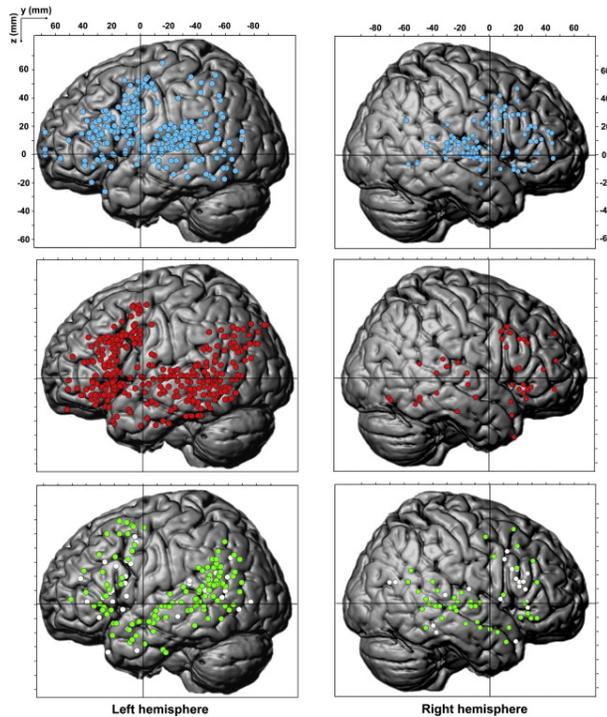


Figura 1. Distribuzione dei picchi di attività per funzioni linguistiche nei due emisferi, secondo una meta-analisi di 128 studi di fMRI. L'immagine in alto mostra i picchi rilevati per compiti fonologici, quella centrale i picchi per compiti lessico-semantici e quella in basso i picchi per la frase e il discorso. La figura in basso distingue anche fra picchi associati a comprensione semantica (in verde) e processi sintattici (in bianco). Ristampato da Vigneau *et al.* (2011), p. 582, con il permesso di Elsevier.

Per esempio, al livello della frase, l'elaborazione sintattica è stata individuata nell'emisfero sinistro, in un network che comprende l'opercolo frontale, il giro e il solco temporale superiori anteriori, il giro e il solco temporale superiore

posteriore (Friederici 2011, Friederici 2012), la parte opercolare del giro frontale inferiore (Friederici 2011, Price 2010), il planum temporale, e la parte ventrale del giro supramarginale (Price 2010).

Al livello della frase e del discorso, l'elaborazione semantica è stata individuata in un network meno lateralizzato, che comprende il giro temporale medio, il lobo temporale anteriore e le parti triangolare e orbitale del giro frontale inferiore (Friederici 2012), le parti anteriori e posteriori del giro temporale medio, e il giro angolare (Price 2012). Il contributo del lobo temporale anteriore è però dibattuto (Binder, Desai 2011) e altre regioni sono state proposte per l'elaborazione semantica: il giro supramarginale, il giro fusiforme, il giro paraippocampale, la corteccia prefrontale dorsale e ventrale, la corteccia cingolata posteriore (Binder, Desai 2011; Binder *et al.* 2009). Quest'ultima, in unione con il precuneo, e molte delle regioni sopra riportate sono state individuate anche per processi d'integrazione al livello del discorso (Price 2010).

Per quanto riguarda l'interazione fra elaborazione semantica e sintattica, una teoria ha proposto che essa avvenga nel giro frontale inferiore sinistro (Hagoort 2005), e un'altra che avvenga nei giri temporale inferiore e fusiforme sinistri (Kuperberg *et al.* 2000). Tuttavia, anche altre regioni sono sensibili sia a caratteristiche sintattiche che semantiche. Per esempio, il planum temporale e la parte ventrale del giro supramarginale si attivano quando la comprensione è resa più difficile a livello sintattico, semantico, e perfino percettivo (Price 2010). La parte posteriore del giro e del solco temporali superiori rispondono ad ambiguità sia sintattiche che semantiche (Friederici 2011). Anche al giro angolare è stato attribuito un ruolo integratore di informazione sintattica e semantica nel costruire il significato generale di una frase (Humphries *et al.* 2006). Per quanto riguarda il giro frontale inferiore, la sua funzione sembra essere ancor più generale: esso viene particolarmente attivato quando la comprensione delle frasi diventa più difficile, specialmente quando c'è maggiore richiesta di elaborazione semantica. Ciò avviene principalmente nelle parti più anteriori (triangolare e orbitale; Friederici 2011; Price 2010).

Il ruolo specifico di tutte queste regioni all'interno dei network in cui si attivano non è ancora stato definito. Diversi ruoli funzionali sono stati proposti. È stato suggerito, per esempio, che le aree temporali anteriori si attivino maggiormente per associazioni semantiche di maggiore specificità e i poli temporali rispondano più spesso a esigenze d'integrazione al livello del discorso (Price 2012). L'attivazione del giro angolare è stata associata all'attivazione di concetti semantici (Obleser, Kotz 2009) o al recupero di conoscenze generali (Binder *et al.* 2009). Riguardo al precuneo e cingolato posteriore è stato proposto che contribuiscano all'aggiornamento della rappresentazione di una narrativa

(Whitney *et al.* 2009) o siano un'interfaccia fra il recupero di memorie semantiche e episodiche (Binder *et al.* 2009). Poiché le ipotesi che sono state avanzate sono molteplici e non sempre in accordo, non abbiamo ancora un quadro definitivo del contributo di ciascuna regione alla funzione del network in cui si attiva.

Esperimenti sulla comprensione del linguaggio che hanno considerato anche effetti del contesto (sia extra- che co-testuali) hanno mostrato notevole sovrapposizione fra le regioni che abbiamo appena indicato come dedicate all'elaborazione linguistica e regioni che sono sensibili a elementi contestuali, così rendendo il tentativo di definire ruoli linguistici specifici per ogni regione ancora più difficile. Si considerino, per esempio, esperimenti che hanno esaminato l'integrazione fra l'informazione acustica linguistica e l'informazione visiva che l'accompagna, come il movimento delle labbra del parlante o i suoi gesti (per esempio, Dick *et al.* 2009; Dick *et al.* 2012; Hasson *et al.* 2007). Alcune delle regioni che sono considerate prettamente linguistiche sono infatti sensibili anche all'integrazione fra l'informazione linguistica e il suo contesto visivo, anche per processi linguistici di basso livello, come, per esempio, la percezione dei fonemi. La parte opercolare del giro frontale inferiore e il planum polare sinistri, per esempio, elaborano stimoli linguistici in modo diverso a seconda dell'informazione visiva che li accompagna: non si attivano tanto in risposta all'informazione acustica dei fonemi, quanto in risposta all'integrazione fra questa informazione e l'informazione visiva delle labbra che li pronunciano (Hasson *et al.* 2007).

A livello linguistico più alto è stato anche mostrato che le parti opercolare e triangolare del giro frontale inferiore e il giro temporale medio posteriore sinistri sono coinvolti nell'integrazione del discorso e dei gesti iconici del parlante (per esempio, Dick *et al.* 2009; Dick *et al.* 2012). Queste regioni, perciò, sono coinvolte nell'integrazione dell'informazione semantica verbale e dell'informazione contestuale extra-linguistica che ne complementa il significato.

Nell'insieme, questi risultati suggeriscono che non ci sia una forte corrispondenza fra le funzioni linguistiche come sono state individuate e studiate in linguistica e psicolinguistica e il funzionamento delle regioni cerebrali. In altre parole, il cervello non sempre elabora il linguaggio in forti distinzioni fra, per esempio, sintassi e semantica (anche se quest'osservazione vale anche per altri livelli di analisi linguistica). Questo è evidente non solo dal fatto che le stesse regioni siano coinvolte in compiti che dal punto di vista linguistico sono molto diversi, ma anche dal fatto che sia difficile individuare il ruolo di queste regioni all'interno dei network in cui si attivano. Può darsi infatti che queste regioni, pur essendo coinvolte in funzioni linguistiche diverse, dal punto di vista del funzionamento del cervello svolgano funzioni simili, come un

comune denominatore. Poiché siamo abituati a pensare al linguaggio nei termini delle categorie introdotte dalla linguistica e dalla psicolinguistica è controintuitivo pensare che il cervello possa utilizzare diverse categorie per elaborare le informazioni.

2.2. Il problema del livello semantico di base

È importante essere consapevoli di alcune difficoltà interpretative che possono emergere dagli studi sul linguaggio condotti con la fMRI. Una prima difficoltà, che chiameremo *il problema del livello semantico di base*, riguarda il rapporto fra il livello di attivazione di base (cioè a riposo) e il livello di attivazione indotto dalle condizioni sperimentali nelle regioni che si considerano associate alle funzioni linguistiche. Poiché il livello di base può consistere di processi semantici endogeni, il problema per i neuroscienziati cognitivi è determinare se le fluttuazioni di attivazione osservate riflettano una modulazione considerevole o una modulazione piuttosto limitata dell'attivazione di base (si veda, per esempio, Morcom, Fletcher 2007). Se ciò che si osserva è solo una modulazione esigua del livello di base, specialmente quando questo è distribuito in un network ben definito, allora l'attività del livello di base è l'elemento cognitivo dominante su cui il linguaggio ha solo un'influenza minore. Poiché, tuttavia, è più intuitivo interpretare i risultati degli studi sul linguaggio con l'assunto che l'elaborazione del linguaggio induce cambiamenti importanti, è bene tener presente come i network coinvolti nelle funzioni linguistiche mantengano la loro connettività indipendentemente da quelle funzioni, per capire fino a che punto mantengono attività indipendente dalla presentazione di stimoli linguistici. Gli studi che hanno esaminato la connettività funzionale di network linguistici a riposo (per esempio, Koyama *et al.* 2010; Tomasi, Volkow 2012) hanno infatti evidenziato che alcuni di questi network non si organizzano ad hoc quando si presenta l'input linguistico, ma mantengono connettività funzionale al di là del contesto di elaborazione del linguaggio. Ciò suggerisce che la loro attività è probabilmente modulata solo in modo minore dalla comprensione del linguaggio.

Si noti, inoltre, che in una rianalisi di 6 esperimenti di fMRI, di cui 4 sul linguaggio (Lohman *et al.* 2010) è stato trovato che durante gli esperimenti sul linguaggio, e solo in quelli, un network temporo-frontale notoriamente associato a funzioni linguistiche si attiva in modo indipendente dalle condizioni sperimentali. Questo risultato è stato interpretato come evidenza del fatto che quando il cervello viene coinvolto nella valutazione di un input linguistico attiva

un network di base del linguaggio su cui variazioni dipendenti dall'esperimento aggiungono solo variazioni minori.

Si consideri anche il caso di regioni coinvolte nella comprensione del linguaggio in cui si è esaminato il susseguirsi di picchi massimi e minimi del segnale BOLD. Skipper e colleghi (2009) hanno trovato che la corteccia premotoria è sensibile all'espressività dei gesti nel contesto della comprensione linguistica, perché la presentazione di gesti espressivi è associata a una distribuzione sistematica di picchi massimi, mentre la presentazione di gesti inespressivi è associata a una distribuzione più uniforme di picchi massimi e minimi. Ricerca recente su questo tipo di fluttuazioni del segnale BOLD (Davis *et al.* 2013) ha ulteriormente dimostrato che i picchi non sono evocati dalla presentazione degli stimoli esterni. Quando la corteccia premotoria è a riposo, la sua attività mostra una distribuzione di picchi simile a quella individuata durante la presentazione di gesti da Skipper e colleghi (2009). È possibile allora che la presenza di stimoli espressivi abbia il solo effetto di allineare a essi l'attività endogena della regione.

2.3. L'errore a serratura

Un secondo errore che è facile commettere nell'interpretare studi di fMRI sul linguaggio, che chiameremo 'errore a serratura', consiste nella tendenza a considerare regioni la cui attivazione si correla con un certo processo linguistico come coinvolte nell'elaborazione del linguaggio. Chiamiamo questo errore interpretativo 'a serratura' perché attribuire gli effetti trovati all'elaborazione linguistica è come osservare il mondo da un buco della serratura e inferire da ciò che il mondo ha la forma di quel buco della serratura. È possibile, cioè, che le aree individuate si attivino per funzioni che, pur coincidendo con modulazioni delle variabili indipendenti del discorso, non sono tuttavia dovute all'elaborazione del linguaggio vera e propria, ma sono dovute a processi che l'accompagnano. Questi possono essere considerati dei 'processi associati', poiché accadono simultaneamente alle computazioni propriamente linguistiche. Essi possono reclutare regioni o network aggiuntivi per supportare le funzioni linguistiche o modulare l'attività delle regioni che elaborano il linguaggio. Fra i processi associati ci sono, per esempio, le risposte emotive al flusso linguistico, processi dell'attenzione o della memoria (si vedano, per esempio, Hasson *et al.* 2007; Kristensen *et al.* 2012; Wallentin *et al.* 2011).

È anche possibile che le regioni che rispondono alle modulazioni delle variabili linguistiche manipolate nell'esperimento, riflettano processi che

sostengono altre funzioni cognitive oltre al linguaggio. Questi possono essere considerati dei 'processi di base', in quanto svolgono le stesse funzioni o funzioni analoghe anche in ambiti non linguistici. Un processo di base è, per esempio, la capacità di rappresentare l'informazione statistica di un flusso di dati in input, che è considerata una funzione linguistica fondamentale per l'acquisizione di una grammatica (Saffran 2003; Thompson, Newport 2007). In realtà, questa funzione si svolge anche con input meno complessi e con cui abbiamo meno familiarità che il linguaggio, come stimoli musicali o richiami di uccelli (Seger *et al.* 2013; Tremblay *et al.* 2012) e non è perciò caratteristica esclusiva dell'elaborazione del linguaggio.

Infine, la natura stessa del segnale BOLD può indurre nell'errore a serratura. Variazioni nel segnale possono essere causate da processi interamente fisiologici, come, per esempio, variazioni del battito cardiaco o dell'attività respiratoria correlata con le diverse condizioni sperimentali. Alcune regioni in cui fluttuazioni BOLD variano in conseguenza di processi fisiologici coincidono con regioni associate con l'elaborazione semantica (per esempio, il giro angolare e il giro frontale superiore mediale; Raichle *et al.* 2001). Tuttavia, dal punto di vista dell'elaborazione del linguaggio, queste fluttuazioni del segnale BOLD sono puramente epifenomeniche.

I paragrafi che seguono offrono una carrellata delle situazioni più comuni in cui si può commettere l'errore a serratura, ma mostrano anche come lo si possa evitare prendendo in considerazione non solo la letteratura sul linguaggio ma anche quella su altre funzioni cognitive.

2.3.1. Il caso della narrativa: struttura a eventi, risposte emotive e teoria della mente

I processi d'integrazione semantica linguistica sono spesso studiati tramite narrative di varia lunghezza (per esempio, Humphries *et al.* 2001; Kuperberg *et al.* 2006; Wallentin *et al.* 2011). Tuttavia, i processi d'integrazione identificati da questi studi sul linguaggio non sono sempre specifici per il linguaggio. Essi sono talvolta condivisi da altre funzioni. Per esempio, si consideri un esperimento in cui sono state usate coppie di frasi o sequenze di suoni con lo stesso significato (come, per esempio, 'ci fu uno sparo e qualcuno scappò via' o 'il suono di uno sparo e il suono di passi che si allontanano velocemente'; Humphries *et al.* 2001). I risultati hanno mostrato che l'ascolto di entrambi i tipi di stimoli evoca attività in regioni temporali associate con l'elaborazione semantica, mostrando così un sostrato neurale comune per la comprensione sia di frasi che di sequenze di suoni.

È stato suggerito che la comprensione delle narrative dipenda almeno in parte dall'abilità di suddividere in eventi il flusso continuo d'informazione che costituisce una narrativa (Zacks *et al.* 2007; Zacks, Swallow 2007). Zacks e colleghi (2001) hanno prima registrato l'attività cerebrale dei partecipanti mentre guardavano un film nello scanner, e hanno poi chiesto agli stessi partecipanti di indicare in che punti del filmato, secondo loro, la narrativa si divideva in eventi separati. Le regioni che, durante l'osservazione del film, sono sensibili a questa suddivisione in eventi costituiscono un ampio network di regioni posteriori mediali e laterali, e alcune regioni frontali. Questo risultato è stato poi replicato in altri studi che hanno usato testi di narrativa (Speer *et al.* 2009) mostrando così un'organizzazione neurale comune alla base della comprensione degli eventi narrativi trasmessi da più mezzi di comunicazione.

Le computazioni condotte dai sistemi cerebrali coinvolti nella suddivisione in eventi può svolgere funzioni anche più semplici. Per esempio, in un esperimento (Tobia *et al.* 2012), durante l'ascolto di una serie di toni il cui livello di ordine variava nel tempo, i partecipanti indicavano quando percepivano un cambiamento nella regolarità della sequenza. Le aree cerebrali in cui l'attività è associata alla percezione del cambiamento costituiscono un network molto simile a quello trovato da Zacks e colleghi. Ciò mostra come l'abilità di percepire eventi separati sia alla base anche di funzioni in cui l'elaborazione del linguaggio non ha nessun ruolo.

Le narrative hanno anche la capacità di indurre stati emotivi in chi le ascolta o legge. Teorie psicologiche del discorso hanno sottolineato come ci si senta facilmente trasportati in una narrativa, si possano avere risposte emotive al suo contenuto, si possa sperare che accadano certi eventi (e non altri), si empatizzi coi personaggi, o ci si ritrovi di umore triste o felice come risultato dell'ascolto o della lettura di una narrativa (per esempio, Allbritton, Gerrig 1991; Egidi, Gerrig 2009; Green, Brock 2000).

Tutte queste risposte emotive hanno un impatto su come il linguaggio che si ascolta o si legge successivamente viene compreso (per esempio, Egidi, Gerrig 2009; Egidi, Nusbaum 2012). È stato dimostrato che alcune di queste risposte emotive modulano l'attività di regioni coinvolte nell'elaborazione del linguaggio. Per esempio, Wallentin e colleghi (2011) hanno chiesto a un gruppo di partecipanti di dare delle valutazioni numeriche (dette *rating*) che indicano il livello di attivazione fisiologica (detta *arousal*) e la valenza soggettiva per ogni frase di una storia per bambini. A un altro gruppo hanno invece chiesto di ascoltare la storia mentre registravano la loro attività cerebrale nello scanner. Livelli più alti di *arousal* corrispondono ad attivazione più forte in regioni frontali e temporali che sono in genere associate all'elaborazione semantica del

linguaggio. Livelli più alti di valenza positiva corrispondono invece ad attivazione più forte in regioni parietali inferiori e regioni mediali che corrispondono a regioni di un network chiamato *default-mode network* (DMN) la cui attività è in genere associata con l'elaborazione semantica sia spontanea, indipendente da stimoli esterni (Buckner *et al.* 2008; Raichle *et al.* 2001), sia linguistica (Binder *et al.* 2009). Questi risultati mostrano perciò come diversi aspetti della risposta emotiva coinvolgano le stesse regioni associate all'elaborazione linguistica e semantica. Ciò implica che non sia possibile parlare di elaborazione del linguaggio indipendentemente dalle componenti emotive che emergono durante la comprensione.

Si noti anche che le narrative sono spesso usate negli esperimenti per descrivere scenari anche quando il linguaggio non è lo scopo della ricerca. Per esempio, la letteratura sulla teoria della mente usa spesso narrative per studiare come si attribuiscono ad altri credenze e intenzioni. Esperimenti di neuroimmagine hanno mostrato che le regioni coinvolte nella teoria della mente e le regioni associate alla comprensione della narrativa coincidono, almeno in parte (Mar 2011), mostrando così anche una certa sovrapposizione tra funzioni sociali di base e comprensione del linguaggio.

2.3.2. *Il ruolo dell'attenzione*

Non tutta l'attività delle regioni principalmente associate a funzioni linguistiche riflette processi strettamente linguistici. L'attività osservata in queste aree durante la comprensione può riflettere anche un'interazione fra le caratteristiche dello stimolo a livello linguistico e le motivazioni dell'ascoltatore. Per esempio, Cooper e colleghi (2011) hanno fatto ascoltare delle storie a dei partecipanti chiedendo loro di fare attenzione a quando gli eventi accadevano o a dove accadevano o a cosa accadeva. I risultati hanno mostrato che questo semplice orientamento dell'attenzione a diversi aspetti della narrativa si associa a differenze nell'attività di regioni coinvolte nella comprensione del linguaggio (per esempio, il giro temporale superiore, il solco temporale superiore, e la parte triangolare del giro frontale inferiore) con attività più forte per l'orientamento dell'attenzione allo spazio e all'azione che al tempo.

L'influenza dell'attenzione sull'elaborazione linguistica non viene solo dalle motivazioni di chi ascolta. Può essere l'informazione nel flusso linguistico stesso a guidare i processi di attenzione durante la comprensione, e così coinvolgere regioni aggiuntive usualmente associate a processi dell'attenzione. Per esempio, Kristensen e colleghi (2012) hanno paragonato l'attività associata all'ascolto di

frasi in cui l'intonazione mette in risalto alcune parole e l'attività associata all'ascolto di frasi senza picchi d'intonazione. La sensibilità all'intonazione è stata individuata in un gruppo di regioni usualmente associate con processi attentivi, che include aree della corteccia parietale posteriore e inferiore (Cabeza *et al.* 2008; Corbetta, Shulman 2002).

Si noti che i processi attentivi non si limitano a modulare l'attività di regioni che elaborano il linguaggio o a reclutare regioni ausiliari per meglio svolgere una funzione. In alcuni casi, i processi attentivi sono parte integrante dell'intero processo di comprensione linguistica, senza i quali essa non sarebbe possibile. Per esempio, si consideri un esperimento che ha esaminato separatamente i network associati all'integrazione locale e globale nella comprensione della narrativa (Egidi, Caramazza 2013). L'integrazione locale è quella fra la frase in input e il contesto più recente, l'integrazione globale è quella fra la frase in input e l'intero contesto dato, che include anche parti più distali dell'informazione presentata in precedenza. I risultati mostrano che l'integrazione delle frasi finali di una serie di storie coinvolge sia le regioni usualmente sensibili al carico d'informazione in memoria di lavoro (Wager, Smith 2003) che le regioni che regolano l'attenzione top-down (Cabeza *et al.* 2008; Corbetta, Shulman 2002). Questi risultati suggeriscono che il primo sistema accede all'informazione distale pertinente per l'integrazione della frase finale, il secondo lo usa nel preparare il sistema all'integrazione dell'informazione che ha più senso dato l'intero contesto (Egidi, Caramazza 2013). Secondo questo modello è allora chiaro che senza questi processi attentivi si otterrebbe una comprensione solo parziale o addirittura nulla. Si noti, per inciso, che anche il legame fra attenzione e linguaggio non si limita al livello del discorso o della frase, ma è anche evidente a livelli linguistici più bassi (per esempio, Petkov *et al.* 2004).

2.3.3. Il ruolo della memoria

Fra i processi che fanno parte dell'elaborazione del linguaggio ma non sono processi strettamente linguistici si annoverano i processi di memoria che permettono l'accesso all'informazione presentata in precedenza. Teorie psicologiche della comprensione del discorso hanno proposto un meccanismo basato sulla memoria che permette di riaccedere al contesto precedente tramite segnali presenti nella memoria di lavoro (Gerrig, O'Brien 2005) e un meccanismo di monitoraggio di un certo tipo d'informazione (come, per esempio, tempo, spazio, scopi dei personaggi di una narrativa) che aggiorna in continuazione il modello del testo in base ai cambiamenti nell'informazione

monitorata (Van den Broek *et al.* 2005). Entrambi i meccanismi rendono conto di come non tutta l'informazione contestuale sia sempre accessibile, e di come invece l'attivazione dell'informazione contestuale vari in funzione del suo rapporto con l'informazione in entrata. Nonostante l'importanza di questi meccanismi nelle teorie del discorso, la ricerca sul linguaggio non ha ancora esaminato le loro basi neurobiologiche.

Lo studio dei correlati neurali del ripristino è prominente però negli studi sulla memoria. Per esempio, Johnson e colleghi (2009) hanno mostrato che i pattern di attivazione durante un compito di riconoscimento possono identificare i diversi contesti in cui una serie di parole vengono presentate nella precedente fase di studio. Le regioni sensibili al tipo di contesto sono regioni importanti nell'elaborazione del linguaggio (giro frontale inferiore sinistro, giro superiore frontale sinistro, giro temporale medio posteriore e solco temporale superiore). Ciò mostra come regioni che si considerano coinvolte principalmente in funzioni linguistiche siano in realtà coinvolte in processi molto più fondamentali probabilmente anche durante l'elaborazione del linguaggio.

Il legame fra alcuni processi di memoria e i processi di comprensione linguistica è più forte di quello che si possa intuitivamente pensare. Essere in grado di ricordare ciò che ci viene detto o si legge è una parte integrante della comprensione. Poiché usualmente, però, comprensione linguistica e memoria sono considerate funzioni separate, ci si aspetta che si associno all'attività di network almeno parzialmente diversi. Studi sul linguaggio che hanno esaminato la relazione fra comprensione e registrazione in memoria suggeriscono tuttavia che molte delle regioni cerebrali coinvolte nelle due funzioni coincidono (Egidi, Caramazza 2013; Hasson *et al.* 2007; Yarkoni *et al.* 2008). In base a questi dati è stato anche proposto che, per quanto riguarda il funzionamento del cervello, si commette un errore categoriale nel considerare comprensione e memoria due funzioni distinte (Hasson *et al.* 2007).

Hasson e colleghi (2007) hanno rilevato il network coinvolto nella comprensione di frasi finali di una storia che sono coerenti o incoerenti rispetto al contesto precedente. Hanno poi esaminato il network associato al ricordare o dimenticare queste frasi finali. Il paragone fra i due network mostra che c'è una forte sovrapposizione fra i due, indicando così che a livello corticale il rilevamento di un'incoerenza e la registrazione in memoria coincidono. Questi dati suggeriscono che la registrazione in memoria si raggiunge, almeno in alcuni network, come un diretto risultato dell'elaborazione dell'informazione che porta alla comprensione.

Il lavoro di Egidi e Caramazza (2013) mostra anche che più di un network sia coinvolto nella registrazione del contenuto linguistico in memoria. L'estensione del network dipende dalla quantità d'informazione considerata durante l'integrazione e la facilità con cui una frase si integra con il contesto recente o quello più globale. Per frasi finali di storie semplici, il cui significato dipende dal contesto recente, l'attività durante la comprensione della frase si correla alla memoria successiva di questa frase in un numero limitato di regioni. Invece, quando il significato della frase finale richiede il ripristino di un contesto più globale, l'attività durante la comprensione si correla alla memoria successiva in un numero di regioni molto più ampio.

2.3.4. La rappresentazione di relazioni statistiche

La capacità di rappresentare relazioni statistiche in un flusso d'informazioni in input è considerata una funzione linguistica fondamentale per l'acquisizione di una grammatica (Saffran 2003). È stato proposto però che esista un sistema che permette la codifica di regolarità statistiche sia per il linguaggio che per altri tipi di stimoli (Conway *et al.* 2009). Diverse regioni che si considera svolgano funzioni linguistiche fondamentali sono infatti sensibili a regolarità più generali. Per esempio, Petersson e colleghi (2012) hanno mostrato che il giro frontale inferiore sinistro è sensibile a violazioni in grammatiche artificiali. Questo risultato suggerisce che il coinvolgimento di questa regione nell'elaborazione della sintassi sia dovuto alla sua capacità più generale di rappresentare una struttura statistica. È stato infatti suggerito che il giro frontale inferiore sinistro non sia tanto coinvolto in computazioni linguistiche quanto nell'elaborazione di sequenze strutturate in generale (Petersson *et al.* 2012). Si noti anche che il giro frontale inferiore risponde più fortemente all'elaborazione di grammatiche artificiali più complesse rispetto a grammatiche artificiali più semplici (Bahlman *et al.* 2009).

Risultati analoghi sono stati ottenuti anche in altri ambiti. Per esempio, esperimenti con stimoli musicali hanno individuato la sensibilità a irregolarità musicali in regioni usualmente associate all'elaborazione linguistica (per esempio, giro temporale superiore anteriore, giro inferiore frontale posteriore, area motoria supplementare; Seger *et al.* 2013). Il coinvolgimento di queste regioni è stato anche documentato per la percezione di strutture ordinate in sequenze di suoni generici (Tobia *et al.* 2012).

Nonostante questi risultati suggeriscano che ambiti disparati come il linguaggio, la musica e le grammatiche artificiali condividano il substrato neurale

per il rilevamento di regolarità statistiche, i processi d'elaborazione di quest'informazione non sono necessariamente gli stessi. Per esempio, Rogalsky e colleghi (2011) hanno mostrato che regioni che rispondono sia a stringhe musicali che a frasi distinguono la risposta agli stimoli musicali da quella agli stimoli linguistici. Inoltre, regioni che rispondono all'elaborazione sintattica delle frasi non rispondono all'elaborazione musicale. Così, anche se queste regioni sono sensibili alla struttura e all'ordine in ambiti diversi, sono però anche sensibili al tipo di stimoli che elaborano.

2.3.5. Effetti del sistema nervoso autonomo sul segnale BOLD

Difficoltà interpretative emergono anche dalle risposte viscerali del sistema nervoso autonomo (SNA), che si manifestano in fluttuazioni sistematiche del segnale BOLD in specifiche regioni. Variazioni nell'attività cardiaca e respiratoria, per esempio, influenzano il segnale BOLD poiché inducono vasodilatazione o vasostrizione con conseguente aumento o diminuzione del flusso sanguigno al cervello e aumento o diminuzione dei livelli di ossigenazione nel sangue (Birn *et al.* 2008; Lund *et al.* 2006).

Queste modificazioni talvolta costituiscono rumore che dev'essere rimosso dai dati per aumentare la potenza statistica e la validità di un'analisi, ma talvolta riflettono un monitoraggio di risposte viscerali, in genere di natura affettiva (Iacovella, Hasson 2011). Le difficoltà interpretative nascono dal fatto che le regioni in cui queste variazioni si correlano con l'attività BOLD coincidono con le regioni della DMN (Birn *et al.* 2006), network coinvolto in elaborazione semantica e che ha un forte peso nell'elaborazione del linguaggio (Binder *et al.* 2009; Buckner *et al.* 2008). Così differenze nel segnale BOLD correlate a condizioni sperimentali possono riflettere non tanto processi linguistici quanto risposte viscerali associate ad altri aspetti di quelle condizioni sperimentali. Per esempio, se in un esperimento vengono presentati stimoli di diversi livelli di difficoltà (come, per esempio, la comprensione di frasi che contengono subordinate complesse e di frasi che non le contengono o di frasi che non contengono elementi di coesione e di frasi che ne contengono), gli stimoli più difficili potrebbero indurre un certo livello di ansia o di aumento dell'*arousal* nel partecipante, con conseguente aumento del battito cardiaco associato alla loro presentazione. Ciò potrebbe risultare in un'influenza sistematica dei fattori fisiologici sul segnale BOLD perfettamente allineata alla differenza fra le due condizioni sperimentali.

Per esempio, nell'esperimento di Wallentin e colleghi (2011) descritto al Paragrafo 2.3.1., in cui l'attività cerebrale durante l'ascolto di una storia per bambini si correlava a rating di *arousal* e valenza per ogni frase, si è trovata anche una correlazione fra i rating di *arousal* e una misura della variabilità del battito cardiaco. Come ci si ricorderà, i risultati mostrano anche che maggiore *arousal* era associato con un'attività BOLD più forte nelle regioni frontali e temporali in genere associate all'elaborazione del linguaggio. La misura della variabilità del battito cardiaco può aver contribuito a questa configurazione di risultati.

Conclusione

In questo capitolo abbiamo descritto come la fMRI sia un metodo efficace per lo studio della comprensione del linguaggio soprattutto per l'individuazione di insiemi di regioni la cui attività si correla nello svolgimento di una certa funzione. Abbiamo anche mostrato come la fMRI richieda metodi di analisi dei dati piuttosto complessi. Poiché la tecnica è ancora in fase di sviluppo, le scelte del ricercatore in certe fasi dell'analisi dei dati sono talvolta arbitrarie e possono portare a inesattezze come, per esempio, nel caso dello *smoothing* o della registrazione a uno spazio anatomico comune.

Abbiamo anche messo in luce come l'interpretazione dei risultati di un esperimento di fMRI sul linguaggio possa presentare delle difficoltà. Queste emergono dal fatto che le stesse configurazioni di attività possono riflettere un'ampia gamma di processi non solo linguistici. Fra questi abbiamo evidenziato i processi associati, cioè quei processi che accadono simultaneamente alle computazioni propriamente linguistiche, e i processi di base, cioè quei processi che svolgono le stesse funzioni o funzioni analoghe anche in ambiti non linguistici. Questo suggerisce che la corrispondenza fra le funzioni cognitive e il loro svolgimento da parte dei network cerebrali spesso non è biunivoca. È pertanto nostra opinione che una conoscenza più approfondita dei sistemi cerebrali coinvolti nella comprensione del linguaggio e in altre funzioni (quale si sta ottenendo in questi anni grazie alla fMRI e alle altre tecniche di misura dell'attività cerebrale) porterà ad una riorganizzazione concettuale almeno parziale delle categorie funzionali definite dalla psicolinguistica e dalla psicologia.

Bibliografia

- Addis D.R., A.T. Wong, D.L. Schacter (2007), *Remembering the past and imagining the future: Common and distinct neural substrates during event construction and elaboration*, «*Neuropsychologia*», 45(7), pp. 13-63.
- Allbritton D.W., R.J. Gerrig (1991), *Participatory responses in text understanding*, «*Journal of Memory and Language*», 30(5), pp. 603-626.
- Argall B.D., Z.S. Saad, M.S. Beauchamp (2006), *Simplified intersubject averaging on the cortical surface using SUMA*, «*Human brain mapping*», 27(1), pp. 14-27.
- Bahlmann J., R.I. Schubotz, J.L. Mueller, D. Koester, A.D. Friederici (2009), *Neural circuits of hierarchical visuo-spatial sequence processing*, «*Brain research*», 1298, pp. 161-170.
- Bassett D.S., N.F. Wymbs, M.A. Porter, P.J. Mucha, J.M. Carlson, S.T. Grafton (2011), *Dynamic reconfiguration of human brain networks during learning*, «*Proceedings of the National Academy of Sciences*», 108(18), 7641-7646.
- Binder J.R., R.H. Desai, W.W. Graves, L.L. Conant (2009), *Where is the semantic system? A critical review and meta-analysis of 120 functional neuroimaging studies*, «*Cerebral Cortex*», 19(12), pp.2767-2796.
- Binder J.R., R.H. Desai (2011), *The neurobiology of semantic memory*, «*Trends in cognitive sciences*», 15(11), pp. 527-536.
- Birn R.M., J.B. Diamond, M.A. Smith, P.A. Bandettini (2006), *Separating respiratory-variation-related fluctuations from neuronal-activity-related fluctuations in fMRI*, «*Neuroimage*», 31(4), pp. 1536-1548.
- Birn R.M., M.A. Smith, T.B. Jones, P.A. Bandettini (2008), *The respiration response function: The temporal dynamics of fMRI signal fluctuations related to changes in respiration*, «*Neuroimage*», 40(2), pp. 644-654.
- Buckner R.L., J.R. Andrews-Hanna, D.L. Schacter (2008), *The brain's default network. Annals of the New York Academy of Sciences*, 1124(1), pp. 1-38.
- Cabeza R., E. Ciaramelli, I.R. Olson, M. Moscovitch (2008), *The parietal cortex and episodic memory: An attentional account*, «*Nature Reviews Neuroscience*», 9(8), pp. 613-625.
- Conway C.M., D.B. Pisoni, W.G. Kronenberger (2009), *The Importance of Sound for Cognitive Sequencing Abilities The Auditory Scaffolding Hypothesis*, «*Current directions in psychological science*», 18(5), pp. 275-279.
- Cooper E.A., U. Hasson, S.L. Small, E. Cooper (2011), *Interpretation-mediated changes in neural activity during language comprehension*, «*Neuroimage*», 55(3), pp. 1314-1323.
- Corbetta M., G.L. Shulman (2002), *Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain*, «*Nature Reviews Neuroscience*», 3(3), pp. 201-215.

- Davis B., J. Jovicich, V. Iacovella, U. Hasson (2013) (in press), *Functional and Developmental Significance of Amplitude Variance Asymmetry in the BOLD Resting-State Signal*, «Cerebral Cortex».
- Desai R., E. Liebenthal, E.T. Possing, E. Waldron, J.R. Binder (2005), *Volumetric vs. surface-based alignment for localization of auditory cortex activation*, «Neuroimage», 26(4), pp. 1019-1029.
- Dick A.S., S. Goldin-Meadow, U. Hasson, J.L. Skipper, S.L. Small (2009), *Co-speech gestures influence neural activity in brain regions associated with processing semantic information*, «Human brain mapping», 30(11), pp. 3509-3526.
- Dick A.S., A. Solodkin, S.L. Small (2010), *Neural development of networks for audiovisual speech comprehension*, «Brain and language», 114(2), pp. 101-114.
- Dick A.S., E.H. Mok, A.R. Beharelle, S. Goldin-Meadow, S.L. Small (2012), *Frontal and temporal contributions to understanding the iconic co-speech gestures that accompany speech*, «Human brain mapping», 134(11), pp. 1065-9471.
- Egidi G., R.J. Gerrig (2009), *How valence affects language processing: Negativity bias and mood congruence in narrative comprehension*, «Memory, cognition», 37(5), pp. 547-555.
- Egidi G., H.C. Nusbaum (2012), *Emotional language processing: How mood affects integration processes during discourse comprehension*, «Brain and language», 122(3), pp. 199-210.
- Egidi G., A. Caramazza (2013), *Cortical systems for local and global integration in discourse comprehension*, «Neuroimage», 71, pp. 59-74.
- Fedorenko E., P.-J Hsieh, A. Nieto-Castañón, S. Whitfield-Gabrieli, N. Kanwisher (2010), *New method for fMRI investigations of language: Defining ROIs functionally in individual subjects*, «Journal of Neurophysiology», 104(2), pp. 1177-1194.
- Ferstl E.C., M. Rinck, D.Y. Cramon (2005), *Emotional and temporal aspects of situation model processing during text comprehension: An event-related fMRI study*, «Journal of Cognitive Neuroscience», 17(5), pp. 724-739.
- Ferstl E.C., D.Y. Von Cramon (2001), *The role of coherence and cohesion in text comprehension: An event-related fMRI study*, «Cognitive Brain Research», 11(3), pp. 325-340.
- Ferstl E.C., D.Y. Von Cramon (2002), *What does the frontomedian cortex contribute to language processing: Coherence or theory of mind?*, «Neuroimage», 17(3), pp. 1599-1612.
- Forman S.D., J.D. Cohen, M. Fitzgerald, W.F. Eddy, M.A. Mintun, D.C. Noll (1995), *Improved assessment of significant activation in functional magnetic resonance imaging (fMRI): use of a cluster-size threshold*, «Magnetic Resonance in Medicine», 33(5), pp. 636-647.

- Friederici A.D. (2011), *The brain basis of language processing: From structure to function*, «Physiological reviews», 91(4), pp. 1357-1392.
- Friederici A.D. (2012), *The cortical language circuit: From auditory perception to sentence comprehension*, «Trends in cognitive sciences», 16(5), pp. 262-268.
- Gerrig R.J., E.J. O'Brien (2005), *The scope of memory-based processing*, «Discourse Processes», 39(2-3), pp. 225-242.
- Ghazi Saidi L., V. Perlberg, G. Marrelec, M. Péligrini-Issac, H. Benali, A.-I. Ansaldo (2013), *Functional connectivity changes in second language vocabulary learning*, «Brain and language», 124(1), pp. 56-65.
- Graves W.W., J.R. Binder, R.H. Desai, L.L. Conant, M.S. Seidenberg (2010), *Neural correlates of implicit and explicit combinatorial semantic processing*, «Neuroimage», 53(2), pp. 638-646.
- Green M.C., T.C. Brock (2000), *The role of transportation in the persuasiveness of public narratives*, «Journal of personality and social psychology», 79(5), pp. 701-721.
- Groen W., C. Tesink, K. Petersson, J. Van Berkum, R. Van der Gaag, P. Hagoort, J. Buitelaar (2010), *Semantic, factual, and social language comprehension in adolescents with autism: An FMRI study*, «Cerebral Cortex», 20(8), pp. 1937-1945.
- Hagoort P. (2005), *On Broca, brain, and binding: A new framework*, «Trends in cognitive sciences», 9(9), pp. 416-423.
- Hasson U., H.C. Nusbaum, S.L. Small (2006), *Repetition suppression for spoken sentences and the effect of task demands*, «Journal of Cognitive Neuroscience», 18(12), pp. 2013-2029.
- Hasson U., H.C. Nusbaum, S.L. Small (2007), *Brain networks subserving the extraction of sentence information and its encoding to memory*, «Cerebral Cortex», 17(12), pp. 2899-2913.
- Hasson U., H.C. Nusbaum, S.L. Small (2009), *Task-dependent organization of brain regions active during rest*, «Proceedings of the National Academy of Sciences», 106(26), pp. 10841-10846.
- Heim S., S.B. Eickhoff, A.K. Ischebeck, A.D. Friederici, K.E. Stephan, K. Amunts (2009), *Effective connectivity of the left BA 44, BA 45, and inferior temporal gyrus during lexical and phonological decisions identified with DCM*, «Human brain mapping», 30(2), pp. 392-402.
- Huettel S.A., A.W. Song, G. McCarthy (2009), *Functional Magnetic Resonance Imaging*, Sunderland MA, Sinauer Associates.
- Humphries C., J.R. Binder, D.A. Medler, E. Liebenthal (2006), *Syntactic and semantic modulation of neural activity during auditory sentence comprehension*, «Journal of Cognitive Neuroscience», 18(4), pp. 665-679.

- Humphries C., K. Willard, B. Buchsbaum, G. Hickok (2001), *Role of anterior temporal cortex in auditory sentence comprehension: An fMRI study*, «Neuroreport», 12(8), pp. 1749-1752.
- Iacovella V., U. Hasson (2011), *The relationship between BOLD signal and autonomic nervous system functions: Implications for processing of 'physiological noise'*, «Magnetic resonance imaging», 29(10), pp. 1338-1345.
- Jezzard P., S. Clare (2001), *Principles of nuclear magnetic resonance and MRI*, in Jezzard P., P.M. Matthews, S.M. Smith (eds.), *Functional MRI: An introduction to methods*, Oxford, Oxford University Press, pp. 67-93.
- Johnson J.D., S.G. McDuff, M.D. Rugg, K.A. Norman (2009), *Recollection, familiarity, and cortical reinstatement: A multivoxel pattern analysis*, «Neuron», 63(5), pp. 697-708.
- Koyama M.S., C. Kelly, Z. Shehzad, D. Penesetti, F.X. Castellanos, M.P. Milham, (2010), *Reading networks at rest*, «Cerebral Cortex», 20(11), pp. 2549-2559.
- Kristensen L.B., L. Wang, K.M. Petersson, P. Hagoort (2012), *The interface between language and attention: Prosodic focus marking recruits a general attention network in spoken language comprehension*, «Cerebral Cortex», 23, pp. 1836-1848.
- Kuperberg G.R., P. McGuire, E. Bullmore, M. Brammer, S. Rabe-Hesketh, I. Wright, A. David (2000), *Common and distinct neural substrates for pragmatic, semantic, and syntactic processing of spoken sentences: An fMRI study*, «Journal of Cognitive Neuroscience», 12(2), pp. 321-341.
- Kuperberg G.R., B.M. Lakshmanan, D.N. Caplan, P.J. Holcomb (2006), *Making sense of discourse: An fMRI study of causal inferencing across sentences*, «Neuroimage», 33(1), pp. 343-361.
- Lohmann G., S. Hoehl, J. Brauer, C. Danielmeier, I. Bornkessel-Schlesewsky, J. Bahlmann, A. Friederici (2010), *Setting the frame: The human brain activates a basic low-frequency network for language processing*, «Cerebral Cortex», 20(6), pp. 1286-1292.
- Lund T.E., K.H. Madsen, K. Sidaros, W.-L. Luo, T.E. Nichols (2006), *Non-white noise in fMRI: Does modelling have an impact?*, «Neuroimage», 29(1), pp. 54-66.
- Mar R.A. (2011), *The neural bases of social cognition and story comprehension*, «Annual review of psychology», 62, pp. 103-134.
- Mason R.A., M.A. Just (2004), *How the Brain Processes Causal Inferences in Text A Theoretical Account of Generation and Integration Component Processes Utilizing Both Cerebral Hemispheres*, «Psychological Science», 15(1), pp. 1-7.
- Mesulam M. (1990), *Large-scale neurocognitive networks and distributed processing for attention, language, and memory*, «Annals of neurology», 28(5), pp. 597-613.

- Moody C.L., S.P. Gennari (2010), *Effects of implied physical effort in sensory-motor and pre-frontal cortex during language comprehension*, «Neuroimage», 49(1), pp. 782-793.
- Morcom A.M., P.C. Fletcher (2007), *Does the brain have a baseline? Why we should be resisting a rest*, «Neuroimage», 37(4), pp.1073-1082.
- Mullinger K., R. Bowtell (2011), *Combining EEG and fMRI*, «Methods in molecular biology», 711, pp. 303.
- Obleser, J., S.A. Kotz (2010), *Expectancy constraints in degraded speech modulate the language comprehension network*, «Cerebral Cortex», 20(3), pp. 633-640.
- Pessoa L. (2008), *On the relationship between emotion and cognition*, «Nature Reviews Neuroscience», 9(2), pp. 148-158.
- Petersson K.-M., V. Folia, P. Hagoort (2012), *What artificial grammar learning reveals about the neurobiology of syntax*, «Brain and language», 120(2), pp. 83-95.
- Petkov C.I., X. Kang, K. Alho, O. Bertrand, E.W. Yund, D.L.Woods (2004), *Attentional modulation of human auditory cortex*, «Nature neuroscience», 7(6), pp. 658-663.
- Price C. (2012), *A review and synthesis of the first 20 years of PET and fMRI studies of heard speech, spoken language and reading*, «Neuroimage», 62(2), pp. 816-847.
- Price C.J. (2010), *The anatomy of language: A review of 100 fMRI studies published in 2009*, «Annals of the New York Academy of Sciences», 1191(1), pp. 62-88.
- Raichle M.E., A.M. MacLeod, A.Z. Snyder, W.J. Powers, D.A. Gusnard, G.L. Shulman (2001), *A default mode of brain function*, «Proceedings of the National Academy of Sciences», 98(2), pp. 676-682.
- Rogalsky C., F. Rong, K. Saberi, G. Hickok (2011), *Functional anatomy of language and music perception: Temporal and structural factors investigated using functional magnetic resonance imaging*, «The Journal of Neuroscience», 31(10), pp. 3843-3852.
- Rosenkranz K., L. Lemieux (2010), *Present and future of simultaneous EEG-fMRI. Magnetic Resonance Materials in Physics*, «Biology and Medicine», 23(5-6), pp. 309-316.
- Sacco K. (ed.) (2013), *Le Neuroimmagini. Nuove frontiere per lo studio del cervello umano in vivo*, Napoli, Idelson-Gnocchi.
- Saffran J.R. (2003), *Statistical language learning mechanisms and constraints*, «Current directions in psychological science», 12(4), pp. 110-114.
- Schmithorst V.J., S.K. Holland, E. Plante (2006), *Cognitive modules utilized for narrative comprehension in children: A functional magnetic resonance imaging study*, «Neuroimage», 29(1), pp. 254-266.

- Seger C.A., B.J. Spiering, A.G. Sares, S.I. Quraini, C. Alpetter, J. David, M.H. Thaut (2013), *Corticostriatal Contributions to Musical Expectancy Perception*, «Journal of Cognitive Neuroscience», 25(7), pp. 1062-1077.
- Skipper J.I., S. Goldin-Meadow, H.C. Nusbaum, S.L. Small (2009), *Gestures orchestrate brain networks for language understanding*, «Current Biology», 19(8), pp. 661-667.
- Smith S.M., P.T. Fox, K.L. Miller, D.C. Glahn, P.M. Fox, C.E. Mackay, A.R. Laird (2009), *Correspondence of the brain's functional architecture during activation and rest*, «Proceedings of the National Academy of Sciences», 106(31), pp. 13040-13045.
- Speer N.K., J.R. Reynolds, K.M. Swallow, J.M. Zacks (2009), *Reading stories activates neural representations of visual and motor experiences*, «Psychological Science», 20(8), pp. 989-999.
- Sporns O., C.J. Honey, R. Kötter (2007), *Identification and classification of hubs in brain networks*, «PloS ONE», 2(10), doi: 10.1371/journal.pone.0001049.
- Stănișor L., C. van der Togt, C.M. Pennartz, P.R. Roelfsema (2013), *A unified selection signal for attention and reward in primary visual cortex*, «Proceedings of the National Academy of Sciences», 110(22), pp. 9136-9141.
- Suzuki K., K.L. Sakai (2003), *An event-related fMRI study of explicit syntactic processing of normal/anomalous sentences in contrast to implicit syntactic processing*, «Cerebral Cortex», 13(5), pp. 517-526.
- Tahmasebi A.M., P. Abolmaesumi, Z.Z. Zheng, K.G. Munhall, I.S. Johnsrude (2009), *Reducing inter-subject anatomical variation: Effect of normalization method on sensitivity of functional magnetic resonance imaging data analysis in auditory cortex and the superior temporal region*, «Neuroimage», 47(4), pp. 1522.
- Talairach J., P. Tournoux (1988), *Co-planar stereotaxic atlas of the human brain. 3-Dimensional proportional system: An approach to cerebral imaging*, New York, Thieme Medical Publishers.
- Thompson S.P., E.L. Newport (2007), *Statistical learning of syntax: The role of transitional probability*, «Language Learning and Development», 3(1), pp. 1-42.
- Tobia M.J., V. Iacovella, B. Davis, U. Hasson (2012), *Neural systems mediating recognition of changes in statistical regularities*, «Neuroimage», 63(3), pp. 1730-1742.
- Tomasi D., N. Volkow (2012), *Resting functional connectivity of language networks: Characterization and reproducibility*, «Molecular psychiatry», 17(8), pp. 841-854.

- Tremblay P., M. Baroni, U. Hasson (2012) (in press), *Processing of speech and non-speech sounds in the supratemporal plane: Auditory input preference does not predict sensitivity to statistical structure*, «Neuroimage».
- Van den Broek P. (2005), *Integrating memory-based and constructionist processes in accounts of reading comprehension*, «Discourse Processes», 39(2-3), pp. 299-316.
- Vigneau M., V. Beaucousin, P.-Y. Hervé, G. Jobard, L. Petit, F. Crivello, N. Tzourio-Mazoyer (2011), *What is right-hemisphere contribution to phonological, lexico-semantic, and sentence processing? Insights from a meta-analysis*, «Neuroimage», 54(1), pp. 577-593.
- Vilberg K.L., M.D. Rugg (2012), *The neural correlates of recollection: Transient versus sustained fMRI effects*, «The Journal of Neuroscience», 32(45), pp. 15679-15687.
- Wager T.D., E.E. Smith (2003), *Neuroimaging studies of working memory*, *Cognitive, Affective*, «Behavioral Neuroscience», 3(4), pp. 255-274.
- Wager T.D., L. Hernandez, J. Jonides, M. Lindquist (2007), *Elements of functional neuroimaging*, in Cacioppo J.T., L.G. Tassinari, G.G. Berntson (eds.), *Handbook of Psychophysiology*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 19-56.
- Wallentin M., A.H. Nielsen, P. Vuust, A. Dohn, A. Roepstorff, T.E. Lund (2011), *Amygdala and heart rate variability responses from listening to emotionally intense parts of a story*, «Neuroimage», 58(3), pp. 963-973.
- Whitney C., W. Huber, J. Klann, S. Weis, S. Krach, T. Kircher (2009), *Neural correlates of narrative shifts during auditory story comprehension*, «Neuroimage», 47(1), pp. 360-366.
- Wilson S.M., I. Molnar-Szakacs, M. Iacoboni (2008), *Beyond superior temporal cortex: Intersubject correlations in narrative speech comprehension*, «Cerebral Cortex», 18(1), pp. 230-242.
- Xu J., S. Kemeny, G. Park, C. Frattali, A. Braun (2005), *Language in context: Emergent features of word, sentence, and narrative comprehension*, «Neuroimage», 25(3), p. 1002.
- Yarkoni T., N.K. Speer, J.M. Zacks (2008), *Neural substrates of narrative comprehension and memory*, «Neuroimage», 41(4), pp. 1408-1425.
- Yue Q., L. Zhang, G. Xu, H. Shu, P. Li (2013) (in press), *Task-modulated activation and functional connectivity of the temporal and frontal areas during speech comprehension*, «Neuroscience».
- Zacks J.M., T.S. Braver, M.A. Sheridan, D.I. Donaldson, A.Z. Snyder, J. Ollinger, M.E. Raichle (2001), *Human brain activity time-locked to perceptual event boundaries*, «Nature neuroscience», 4(6), pp. 651-655.

- Zacks J.M., N.K. Speer, K.M. Swallow, T.S. Braver, J.R. Reynolds (2007), *Event perception: A mind-brain perspective*, «Psychological bulletin», 133(2), p. 273.
- Zacks J.M., K.M. Swallow (2007), *Event segmentation*, «Current directions in psychological science», 16(2), pp. 80-84.
- Zhu Z., P. Hagoort, J.X. Zhang, G. Feng, P.-Y. Chen, M. Bastiaansen, S. Wang (2012), *The anterior left inferior frontal gyrus contributes to semantic unification*, «Neuroimage», 60(4), pp. 2230-2237.

La spettroscopia nel vicino infrarosso funzionale (fNIRS) nello studio del linguaggio

Silvia Bisconti,¹ Teresa Farroni²

¹University of Michigan, ²Università degli Studi di Padova

1. La spettroscopia nel vicino infrarosso funzionale (fNIRS)

La spettroscopia nel vicino infrarosso (fNIRS) è una tecnica di neuroimmagine funzionale usata per la misurazione non invasiva dei cambiamenti di ossigenazione nel flusso sanguigno. In particolare tale tecnica è comunemente applicata nello studio del cervello e del muscolo. Nel seguente paragrafo tale tecnica verrà descritta nell'ambito delle sue applicazioni nello studio delle funzioni cognitive.

La fNIRS è stata sviluppata a partire dal 1977, quando Jöbsis dimostrò nel suo lavoro pioniero che i tessuti sono relativamente trasparenti alla luce nella regione (650-1000 nm) del vicino infrarosso, consentendo l'individuazione in tempo reale dell'ossigenazione del tessuto in vivo (Jöbsis 1977). In questo intervallo spettrale, definito anche 'finestra ottica', possono essere monitorati i tessuti biologici non direttamente raggiungibili dall'esterno. Infatti, attraverso l'utilizzo di specifiche lunghezze d'onda nella regione del vicino infrarosso, la luce è in grado di penetrare la cute e le ossa craniche, ed essere assorbita o diffusa all'interno del tessuto. La luce che riemerge dal tessuto fornisce delle informazioni sull'ossigenazione cerebrale, il flusso sanguigno e lo stato metabolico delle regioni investigate. Vari componenti (cromofori) contribuiscono all'assorbimento nel tessuto biologico. Alcuni di loro hanno una concentrazione fissa in un tempo ragionevole di misura, contribuendo in maniera costante all'attenuazione della luce (ad esempio, l'acqua e i lipidi), mentre altri variano con il flusso e l'ossigenazione del sangue (ad esempio, l'emoglobina [Hb]).

In particolare, l'Hb è una proteina a struttura tetramericata contenuta nei globuli rossi, responsabile del trasporto dell'ossigeno molecolare.

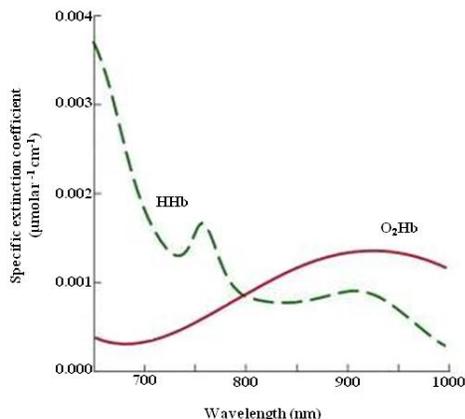


Figura 1. I coefficienti di estinzione di ossi-emoglobina (O₂Hb) e deossi-emoglobina (HHb) nello spettro nel vicino infrarosso (NIR) (Riprodotta da Pellicer, Bravo 2011)

Ognuno delle sue quattro sub-unità proteiche contiene un gruppo eme, composto da una protoporfirina che coordina uno ione ferro, dove avviene il legame con l'ossigeno. L'Hb è presente nel sangue in due forme: l'emoglobina ossigenata (O₂Hb) e deossigenata (HHb), la cui somma costituisce l'Hb totale. I diversi spettri di assorbimento di O₂Hb e HHb nello spettro del vicino infrarosso consentono di distinguere a livello intravascolare le due forme di Hb quando l'attenuazione della luce è misurata a due o più lunghezze d'onda (Figura 1). Inoltre, l'assorbimento dell'acqua e dell'Hb relativamente basso nello spettro del vicino infrarosso, permette alla luce di penetrare i tessuti superficiali, e misurare l'ossigenazione fino a livello della corteccia cerebrale. Sia l'assorbimento che la diffusione giocano un ruolo importante nell'attenuazione della luce, sebbene il coefficiente di diffusione sia di gran lunga più grande del coefficiente di assorbimento. Come conseguenza dell'effetto di diffusione della luce attraverso i diversi strati del tessuto, la lunghezza del percorso della luce (NIR) è più lunga della distanza fisica tra la sorgente e il rivelatore. Le proporzioni in cui la luce è assorbita, diffusa o trasmessa dipendono dalle proprietà del mezzo. Quando una luce monocromatica viaggia attraverso un mezzo chiaro, la diffusione è trascurabile perché la maggior parte della luce è assorbita o trasmessa. Questa situazione è ben rappresentata dalla legge di Lambert-Beer:

$$A = -\log(I/I_0) = \alpha \cdot c \cdot d$$

dove A è l'attenuazione, I è l'intensità della luce trasmessa (per esempio dopo aver oltrepassato il mezzo), I_0 è l'intensità della luce incidente prima del mezzo, c è la densità del mezzo, mentre α è il coefficiente di estinzione molare specifico per una certa lunghezza d'onda e d è la distanza che la luce percorre nel mezzo (nei casi ideali è pari alla lunghezza del mezzo).

Tale legge può essere applicata per valutare le concentrazioni di O₂Hb and HHb, tuttavia i tessuti biologici non rappresentano un mezzo chiaro a causa del forte livello di diffusione. Tale legge deve essere perciò modificata:

$$A = -\log(I/I_0) = (\alpha \cdot c \cdot d \cdot DPF) + G$$

dove DPF è il fattore di lunghezza del percorso differenziale che descrive la traiettoria non lineare della luce nei tessuti biologici e G è la diffusione.

Nelle strumentazioni a onda continua (CW), uno dei tre tipi di strumentazione fNIRS a disposizione che verranno spiegati nel corso del capitolo, il DPF e il fattore G non possono essere misurati direttamente (sebbene esistano delle stime del DPF) e di conseguenza i valori assoluti per le concentrazioni di O₂Hb e HHb non possono essere ottenuti (Gervain *et al.* 2011). Malgrado la diffusione giochi un ruolo dominante nell'attenuazione della luce, il suo contributo è trascurabile quando vengono calcolati i cambiamenti di concentrazione nei cromofori, essendo essa costante:

$$\Delta A = ((\Delta C_{\text{oss}} \cdot \alpha_{\text{oss}}) + (\Delta C_{\text{deoss}} \cdot \alpha_{\text{deoss}})) \cdot d + DPF$$

Usando due lunghezze d'onda, le concentrazioni relative di O₂Hb e HHb possono essere calcolate dal cambiamento nell'attenuazione (Pellicer, Bravo 2011). Senza entrare nel dettaglio, informazioni più approfondite sui principi fisici e fisiologici sottostanti la fNIRS, possono essere trovate nei lavori di Strangman *et al.* (2002) e Ghosh *et al.* (2012).

La risposta tipica di ossigenazione in una regione corticale coinvolta in un'attività cognitiva è rappresentata da un incremento locale nell'O₂Hb e un decremento nell'HHb due o tre volte inferiore (Figura 2). Tale risultato dipende da un incremento nella vasodilatazione arteriosa locale provocato dall'attività neuronale. Questo fenomeno è stato definito accoppiamento neurovascolare (Steinbrink *et al.* 2006). L'attività neuronale causata da una stimolazione cognitiva, provoca una maggiore richiesta di ossigeno e di glucosio che determinano un incremento locale dell'afflusso di sangue nella regione d'interesse. Quest'aumento del flusso di sangue eccede il consumo di ossigeno, conducendo a un'iperossigenazione rispetto a una condizione di riposo.

L'aumento dell'O₂Hb è dovuto in particolare all'aumento del volume sanguigno, mentre il decremento dell'HHb riflette il rapido *washout* che si determina con l'aumento dell'afflusso sanguigno sopra esposto. In un primo momento, il decremento dell'HHb può risultare poco comprensibile dato che il consumo di ossigeno, in un'area attivata, prevederebbe un aumento dell'HHb. Tuttavia, è stato dimostrato che l'incremento del flusso sanguigno compensa eccessivamente la richiesta di ossigeno, perciò un'iperossigenazione, che include una diminuzione dell'HHb, è attesa in un'area coinvolta in un compito cognitivo o motorio. In virtù delle considerazioni sopra apportate, il termine 'attivazione' è spesso utilizzato per indicare un incremento del flusso sanguigno cerebrale. Considerando che il segnale dipendente dal livello di ossigeno (BOLD) nel sangue, valutato attraverso la risonanza magnetica d'immagine funzionale (fMRI), è determinato dalle proprietà paramagnetiche della HHb, diversi studi hanno messo in relazione il segnale fNIRS con il segnale BOLD dell'fMRI. In particolare, una buona correlazione è stata trovata tra il segnale dell'HHb e la risposta BOLD (Schroeter *et al.* 2006).

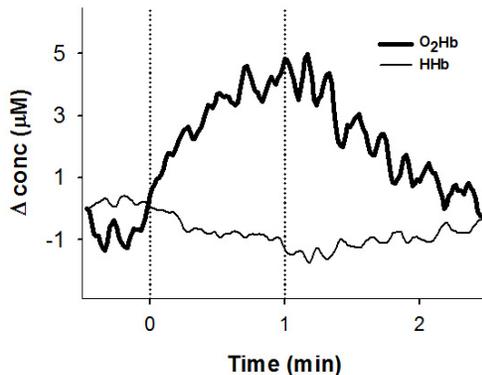


Figura 2. Esempio di risposta emodinamica tipica nell'adulto in seguito a un'attivazione corticale. La risposta inizia con un aumento della concentrazione di ossi-emoglobina (O₂Hb) e un decremento della deossi-emoglobina (HHb). Il picco della risposta emodinamica è raggiunto pochi secondi dopo l'inizio dello stimolo, dopodiché alla fine della stimolazione i valori ritornano lentamente al livello di base.

Malgrado la risposta di attivazione tipica negli adulti sia ormai ben compresa, meno è noto sulla risposta tipica di attivazione cerebrale negli infanti. Infatti, mentre nei soggetti adulti sani la risposta dell'O₂Hb e dell'HHb é di solito correlata e mostra un andamento riproducibile e abbastanza standardizzato (aumento di O₂Hb e diminuzione di HHb), negli infanti l'O₂Hb e l'HHb non risultano sempre accoppiate e/o la loro direzione sembra invertita. Sebbene negli infanti tale risposta emodinamica atipica potrebbe essere spiegata dal fatto che tale processo non è ancora maturato, ulteriori studi sono necessari per chiarire tale ipotesi (Gervain *et al.* 2011).

Tre tipi di strumentazioni sono disponibili per investigare la concentrazione di Hb nel sangue:

1. I sistemi nel dominio del tempo misurano il tempo di volo medio che l'impulso di luce impiega a viaggiare attraverso il tessuto.
2. I sistemi nel dominio della frequenza misurano il ritardo di fase e l'attenuazione della luce, modulata a una certa frequenza d'intensità, quando passa attraverso il tessuto.
3. I sistemi a onda continua (CW) misurano i cambiamenti di intensità della luce nel tempo in confronto a una linea di base di intensità costante.

Tutte e tre le strumentazioni fNIRS sono caratterizzate da alcune fibre ottiche che trasportano la luce nello scalpo (sorgenti) e da altre fibre che raccolgono la luce proveniente dal tessuto cerebrale e dallo scalpo (rivelatori). Le fibre ottiche sono organizzate all'interno di sonde di plastica (optodi) e disposte in diverse configurazioni spaziali sopra le regioni d'interesse attraverso l'utilizzo di caschetti o matrici che contengono gli optodi (Figura 3). La loro funzione consiste nel supportare le fibre ottiche garantendo un contatto stabile con lo scalpo. La collocazione del caschetto o delle matrici sopra la superficie cutanea, avviene facendo riferimento al sistema internazionale 10/20 (Jasper 1958). Questo metodo, riconosciuto a livello internazionale, consiste nel tracciare dei punti di riferimento standard rispetto al *nasion-inion* ed ai punti pre-auricolari sopra lo scalpo.

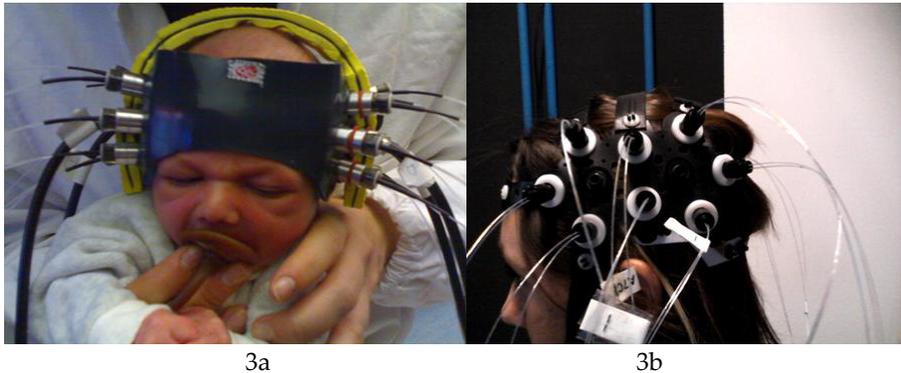


Figura 3. Esempi di sistemi fNIRS multicanale con differenti configurazioni di optodi applicate nei neonati (a) e negli adulti (b)

Collocando il caschetto fNIRS in base ai punti di ancoraggio che fanno riferimento alle posizioni del Sistema Internazionale 10/20, è possibile replicare gli studi sperimentali nel tempo e confrontare popolazioni diverse. Ogni configurazione è caratterizzata da coppie di sorgenti e rivelatori collocate a pochi centimetri di distanza l'una dall'altra. All'interno del tessuto biologico, la luce viaggia dalla sorgente al rivelatore assumendo una traiettoria a forma di banana. Sebbene l'adeguata distanza tra sorgente e rivelatore dipenda dalla regione corticale investigata, dall'età e dall'intensità della luce, nei bambini la distanza comunemente usata è di 2-3 cm, mentre nei soggetti adulti essa è all'incirca di 3-4 cm. La separazione sorgente-rivelatore è un importante parametro dei sistemi fNIRS perché determina sia la profondità di penetrazione sia la risoluzione spaziale. Infatti, maggiore è la distanza tra sorgente e rivelatore, maggiore sarà la profondità del tessuto investigato, mentre minore è la risoluzione spaziale della misura. Per ogni coppia di sorgente e rivelatore, il punto di misura, definito canale, è all'incirca a metà della distanza che li separa. Mappe topografiche bidimensionali dei cambiamenti di O_2Hb and HHb prodotti dall'attività cerebrale possono essere costruite in base alle configurazioni di sorgenti e rivelatori disposte sulle regioni d'interesse (Figura 4). La fNIRS è stata applicata nel *mapping* funzionale del cervello solo a partire dagli anni '90, sebbene negli ultimi anni il suo utilizzo abbia influenzato in maniera significativa la comprensione dei correlati neurali sottostanti le funzioni cognitive come il linguaggio, l'attenzione, la memoria e le emozioni. I principali lavori fNIRS nel campo delle neuroscienze cognitive possono essere trovati in una recente *review* di Cutini *et al.* (2012).

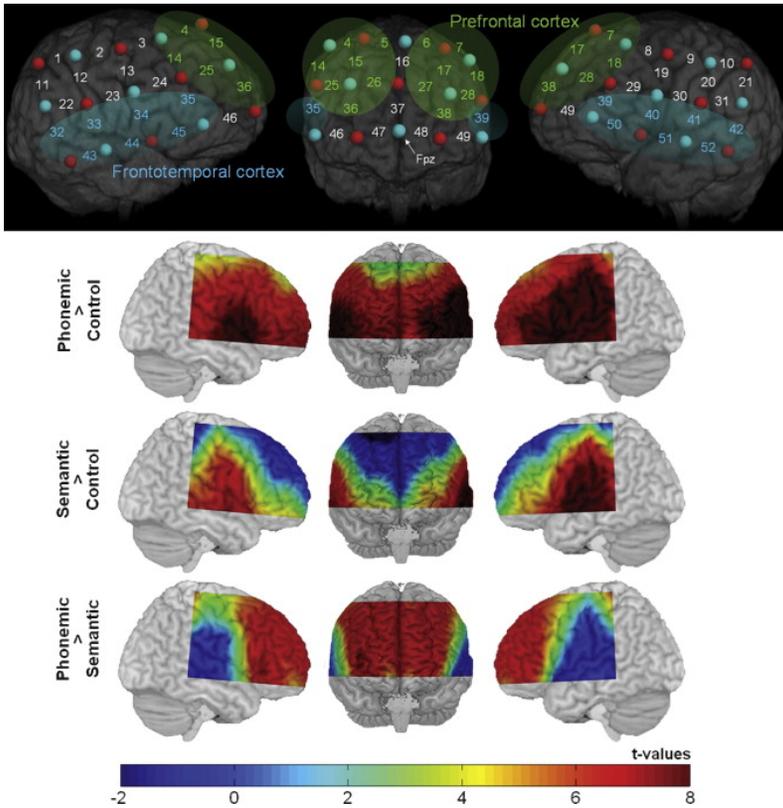


Figura 4. Mappe di attivazione corticale in risposta a un compito di fluenza verbale semantica e fonemica. Nel compito fonemico, la corteccia frontotemporale e la corteccia anteriore sono attivate maggiormente rispetto al compito di controllo. Nel compito semantico solo la corteccia frontotemporale è più attivata rispetto al compito di controllo. Confrontando i due compiti, solo la corteccia anteriore sembra più attivata nel compito fonemico rispetto al compito semantico. (Riprodotta da Tupak *et al.* 2012)

1.1. Come ottimizzare la qualità del segnale fNIRS

Com'è stato in precedenza spiegato, ci sono molti fattori che influenzano la qualità del segnale fNIRS. In particolare, le sorgenti di errore possono essere raggruppate in tre gruppi: errori sperimentali, rumore strumentale e fluttuazioni sistemiche. Tali errori devono essere opportunamente considerati nell'analisi del segnale per evitare di includere valori che non appartengono ai cambiamenti di ossigenazione evocati dagli stimoli cognitivi.

Il numero maggiore degli errori definiti sperimentali, è rappresentato dagli artefatti da movimento, che possono influenzare in maniera negativa l'acquisizione del segnale. È possibile tuttavia ridurre tali artefatti assicurando uno stabile contatto tra l'optodo e lo scalpo. Infatti, quando gli optodi sono ben posizionati sulla testa, il soggetto può muoversi liberamente durante il protocollo sperimentale. Ciò implica che siano usati degli optodi rigidi e che essi siano integrati in un materiale resistente per ottenere un segnale stabile. Diversi gruppi sperimentali sfruttano questa caratteristica perché, diversamente dall'fMRI, è possibile studiare l'attività cerebrale durante compiti sperimentali che richiedono il movimento. Tuttavia, la creazione di un supporto stabile nelle misurazioni fNIRS deve tenere in considerazione anche le specifiche richieste dello studio per cui sono finalizzate, tra cui l'età dei soggetti coinvolti. Negli studi con gli infanti o con bambini ad esempio, è più opportuno favorire la velocità con cui porre il caschetto o le matrici per evitare che questi perdano l'interesse verso lo studio. Durante la misura fNIRS è necessario che le fibre ottiche non poggino su altri punti del corpo come le spalle, perché ogni movimento del corpo influenzerà il contatto scalpo-optodo. Sebbene alcune bende che coprano gli optodi possano sembrare una soluzione per prevenire gli artefatti da movimento, esse non sono raccomandate dato che potrebbero rendere meno confortevole il caschetto o le matrici da indossare, facilitando uno stato di ansia nel soggetto. Inoltre è importante collocare il caschetto o le matrici nella stessa maniera in tutti i partecipanti. La riproducibilità dei risultati, infatti, può essere influenzata da un posizionamento errato del caschetto o delle matrici sulla testa dei soggetti. Anche le differenze anatomiche e vascolari tra i soggetti che partecipano allo studio possono influenzare i risultati. Tuttavia l'esperienza dello sperimentatore e l'attenzione al disegno degli optodi riducono le sorgenti di errore sperimentale, sebbene gli artefatti da movimento possano essere trattati anche dopo l'acquisizione dei dati. Inoltre, al fine di ridurre il numero di artefatti da movimento, è anche importante prestare scrupolosa attenzione alla qualità del protocollo sperimentale. Infatti, se lo studio è poco interessante, o troppo lungo, il

soggetto, annoiato e distratto, compirà più facilmente movimenti con il corpo (Gervain *et al.* 2011).

Tra le altre sorgenti di errore in grado di influenzare la qualità dei risultati fNIRS va citato il rumore strumentale, come il rumore elettronico o dell'hardware, che può interferire nelle misurazioni. Tale errore può essere ridotto modificando l'intensità dei laser.

Infine le fluttuazioni fisiologiche, come il battito cardiaco, la respirazione, la pressione sanguigna (onda di Mayer), possono interferire con la stima della risposta emodinamica nonostante la loro presenza sia indicativa di una buona qualità di segnale. I tentativi fino ad ora fatti per ridurre il segnale proveniente dalle fluttuazioni sistemiche, consistono nel conoscere le frequenze legate ai segnali fisiologici e nel misurare il segnale di attivazione funzionale usando almeno un punto di misura con una breve distanza sorgente-rivelatore nella regione investigata. Quest'ultimo accorgimento permette di isolare facilmente le fluttuazioni sistemiche degli strati superficiali senza valutare l'attività cerebrale.

1.2. Vantaggi e limiti della fNIRS

La fNIRS è una tecnica ideale per gli studi di neuroimmagine considerati i numerosi vantaggi che possiede rispetto alle altre tecniche. In primo luogo è un metodo d'indagine sicuro e non invasivo. Soggetti sottoposti alle misurazioni fNIRS infatti, non subiscono né forti campi magnetici né impulsi di radiofrequenze. Inoltre, nessun tracciante deve essere iniettato nel soggetto prima di una misura. Diversamente dall'fMRI che valuta solo l'HHb, la fNIRS misura la concentrazione sia dell'O₂Hb che dell'HHb, fornendo una valutazione più completa del flusso e del volume sanguigno. Inoltre, è caratterizzata da una relativamente alta risoluzione temporale (tempo di campionamento fino a 100 Hz). Può essere usata in maniera flessibile in base al tipo di studio che deve essere condotto perché può essere trasportata e quindi adattata al setting sperimentale. In aggiunta, la fNIRS permette di ripetere le misurazioni per lungo tempo anche a brevi intervalli di distanza, consentendo il monitoraggio degli effetti longitudinali di training, terapie o dello sviluppo cognitivo. Tale strumentazione è compatibile con altri sistemi di monitoraggio magnetici o elettrici e dispositivi medici (ad esempio, pacemaker, protesi, valvole cardiache meccaniche, placche in titanio, schegge metalliche, apparecchi per l'udito, impianti cocleari, etc.). La fNIRS è silenziosa e relativamente tollerante agli artefatti da movimento perché richiede una stabilità meno rigida della testa e del corpo, diversamente dalla PET e dall'fMRI che possono essere utilizzate negli

infanti in maniera limitata allo studio del sonno, a soggetti molto giovani o sotto sedazione. Per le ragioni esposte, la fNIRS invece può essere applicata con successo nei bambini. Gli infanti che partecipano agli studi fNIRS hanno generalmente un buon livello di movimento mentre osservano o ascoltano gli stimoli cognitivi stando sopra le gambe della madre o dello sperimentatore. La fNIRS può essere applicata in maniera combinata con altre tecniche come l'elettroencefalografia (EEG), la risonanza magnetica funzionale (fMRI), la magnetoencefalografia (MEG), la tomografia a emissione di positroni (PET) o potenziali evento-relati (ERP). La strumentazione fNIRS è relativamente poco costosa e trasportabile. Attualmente gli strumenti fNIRS wireless offrono la possibilità di poter studiare la risposta emodinamica in contesti sempre più vicini alla realtà e legati alla vita quotidiana.

Tale tecnica sperimentale mostra tuttavia dei limiti. Innanzitutto è possibile studiare solo la struttura corticale e non le strutture anatomiche sottocorticali come nell'fMRI. Sebbene la fNIRS abbia una migliore risoluzione spaziale rispetto all'EEG, essa non è abbastanza elevata (~ 1 cm) e consente una ricostruzione bidimensionale delle attivazioni corticali. Diversamente dalle tecniche di neuroimmagine che sono in grado di produrre mappe estese del cervello, le rappresentazioni dell'attività emodinamica monitorata dalla fNIRS è ristretta alle regioni corticali investigate e al numero di canali usati. Inoltre l'uso di fibre ottiche possono essere spesso pesanti e limitare lo spazio di movimento del soggetto che non va oltre la loro lunghezza. La mancanza di standardizzazione nell'analisi e nell'interpretazione dei dati limita il confronto dei risultati fNIRS. Inoltre il segnale generato dai tessuti extracerebrali è difficilmente distinguibile da quello originato dall'attività cerebrale (Quaresima *et al.* 2012).

2. La fNIRS nello studio del linguaggio

I diversi vantaggi che la fNIRS offre nello studio del linguaggio hanno consentito di approfondire ampiamente i correlati neurali di tale funzione cognitiva e il suo sviluppo. Sebbene l'EEG e la MEG siano state le tecniche di eccellenza nella ricerca neurolinguistica, soprattutto perché possiedono un'alta risoluzione temporale in grado di cogliere l'attività cerebrale durante l'elaborazione d'input linguistici, queste tecniche appaiono meno affidabili nel localizzare la risposta a causa della loro bassa risoluzione spaziale. Diversamente dalla fMRI, l'applicazione della fNIRS nello studio dello sviluppo del linguaggio risulta essere molto importante, in primo luogo per la sua tolleranza agli artefatti da movimento che le consente di valutare i soggetti anche durante una conversazione. In secondo luogo, essendo la

fNIRS molto silenziosa, è possibile presentare gli stimoli linguistici come in una situazione naturale, avendo così l'opportunità di indagare anche la capacità di discriminare differenze linguistiche sottili, come nel caso dei fonemi. Questa metodologia può essere applicata anche nei bambini che non possono essere studiati in campi magnetici forti, lasciando che i soggetti siano monitorati, ad esempio stando in compagnia dei familiari. Di seguito verranno presentati e discussi diversi studi fNIRS che hanno contribuito allo studio dello sviluppo, della comprensione e della produzione del linguaggio.

2.1. Lo sviluppo del linguaggio

Il linguaggio può essere definito come la capacità dell'uomo di esprimersi e comunicare tramite un sistema di simboli, in particolare di segni vocali e grafici. Il suo sviluppo ha suscitato da sempre molto interesse per l'importanza che tale funzione cognitiva ricopre nell'interazione con altri esseri viventi. Al di là delle caratteristiche comuni a tutte le lingue, la conoscenza di una specifica lingua richiede la capacità di riconoscere le caratteristiche prosodiche e fonologiche, la conoscenza delle rappresentazioni lessico-semantiche e la padronanza delle regole sintattiche. Inoltre, essendo il linguaggio utilizzato in un contesto sociale, il suo uso dipende anche dalle convenzioni culturali metalinguistiche.

Sebbene la padronanza del linguaggio vada oltre la sua percezione, l'analisi delle caratteristiche uditive di un discorso, sembra un fattore fondamentale per stabilire dei punti di ancoraggio che rendano possibile la segmentazione delle unità linguistiche. Mentre negli adulti l'informazione semantica e lessicale, così come quella pragmatica e contestuale, favoriscono il riconoscimento delle unità linguistiche del discorso, nei neonati o negli adulti che devono acquisire una lingua straniera, le caratteristiche acustiche sono cruciali per la sintonizzazione nel linguaggio e l'identificazione delle caratteristiche segmentali (ad esempio, fonemi) e soprasegmentali (prosodia non lessicale). L'abilità di distinguere differenti contrasti fonemici e l'uso degli stimoli prosodici per segmentare il discorso e assegnare uno stato lessicale è una caratteristica pre-lessicale rilevante, così come la capacità di estrarre delle regole statistiche che guidano la segmentazione del flusso del discorso in fonemi, sillabe, parole con lo scopo di aiutare la comprensione della sintassi e del lessico.

La capacità dei neonati di elaborare regolarità statistiche nella struttura del linguaggio è stata investigata attraverso la fNIRS da Gervain *et al.* (2008). Ai neonati venivano presentate delle sequenze di sillabe contenenti sia delle sillabe ripetute di seguito (ABB; ad esempio, 'mubaba') sia delle sillabe random (ABC;

ad esempio, 'mubage'). I risultati dello studio dimostrarono un incremento dell'O₂Hb nelle regioni frontali dell'emisfero sinistro e nelle regioni temporali bilaterali in risposta alle sequenze che contenevano sillabe ripetute rispetto a sequenze di sillabe non strutturate. Ciò dimostrerebbe che i neonati sono già in grado di estrarre delle semplici regolarità dal discorso. Tuttavia quest'abilità sarebbe evidente solo quando le sillabe sono ripetute l'una di seguito all'altra. La stessa risposta emodinamica non è stata evidenziata quando le sillabe ripetute non erano consecutive (ABA; ad esempio, 'mabuba'). In uno studio fNIRS di Pena *et al.* (2003), i cambiamenti dell'ossigenazione cerebrale furono investigati alla nascita a livello della corteccia temporale in risposta all'elaborazione del linguaggio. Ai neonati venivano presentate delle frasi con una fluenza del discorso normale (in avanti) e delle frasi con un ordine inverso (all'indietro). I risultati dello studio dimostrarono che era presente una predominanza del lobo temporale sinistro nel linguaggio in avanti, ma non all'indietro o durante il silenzio. Gli autori spiegano tale risultato come un'evidenza della dominanza dell'emisfero sinistro nell'elaborare le proprietà del discorso.

Sato *et al.* (2012) investigarono ulteriormente l'elaborazione del linguaggio in avanti e all'indietro per capire se questa dominanza fosse evidente per qualsiasi linguaggio o solo in risposta alla lingua madre. I neonati furono sottoposti quindi all'ascolto del discorso sia in avanti che all'indietro nella lingua madre (giapponese) e in una lingua straniera (inglese). I risultati provarono che la regione temporo-parietale appariva maggiormente attivata per il linguaggio della lingua madre in avanti rispetto a quello all'indietro. Tale differenza non fu rilevata tra il linguaggio in avanti o all'indietro nella lingua straniera. Inoltre, questa risposta era più evidente nell'ascolto del discorso in avanti della lingua madre rispetto all'ascolto in avanti della lingua straniera. Gli autori affermarono che tali risultati dimostravano una chiara sintonizzazione verso certe caratteristiche del linguaggio della lingua madre già a pochi giorni di vita.

L'attenzione verso la percezione della voce materna è stata investigata attraverso la fNIRS da Lloyd-Fox *et al.* (2011). Sebbene gli infanti non siano in grado di elaborare pienamente il linguaggio, sin dai primi mesi di vita loro sono in grado di identificare e apprendere il linguaggio dalle voci dell'ambiente circostante. Lloyd-Fox *et al.* (2011) dimostrarono che, verso i 6 mesi di età, aree specifiche della corteccia cerebrale iniziano a specializzarsi in maniera selettiva nel riconoscimento della voce umana. Mentre soggetti di 4 mesi mostrano un'attivazione bilaterale della corteccia temporale in risposta all'ascolto di suoni vocali e non vocali, regioni della corteccia anteriore temporale presentano un incremento nell'attivazione durante l'ascolto della voce umana. Tale risultato è stato utile non solo per comprendere quali regioni fossero sensibili al

riconoscimento della voce nello sviluppo tipico, ma anche per dimostrare che l'infante analizza le caratteristiche prosodiche del discorso ed è in grado di discriminare le differenze ritmiche della voce materna da quella di estranei.

Per garantire una buona comunicazione tra persone è opportuno riconoscere dei segnali che indicano l'intenzione di comunicare, come il contatto degli occhi. A tal proposito Grossmann *et al.* (2010b) hanno approfondito il ruolo della corteccia prefrontale coinvolta in questa funzione in soggetti di 5 mesi, considerando che a questa età gli infanti sono sensibili al contatto degli occhi e a stimoli come il proprio nome. Lo studio prevedeva, in una prima sessione, la visione di volti umani che mostravano un contatto negli occhi o che dirigevano lo sguardo via dall'infante e, in una successiva sessione, l'ascolto delle voci che chiamavano il loro o un altro nome. I risultati rivelarono che gli infanti reclutavano aree adiacenti nella corteccia prefrontale dorsale sinistra quando elaboravano il contatto degli occhi e il proprio nome. Tali evidenze indicano che gli infanti elaborano selettivamente i segnali comunicativi diretti a loro, sebbene non utilizzino le stesse aree quando elaborano segnali comunicativi di diversa modalità.

L'apprendimento del linguaggio è stato anche analizzato nei soggetti monolingui e bilingui per comprendere la capacità di elaborazione fonetica nelle persone che padroneggiano una o due lingue. Nei primi mesi di vita gli infanti sono in grado di discriminare un'ampia varietà di contrasti fonetici, tuttavia con il tempo, tale sensibilità lascerebbe lo spazio a una specializzazione verso i contrasti rilevanti per la propria lingua nativa. Secondo l'ipotesi 'uditiva generale', i bambini monolingui imparano le unità fonetiche del loro linguaggio utilizzando meccanismi uditivi generali che durante il primo anno di vita diventano sempre più specializzati per il linguaggio. Tale sensibilità dipende dalla frequenza di esposizione agli stimoli legati alla lingua nativa e dalla salienza dei contrasti fonetici, attraverso cui è possibile costruire delle rappresentazioni mentali legate ai fonemi o ai suoni. Secondo l'ipotesi 'specificità del linguaggio', i bambini monolingui possiedono meccanismi specifici dedicati al linguaggio grazie ai quali sono in grado di sintonizzarsi su caratteristiche temporali e ritmiche tipiche del linguaggio. Per apprendere il linguaggio, secondo questa ipotesi, è necessaria un'esposizione sistematica alla lingua che consente di cogliere certe regolarità fonetiche e fonemiche. Per comprendere i meccanismi che guidano l'acquisizione del linguaggio, tali ipotesi sono state valutate in uno studio di Petitto *et al.* (2012) in cui soggetti bilingui e monolingui di 4-6 mesi e di 10-12 mesi venivano testati in un compito di elaborazione del linguaggio. Ai soggetti erano presentati stimoli fonetici nativi (inglese) e non nativi (Hindi) e stimoli non linguistici (toni). Se l'ipotesi 'uditiva generale' che

media l'elaborazione fonetica fosse stata confermata, tutti i bambini avrebbero dovuto elaborare gli stimoli linguistici e non linguistici reclutando le aree deputate all'elaborazione fonetica, come il giro temporale superiore e la corteccia frontale inferiore. I bambini bilingui avrebbero dovuto mostrare una più grande attività nell'area frontale a differenza dei bambini monolingui data la necessità di usare un maggiore sforzo cognitivo per elaborare due lingue. Se l'ipotesi 'linguaggio specifica' fosse stata invece vera, una differenza nel reclutamento neurale in risposta a stimoli linguistici e non linguistici sarebbe dovuta essere evidente nei due gruppi e nel periodo di sviluppo. I risultati dello studio hanno dimostrato che i soggetti monolingui e bilingui reclutavano le stesse aree del linguaggio osservate negli adulti, come il giro temporale superiore sinistro (coinvolto nell'elaborazione fonetica) e la corteccia frontale inferiore (coinvolta nella ricerca e nel recupero dei significati e nell'elaborazione sintattica e fonologica). Tuttavia, l'attivazione del giro temporale sinistro fu osservata nei soggetti più giovani e rimaneva stabile nel tempo, mentre la corteccia frontale inferiore sinistra mostrò un incremento dell'attivazione nei bambini più grandi. Inoltre, una differenza fu osservata nei bilingui più grandi in risposta ai contrasti fonetici non-nativi, mentre i monolingui più grandi non erano in grado di fare tale discriminazione. Gli autori descrissero tale risposta come una dimostrazione della 'Perceptual Wedge Hypothesis'. Tale ipotesi sostiene che la capacità di discriminare/percepire diventa sempre più attenuata con la crescita perché i soggetti non sono più esposti a stimoli rilevanti. Per questo motivo, l'esposizione a più di una lingua potrebbe alterare l'elaborazione neurale e del linguaggio e potrebbe suggerire un vantaggio per chi usa più lingue.

Il contributo della fNIRS nel corso dello sviluppo del linguaggio ha riguardato anche l'apprendimento della lettura. La risposta emodinamica è stata investigata da Safi *et al.* (2012) durante la lettura di parole irregolari e di non-parole. Tale studio si prefiggeva di investigare due tipi di elaborazione nella lettura delle parole: la via lessicale elabora globalmente la parola attivando il lessico e le conoscenze semantiche mentre la via fonologica (sublessicale) elabora lo stimolo linguistico attraverso la conversione dei grafemi in fonemi. La via lessicale costituisce la via principale nella lettura delle parole mentre la via fonologica si attiverebbe nella lettura delle non-parole o parole nuove. I risultati dello studio hanno messo in luce che il giro frontale inferiore, il giro temporale superiore e medio e la corteccia occipitale bilaterale si attivavano sia in risposta alle non-parole sia in risposta alle parole irregolari. Tuttavia, nel giro frontale inferiore bilaterale, l'attivazione era maggiore durante la lettura delle non-parole rispetto alla lettura delle parole

irregolari. Tale risposta è stata attribuita dagli autori alla conversione grafema-fonema che caratterizza il percorso fonologico della lettura.

La percezione delle modulazioni ritmiche basse riveste un ruolo importante per il linguaggio e per la capacità di leggere. In uno studio sul ritmo del linguaggio, Kovelman *et al.* (2012) hanno studiato la percezione dei suoni nella corteccia frontale e temporale. I soggetti di 6-9 anni ascoltavano passivamente dei blocchi di 'beeps' a diverse frequenze 0.5 Hz, 1.5 Hz e 3.0 Hz. I risultati dello studio dimostrarono una maggiore attivazione nel giro temporale superiore sinistro solo quando i soggetti ascoltavano i suoni a una frequenza di 1.5 Hz. Il coinvolgimento delle aree deputate al linguaggio (giro temporale superiore sinistro) non risultava altrettanto evidente durante la percezione dei suoni a una frequenza di 0.5 Hz o 3.0 Hz. Gli autori spiegano questa sensibilità affermando che tali frequenze potrebbero aiutare la segmentazione del flusso linguistico favorendo il riconoscimento delle parole e delle frasi. Nella regione temporale posteriore si evinceva una maggiore attivazione dell'emisfero destro in risposta alle diverse frequenze. Ciò potrebbe indicare che l'emisfero destro è deputato alla discriminazione dei suoni.

Gli studi fNIRS fino ad ora presentati hanno messo in luce come l'emisfero sinistro del cervello, già a partire dai primi mesi di vita, sia particolarmente sensibile a stimoli fonetici, sillabe o parole che sono affini alla lingua nativa dei soggetti coinvolti negli studi. Ciò è in accordo con la presenza nell'emisfero sinistro dell'area di Broca, localizzata nella terza circonvoluzione frontale e dell'area di Wernicke, localizzata nella parte posteriore del solco temporale superiore. Tali aree sono coinvolte nella produzione e comprensione del linguaggio scritto e parlato.

2.2. La fluenza verbale

Il linguaggio permette agli esseri umani di convertire significati complessi e astratti attraverso una sequenza lineare di suoni del discorso. La fNIRS è stata ampiamente applicata nella produzione del linguaggio sia per comprendere i correlati neurali legati all'uso del linguaggio, sia per capire la risposta cognitiva durante l'acquisizione di una nuova lingua.

Nell'ambito dello studio delle basi neurali del linguaggio, molti studi fNIRS si sono focalizzati sulla lateralizzazione del linguaggio. A tale scopo Tupak *et al.* (2012) investigarono la risposta emodinamica nella corteccia frontotemporale in relazione a un compito di fluenza verbale semantico e fonemico. Sebbene l'abilità richiesta potesse sembrare molto simile, generare

delle parole che iniziano con una stessa lettera dipende dalla capacità strategica di trovare termini che abbiano una corrispondenza lessicale con gli stimoli fonetici, mentre la generazione semantica dipende dalla capacità strategica di individuare parole che abbiano un significato in comune. Ai soggetti era chiesto di generare più parole possibili che appartenessero a una categoria semantica o che iniziassero con uno stesso fonema. I risultati dello studio mostrarono una parziale dissociazione dell'area attivata riguardo al compito usato. Infatti, l'area frontotemporale era attivata sia per il compito di fluenza semantica sia per il compito di fluenza fonemica, mentre la corteccia anteriore e superiore erano esclusivamente attivate in risposta al compito di fluenza fonemica. Sulla base di tali risultati, gli autori affermano che le regioni temporali formerebbero la base funzionale per il sistema semantico, mentre le aree frontali, come il giro frontale inferiore, sarebbero importanti per l'elaborazione fonetica e semantica del linguaggio. Inoltre, l'analisi della lateralizzazione evidenziava una più pronunciata predominanza dell'emisfero sinistro in risposta al compito semantico. Questa conclusione è in linea con il risultato trovato da Bisconti *et al.* (2012) durante un compito di fluenza verbale fonemica nella corteccia frontopolare. Infatti, nessuna lateralizzazione appariva evidente durante il compito nella risposta emodinamica a livello di gruppo, sebbene un pattern disomogeneo fosse presente quando la predominanza emisferica era analizzata a livello del singolo soggetto.

Com'è stato in precedenza spiegato, durante l'acquisizione del linguaggio il cervello diventa sempre più specializzato nella percezione dei suoni o dei fonemi della lingua madre. Come risultato della maturazione e dell'esperienza linguistica, gli adulti parlano in maniera competente la lingua madre, ma fanno fatica a discriminare i fonemi di altre lingue. In uno studio di Kovelman *et al.* (2011), l'abilità nel discriminare i suoni della lingua madre o di una lingua acquisita furono confrontati e analizzati. Agli adulti di madrelingua inglese fu chiesto di discriminare fonemi che erano simili (Tagalog /na/-/ŋa/) o che differivano da quelli della lingua inglese (Ndebele /k|li/-/k|li/). I risultati dello studio dimostrarono che la regione frontale inferiore sinistra mostrava un'attivazione solo durante la condizione in cui i soggetti ascoltavano i fonemi simili a quelli della lingua madre, ma tale pattern di risposta non si verificava quando i soggetti sentivano i fonemi differenti.

L'abilità di cambiare lingua in base alla situazione più appropriata è stata studiata nei soggetti bilingui. In base agli studi di neuroimmagine sembra che la capacità di cambiare linguaggio dipenda dalle funzioni esecutive, piuttosto che dalle aree specializzate nel linguaggio. Nel lavoro di Kovelman *et al.* (2009), furono esaminati soggetti bilingui che conoscevano la lingua inglese e il

linguaggio dei segni in base alla loro abilità di usare le due lingue simultaneamente, in alternanza o separatamente. Ai soggetti veniva chiesto di nominare delle immagini in una sola lingua (usando una lingua alla volta) oppure in due lingue (simultaneamente oppure alternandole rapidamente). I risultati dello studio a livello comportamentale evidenziarono un simile livello di accuratezza tra i gruppi e le condizioni. I risultati fNIRS rivelarono che i bilingui, quando dovevano rispondere attraverso la lingua dei segni e la lingua inglese, reclutavano in misura maggiore le regioni temporali posteriori rispetto a quando dovevano rispondere attraverso una sola lingua. Gli autori spiegarono questa risposta cognitiva come dovuta al fatto che l'abilità dei bilingui di usare due lingue senza sforzo e confusione coinvolgesse l'uso di regioni temporali posteriori specifiche per l'abilità di cambiare il codice linguistico e reclutare due lingue contemporaneamente.

2.3. La comprensione del linguaggio

La comprensione del linguaggio è stata oggetto di studio anche nei soggetti adulti. Mentre nell'infante la competenza linguistica è ridotta per il fatto che il soggetto non possiede una padronanza della lingua, nell'adulto tale abilità mette in gioco la conoscenza lessicale-semantica e morfosintattica del linguaggio. Per questa ragione, la fNIRS è stata applicata per valutare la risposta cognitiva durante l'elaborazione di stimoli linguistici.

Scherer *et al.* (2012) ha applicato la fNIRS allo studio dell'elaborazione sintattica negli adulti con un'alta competenza linguistica nella lingua madre (portoghese) e in una seconda lingua (francese). Ai soggetti venivano presentate visivamente delle frasi che potevano contenere delle violazioni dell'accordo nome-verbo. I risultati dimostrarono che in entrambe le lingue si evidenziava una maggiore attivazione nelle regioni frontali anteriori dell'emisfero sinistro in risposta al giudizio sintattico. Le regioni temporali posteriori erano anche attive, tuttavia l'attivazione era più prominente nella seconda lingua.

In uno studio di Hashimoto *et al.* (2012) che si proponeva l'obiettivo di valutare la capacità di discriminare la struttura delle frasi in soggetti adulti, venivano presentate ai soggetti delle frasi con una struttura soggetto-verbo-oggetto o con una struttura oggetto-soggetto-verbo. Sebbene in giapponese non esistano regole sintattiche, è stata dimostrata una maggiore attivazione della corteccia frontale inferiore in risposta alla struttura oggetto-soggetto-verbo.

Le regole per combinare i differenti fonemi in una lingua sono definite regole fonotattiche. Queste regole definiscono le combinazioni possibili legali

all'inizio o alla fine di una frase, come ad esempio /fl/, che è compatibile con l'inizio di una parola inglese (ad esempio, /flight/) o tedesca (ad esempio, /flug/) o quelle illegali come /tl/ che non è compatibile né con la lingua inglese né con la lingua tedesca. Tuttavia ci sono delle combinazioni che, nonostante siano illegali all'inizio di una parola, come /ft/ che è illegale all'inizio di una parola inglese o tedesca, non lo sono alla fine della parola inglese (ad esempio, /loft/) o tedesca (ad esempio, /luft/) (Obrig *et al.* 2010). A questo scopo Rossi *et al.* (2011) hanno studiato l'elaborazione delle regole fonotattiche in uno studio combinato EEG-fNIRS. La popolazione era costituita da soggetti adulti, ai quali venivano presentate delle pseudoparole che potevano essere legali o illegali rispetto alla lingua madre. I risultati negli adulti dimostrarono un incremento maggiore dell'O₂Hb durante l'ascolto delle pseudoparole legali rispetto a quelle illegali, con una chiara lateralizzazione verso l'emisfero sinistro. Gli autori affermarono che tali risultati testimoniano l'abilità di discriminare i suoni della lingua nativa dagli stimoli fonologici sconosciuti.

3. Prospettive future della fNIRS nello studio del linguaggio

In questo capitolo sono stati menzionati solo alcuni degli studi della fNIRS che hanno contribuito alla comprensione dei processi che governano il linguaggio. Senza dubbio la fNIRS ha mostrato dei chiari vantaggi nello studio del linguaggio fornendo un metodo di indagine silenzioso e meno limitante dell'fMRI. Considerata la mancanza di rumore strumentale, la fNIRS è risultata molto utile negli adulti per comprendere l'elaborazione, quando gli stimoli linguistici prevedono differenze acustiche sottili o quando deve essere valutata l'espressione orale. Inoltre la flessibilità nell'utilizzo e il suo costo relativamente basso in confronto ad altri strumenti di neuroimmagine (ad esempio, la fMRI) rende la fNIRS una tecnica di particolare interesse per lo studio del linguaggio. La possibilità di valutare i cambiamenti emodinamici in un ambiente vicino a quello naturale è particolarmente confortevole quando si valutano bambini o infanti considerando che anche i genitori possono rimanere nella stessa stanza ed assistere alle misurazioni. Tuttavia molto rimane ancora da investigare nel campo dello studio del linguaggio.

La possibilità di testare anche soggetti che indossano dispositivi medici come gli apparecchi per l'udito o impianti cocleari potrebbe essere particolarmente utile per investigare lo sviluppo del linguaggio in soggetti con disabilità uditiva. In futuro, la possibilità di incrementare il numero degli studi longitudinali che tracciano l'emergenza e la lateralizzazione delle funzioni del

linguaggio potrebbe costituire una base solida per comprendere l'emergenza delle funzioni linguistiche nei primi anni di vita. Inoltre, l'uso di registrazioni simultanee tra la fNIRS e l'EEG potrebbero chiarire le correlazioni tra i segnali ottici e quelli elettrofisiologici, ottenendo, così, una maggiore conoscenza dei meccanismi sottostanti il linguaggio. L'avanzamento tecnologico verso un uso sempre più ampio dei dispositivi wireless potrebbe facilitare l'utilizzo della fNIRS in un contesto di studio ancora più vicino a quello reale. I soggetti non sarebbero limitati dall'impiego di fibre ottiche che ostacolano la libertà di movimento e il segnale fNIRS sarebbe senza dubbio migliore.

Bibliografia

- Bisconti S., G. Di Sante, M. Ferrari, V. Quaresima (2012), *Functional near-infrared spectroscopy reveals heterogeneous patterns of language lateralization over frontopolar cortex*, «Neuroscience Research», 73(4), pp. 328-832.
- Cutini S., S. Basso Moro, S. Bisconti (2012), *Functional near infrared optical imaging in cognitive neuroscience: An introductory review*, «Journal of Near Infrared Spectroscopy», 20(1), pp. 75-92.
- Gervain J., F. Macagno, S. Cogoi, M. Peña, J. Mehler (2008), *The neonate brain detects speech structure*, «Proceedings of the National Academy Sciences of the United States of America», 105(37), pp. 14222-14227.
- Gervain J., J. Mehler, J.F. Werker, C.A. Nelson, G. Csibra, S. Lloyd-Fox, M. Shukla, R.A. Aslin (2011), *Near-infrared spectroscopy: A report from the McDonnell infant methodology consortium*, «Developmental Cognitive Neuroscience», 1(1), pp. 22-46.
- Ghosh A., C. Elwell, M. Smith (2012), *Review article: Cerebral near-infrared spectroscopy in adults: A work in progress*, «Anesthesia and Analgesia», 115 (6), pp. 1373-1383.
- Grossmann T., E. Parise, A.D. Friederici (2010a), *The detection of communicative signals directed at the self in infant prefrontal cortex*, «Frontiers in Human Neuroscience», 4, pp. 201.
- Grossmann T., R. Oberecker, S.P. Koch, A.D. Friederici (2010b), *The developmental origins of voice processing in the human brain*, «Neuron», 65(6), pp. 852-858.
- Hashimoto Y., S. Yokoyama, R. Kawashima (2012), *Neuro-typology of sentence comprehension: Cross-linguistic difference in canonical word order affects brain responses during sentence comprehension*, «The Open Medical Imaging Journal», 6, pp. 62-69.

- Jasper H.H. (1958), *Report of the Committee on Methods of Clinical Examination in Electroencephalography*, «*Electroencephalography Clinical Neurophysiology*», 10, pp. 370-371.
- Jobsis F.F. (1977), *Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters*, «*Science*», 198(4323), pp. 1264-1267.
- Kovelman I., M.H. Shalinsky, K.S. White, S.N. Schmitt, M.S. Berens, N. Paymer, L.A. Petitto, (2009), *Dual language use in sign-speech bimodal bilinguals: fNIRS brain-imaging evidence*, «*Brain, Language*», 109(2-3), pp. 112-123.
- Kovelman I., J.C. Yip, E.L. Beck (2011), *Cortical systems that process language, as revealed by non-native speech sound perception*, «*Neuroreport*», 22(18), pp. 947-9450.
- Kovelman I., K. Mascho, L. Millott, A. Mastic, B.H. Moiseff, M. Shalinsky (2012), *At the rhythm of language: Brain bases of language-related frequency perception in children*, «*Neuroimage*», 60(1), pp. 673-682.
- Lloyd-Fox S., A. Blasi, E. Mercure, C.E. Elwell, M.H. Johnson (2011), *The emergence of cerebral specialization for the human voice over the first months of life*, «*Social Neuroscience*», 21(14), pp. 1220-1224.
- Minagawa-Kawai Y., K. Mori, J.C. Hebden, E. Dupoux (2008), *Optical imaging of infants' neurocognitive development: Recent advances and perspectives*, «*Developmental Neurobiology*», 68(6), pp. 712-728.
- Obrig H., S. Rossi, S. Telkemeyer, I. Wartenburger (2010), *From acoustic segmentation to language processing: Evidence from optical imaging*, «*Frontiers in Neuroenergetics*», 3(2), pp. 1-12.
- Pellicer A., C. Bravo Mdel (2011), *Near-infrared spectroscopy: A methodology-focused review*, «*Seminar in Fetal, Neonatal Medicine*», 16(1), pp. 42-49.
- Pena M., A. Maki, D. Kovacic, G. Dehaene-Lambertz, H. Koizumi, F. Bouquet, J. Mehler (2003), *Sounds and silence: An optical topography study of language recognition at birth*, «*Proc Natl Acad Sci USA*», 100(20), pp. 11702-11705.
- Petitto L.A., M.S. Berens, I. Kovelman (2012), *The 'Perceptual Wedge Hypothesis' as the basis for bilingual babies' phonetic processing advantage: New insights from fNIRS brain imaging*, «*Brain, Language*», 121(2), pp. 130-143.
- Quaresima V., S. Bisconti, M. Ferrari (2012), *A brief review on the use of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) for language imaging studies in human newborns and adults*, «*Bran, Language*», 121(2), pp. 79-89.
- Rossi S., I.B. Jürgenson, A. Hanulíková (2011), *Implicit processing of phonotactic cues: Evidence from electrophysiological and vascular responses*, «*Journal of Cognitive Neuroscience*», 23(7), pp. 1752-1764.

- Safi D., M. Lassonde, D.K. Nguyen (2012), *Functional near-infrared spectroscopy for the assessment of overt reading*, «Brain, Behavior», 2(6), pp. 825-837.
- Sato H., Y. Hirabayashi, H. Tsubokura (2012), *Cerebral hemodynamics in newborn infants exposed to speech sounds: A whole-head optical topography study*, «Human Brain Mapping», 33(9), pp. 2092-2103.
- Scherer L.C., R.P. Fonseca, M. Amiri (2012), *Syntactic processing in bilinguals: An fNIRS study*, «Brain, Language», 121(2), pp. 144-151.
- Schroeter M.L., T. Kupka, T. Mildner, K. Uludağ, D.Y. von Cramon (2006), *Investigating the post-stimulus undershoot of the BOLD signal—a simultaneous fMRI and fNIRS study*, «Neuroimage», 30(2), pp. 349-358.
- Strangman G., D.A. Boas, J.P. Sutton (2002), *Non-invasive neuroimaging using near-infrared light*, «Biological Psychiatry», 1,52(7), pp. 679-693.
- Tupak S.V., M. Badewien, T. Dresler, T. Hahn, L.H. Ernst, M.J. Herrmann, A.J. Fallgatter, A.C. Ehlis (2012), *Differential prefrontal and frontotemporal oxygenation patterns during phonemic and semantic verbal fluency*, «Neuropsychologia», 50(7), pp. 1565-1569.
- Steinbrink J., A. Villinger, F. Kempf, D. Haux, S. Boden, H. Obrig (2006), *Illuminating the BOLD signal: Combined fMRI-fNIRS studies*, «Magnetic Resonance Imaging», 24(4), pp. 495-505.

Lo studio dei tracciati oculari (*eye-tracking*) nella ricerca sul linguaggio

Marco Porta,¹ Stefano Rastelli¹

¹Università degli Studi di Pavia

1. L'occhio

1.1. Anatomia e fisiologia dell'occhio umano

L'occhio è l'organo che permette alle immagini di essere acquisite e trasmesse al cervello per la successiva elaborazione (Gonzalez, Woods 2008, pp. 35-38; Encyclopedia Britannica 2012).

Il rivestimento più esterno dell'occhio è costituito da due parti curve ma non esattamente sferiche: la cornea, posta anteriormente, trasparente e con un raggio di poco inferiore al centimetro, e la sclera, opaca e con un raggio di circa 12 millimetri. Più internamente si trovano la coroide, l'iride (cioè la parte 'colorata' dell'occhio) e il corpo ciliare, mentre al livello più interno trova posto la retina. Il cristallino, formato da fibre trasparenti, è situato dietro la cornea e, come una lente, permette di regolare la distanza focale in modo che l'immagine risulti il più possibile nitida. La pupilla è un foro posto al centro dell'iride, la cui dimensione regola la quantità di luce che entra nell'occhio.

La retina è una membrana fotosensibile composta principalmente da due categorie di cellule: i coni e i bastoncelli. Mentre i coni sono più sensibili ai colori e sono caratterizzati da una maggiore acuità visiva, i bastoncelli sono più sensibili alla luce, così da permettere, ad esempio, la visione in condizioni di semioscurità. Sulla superficie della retina, in posizione opposta rispetto alla pupilla, c'è la fovea, un'area caratterizzata dalla massima acuità visiva.

L'occhio umano può essere paragonato ad una semplice macchina fotografica, in quanto il cristallino forma sulla retina, che corrisponde alla pellicola o al sensore, un'immagine capovolta degli oggetti. La messa a fuoco viene ottenuta con l'appiattimento o l'arrotondamento del cristallino: tale processo è chiamato accomodazione. In condizioni normali, l'accomodazione non è necessaria per vedere oggetti lontani, in quanto il cristallino riesce a mettere a fuoco questi elementi sulla retina. Per vedere oggetti più vicini, il cristallino viene progressi-

vamente 'arrotondato' dalla contrazione del corpo ciliare. Naturalmente, occorre sempre tenere conto del fatto che ciò che percepiamo dipende non solo dalla realtà fisica, ma anche dall'interpretazione da parte del nostro cervello.

1.2. I movimenti oculari

Le informazioni provenienti dal mondo esterno vengono elaborate in primo luogo dalla retina. Come detto nel precedente paragrafo, sulla sua superficie sono distribuite due categorie di fotorecettori, i coni e i bastoncelli. Tale distribuzione non è però uniforme, ma varia in funzione della distanza dalla fovea, ovvero dalla zona centrale dove si ha la maggior risoluzione spaziale; questo comporta che la visione nitida di un determinato oggetto è possibile solo se la sua immagine si forma sulla fovea e vi resta stabile. I movimenti oculari hanno quindi la funzione di spostare lo sguardo sull'obiettivo in modo da farlo cadere sulla fovea e di mantenerne stabile l'immagine sulla retina durante lo spostamento relativo fra l'osservatore e l'obiettivo stesso. Lo sguardo (*gaze* in inglese) corrisponde alla somma della posizione dell'occhio nella sua orbita e della testa nello spazio.

Si possono sostanzialmente distinguere quattro tipi i movimenti oculari (Duchowski 2007; Zambarbieri 2006): saccadi, inseguimenti lenti, fissazioni e nistagmi.

Le saccadi (*saccades*) sono movimenti oculari molto rapidi effettuati per focalizzare l'immagine sulla fovea. I movimenti possono essere eseguiti sia volontariamente, per portare lo sguardo su un determinato 'target', sia come correttivo optocinetico o vestibolare. La durata delle saccadi varia in genere tra i 10 e i 100 ms, periodo durante il quale l'occhio può essere considerato sostanzialmente 'cieco'.

Gli inseguimenti lenti (*smooth pursuits*) sono possibili solo quando l'occhio segue un target che si sposta. Rispetto alle saccadi, gli inseguimenti lenti sono caratterizzati da velocità molto inferiori, dipendenti dalla velocità del target.

Le fissazioni (*fixations*) sono movimenti oculari che stabilizzano l'oggetto di interesse sulla retina (e in particolare sulla fovea). Durante la fissazione l'occhio è quindi relativamente stabile, anche se non mancano piccoli movimenti più o meno casuali, che possono essere considerati piccoli disturbi da parte del sistema di controllo oculare. La durata delle fissazioni è in genere compresa tra i 100 e i 600 millisecondi.

I movimenti di nistagmo (*nystagmus*), infine, sono caratterizzati da un andamento temporale 'a dente di sega'; in sostanza, dei 'tremori', nella maggior parte dei casi involontari (e quindi di natura patologica), più raramente volontari.

I movimenti oculari possono anche essere suddivisi in movimenti di vergenza e di versione (Zambarbieri 2006). I primi sono movimenti di uguale ampiezza ma di direzione opposta, compiuti al fine di mantenere in posizione equivalente sulle retine l'immagine di un obiettivo che si sposta in profondità rispetto all'osservatore, avvicinandosi o allontanandosi. I movimenti di versione, invece, sono compiuti dagli occhi nella stessa direzione, ad esempio per seguire un oggetto che si sposta verso destra o verso sinistra.

2. *Eye-tracking*

Con il termine *eye-tracking* (o tracciamento oculare in italiano) si intende l'uso di opportune tecniche e strumenti per l'identificazione della direzione dello sguardo di un soggetto; in altre parole, *l'eye-tracking* permette di rilevare e registrare 'cosa si guarda', tipicamente, ma non necessariamente, su uno schermo.

Nel corso degli anni sono stati sviluppati diversi metodi per la misurazione dei movimenti oculari, dagli iniziali sistemi piuttosto scomodi e poco accurati, agli attuali dispositivi remoti, che non richiedono nessun contatto tra utente e macchina e garantiscono buone precisioni.

2.1. Tecniche di *eye-tracking*

Si possono sostanzialmente distinguere quattro categorie di tecniche per il tracciamento oculare che si sono sviluppate nel corso degli anni, e precisamente l'elettro-oculografia (EOG), le lenti a contatto *sclerali/search coil*, la foto-oculografia (POG) o video-oculografia (VOG) e la riflessione pupillare-corneale combinata (Duchowski 2007, pp. 52-57).

L'elettro-oculografia è un metodo utilizzato fin dagli anni '60 che si basa sulla misura delle differenze di potenziale elettrico rilevate sulla pelle. Quattro elettrodi posti appena sopra, sotto, a sinistra e a destra dell'occhio misurano le variazioni di tensione derivanti dal movimento del bulbo oculare. Pur non permettendo delle misurazioni di elevata precisione (ed essendo necessariamente relativa alla posizione della testa), questa tecnica è molto economica, ed è anche l'unica applicabile per lo studio dei movimenti oculari durante il sonno.

Il metodo basato su lenti a contatto sclerali e *search coil* è uno tra i più precisi, ma anche molto invasivo. Esso utilizza un oggetto di riferimento meccanico (oppure ottico) montato su una lente a contatto che copre sia la cornea che la sclera. Un 'peduncolo' attaccato alla lente è poi collegato ad un dispositivo mec-

canico od ottico, quale ad esempio una bobina che misura la variazione di un campo elettromagnetico. Come l'elettro-oculografia, questo metodo può solo misurare la posizione dell'occhio riferita alla testa.

La foto/video-oculografia raggruppa diverse tecniche che si basano sulla misurazione di caratteristiche distinguibili degli occhi durante movimenti di rotazione e traslazione, come ad esempio la forma della pupilla, il bordo che separa sclera e iride e i riflessi corneali causati da una o più sorgenti di luce (solitamente infrarossa). Le misurazioni, effettuate attraverso sequenze di scatti fotografici o riprese video, possono essere sia automatiche che manuali (queste ultime soprattutto in passato). Come i precedenti due metodi, anche questa tecnica studia il movimento oculare di per sé, riferito alla posizione della testa, che spesso deve quindi essere fissata per mezzo di un poggia-mento.

L'uso combinato dei riflessi corneale e pupillare ha il grosso vantaggio di permettere la stima della direzione dello sguardo in modo preciso, disambiguando movimento della testa e rotazione dell'occhio. Questo è ottenuto sfruttando come riferimenti i riflessi corneali generati da una o più sorgenti di luce, solitamente infrarossa (in modo da non essere percepita dall'utente), e il centro della pupilla. Come sarà illustrato nel Paragrafo 2.2., esistono sia dispositivi cosiddetti *table-mounted* (molto simili agli ordinari monitor LCD), sia apparecchi da indossare sulla testa (caschetti o, più recentemente, speciali occhiali). Una volta identificata la posizione della pupilla (ad esempio tramite la cosiddetta tecnica *bright pupil*, in cui l'individuazione è semplificata dall'illuminazione del fondo oculare da parte della sorgente di luce), la direzione dello sguardo è ottenuta analizzando i riflessi corneali (noti come riflessi o immagini di *Purkinje*). Durante una fase di calibrazione iniziale vengono ricercate le corrispondenze tra punti osservati dal soggetto (ad esempio su uno schermo) e la posizione dei riflessi sulla cornea, permettendo poi quindi la stima dello sguardo a partire da tali riflessi. Quando vengono considerati entrambi gli occhi, come avviene con la maggior parte degli odierni *eye-tracker*, si parla di sistemi binoculari.

2.2. Tipologie di *eye-tracker*

Con riferimento al mercato attuale, possiamo identificare tre tipologie principali di *eye-tracker*, e precisamente:

- Basati su monitor, o remoti. Sono quelli più diffusi, e si presentano tipicamente nella forma di un monitor LCD 17" o superiore. Poiché registrano la direzione dello sguardo dell'utente riferita allo schermo, sono adatti allo studio di interfacce utente (si veda il Paragrafo 4.1.) e al controllo diretto del computer in ambito assistivo (Paragrafo 4.2.).
- Misti: 'mondo reale' + monitor. A differenza dei precedenti, questi *eye-tracker* non dispongono di un proprio monitor, ma solo di emettitori led infrarossi e di una videocamera per la percezione del segnale oculare. Il loro vantaggio sta sia nel fatto che possono essere utilizzati con qualunque schermo (anche se richiedono una fase di calibrazione iniziale relativamente complessa) sia, soprattutto, nella possibilità di misurare la direzione dello sguardo durante l'osservazione di una 'scena' qualunque. Ad esempio, se il dispositivo è posto di fronte allo scaffale di un supermercato, è possibile rilevare quali aree attirano di più l'attenzione, potenzialmente suggerendo, quindi, in un'ottica di marketing, la disposizione ottimale dei prodotti.
- Indossabili. Questa categoria comprende tutti quei sistemi di tracciamento oculare che devono essere in qualche modo indossati dall'utente. Mentre in passato, prima dell'avvento dei dispositivi remoti, gli apparati da posizionare sulla testa dell'utente erano molto diffusi (e anche piuttosto invasivi, con procedure di calibrazione generalmente lunghe e complesse), i sistemi indossabili attuali si presentano perlopiù nella forma di 'cappellini' sulla cui visiera sono fissati gli emettitori a infrarossi e la videocamera per la ripresa. *Eye-tracker* di questo tipo permettono l'osservazione libera di scene del mondo reale e misurano i movimenti oculari con riferimento alla posizione della testa. Una variante recente dei sistemi indossabili è rappresentata da speciali occhiali, che per funzionalità sono paragonabili ai dispositivi da portare sulla testa ma hanno il vantaggio di una maggiore praticità e leggerezza.

2.3. Limiti dei sistemi di *eye-tracking* attuali

I moderni sistemi di tracciamento oculare, per quanto molto più sofisticati rispetto al passato, soffrono ancora di alcuni problemi. Come ben descritto da Böhme *et al.* (2006), gli aspetti che richiedono ulteriori progressi riguardano principalmente la robustezza, la precisione ed il prezzo.

Ad esempio, anche se raramente, i dispositivi che utilizzano l'illuminazione ad infrarossi hanno talvolta problemi con utenti che indossano occhiali, a causa dei riflessi delle lenti. Anche se l'utilizzo di due o più illuminatori, come avviene solitamente, riesce ad ovviare in maniera più che sufficiente al problema, un modello dell'occhio che tenga conto della presenza di lenti consentirebbe il raggiungimento di precisioni molto elevate in qualunque circostanza.

Un grosso problema pratico è inoltre rappresentato dal prezzo degli odierni sistemi di *eye-tracking* (generalmente superiore ai 20.000 Euro), dovuto da una parte al costo dei componenti (ad esempio videocamere ad alta risoluzione e lenti di elevata qualità), dall'altra, soprattutto, al mercato molto ristretto che questi dispositivi hanno avuto finora. Per quanto riguarda il primo aspetto, i progressi dei sensori hardware potrebbero risolvere a breve questo problema, fornendo risoluzioni ottimali a prezzi più competitivi. Quanto all'attuale mercato molto 'di nicchia' del settore *eye-tracking*, ci sono segnali chiari che la tecnologia del tracciamento oculare potrebbe tra qualche anno diventare, se non di uso comune, molto meno circoscritta di quanto lo sia ora. Lo dimostrano sia l'interesse da parte di grandi aziende del settore informatico, sia l'esistenza, già da qualche anno (seppur a livello prototipale), di computer laptop che incorporano funzionalità di controllo oculare (Eisemberg 2011).

2.4. Un esempio di *eye-tracker* remoto: il Tobii 1750

L'*eye-tracker* Tobii 1750 (Tobii 2004), uno tra i più diffusi a livello commerciale, si presenta come un normale monitor LCD 17'', nel quale sono integrati una videocamera ed emettitori NIR-LED (*Near Infra-Red Light-Emitting Diodes*) che generano luce nel campo del quasi-infrarosso (Figura 1a).

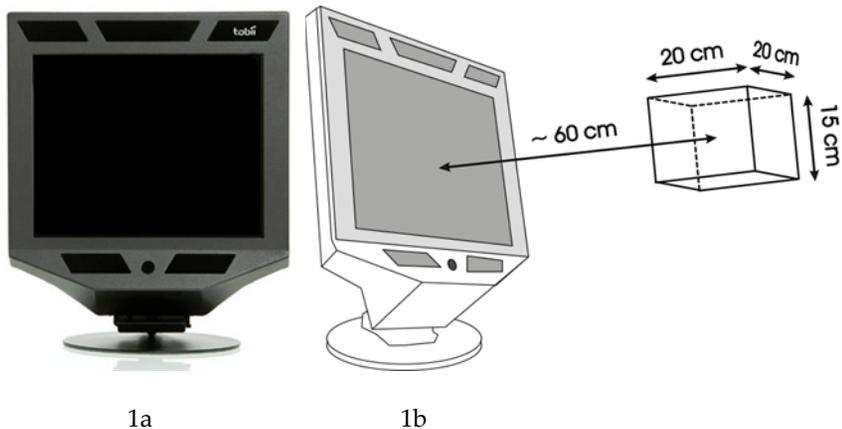


Figura 1. Eye-tracker Tobii 1750 (1a) e spazio di lavoro per il corretto funzionamento del dispositivo (1b)

Una videocamera posta alla base del monitor, dotata di sensore CCD, rileva i riflessi corneali con una frequenza di 50 Hz e con una accuratezza pari a circa 0.5°. Come mostrato in Figura 1b, per una corretta rilevazione della direzione dello sguardo è necessario che almeno un occhio si trovi nel campo visivo dello strumento (più o meno un parallelepipedo di dimensioni 20x15x20 cm ad una distanza della testa di circa 60 cm dal monitor), che è più che sufficiente perché l'utente possa interagire in modo naturale con gli stimoli mostrati sullo schermo, senza vincoli troppo stringenti.

Il dispositivo può essere utilizzato sia per la valutazione di interfacce di vario tipo, sia come strumento di input alternativo a tastiera e mouse (si vedano i Paragrafi 4.1. e 4.2.).

3. L'attenzione visiva

I movimenti oculari permettono di 'centrare lo sguardo' sull'oggetto di interesse. Poiché anche l'attenzione spesso si sposta sul punto osservato, il tracciamento oculare può essere considerato, entro certi limiti, un mezzo per seguire l'andamento dell'attenzione. A tal proposito sono state sviluppate diverse teorie, spesso contrastanti. Nel seguito se ne propone un brevissimo riassunto (Duchowski 2007, pp. 4-10), che cerca di evidenziare le caratteristiche essenziali di quelle principali.

Secondo Hermann Von Helmholtz gli occhi 'vagano' continuamente per osservare il più distintamente possibile le varie parti del campo visivo. L'attenzione può essere controllata in modo conscio e volontario, e si può focalizzare anche su oggetti periferici (tramite la cosiddetta *parafoveal visual attention*). I movimenti oculari riflettono quindi la volontà esplicita di analizzare i dettagli, secondo un meccanismo attentivo chiamato *overt*.

William James si concentra invece sugli aspetti attivi e volontari dell'attenzione (*foveal visual attention*), pur riconoscendone la natura talvolta passiva e involontaria. Anche se gli approcci di Von Helmholtz e James vengono spesso contrapposti, essi possono essere visti come complementari. Ad esempio, quando osserviamo un'immagine possiamo inizialmente percepire certi suoi particolari tramite la visione periferica (parafoveale), per poi concentrarci su di essi (visione foveale) e osservarne i dettagli.

Secondo James Jerome Gibson l'attenzione implica una 'preparazione in anticipo' alla reazione (il 'come' avverrà effettivamente la reazione dipenderà poi dall'osservatore). Donald Eric Broadbent suppone invece l'esistenza di un filtro selettivo, secondo cui l'attenzione permette di filtrare le informazioni visive (essendo il canale visivo limitato). Anthony e Diana Deutsch ipotizzano che tutte le informazioni visive vengano inizialmente analizzate senza filtri: saranno poi opportune 'strutture' ad attribuire importanze diverse all'informazione acquisita.

Alfred Luk'yanovich Yarbus è stato tra i primi ad analizzare nel dettaglio gli *scanpath* (ossia i percorsi oculari) ottenuti tramite tecniche di *eye-tracking*, attraverso esperimenti in cui diverse zone ('aree di interesse') di un'immagine venivano osservate in sequenza, notando un'alta variabilità tra gli osservatori.

Secondo Michael Posner l'attenzione si sposta come un 'riflettore' sulla scena (indipendentemente dai movimenti oculari). Anne Treisman suggerisce che l'attenzione sia il 'collante' che fa percepire gli 'elementi' di una determinata area come un tutt'uno (oggetti). Per Stephen Michael Kosslyn, una 'finestra dell'attenzione', la cui dimensione varia in modo incrementale, seleziona gli elementi all'interno della memoria visiva.

Il lavoro di Alfred Luk'yanovich Yarbus, in particolare, è stato molto significativo, tanto che lo studioso può essere considerato il padre degli studi sul tracciamento oculare (e il suo libro «Eye Movements and Vision», tradotto in lingua inglese nel 1967, una pietra miliare sull'argomento). Tra le altre cose, Yarbus ha verificato, in un famoso esperimento, che i movimenti oculari di diversi osservatori di un dipinto erano simili ma non identici, così come, ripetendo gli esperimenti a distanza di tempo con gli stessi soggetti, i movimenti erano molto simili, ma mai uguali. Era tuttavia evidente che la somiglianza tra i comportamenti oculari di un singolo osservatore era maggiore di quanto non lo fosse tra osserva-

tori diversi. Yarbus ha anche constatato il diverso comportamento dei soggetti nel caso di lunghe osservazioni, notando 'cicli di ispezione' ripetuti, in ciascuno dei quali l'occhio si ferma ed esamina gli elementi più importanti della scena (Tatler *et al.* 2010).

Di particolare interesse è anche la cosiddetta *Eye-Mind Hypothesis* (Just, Carpenter 1976; Just, Carpenter 1980), secondo la quale vi è una corrispondenza diretta tra lo sguardo dell'utente e il suo punto di attenzione. Come dimostrato da alcuni esperimenti, infatti, mentre è possibile spostare l'attenzione senza spostare lo sguardo, il contrario è decisamente più difficile (Poole, Ball 2006). L'*Eye-Mind Hypothesis*, grazie alla sua semplicità, è stata ampiamente sfruttata nella valutazione delle interfacce utente, ma anche in altri ambiti, come ad esempio negli studi sulla lettura.

Da non trascurare è poi la constatazione che il modello dei movimenti oculari è spesso una conseguenza di un processo di apprendimento a diversi livelli (Hayhoe 2007, pp. 641-648). Nello svolgimento di qualunque compito, infatti, gli osservatori devono apprendere quali oggetti nella scena sono rilevanti, nonché, a un livello più dettagliato, la loro posizione migliore per l'ottimale raggiungimento dell'obiettivo.

È infine interessante osservare come le varie ipotesi sull'attenzione visiva siano spesso collegate, direttamente o indirettamente, alla cosiddetta Teoria della Gestalt (Desolneux *et al.* 2007, pp. 11-25). In sostanza, la teoria afferma che 'il tutto è più della somma delle singole parti', e che ciò che percepiamo è dunque il risultato di un processo di composizione visiva basato su diversi principi, tra i quali la vicinanza, la somiglianza e la simmetria.

4. Principali applicazioni dell'*eye-tracking*

Il tracciamento oculare trova ampio spazio in diversi campi applicativi, i principali dei quali sono l'uso come strumento di 'misurazione e indagine' e l'utilizzo come interfaccia attiva per il controllo del computer tramite lo sguardo. Nel seguito vengono brevemente discussi gli elementi distintivi di ciascuna categoria, e si presentano alcuni esempi rappresentativi. Per una discussione sull'uso dell'*eye-tracking* per l'analisi della lettura (ambito di ricerca molto studiato e di grande rilevanza) si rimanda al Paragrafo 5.

4.1. Valutazione di interfacce e studi di usabilità

L'usabilità è un settore della *Human-Computer Interaction* (in italiano solitamente tradotta con interazione uomo-macchina), disciplina derivante dall'ergonomia che studia le modalità di interazione tra l'uomo e il computer e che si occupa dello sviluppo di metodologie per la valutazione e il miglioramento degli strumenti informatici.

Secondo la norma ISO 9241, l'usabilità è l'«efficacia, efficienza e soddisfazione con cui specifici utenti possono raggiungere determinati obiettivi in determinati contesti d'uso» (ISO 1998). In altre parole, l'usabilità indica quanto qualcosa (sia esso un dispositivo fisico, un software o altro) è facile da usare, permettendo un proficuo raggiungimento degli obiettivi. Nel caso particolare di un sito web, ad esempio, testare l'usabilità significa valutare se un sito sia stato progettato correttamente, garantendo facilità di accesso, navigazione e reperimento delle informazioni.

Nella valutazione delle interfacce utente la tecnica dell'*eye-tracking* viene utilizzata soprattutto per la sua capacità di fornire, rispetto ad altre metodologie, risultati potenzialmente più 'scientifici', oggettivi e quantificabili. La già citata *Eye-Mind Hypothesis* è alla base degli studi di questo tipo, in quanto suppone l'esistenza di una corrispondenza diretta fra la posizione dello sguardo dell'utente e il punto a cui è rivolta la sua attenzione. Così, ad esempio, la durata delle fissazioni può fornire indicazioni circa i tempi di elaborazione delle diverse componenti dell'interfaccia da parte del cervello. Attraverso la registrazione dei movimenti oculari possiamo quindi potenzialmente indagare i processi cognitivi degli utenti, e scoprire cosa essi trovino 'interessante', 'importante' o 'poco chiaro'.

Tuttavia, perché si possano trarre conclusioni valide sul comportamento oculare dell'utente, e quindi l'interfaccia possa essere valutata correttamente, è necessario che i parametri oculari siano valutati in modo adeguato. Per quanto riguarda le fissazioni, ad esempio, in uno studio di usabilità la loro durata può essere interpretata diversamente a seconda del contesto: una lunga fissazione potrebbe essere indice del fatto che l'elemento fissato è di difficile comprensione, oppure, al contrario, che ciò che viene fissato è particolarmente interessante. Per interpretare le fissazioni nel giusto modo bisogna quindi sempre tenere presente il compito che è stato assegnato al tester: se ad esempio l'obiettivo è l'esecuzione di un determinato comando attivabile da menù, e le 'voci' di tale menù vengono fissate molto a lungo senza però essere cliccate, probabilmente ciò significa che questo elemento d'interfaccia è mal progettato.

4.1.1. Metriche

Nel seguito vengono brevemente riportate le metriche tipiche utilizzate negli studi di usabilità basati su *eye-tracking* (riguardanti le fissazioni, i movimenti saccadici e lo *scanpath*), riferite all'intera pagina o, nella maggior parte dei casi, ad aree di interesse (AOI) specifiche al suo interno (Poole, Ball 2006).

Con riferimento alle fissazioni, possiamo identificare le seguenti metriche:

- Numero totale: il numero di fissazioni complessive rilevate (più sono, più l'utente si è soffermato sulla pagina).
- Numero per AOI: un maggior numero di fissazioni in una determinata area può indicare che questa esercita una maggiore attrattiva o è ritenuta più significativa dall'utente.
- Durata totale: la somma delle durate di tutte le fissazioni sulla pagina.
- Durata per AOI: la somma delle durate delle fissazioni in una determinata area (può indicare una scarsa comprensione dell'oggetto o una forza attrattiva di quest'ultima).
- Densità spaziale: più le fissazioni sono concentrate in una determinata area, più quell'area è stata l'oggetto dell'attenzione dell'utente.
- Tempo trascorso dall'inizio della visualizzazione della pagina fino alla prima fissazione su di un obiettivo: minore è questo tempo, più, in genere, l'obiettivo è identificabile facilmente.
- Percentuale di utenti che fissano una determinata area: se la percentuale è bassa, l'area attira poco l'attenzione.

Per quanto riguarda le saccadi, si possono considerare le seguenti metriche:

- Numero totale: un maggior numero di saccadi sta in genere ad indicare una 'ricerca' maggiore, e quindi maggiore difficoltà.
- Ampiezza: più le saccadi verso un target sono ampie (in termini spaziali), più è probabile che esso eserciti un potere attrattivo.
- Regressioni: molto utili nell'analisi della lettura, i salti all'indietro dello sguardo sono di solito indice di limitata comprensione del testo, che costringe il soggetto a tornare su ciò che ha già letto.

In relazione allo *scanpath*, cioè al percorso oculare, possiamo infine identificare:

- **Durata:** uno *scanpath* molto lungo indica generalmente un'esplorazione della pagina o una ricerca poco efficienti.
- **Lunghezza:** uno *scanpath* temporalmente molto lungo e complesso è un tipico sintomo di una ricerca poco efficace.
- **Regolarità:** percorsi oculari che deviano molto dalla norma possono indicare una difficoltà dell'utente, probabilmente dovuta alla struttura dell'interfaccia.
- **Direzione:** la direzione delle saccadi può essere utilizzata per rilevare la strategia di ricerca di un target da parte degli utenti.
- **Rapporto tra saccadi e fissazioni:** raffronta il tempo speso in ricerca a quello speso in elaborazione dell'informazione.

Va ribadito ancora una volta che l'interpretazione dei risultati dipende sempre dal particolare contesto. Ad esempio, se l'obiettivo dello studio è capire quanto un banner pubblicitario attiri l'attenzione, più fissazioni su di esso (e di maggiore durata) saranno generalmente un fatto positivo; viceversa, se lo scopo è indagare quanto sia facile o difficile trovare un determinato elemento in una pagina web, più fissazioni saranno un fatto negativo, in quanto probabile indice di maggiore difficoltà di comprensione del significato dell'oggetto della ricerca.

4.1.2. Software per la registrazione

Naturalmente, oltre al dispositivo hardware che rileva i riflessi corneali (ossia l'*eye-tracker*), è sempre necessario utilizzare un software che effettui le registrazioni dei movimenti oculari e ne permetta la successiva analisi. I due programmi più diffusi per il Tobii 1750 descritto nel Paragrafo 2.4., ad esempio, sono il ClearView (2006) e il Tobii Studio (2010). Entrambi i software permettono di impostare gli esperimenti e di analizzare e manipolare gli innumerevoli dati registrati dal sistema. Tra i diversi stimoli che possono essere utilizzati per effettuare un test i principali sono pagine web, *slideshow* (ossia sequenze di immagini) e filmati.

Prima di effettuare una registrazione con un utente occorre eseguire la calibrazione dello strumento: infatti, perché l'individuazione della direzione dello sguardo possa avvenire correttamente è necessario che l'algoritmo di rileva-

zione sia in grado di associare ad ogni 'posizione' degli occhi un determinato punto dello schermo. Essendo tale associazione dipendente da numerosi parametri, quali le caratteristiche fisiche della persona (ad esempio la distanza fra gli occhi e il loro grado di riflessione della luce infrarossa), la sua posizione di fronte allo schermo e le condizioni di luce ambientale, la calibrazione risulta sempre necessaria. Tale procedura, molto veloce, consiste in genere nel seguire con lo sguardo un cerchio che si sposta sullo schermo.

4.1.3. Visualizzazione e analisi dei dati

I dati raccolti in una sessione di *eye-tracking* possono essere analizzati e presentati secondo due approcci: tramite rappresentazioni grafiche o per mezzo di valori numerici.

Nel primo caso abbiamo tre tipi di rappresentazione principali, ognuno rispondente a specifiche finalità e in grado di mettere in evidenza diversi aspetti: *replay video*, *gazeplot* e *hotspot*.

Il *replay video* del tracciamento oculare permette di rivedere un'intera sessione di test, relativamente ad un determinato utente: in pratica, un video mostra le 'azioni' svolte dall'utente durante l'interazione con un'interfaccia, come ad esempio la navigazione di un sito web, visualizzando in sovrimpressione le fissazioni (cerchi con dimensioni proporzionali alla loro durata) e le saccadi (segmenti che collegano una fissazione alla successiva); è possibile quindi ricostruire cosa l'utente stesse osservando istante per istante.

Il *gazeplot*, detto anche *scanpath*, è una rappresentazione statica che mostra la sequenza di fissazioni e di saccadi (sempre indicate con cerchi e segmenti) che hanno caratterizzato l'esplorazione visiva di un'interfaccia da parte dell'utente (Figura 2a).



2a



2b

Figura 2. Esempi di gazeplot (a) e hotspot (b)

Nel caso di un sito web, ad esempio, è possibile ottenere un *gaze plot* per ciascuna pagina visitata, in modo da ricostruire in modo preciso l'attività oculare dell'utente.

Una visualizzazione *hotspot*, infine, detta anche *heatmap* (o mappa di calore in italiano), è una rappresentazione qualitativa che utilizza codici cromatici per evidenziare le aree di un'interfaccia che sono state più osservate (Figura 2b). Solitamente, il rosso indica le zone più 'calde', che hanno ricevuto più fissazioni e/o sono state guardate per più tempo; gradatamente si passa poi alle sfumature dell'arancio, del giallo e del verde, fino all'assenza di colore (ossia il grigio) che sta ad indicare assenza di fissazioni o intensità dell'osservazione inferiore ad una certa soglia.

Le rappresentazioni grafiche forniscono senz'altro un supporto molto utile all'analisi qualitativa dei risultati di sessioni di test di usabilità: i *replay video*, unitamente alle registrazioni dei cosiddetti 'protocolli verbali', in cui al tester viene chiesto di esprimere a voce alta le difficoltà che incontra nello svolgimento di un determinato compito, contestualizzano le descrizioni dei problemi e le azioni compiute con ciò che il soggetto stava guardando in un determinato istante; i *gazeplot*, per quanto concettualmente semplici, permettono una ricostruzione precisa dei percorsi oculari compiuti dal tester nell'interazione con l'interfaccia oggetto dell'analisi, seguendo l'ordine dei 'processi mentali' seguiti per il raggiungimento dell'obiettivo; gli *hotspot*, soprattutto quando relativi al comporta-

mento dei tester nella loro globalità, forniscono un feedback intuitivo ed efficace circa le aree dell'interfaccia maggiormente osservate.

Quando sono necessari risultati di rilevanza statistica, tuttavia, occorre fare riferimento ai valori numerici prodotti dalle registrazioni dell'*eye-tracker*, coinvolgendo un numero sufficientemente elevato di tester. L'*eye-tracker* Tobii 1750 descritto nel Paragrafo 2.4., ad esempio, acquisisce le coordinate dello sguardo dell'utente – processo detto di campionamento – cinquanta volte al secondo, insieme a dati accessori quali la dimensione della pupilla e la distanza della testa dalla videocamera. Le fissazioni vengono indirettamente ricavate come sequenze di almeno n campionamenti successivi le cui coordinate ricadono all'interno di un cerchio di raggio r . Nel caso del Tobii 1750 i valori tipici per gli studi di usabilità sono $n=5$ (quindi durata delle fissazioni di almeno 100 millisecondi) e $r=30$ pixel.

Come già illustrato nel Paragrafo 4.1.1., diverse sono le metriche che si possono prendere in considerazione, sulle quali si baserà poi l'analisi statistica (con calcolo di medie, varianze, analisi delle varianze, correlazioni, etc.). Le più utilizzate riguardano il numero delle fissazioni, la loro durata e la lunghezza dei percorsi oculari, ma anche la dimensione della pupilla è talvolta considerata, soprattutto quando si vogliono indagare gli stati 'emozionali' e 'cognitivi' dell'utente.

4.2. Interfacce per il controllo del computer tramite lo sguardo

Le interfacce percettive forniscono al computer capacità sensoriali tipicamente umane, come ad esempio la vista e l'udito. Le interfacce percettive basate su visione, in particolare, sfruttano una o più videocamere per permettere al computer di ottenere informazioni, sia esplicite che implicite, sull'utente e sull'ambiente che lo circonda (Porta 2002). La tecnologia dell'*eye-tracking* rientra in tale categoria, e trova importanti applicazioni soprattutto in ambito assistivo.

Poter controllare un computer attraverso lo sguardo è particolarmente utile nel caso di malattie che limitano fortemente e progressivamente le capacità motorie di una persona, come ad esempio la sclerosi laterale amiotrofica (SLA), la distrofia muscolare, la sclerosi multipla, l'atrofia muscolare spinale, le paralisi cerebrali, i danni al midollo spinale, etc. Per quanto l'effettiva efficacia del tracciamento oculare in questi casi sia subordinata all'accuratezza del dispositivo di rilevazione, è fondamentale che il software associato sia sufficientemente 'intelligente' da interpretare l'input oculare in maniera opportuna, facilitando le operazioni di controllo della macchina (Donegan *et al.* 2005, pp. 11-24). A titolo di

esempio, nel seguito si presentano brevemente due interfacce a controllo oculare sviluppate presso l'Università di Pavia, le quali utilizzano entrambe l'*eye-tracker* Tobii 1750 descritto nel Paragrafo 2.4.

4.2.1. *Eye-S*, un sistema di scrittura puramente oculare

Eye-S è un sistema a controllo oculare progettato principalmente per fornire input testuali al computer (Porta, Turina 2008).

L'approccio tradizionale alla scrittura oculare utilizza tastiere virtuali visualizzate sullo schermo, nelle quali un tasto risulta premuto se osservato per un certo tempo (ad esempio mezzo secondo). Nonostante l'intuitività del loro utilizzo, le tastiere su schermo soffrono di un forte limite: per evitare che le fissazioni ricadano nei punti sbagliati, occorre che i tasti siano di grandi dimensioni. Ciò significa che gran parte dello schermo – in genere almeno la metà – dovrà essere occupata dalla tastiera. Il vantaggio principale di *Eye-S* rispetto ad altri sistemi di input oculare è proprio il fatto di lasciare lo schermo sostanzialmente libero, non necessitando di un'interfaccia grafica.

Eye-S utilizza un approccio basato su gesti oculari, in cui sequenze di fissazioni su nove aree quadrate permettono di 'disegnare' le lettere dell'alfabeto. Come mostrato in Figura 3a, queste aree, chiamate *hotspot*, sono poste ai quattro vertici dello schermo, al centro di ciascun lato e al centro. Va sottolineato che gli *hotspot*, visualizzati in semitrasparenza in Figura 3a, grazie alle loro posizioni intuitive e prevedibili, possono essere nascosti una volta che si è presa dimestichezza con la modalità di input, lasciando quindi lo schermo completamente libero.

Una sequenza oculare (*Eye Sequence*, da cui il nome *Eye-S* deriva) è una successione di fissazioni sugli *hotspot*. Quando l'utente guarda un *hotspot* per più di un certo tempo (ad esempio 400 millisecondi), parte il processo di riconoscimento di una potenziale sequenza oculare: se, dopo quello iniziale, altri *hotspot* sono fissati entro un certo *timeout*, e se la successione di tali *hotspot* corrisponde a una delle sequenze associate a una lettera dell'alfabeto, tale lettera viene accettata come input. Le sequenze delle varie lettere, così come quelle dei segni di punteggiatura o di comandi generici da fornire al computer, sono memorizzate in un file di configurazione. Anche se tali sequenze possono essere del tutto arbitrarie, per una maggiore intuitività dell'input testuale è meglio che ricordino la forma delle lettere (la Figura 3b mostra ad esempio le sequenze tipiche per i caratteri 'a' e 'b'). Opportuni feedback visivi (numeri progres-

sivi che appaiono all'interno degli *hotspot*) aiutano l'utente a tenere costantemente traccia dello stato corrente nel processo di composizione della lettera.

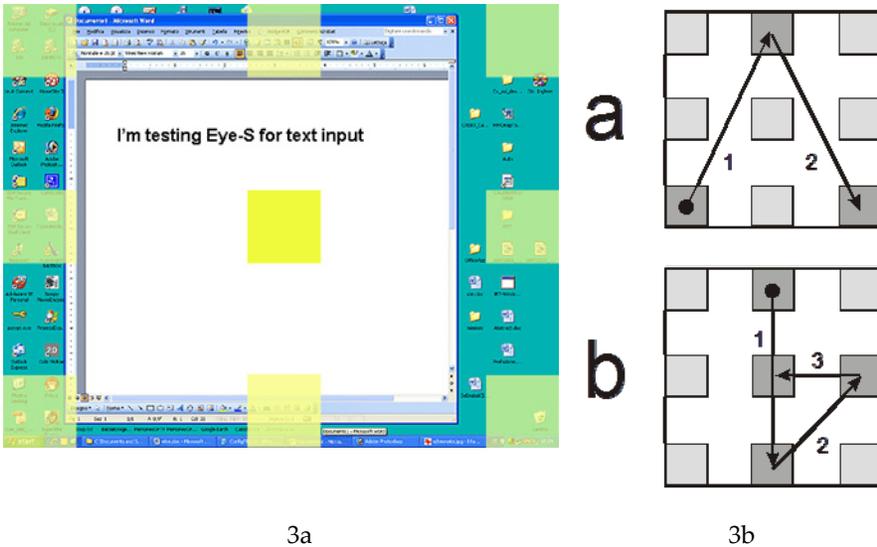


Figura 3. Eye-S: visualizzazione dei nove *hotspot* (a) ed esempi di sequenze oculari (b)

4.2.2. WeyeB, un browser web a controllo oculare

WeyeB (da *Web eye Browser*) è un sistema a controllo oculare che permette di svolgere le due attività fondamentali necessarie per la navigazione sul Web, vale a dire lo scrolling della pagina e la selezione dei link (Porta, Ravelli 2009).

In *WeyeB*, lo scrolling può essere attivato semplicemente guardando per un certo tempo (ad esempio due secondi) uno dei due bottoni posti nella parte superiore e inferiore dell'interfaccia. Quando ciò si verifica, un rettangolo semitrasparente viene mostrato in sovrapposizione, come mostrato in Figura 4a. Guardando all'interno di tale rettangolo, il contenuto della pagina può essere fatto scorrere in su o in giù con una velocità proporzionale alla distanza verticale del punto di fissazione dalla zona centrale (quindi con una velocità pressoché nulla quando lo sguardo è al centro e progressivamente maggiore man mano che si sposta verso la parte superiore o inferiore).



Figura 4. *WeyeB*: rettangolo di scrolling (a) e menu pop-up con l'elenco dei link riconosciuti (b)

Il rettangolo di scrolling può essere poi nascosto semplicemente guardando all'esterno di esso per un certo tempo (ad esempio due secondi). Questa semplice soluzione permette all'utente un controllo completo della pagina: da una parte lo scorrimento non può avvenire accidentalmente, dal momento che il rettangolo di scrolling deve essere visualizzato esplicitamente, e dall'altra il rettangolo stesso fornisce un efficace feedback visivo.

La selezione di un link in *WeyeB* avviene tramite l'esecuzione di un gesto oculare. In pratica, l'utente deve fissare il link per un certo tempo (ad esempio un secondo) e successivamente spostare rapidamente lo sguardo prima verso l'alto, e poi verso il basso, di nuovo, all'incirca, sul link. Questa modalità di selezione, a differenza di altri approcci, non interferisce con le normali attività di lettura. Il rilevamento di un gesto di selezione fa sì che il sistema acquisisca uno *snapshot* della zona intorno al link (ossia 'catturi' un'area rettangolare centrata sul punto di fissazione iniziale). La regione acquisita (che ha una dimensione fissa, ad esempio di 200x100 pixel) è memorizzata in forma di immagine bitmap. Tale immagine è poi esaminata usando tecniche OCR (*Optical Character Recognition*) per estrarre il suo contenuto testuale e identificare possibili link testuali al suo interno, tramite l'analisi del codice sorgente HTML della pagina. Si possono quindi verificare tre casi: (1) se lo *snapshot* contiene un solo link, viene caricata la pagina ad esso corrispondente; (2) se lo *snapshot* contiene più di un link, viene mostrato un menù pop-up che presenta tutti i link riconosciuti nell'area (Figura 4b), facilmente selezionabili con lo sguardo grazie alle ampie dimensioni del menù stesso; (3) se lo *snapshot* non contiene link testuali (ad esempio perché il link è costituito da un'immagine o da un altro elemento

multimediale), il cursore del mouse è semplicemente spostato nel punto di fissazione iniziale e viene virtualmente generato un click. A differenza di altre tecniche di selezione oculare dei link, l'approccio appena descritto ha il vantaggio di richiedere un gesto oculare intenzionale, senza il rischio di selezioni accidentali.

5. *Eye-tracking* e linguaggio

5.1. *Eye-tracking*: processing e competenza linguistica

Lo tecnica dell'*eye-tracking* è usata da circa trent'anni per indagare come la competenza linguistica dei parlanti viene utilizzata in tempo reale per comprendere le frasi. Dal modo in cui il soggetto di un esperimento legge una frase o guarda un'immagine mentre ascolta una frase, i ricercatori cercano di desumere come e quanto quel lettore sa una lingua, cioè cercano di risalire alla natura delle istruzioni mentali che riceve dalla sua Facoltà di Linguaggio (FL) o dal suo sistema cognitivo (se non si crede che esista una FL). La domanda principale della ricerca è verificare se esiste un legame tra schemi di lettura e grado di competenza linguistica (Paragrafo 5.5.). L'ipotesi di base è che il lettore competente (nella sua lingua madre o nella seconda lingua) legge in maniera diversa rispetto al lettore non competente. L'*eye-tracking* – come altre tecniche psicolinguistiche comportamentali – permette di fare inferenze sulla competenza linguistica solo indirettamente, cioè mediante l'analisi del processing. L'analisi combinata dei movimenti delle pupille, quella dei tempi di reazione e dei giudizi di accettabilità (se richiesti) apre una finestra sul modo in cui la lingua viene processata. Il processing del linguaggio è l'insieme dei meccanismi che permettono ai parlanti di isolare, classificare e infine raggruppare le parole a mano a mano che vengono lette/ascoltate allo scopo di interpretare la frase. Competenza linguistica e processing sono oggetti di studio differenti perché la capacità di processare un dato fenomeno linguistico (per esempio, l'inversione dell'ausiliare per fare le domande in inglese) non dipende solamente dalla presenza o meno dell'informazione linguistica completa e dettagliata relativa a quel fenomeno nella mente del parlante. Esistono infatti strategie di comprensione e di produzione del linguaggio che minimizzano il ricorso all'informazione sintattica e grammaticale e massimizzano invece l'utilizzo di euristiche probabilistiche e di procedure inferenziali (Rastelli 2013, Capitolo 1). Poiché algoritmi linguistici ed euristiche di natura non linguistica interagiscono anche nei normali processi di lettura e comprensione del testo scritto, la tecnica dell'*eye-tracking* non può essere utilizzata per isolare la competenza linguistica in astratto – cioè per indivi-

duarne genesi, sviluppo, architettura e sostrati neurali – ma solo per studiarla «in azione», nella sua interazione con un ben più vasto e complesso «sistema della performance» (Garrett 2007). In questo sistema della performance, la competenza linguistica dei parlanti è solo uno dei fattori in gioco.

Per riassumere: i dati di *eye-tracking* forniscono sia un accesso diretto al processing sia alcuni indizi che possono essere utili per ricostruire indirettamente la natura della competenza linguistica soggiacente. L'analisi dei *gazeplot* e degli *hotspot* (Paragrafo 4.1.3.) ci dice quali sono le parole (o le parti di immagini) che i parlanti guardano prima e di più, quelle sulle quali si soffermano e ritornano, quelle che invece saltano e non leggono/guardano per intero oppure che non guardano mai. Il problema è quello di ricostruire per induzione la competenza linguistica dei parlanti a partire da questi fenomeni. Negli ultimi trent'anni i ricercatori hanno cercato di collegare gli schemi di lettura a un modello dinamico e coerente di processing del linguaggio. Però non è sempre facile trovare una spiegazione convincente e puramente linguistica di fatti fisiologici che hanno anche una forte componente cognitiva e involontaria come i movimenti oculari. Fattori cognitivi non specificamente linguistici (attenzione, memoria, interesse e salienza) condizionano infatti fortemente gli schemi di lettura. Ad esempio, i ricercatori si sono sempre domandati perché i lettori ci mettono più tempo a leggere le frasi (o le parti di frasi) difficili che le frasi facili. Il tempo che il lettore medio spende su una parola o su una AOI (*Area Of Interest*) può essere un sintomo di difficoltà linguistica oppure può essere influenzato – per esempio – anche dall'interesse per il tema e dal coinvolgimento emotivo. È possibile individuare con certezza quali sono le cause di un rallentamento o di un arresto della lettura e distinguere le cause linguistiche da quelle non linguistiche? Inoltre non è chiaro se i lettori si fermano sempre quando incontrano una difficoltà di natura linguistica oppure se tendono a proseguire nella lettura lasciando temporaneamente irrisolti i punti difficili per riprenderli in seguito (Paragrafo 5.4.). Nel secondo caso l'effetto di una strategia cognitiva sul processing (rimandare l'analisi dei punti oscuri) potrebbe eclissare i dati puramente linguistici perché non è solo la competenza linguistica del lettore o la qualità di ciò che viene letto a dettare l'avanzamento o la regressione delle saccadi e la durata delle fissazioni. Il collegamento tra competenza e schemi di lettura è complicato anche dalla possibilità che i lettori non processino solo le parole che stanno fissando in un determinato momento, ma piuttosto ripensino anche a quello che hanno già letto mentre il loro sguardo automaticamente 'fotografa' nuovo materiale. In questo caso l'andamento dello sguardo ha una forte componente meccanica (movimento da sinistra verso destra) che non è influenzata in maniera diretta dalle caratteristiche linguistiche del materiale che viene fissato e processato volta per volta. Non è chiaro infine se i lettori

possono estrarre informazioni linguistiche solo dalle parole che cadono all'interno dell'area foveale o anche dalle parole situate alla periferia del campo visivo (area parafoveale). In questo caso la forma grafica del testo (lunghezza delle righe, numero di a capo, grandezza dei caratteri) è un fattore determinante per la comprensione tanto quanto il contenuto e la forma delle singole parole.

Per concludere: tutti i dati ottenuti con lo studio dei tracciati oculari hanno significato soltanto all'interno di un modello che spiega quali sono le reazioni fisiologiche tipiche del lettore che comprende (o non comprende) quello che sta leggendo. I dati ottenuti con l'*eye-tracking* devono essere collegati a un modello di lettura, cioè a ipotesi su quello che il lettore medio e il lettore 'speciale' fanno quando leggono o ascoltano un testo (Paragrafo 5.4., Paragrafo 5.5.). Questi modelli informano direttamente le teorie del processing e possono anche essere indirettamente rilevanti per le teorie del linguaggio. Mentre da un lato i dati di *eye-tracking* incrementano direttamente la nostra conoscenza degli algoritmi di comprensione dei testi, il loro utilizzo per validare una o l'altra teoria del linguaggio deve essere però mediato da considerazioni più generali sulla natura del processo di lettura all'interno del sistema della performance. Leggere un testo è un'operazione che chiama in causa anche risorse neurali, meccanismi cognitivi e automatismi fisiologici condivisi, cioè non specifici del linguaggio. L'interpretazione dei dati dei tracciati oculari nella ricerca sul linguaggio deve quindi procedere per sottrazione. Possono essere attribuiti direttamente alla competenza linguistica dei lettori solo due tipi di fenomeni: (a) quelli che rimangono costanti attraverso molte manipolazioni sperimentali e (b) quelli che non possono essere attribuiti solo a cause fisiologiche dovute alla meccanica della visione o a cause cognitive general-domain che sono peculiari del processo di lettura.

5.2. Paradigmi applicativi

Prima di soffermarci sul modo in cui dati dell'*eye-tracking* vengono interpretati, descriviamo i suoi due principali paradigmi applicativi. L'*eye-tracking* è usato per studiare come i soggetti leggono i testi scritti (*reading paradigm*) e per studiare come guardano un'immagine relativa a una frase che viene ascoltata in quel momento (*visual world paradigm*). Il *reading paradigm* è utilizzato dall'inizio degli anni Ottanta per analizzare cosa succede quando il lettore incontra nella frase anomalie o errori di vario tipo. I movimenti oculari (fissazioni, regressioni, saccadi, Paragrafo 1.2.) in questo sono una funzione della sensibilità dei parlanti al rispetto delle regole morfosintattiche, alla congruenza semantica e alle condizioni di appropriatezza pragmatica delle parole della frase. Il *visual world paradigm* invece è utilizzato all'incirca dalla metà degli anni Novanta per

analizzare come i movimenti oculari si dirigono verso gli oggetti che vengono nominati nella frase ascoltata: i movimenti possono infatti anticipare oppure seguire le parole che si riferiscono a quegli oggetti. In questo caso i movimenti oculari sono una funzione della presenza o meno di aspettative e di ipotesi che possono essere generate dalla competenza linguistica (sintattica, lessicale e pragmatico-discorsiva) dei parlanti o possono essere condizionate dal contesto (Tanenhaus 2007a; Tanenhaus 2007b).

Molti di coloro che utilizzano il *reading paradigm* considerano le *early measures* o 'misure immediate' (i tempi relativi alla prima fissazione e/o al primo passaggio su una parola o su una AOI) come indice della sensibilità dei lettori alla frequenza delle parole nell'input e alla presenza di grosse anomalie sintattiche nella frase. Per frequenza delle parole si intende sia la frequenza assoluta (rispetto a un corpus di riferimento) sia la frequenza relativa, cioè probabilità che una parola sia seguita o preceduta da un'altra parola (in questo caso si parla di 'probabilità transizionali'). Se l'informazione su una parola n è disponibile ed è stata processata, allora le statistiche relative alla probabilità di transizione da n alla parola che la precede ($n-1$) e alla parola che la segue ($n+1$) sono rilevanti per lo sguardo e per la programmazione della saccade. Ciò implica in particolare che anche l'anticipazione parafoveale (*parafoveal preview*, Paragrafo 5.3., Paragrafo 5.5.) ha accesso e fa uso di queste statistiche (Shillcock 2007). Per esempio, dopo l'articolo 'the', la durata della fissazione è più breve se la parola che segue è un nome piuttosto che un aggettivo, questo perché la sequenza articolo + nome nell'input è molto più frequente della sequenza articolo + aggettivo (Clifton *et al.* 2007, p. 365). È stato calcolato che l'effetto della frequenza assoluta delle parole vale da 20 a 60 millisecondi, mentre l'effetto della predicibilità vale da 20 a 30 millisecondi (Rayner, Simon 2004). Per grosse violazioni sintattiche si intende violazioni categoriali, cioè gli accostamenti illeciti di parole appartenenti a categorie grammaticali che non possono essere immediatamente adiacenti. Le frasi (1), (2) e (3) riassumono quanto detto finora sul *reading paradigm*. La lettura da parte di un parlante nativo di medie capacità potrebbe subire un rallentamento o un arresto immediato (cioè non differito alla fine della lettura) più o meno all'altezza della regione sottolineata:

1. Nel tuo sms c'è un poliptoto temporale che mi preoccupa (effetto bassa frequenza assoluta).
2. Consumare a pranzo troppi libri in scatola è pericoloso per la salute (effetto incongruenza e bassa probabilità transizionale).
3. Ho letto il per mentre camminavo (violazione sintattico-categoriale).

Secondo alcuni studiosi, il primo passaggio su una regione dà indicazioni sia sulla facilità/difficoltà dell'accesso lessicale (riconoscimento delle singole parole) sia sulla facilità/difficoltà del processing sintattico, cioè di come l'informazione grammaticale contenuta in una parola viene integrata con quella delle altre parole presenti nella frase. Riconoscimento lessicale-semantico e integrazione sintattica sono in realtà operazioni linguistiche differenti. Il modo in cui una parola è riconosciuta è diverso dal modo in cui è integrata nel suo intorno sintattico. Per questo altri studiosi preferiscono usare le misure relative alla prima fissazione esclusivamente per investigare il processo di identificazione della parola, della sua forma e del suo significato. Fattori lessicali intrinseci hanno probabilmente un effetto più immediato sulla lettura rispetto ai fattori sintattici perché il lettore ha diversi modi alternativi per integrare un'anomalia sintattica (si veda Paragrafo 5.5.). Invece il mancato riconoscimento di una singola parola porta conseguenze difficilmente rimediabili e quindi più immediate (Clifton *et al.* 2007, p. 366). Inoltre è stato riscontrato che il disturbo della lettura in seguito ad anomalia sintattica potrebbe non verificarsi subito e proprio sulla parola critica, ma una o due parole dopo che l'anomalia è stata riscontrata (Rayner, Simon 2004, p. 87). Per quanto riguarda l'effetto lessicale relativo alla frequenza delle parole, va detto che l'effetto inversamente proporzionale tra ranking di frequenza di una parola e tempi di fissazione per riconoscimento si attenua se la stessa parola è ripetuta a stretto giro di frase. A partire già dal terzo incontro in un testo, i lettori guardano di meno anche le parole meno frequenti. In generale, tutte le parole predicibili (e non solo quelle conosciute) sono guardate di meno e sono più saltate delle parole meno predicibili (Clifton *et al.* 2007).

Le misure che registrano i passaggi successivi al primo (numero e durata delle fissazioni), il numero di regressioni, la lunghezza del cammino (*path length*) e il tempo totale di lettura (*total reading time*) sono dette *late measures* o 'misure differite'. Mentre le misure immediate rendono conto dell'analisi iniziale della frase da parte dei parlanti, sembra che le misure differite siano da collegare al processo di rianalisi generale della frase. Ricerche più recenti suggeriscono invece che i processi di rianalisi sintattica e semantica causino solamente regressioni sulla regione dell'anomalia e non influenzino i tempi totali di lettura (Clifton *et al.* 2007). Il processo di rianalisi si rende necessario quando i parlanti si rendono conto che la prima interpretazione di una frase non è quella corretta. Mentre gli effetti riportati dalle misure precoci si riferiscono alle parole o alle porzioni che vengono processate nel momento in cui vengono fissate, le misure differite possono registrare anche gli effetti sul processing delle parole che sono state precedentemente fissate, riconosciute e immagazzinate nella memoria di lavoro, ma

che a un certo punto vengono riconsiderate, integrate e reinterpretate in relazione al nuovo materiale (Pickering *et al.* 2004).

Nel *visual world paradigm* i movimenti oculari sono messi in stretta relazione temporale con le parole presenti in una frase che viene ascoltata dai soggetti che partecipano all'esperimento. In questo modo è possibile verificare se i soggetti identificano gli oggetti sullo schermo prima o dopo che la parola che li descrive è stata pronunciata. Per esempio, se sullo schermo compaiono l'immagine di un ragazzo, di una torta e di altre cose non commestibili mentre i soggetti ascoltano la frase 'il ragazzo mangerà la torta', è probabile che i ricercatori osserveranno saccadi dirette verso la torta non appena è stato pronunciato il verbo 'mangiare'. Questo effetto anticipatorio non si osserva se il verbo 'mangiare' viene sostituito da un altro verbo (per esempio 'comprare'). I movimenti anticipatori dell'occhio suggeriscono – per esempio – che i parlanti nativi di una lingua sono in grado di proiettare mentalmente alcune delle proprietà del quadro di sottocategorizzazione sintattica e della griglia semantica dei verbi. Come specificato nel Paragrafo 5.1., per potere fare inferenze sul processing e sulla competenza linguistica dei parlanti è necessario ipotizzare una relazione tra saccadi e comprensione. In genere c'è accordo sul fatto che i luoghi della fissazione di oggetti di una scena visiva forniscono indizi su come la frase viene interpretata in un istante preciso. L'interpretazione di una frase può cambiare diverse volte prima che il parlante abbia finito di ascoltarla. In ogni singolo momento, le rappresentazioni linguistiche che sono più attivate (i significati delle parole) interagiscono con le rappresentazioni visuali (le immagini). Dunque gli oggetti e le entità della scena che vengono fissate in un determinato momento riflettono l'interpretazione corrente della frase in corso di processazione. Questa ipotesi di relazione tra immagini di una scena e processing linguistico nel *visual world paradigm* viene chiamata *comprehension-based linking hypothesis* (Altmann 2004; Altmann, Kamide 1999; Altmann, Kamide 2007; Salverda *et al.* 2010; Huettig *et al.* 2011; Roberts 2012).

Diamo infine anche (molto brevemente) conto del tentativo di applicare l'*eye-tracking* allo studio della produzione del linguaggio. In alcuni di questi studi ai soggetti viene chiesto di descrivere delle scene in cui sono presenti diversi attanti (entità che partecipano a un evento) disposti in un certo ordine. Oltre alla diversa posizione sullo schermo, gli attanti hanno diversa salienza percettiva (forma, colore). I ricercatori cercano di vedere se la disposizione visuale degli attanti nella scena e la diversa salienza hanno dei riflessi sull'organizzazione linguistica del discorso, cioè se le entità fissate per prime e più a lungo vengono investite di ruoli linguisticamente prominenti (soggetto,

agente) I risultati riportati in Griffin, Bock (2000) e Bock *et al.* (2004) sono però ancora quasi totalmente congetturali.

5.3. I movimenti degli occhi durante la lettura

I movimenti degli occhi sulle parole di un testo scritto sono in parte determinati dalla forma e dal significato delle parole, in parte da fattori oculomotori. Gli impulsi provenienti dal muscolo costringitore e dal muscolo dilatatore dell'iride sono quelli che permettono l'oculomozione intrinseca o involontaria della parte del globo oculare deputata alla fissazione delle immagini (e quindi della forma grafica delle parole) sulla retina. Il movimento di questi muscoli è influenzato dalla luce, dal colore e dalla lontananza o vicinanza degli oggetti che vengono fissati. Probabilmente i movimenti involontari sono dunque influenzati anche da alcuni aspetti fisici e grafici del testo che viene letto. L'oculomozione intrinseca invece non è per nulla influenzata dagli aspetti linguistici del testo. La premessa irrinunciabile di ogni studio di *eye-tracking* sul linguaggio è una premessa di carattere fisiologico: il dove e il quando nei movimenti oculari vanno distinti accuratamente. La decisione su quando muovere gli occhi dipende dal processing linguistico, mentre la decisione sul dove muovere gli occhi (che viene evidenziata per esempio dalla misurazione della lunghezza e del 'luogo di atterraggio' della saccade) è determinata da fattori legati alla visione, tra i quali soprattutto l'identificazione dei confini della pagina, la forma del testo, la lunghezza della riga. Per riassumere: se la frequenza di una parola ha effetto sul quando, la lunghezza e la posizione di una parola in una riga di testo può condizionare invece il dove si muove lo sguardo dei lettori (Rayner, Liversedge 2004). Sembra che la maggior parte del tempo impiegato nella fissazione di una parola sia usato per il suo riconoscimento e la sua comprensione piuttosto che per la sua visualizzazione, cioè per la corretta identificazione dei confini e per il riconoscimento dei tratti grafici salienti delle lettere che compongono le parole. Dunque l'impatto sulle metriche di lettura dei movimenti involontari di aggiustamento sembra essere contenuto, anche se non è mai trascurabile, specialmente nel confronto tra scritture alfabetiche e scritture non alfabetiche.

Nell'analisi dei movimenti oculari durante la lettura di un testo scritto le fissazioni e le saccadi vengono messe in relazione con la facilità o difficoltà di processazione. Rispetto agli studi non linguistici, i ricercatori si preoccupano anche di misurare la relazione tra area foveale e confine di parola. Una singola fissazione su una parola dura in media dai 50-100 ms secondo alcuni studi (Staub, Rayner 2007) e di 200-250 ms secondo altri (Rayner, Sereno 1994). In media la

saccade copre 7-9 caratteri, ma può arrivare fino a 20. Nei lettori esperti, il 90% delle saccadi è in avanti (Staub, Rayner 2007). Nei lettori meno esperti (e negli apprendenti di seconde lingue) il numero delle regressioni aumenta e la lunghezza delle saccadi diminuisce. Ogni saccade ha un tempo di programmazione (periodo di latenza) piuttosto lungo, che può durare fino a circa 150 ms. È probabile che la programmazione della saccade inizi parallelamente alla decisione sul target del movimento, cioè è probabile che le decisioni su dove e quando muovere lo sguardo siano prese assieme (Rayner, Simon 2004). Nell'esecuzione delle saccadi, la metà delle volte le 'parole funzione' (articoli, preposizioni), le parole molto brevi e le parole molto predicibili sono saltate. Per esempio, l'articolo inglese 'the' è fissato all'incirca il 20% delle volte (Rayner, Sereno 1994). In particolare, le parole brevi sono facilmente identificate e processate durante la fissazione sulla parola che le precede (Staub, Rayner 2007). Esiste dunque una relazione sistematica tra *skipping* e tipo di parola. Parole di tre lettere o meno hanno più probabilità di essere saltate. Parole di sei lettere sono quasi sempre fissate e parole di otto lettere o più non sono quasi mai saltate.

La relazione tra area foveale e confine di parola è cruciale per gli studi di *eye-tracking* sul linguaggio. La regione foveale ha circa 2° di angolo visuale, che corrispondono a 3-4 caratteri a destra e a sinistra della fissazione (o sei-otto caratteri in tutto; Rayner, Sereno 1994). La regione parafoveale ha circa 5° di angolo visuale. Secondo alcuni studiosi non si può estrarre informazione linguisticamente rilevante da questa zona, ma solo indicazioni sulla forma del testo (Staub, Rayner 2007). Vedremo che questo punto è però dibattuto (Paragrafo 5.6.). Il *perceptual span* o 'area percettiva' è la regione in cui si possono identificare le parole. Questa regione corrisponde a circa 3-4 caratteri a sinistra e 7-8 caratteri a destra della fissazione. Il *perceptual span* è la porzione del testo da cui il lettore ottiene informazione durante una singola fissazione. Spesso il *perceptual span* coincide con la singola parola o addirittura con un'unica fissazione si identificano una o due parole. Il *perceptual span* nei lettori alfabetici ha un'asimmetria verso destra. Nelle teorie modulari sul processing (Rastelli 2013, Capitolo 1), il *perceptual span* viene fatto corrispondere al *processing window*, cioè a una delle unità di analisi incrementale in cui ogni frase viene spezzettata e che ricevono immediatamente un'interpretazione sintattica. Lo sguardo dei lettori di solito cade sulle parole in una posizione prestabilita. La posizione visuale ottimale (*optimal viewing position*, OVP) è tra l'inizio e la metà della parola. L'occhio destro e l'occhio sinistro iniziano il movimento utile alla fissazione nello stesso momento ma 'atterrano' a una distanza circa di 1,5 caratteri l'uno dall'altro. Durante la fissazione i due occhi si riavvicinano (Rayner,

Simon 2004, p. 76). Le disparità della fissazione infatti sono riequilibrate dall'attività di sincronizzazione del cervello. La fissazione leggermente a sinistra del centro della parola è causata dallo split verticale della fovea. Questo apparente squilibrio in realtà dà a ciascun emisfero cerebrale uguali chance di riconoscere la parola (dato che ogni occhio proietta nell'emisfero controlaterale e dato che esiste un indubbio vantaggio dell'emisfero sinistro per i compiti linguistici) (Shillcock 2007).

5.4. Possibili problemi interpretativi

Lo strumento dell'*eye-tracking*, rispetto alla fMRI, ha una migliore risoluzione temporale (si veda anche il prossimo paragrafo) ma non dà nessun tipo di informazione spaziale sulle fonti neurali del processing. Negli studi sperimentali sul linguaggio, i problemi di insufficiente risoluzione temporale rischiano di trasformarsi spesso in problemi di interpretazione dei dati. La tecnica dell'*eye-tracking* non è esente da questi problemi. Ad esempio, alcuni studi hanno evidenziato rallentamenti della lettura nelle regioni successive a quella dove erano attesi rispetto a una data manipolazione sperimentale (effetto *spillover*). Inoltre è noto che i lettori passano molto più tempo alla fine della frase perché a questo punto l'intera frase viene – per così dire – 'riavvolta' (*wrap-up effect*) e riconsiderata nella sua interezza. In genere negli esperimenti si evita di posizionare le AOI alla fine della frase e ci si aspetta che il lettore sperimenti dei disturbi nella lettura qualche parola dopo quella che contiene delle anomalie e degli errori.

5.5. Il modello di lettura E-Z

Abbiamo detto (Paragrafo 5.1.) che i dati dei tracciati oculari hanno senso solo se sono collegati a un modello di lettura. Negli ultimi due paragrafi presentiamo un modello di lettura e una serie di presupposti teorici che collegano le metriche di analisi a fatti relativi alla comprensione del linguaggio. Il 'Modello del Lettore E-Z' (E-Z Reader Model) è un modello di processing che parte dall'assunzione che i tentativi di comprensione del testo influenzano direttamente i movimenti oculari durante la lettura (Reichle *et al.* 1998; Reichle *et al.* 1999; Reichle, Rayner 2001; Reichle *et al.* 2003). Il motore che manda avanti la lettura da sinistra verso destra (nelle lingue come l'italiano) non è il tentativo di connettere le parole in unità sintattiche più grandi, ma il tentativo di identificare e riconoscere le singole parole. Quando una parola è identificata, il sistema cognitivo riceve un segna-

le di via libera e gli occhi programmano una saccade in avanti. I processi sintattici intervengono nel controllo dei movimenti oculari soltanto se qualcosa va storto, cioè solo se la parola che viene fissata non viene identificata o non può essere immediatamente integrata con le parole che la precedono. In quel caso il sistema cognitivo manda al sistema oculomotorio un segnale di arresto o di regressione. Dunque nel modello E-Z, l'identificazione delle parole è l'unico segnale che gli occhi si possono muovere in avanti.

Secondo questo modello, gli aspetti percepibili della pagina stampata sono proiettati dalla retina in un sistema di processing visuale che procede di parola in parola a seconda delle limitazioni dell'acuità visiva. Le informazioni spaziali (i confini di parola) sono utilizzate dal sistema oculomotorio per programmare il target delle saccadi. Invece le informazioni linguisticamente rilevanti sono passate al sistema di identificazione della parola. Il primo livello di questo sistema è costituito dal processing lessicale. Se il tentativo di identificazione lessicale ha successo, il sistema segnala al sistema oculomotorio che può programmare la saccade successiva. Anche l'attenzione viene quindi spostata alla parola successiva. Programmazione della saccade e spostamento dell'attenzione alla parola successiva – benché fenomeni connessi – non sono appaiati. Nel modello E-Z il costruito psicologico dell'attenzione non corrisponde alla capacità di 'orientamento spaziale' degli occhi sul testo scritto, ma ciò che permette il regolare svolgersi del processo di integrazione degli aspetti (*features*) che permettono il riconoscimento delle parole e la loro integrazione nel discorso. I movimenti oculari non dipendono quindi dallo spostamento in avanti (volontario) del focus attentivo, ma dal successo del tentativo di riconoscimento immediato delle parole. Secondo il modello del lettore E-Z, sia il movimento seriale degli occhi sulle parole che si susseguono in un testo sia il processo di riconoscimento immediato di alcuni aspetti delle parole sono processi meccanici che precedono lo *shift* attentivo (volontario) vero e proprio.

5.6. L'assunzione '*no eye-mind span*'

L'assunzione di base del modello E-Z è che la variabilità di regressioni, fissazioni e lunghezza delle saccadi è dovuto al processing linguistico durante la lettura. Quando il testo è difficile, il lettore fa fissazioni più lunghe, saccadi più brevi e più regressioni (Rayner, Sereno 1994, p. 59). La *no eye-mind span assumption* è un'assunzione ancora più basilare: c'è una corrispondenza diretta e immediata tra sguardo e processazione. Tutta la processazione di una parola deve essere terminata prima che gli occhi abbiano lasciato quella parola. L'assunzione è in

realtà duplice: (a) l'analisi linguistica è incrementale (il lettore processa una parola alla volta); (b) il lettore guarda solamente ciò cui sta pensando. La somma delle due assunzioni è la seguente: se un lettore sta guardando una parola, allora sta processando proprio quella parola. La durata della fissazione sarebbe dunque influenzata solo dalla parola fissata e non da quella prima o da quella dopo (Staub, Rayner 2007). In altre parole: nessun'informazione sul significato o sulla morfologia di una parola è ottenibile prima che una parola sia fissata direttamente. Il cosiddetto *preview effect* (effetto anticipazione) e lo *spillover effect* (effetto ritardato) non possono rendere meno affidabili le misure basate sul rapporto tra processing e sguardo.

La *no eye-mind assumption* è stata criticata perché alcuni studi hanno dimostrato che (a) il processing linguistico può includere aree non foveali; (b) il locus del processing può essere dissociato dal luogo della fissazione; (c) la posizione dell'occhio non è sempre sotto il controllo cognitivo (Irwin 2004). Non c'è una relazione netta tra tipo e presenza di violazione e rallentamento nell'area in cui c'è la violazione (Clifton *et al.* 2007). Sebbene la visione sia più acuta nell'area foveale, il processing non è limitato a quest'area. Il locus del processing cognitivo non coincide necessariamente con il locus della fissazione. Gli occhi infatti possono essere catturati da stimoli inattesi: ciò dimostra che la posizione degli occhi non è sotto stretto controllo cognitivo (attentivo), come ben sottolineato nel modello E-Z. Inoltre qualche volta l'attività di processazione continua anche quando gli occhi si sono già mossi su un altro target. Infine può darsi che la *no eye-mind assumption* non valga per alcuni aspetti del processing (per esempio, alcuni aspetti di integrazione semantica) perché questi aspetti richiedono più tempo di quanto l'occhio umano che legge un testo sia disposto ad aspettare. In questo caso l'occhio va avanti mentre la mente elabora, accumula informazioni e le integra con le informazioni già a disposizione (Pickering *et al.* 2004).

6. Conclusioni

Nel campo del sapere scientifico gli avanzamenti tecnologici – inizialmente ristretti a un certo numero di applicazioni – con il tempo estendono i loro benefici anche ad altre discipline. Negli ultimi anni alcune tecniche ingegneristiche e medicali – progettate inizialmente per altri scopi – hanno presentato alla ricerca sul linguaggio un nuovo tipo di dati. Questi dati fotografano l'attività cognitiva dei parlanti (e l'architettura delle sue componenti) così come viene elicitata durante lo svolgimento di compiti linguistici. I tracciati oculari rappresentano una finestra sul processing del linguaggio. L'analisi dei tracciati oculari permette di

formulare ipotesi indirette anche sulla competenza linguistica dei parlanti tramite una modellizzazione dei fenomeni relativi agli schemi di lettura. Lo scopo della ricerca linguistica che utilizza la tecnica dell'*eye-tracking* è quello di collegare le diverse misurazioni dell'attività oculomotoria agli algoritmi di comprensione del testo scritto e parlato. L'operazione non è semplice per la presenza determinante di fattori attentivi e fisiologici che non dipendono dalla natura linguistica del target visivo. Finora i risultati più convincenti della ricerca sono quelli che hanno individuato i correlati visivi del processo di identificazione delle singole parole. Più sfumati e meno concordi sono invece i risultati delle ricerche che riguardano i modi in cui l'informazione lessicale viene integrata con quella sintattica e discorsiva. Il fatto che la risoluzione temporale dei dati non sia sufficientemente alta ha finora impedito di identificare e distinguere i correlati visivi del processing semantico da quelli del processing sintattico. La ricerca sui tracciati oculari applicata allo studio del linguaggio attende un affinamento dei modelli e comincia in questi anni a sperimentare una possibile futura integrazione con tecniche elettrofisiologiche e metaboliche (ERP e fMRI).

Bibliografia

- Altmann G.T.M., Y. Kamide (1999), *Incremental interpretation at verbs: Restricting the domain of subsequent reference*, «Cognition», 73(3), pp. 247-264.
- Altmann G.T.M. (2004), *Language-mediated eye movements in the absence of a visual world: The 'blank screen paradigm'*, «Cognition», 93, pp. 79-87.
- Altmann G.T.M., Y. Kamide (2007), *The real-time mediation of visual attention by language and world knowledge: Linking anticipatory (and other) eye movements to linguistic processing*, «Journal of Memory and Language», 57(4), pp. 502-518.
- Böhme M., A. Meyer, T. Martinetz, E. Barth (2006), *Remote Eye-tracking: State of the Art and Directions for Future Development*, in *Proceedings of the 2nd Conference on Communication by Gaze Interaction (COGAIN)*, «Gazing into the Future», 4-5 settembre 2006, Torino, pp. 12-16.
- Bock J.K., D.E. Irwin, D.J. Davidson (2004), *Putting first things first*, in Henderson J.M., F. Ferreira (eds.), *The interface of language, vision, and action: Eye movements and the visual world*, New York, Psychology Press, pp. 249-278.
- ClearView (2006), *Tobii Eye-tracker ClearView analysis software, Tobii Technology AB*, [online], URL, <http://www.tobii.com/Global/Analysis/Downloads/User_Manuals_and_Guides/User%20manual_CV2.6.pdf?eps_language=en>, [ultimo accesso: 26/11/2012].

- Clifton C., A. Staub, K. Rayner (2007), *Eye movements in reading words and sentences*, in van Gompel R.P.G., M.H. Fisher, W.S. Murray, R.L. Hill (eds.), *Eye Movements: A window on mind and brain*, Amsterdam, Elsevier, pp. 342-371.
- Desolneux A., L. Moisan, J.M. Morel (2008), *From Gestalt Theory to Image Analysis: A Probabilistic Approach*, «Interdisciplinary Applied Mathematics Series», 34, New York, Springer.
- Donegan M., L. Oosthuizen, R. Bates, G. Daunys, J.P. Hansen, M. Joos, P. Majoranta, I. Signorile (2005), *User requirements report with observations of difficulties users are experiencing. Communication by Gaze Interaction (COGAIN)*, [online], URL: <<http://www.cogain.org/w/images/e/ef/COGAIN-D3.1.pdf>>, [ultimo accesso: 19/09/2013].
- Duchowski A.T. (2007²), *Eye-tracking Methodology - Theory and Practice*, London, Springer-Verlag.
- Eisenberg A. (2011), *Pointing With Your Eyes, to Give the Mouse a Break*, «The New York Times», March 27, 2011, p. BU3, [online], URL: <<http://www.nytimes.com/2011/03/27/business/27novel.html?r=0>>, [ultimo accesso: 19/09/2013].
- Encyclopedia Britannica (2012), *Human Eye*, [online], URL: <<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/1688997/human-eye>>, [ultimo accesso: 19/09/2013].
- Griffin M., J.K. Bock (2000), *What the eyes say about speaking*, «Psychological Science», 11, pp. 274-279.
- Gonzalez R.C., R.E. Woods (2008³), *Digital Image Processing*, Prentice Hall.
- Hayhoe M.M., J. Droll, N. Mennie (2007), *Learning Where to Look*, in van Gompel R.P.G., M.H. Fischer, W.S. Murray, R.L. Hill (eds.), *Eye Movements: A Window on Mind and Brain*, Oxford, Elsevier Ltd., pp. 641-659.
- Huettig F., J. Rommers, A.S. Meyer (2011), *Using the visual world paradigm to study language processing: A review and critical evaluation*, «Acta Psychologica», 137, pp. 151-171.
- Irwin D. (2004), *Fixation location and Fixation duration as indices of cognitive processing*, in Ferreira F., J. Henderson (eds.), *The interface of language, vision, and action*, New York, Psychology Press, pp. 105-134.
- ISO 9241-11 (1998), *Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs) - Part 11: Guidance on usability*.
- Just M.A., P.A. Carpenter (1976), *Eye Fixations and Cognitive Processes*, «Cognitive Psychology», 88, pp. 441-480.
- Just M.A., Carpenter P.A. (1980), *A theory of Reading. From Eye Fixation to Comprehension*, «Psychology Review», 87, pp. 329-354.

- Pickering S., B. McErlee, M. Traxler (2004), *Eye movement and semantic composition*, in Carreiras M., C. Clifton (eds.), *The on-line study of sentence comprehension: ERP, eye-tracking and beyond*, Hove, Psychology Press.
- Poole A., L.J. Ball (2006), *Eye-tracking in Human-Computer Interaction and Usability Research: Current Status and Future Prospects*, in Gahoui C. (ed.), *Encyclopedia of Human-Computer Interaction*, Hershey, Idea Group Reference, pp. 211-219.
- Porta M. (2002), *Vision-Based User Interfaces: Methods and Applications*, «International Journal of Human-Computer Studies», 57, pp. 27-73.
- Porta M., M. Turina (2008), *Eye-S: A Full-Screen Input Modality for Pure Eye-based Communication*, in *Proceedings of the 5th symposium on Eye-tracking Research & Applications (ETRA 2008)*, Savannah, GA, USA, March 26-28, 2008, pp. 27-34.
- Porta M., A. Ravelli (2009), *WeyeB, an Eye-Controlled Web Browser for Hands-Free Navigation*, in *Proceedings of the 2nd IEEE-IES International Conference on Human System Interaction (HSI 2009)*, Catania, Italy, May 21-23, 2009, pp. 210-215.
- Rastelli S. (2013), *Il Processing nella seconda lingua. Teorie, dati, didattica*, Roma, Carocci.
- Rayner K., S. Sereno (1994), *Eye Movements in reading*, in Gernsbacher M.A. (eds.), *Handbook of Psycholinguistics*, San Diego, San Diego Academic Press, pp. 57-82.
- Rayner K., S. Liversedge (2004), *Visual and linguistic processing during eye fixation in reading*, in Ferreira F., J. Henderson (eds.), *The interface of language, vision, and action*, New York, Psychology Press, pp. 59-104.
- Reichle E.D., A. Pollatsek, D.L. Fisher, K. Rayner (1998), *Toward a model of eye movement control in reading*, «Psychological Review», 105, pp. 125-157.
- Reichle E.D., K. Rayner, A. Pollatsek (1999), *Eye movement control in reading: Accounting for initial fixation locations and refixations within the E-Z Reader model*, «Vision Research», 39, pp. 4403-4411.
- Reichle E.D., K. Rayner (2001), *Cognitive processes and models of reading*, in Hung G., K. Ciuffreda (ed.), *Models of the visual system*, New York, Plenum Press.
- Reichle E.D., K. Rayner, A. Pollatsek (2003), *The E-Z Reader model of eye-movement control in reading: Comparisons to other models*, «Behavioral and Brain Sciences», 26, pp. 445-526.
- Roberts L. (2012), *Review article: Psycholinguistic techniques and resources in second language acquisition research*, «Second Language Research», 28(1), pp. 113-127.
- Salverda A.P., M. Brown, M.K. Tanenhaus (2010), *A goal-based perspective on eye movements in visual world studies*, «Acta Psychologica», 137(2), pp. 172-180, doi:10.1016/j.actpsy.2010.09.010.

- Shillcock R. (2007), *Eye movements and visual word recognition*, in Gaskell M.G. (ed.), *The Oxford Handbook of Psycholinguistics*, Oxford, Oxford University Press, pp. 89-105.
- Staub A., K. Rayner (2007), *Eye movements and on-line comprehension processes*, in Gaskell M.G. (ed.), *The Oxford Handbook of Psycholinguistics*, Oxford, Oxford University Press, pp. 327-342.
- Tanenhaus M.K. (2007a), *Eye movements and spoken language processing*, in van Gompel R.P.G., M.H. Fischer, W.S. Murray, R.L. Hill (eds.), *Eye movements: A window on mind and brain*, Oxford, Elsevier, pp. 443-469.
- Tanenhaus M.K. (2007b), *Spoken language comprehension: Insights from eye movements*, in Gaskell G. (ed.), *Oxford Handbook of Psycholinguistics*, Oxford, Oxford University Press, pp. 309-326.
- Tatler B.W., N.J. Wade, H. Kwan, J.M. Findlay, B.M. Velichkovsky (2010), *Yarbus, eye movements, and vision*, «i-Perception», 1, pp. 7-27.
- Tobii (2004), *Product description Tobii 50 Series*, Tobii Technology AB, [online], URL: <http://www.srlabs.it/risorse/Product_Description_Tobii_50_Series.pdf>, [ultimo accesso 25/09/2013].
- Tobii Studio (2010), *Tobii Studio 2.X*, Tobii Technology AB, [online], URL: <http://www.tobii.com/Global/Analysis/Downloads/User_Manuals_and_Guides/Tobii_Studio2.2_UserManual.pdf>, [ultimo accesso 25/09/2013].
- Yarbus A.L. (1967), *Eye Movements and Vision*, New York, Plenum Press.
- Zambarbieri D. (2006), *Movimenti oculari*, Bologna, Pàtron.

Autori

SILVIA BISCONTI è assegnista di ricerca presso l'Università del Michigan. Ha conseguito il dottorato di ricerca in "Imaging Molecolare ed Ultrastrutturale" presso l'Università dell'Aquila e una laurea in Psicologia dello Sviluppo e dell'Educazione presso l'Università di Padova. I suoi interessi di ricerca riguardano lo studio dei correlati neurali legati allo sviluppo tipico e atipico del linguaggio.

STEFANO F. CAPPÀ si è laureato in Medicina e specializzato in Neurologia presso l'Università degli Studi di Milano. Ha trascorso periodi di studio e di ricerca presso l'Università di Boston, il Massachusetts Institute of Technology, il Medical Research Council Cyclotron Unit dell'Hammersmith Hospital di Londra, e il Max Planck Institute for Cognitive Neuroscience di Leipzig. Dal novembre 1999 è professore ordinario di Neuroscienze Cognitive presso l'Università Vita-Salute San Raffaele di Milano, e Direttore dell'Unità di Neuroriabilitazione di San Raffaele Turro. Dal 2010 è Honorary Senior Research Associate all'University College, Londra. L'attività di ricerca del professor Cappà si svolge nel campo delle neuroscienze cognitive e riguarda in particolare le basi neurologiche del linguaggio, della memoria e del comportamento sociale. Ha pubblicato più di 300 lavori sulle principali riviste neurologiche e neuropsicologiche internazionali ed alcuni libri, tra cui recentemente, *Cognitive Neurology* presso la Oxford University Press.

ZAIRA CATTANEO ha conseguito il dottorato in Psicologia presso l'Università di Pavia nel 2006. Durante il dottorato e il post-dottorato ha trascorso diversi periodi di ricerca e formazione all'estero, in particolare presso l'Università di Utrecht (Olanda), l'Università di Rochester (USA), e presso la Harvard Medical School (USA). Dal 2008 è ricercatrice a tempo indeterminato presso il Dipartimento di Psicologia, Università di Milano-Bicocca, ed è membro del laboratorio "Brain Connectivity Center", IRCCS Mondino a Pavia. Zaira Cattaneo è attualmente coinvolta in una serie di progetti su temi diversi, riguardanti in particolare gli effetti della stimolazione magnetica transcranica (TMS) e della stimolazione transcranica a corrente diretta a bassa intensità (tDCS) su processi percettivi, attentivi e cognitivi.

JOSEPH T. DEVLIN è professore presso il dipartimento di “Cognitive, Perceptual and Brain Science”, University College of London (UCL). Nel 1998 finisce il suo dottorato in Computer Science (intelligenza artificiale) presso l’UCL e successivamente lavora come post-doc a Cambridge e Oxford, dove si specializza nell’uso della stimolazione magnetica transcranica (TMS). La sua attività di ricerca si svolge nel campo delle neuroscienze cognitive e riguarda in particolare l’elaborazione del linguaggio e la sua relazione con gli altri sistemi cognitivi, motori e sensoriali.

GIOVANNA EGIDI è una ricercatrice post-doc al “Centro Interdipartimentale Mente e Cervello” (CIMEC) dell’Università di Trento. Si è addottorata Ha conseguito un dottorato di ricerca in psicologia cognitiva presso la Stony Brook University. La sua ricerca recente è incentrata sulla comprensione del discorso, con particolare attenzione al contributo degli stati affettivi di chi comprende. Ha pubblicato in riviste internazionali come «Neuroimage», «Brain & Language», «Memory & Cognition», e «Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition».

TERESA FARRONI è ricercatrice e professore aggregato presso il Dipartimento di Psicologia dello Sviluppo e della Socializzazione, Università di Padova. I suoi principali interessi di ricerca sono l’elaborazione visiva dell’infante, che include l’orientamento visivo, l’attenzione e l’elaborazione dei volti. Ha acquisito avanzate competenze in un numero elevato di metodi per lo studio dello sviluppo fin dalla nascita, inclusi test comportamentali sulle abilità visuo-cognitive, *eye-tracking*, ERPs ad alta densità, e più recentemente le immagini ottiche. Attualmente sta coniugando con successo queste diverse metodologie per affrontare una questione centrale che stimola la sua attività di ricerca: le origini evolutive tipiche e atipiche del cervello sociale.

URI HASSON è professore associato al Dipartimento di Psicologia e Scienze Cognitive e del “Centro Interdipartimentale Mente e Cervello” (CIMEC) dell’Università di Trento. Ha conseguito un dottorato di ricerca in psicologia cognitiva alla Princeton University. La sua ricerca sul linguaggio si incentra su questioni che riguardano diversi livelli della comprensione del linguaggio. I suoi lavori sono pubblicati su riviste internazionali come «Cerebral Cortex», «Journal of Cognitive Neuroscience», «Neuron», e «Proceedings of the National Academy of Sciences».

CARLOTTA LEGA si è laureata in Psicologia presso l’Università di Milano-Bicocca nel 2012 ed è diplomata in Conservatorio (pianoforte). Attualmente, è dottoranda in Psicologia Sperimentale, Linguistica e Neuroscienze Cognitive

presso l'Università di Milano-Bicocca. Si sta specializzando nell'utilizzo di tecniche di stimolazione cerebrale, quali la TMS e la tDCS, che applica nel campo delle neuroscienze cognitive, con particolare riferimento al linguaggio e alla percezione visiva e musicale.

MARCO PORTA ha conseguito la laurea in Ingegneria Elettronica al Politecnico di Milano e il dottorato di ricerca in Ingegneria Elettronica e Informatica presso l'Università di Pavia, dove è attualmente ricercatore (presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione). I suoi interessi di ricerca riguardano i diversi aspetti dell'Interazione Uomo-Macchina (*Human-Computer Interaction*), e in particolare le interfacce percettive basate su visione, le applicazioni dell'*eye-tracking*, i linguaggi visuali, le tecnologie dell'e-learning e le interfacce multimediali in generale.

TOMASO VECCHI è professore ordinario di Psicologia Sperimentale presso il Department of Brain and Behavioral Sciences dell'Università di Pavia e membro del Brain Connectivity Center presso l'IRCCS Mondino. Gli interessi di ricerca sono rivolti alla comprensione dei meccanismi mentali e neurofisiologici alla base di processi cognitivi quali la percezione, l'elaborazione spaziale e la memoria.

MIRTA VERNICE si è laureata in psicologia presso l'Università di Pavia, ha conseguito il dottorato presso la stessa Università, in collaborazione con le Università di Gent e di Edimburgo, con una tesi sulla produzione del linguaggio negli adulti. Attualmente è assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Psicologia dell'Università Milano-Bicocca. La principale area d'indagine è la produzione sintattica in età evolutiva. Presso l'Università di Pavia è responsabile di seminari di statistica e di metodologia della ricerca psicologica.

FRANCESCO VESPIGNANI ha conseguito il dottorato di ricerca in Scienze Cognitive presso l'Università di Padova e dal 2006 è ricercatore in Psicobiologia e Psicologia Fisiologica presso il Dipartimento di Psicologia e Scienze Cognitive dell'Università di Trento. Il suo interesse di ricerca è principalmente indirizzato allo studio dei correlati elettroencefalografici dei processi cognitivi con particolare enfasi nello studio dell'elaborazione di aspetti sintattici e semantici durante la comprensione frasale. Insegna Psicologia del Linguaggio e della Comunicazione nel corso di laurea in Scienze e Tecniche di Psicologia Cognitiva presso l'Università di Trento. È membro della sezione sperimentale dell'AIP e dell'ESCAP. Ha pubblicato in numerose riviste internazionali fra le quali «Cognition», «Journal of Memory and Language», «Journal of Cognitive Neuroscience», «Psychophysiology» e ha partecipato all'organizzazione di vari eventi scientifici, fra i quali AMLaP 2012.

Experimental Approaches to the Study of Language: Acquisition, Use and Loss

Stefano Rastelli

Abstract

This volume puts together seven essays dealing with crucial areas of advanced experimental research on language acquisition, use and loss. The chapters of the volume are written by experts in the field of psycholinguistics and neurolinguistics. The authors describe five experimental techniques: event-related potentials, functional neuroimaging, transcranial magnetic stimulation, eye-tracking and behavioural procedures. Beside providing practitioners with a valuable up-to-date theoretical background, all contributors also aim at giving non-specialist researchers and phd students the basic notions and some crucial methodological guidelines for designing and running experiments with both behavioral and physiological data. The volume may thus be useful as either a reference book or an introductory coursebook for students.

STEFANO RASTELLI is Assistant Professor at the University of Pavia. His main areas of research interest are second language acquisition and second language processing of syntactic phenomena.

E-mail: stefano.rastelli@unipv.it