

Fábio Theoto Rocha

Sistema informatizado para avaliação de crianças com  
dificuldades de aprendizagem

Tese apresentada à Faculdade de  
Medicina da Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Doutor em Ciências

Área de concentração: Patologia  
Orientador: Prof. Dr. Eduardo Massad

São Paulo  
2009

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Preparada pela Biblioteca da  
Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo

©reprodução autorizada pelo autor

Rocha, Fábio Theoto

Sistema informatizado para avaliação de crianças com dificuldades de  
aprendizagem / Fábio Theoto Rocha. -- São Paulo, 2009.

Tese(doutorado)--Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo.

Departamento de Patologia.

Área de concentração: Patologia.

Orientador: Eduardo Massad.

Descritores: 1.Transtornos de aprendizagem 2.Dislexia 3.Eletroencefalografia  
4.Teoria de rede

USP/FM/SBD-047/09

## Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, o professor Eduardo Massad, pela sua confiança e apoio dado por toda minha vida acadêmica.

Agradeço aos meus pais pelo apoio dado por toda a minha vida e a minha mulher pelo carinho e companherismo.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) por ter apoiado o projeto Enscer (processo 04/00743-4), do qual foram utilizados os dados no presente trabalho.

Agradeço à professora Neli Regina Siqueira Ortega pela ajuda na escolha do conteúdo da tese, pela orientação estatística, pela discussão na qualificação e pelas inúmeras sugestões na confecção do presente trabalho.

Agradeço ao professor Marcelo Nascimento Burattini pela orientação na qualificação desse trabalho.

Agradeço ao professor Heráclito Barbosa de Carvalho pela orientação na qualificação desse trabalho.

## Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Modelos neurocientíficos acerca do funcionamento cerebral.....	2
1.1.1	Sistema Inteligente de Processamento Distribuído.....	3
1.1.2	Teoria de Grafos.....	5
1.1.3	Rede <i>Small-world</i> .....	6
1.1.4	Rede <i>Scale-free</i> .....	8
1.1.5	Rede <i>Broad-scale</i> .....	9
1.1.6	Sub-redes e rede complexa.....	9
1.2	Investigando a linguagem dentro de uma rede complexa.....	13
1.2.1	O desenvolvimento da linguagem oral.....	18
1.2.2	Conhecimento prévio para a linguagem.....	19
1.2.3	Palavras.....	20
1.2.4	Orações.....	25
1.2.5	O desenvolvimento da linguagem escrita.....	27
1.2.5.1	Leitura semântica.....	28
1.2.5.2	Leitura fonológica grafema-fonema.....	29
1.2.6	Dificuldades no aprendizado da leitura.....	31
1.2.6.1	Dislexia semântica.....	32
1.2.6.2	Dislexia fonológica grafema-fonema.....	34
1.2.6.3	Dislexia semântica e fonológica.....	35
1.3	Sistema executivo.....	37
1.3.1	Memória de trabalho.....	39
1.3.2	Memória de longo-prazo.....	40
1.3.3	Estruturas de recuperação.....	41
1.3.4	Localizacionismo cerebral.....	43
1.3.5	Controle executivo, memória de trabalho e leitura.....	44

1.4 Proposição do trabalho de tese.....	46
1.5 Identificação das dificuldades de leitura em escolas públicas do município de Mogi das Cruzes.....	48
2 Objetivos.....	51
3 Metodologia.....	52
3.1 Atividades de leitura.....	53
3.2 Os grupos de estudo.....	55
3.3 O mapeamento cerebral.....	56
3.4 Os Mapas Cognitivos Cerebrais.....	60
3.5 As estruturas de rede.....	61
4 Resultados.....	63
4.1 Desempenho nas atividades de leitura.....	63
4.2 Mapas Cognitivos Cerebrais.....	64
4.3 Estruturas de rede.....	66
4.3.1 Reconhecimento de palavras dos grupos NO1 e DL1.....	67
4.3.2 Leitura de palavras dos grupos NO1 e DL1.....	69
4.3.3 Leitura de frases dos grupos NO2 e DL2.....	70
5 Discussão.....	72
5.1 Reconhecimento e leitura de palavras.....	72
5.1.1 Os procedimentos envolvidos com a solução das atividades....	72
5.1.2 Organização cerebral do grupo NO1 em RP e LP.....	74
5.1.3 Organização cerebral do grupo DL1 em RP e LP.....	78

5.1.4 As diferenças entre os grupos NO1 e DL1 em RP e LP.....	80
5.2 Leitura de frases.....	82
5.2.1 Os procedimentos envolvidos com a solução das atividades....	82
5.2.2 Organização cerebral do grupo NO2 em LF.....	83
5.2.3 Organização cerebral do grupo DL2 em LF.....	88
5.2.4 As diferenças entre os grupos NO2 e DL2 em LF.....	89
6 Conclusões.....	90
7 Referências.....	92

## Lista de Figuras

Figura 1 – Modelos de redes.....	6
Figura 2 – Neurônio espelho da ação e linguagem.....	12
Figura 3 – Áreas cerebrais envolvidas com a linguagem.....	15
Figura 4 – Compreensão de um substantivo produzido oralmente.....	23
Figura 5 – Compreensão de um verbo produzido oralmente.....	25
Figura 6 – <i>Dual-route</i> .....	31
Figura 7 – Atividades de leitura.....	54
Figura 8 – O cálculo de entropia.....	59
Figura 9 – Mapeamento cerebral a partir da análise fatorial.....	60
Figura 10 – Mapas Cognitivos Cerebrais - Reconhecimento de Palavras....	65
Figura 11 – Mapas Cognitivos Cerebrais - Leitura de Palavras.....	65
Figura 12 – Mapas Cognitivos Cerebrais - Leitura de Frases.....	66

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Planilha com os valores de entropia.....	60
Tabela 2 – Análise Fatorial.....	60
Tabela 3 – Planilha de contagem.....	62
Tabela 4 – Estrutura de rede do grupo NO1 para RP .....	68
Tabela 5 – Estrutura de rede do grupo LD1 para RP .....	68
Tabela 6 – Estrutura de rede do grupo NO1 para LP .....	69
Tabela 7 – Estrutura de rede do grupo LD1 para LP .....	70
Tabela 8 – Estrutura de rede do grupo NO2 para LF .....	71
Tabela 9 – Estrutura de rede do grupo DL2 para LF .....	71



## Resumo

As dificuldades no aprendizado da leitura podem ter uma causa neurológica ocasionada por fatores genéticos ou ambientais. O presente trabalho integra modelos matemáticos e neurocientíficos acerca dos processos neurais responsáveis pela leitura para estudar a dinâmica cerebral de alunos com e sem dificuldades no aprendizado da leitura. Utiliza-se, nesse estudo, uma técnica de mapeamento cerebral que considera o cérebro como uma rede complexa, onde os neurônios de diversas áreas cerebrais podem se organizar em sub-redes permitindo a execução paralela de diversos processos neurais. Mostra-se que os agrupamentos das áreas cerebrais de ambos os grupos, obtidos através de análise fatorial, são condizentes com modelos correntes em neurociências que sugerem para a leitura duas possíveis vias neurais, além do envolvimento de componentes de controle atencional (funções executivas).

Descritores: Transtornos de aprendizagem; dislexia; eletroencefalografia; teoria de rede

## Summary

Reading learning difficulties can be caused by genetic or environmental factors. The present work integrates graph theory and models from neuroscience about the neurological processes involved in reading to study the cerebral dynamics of children with and without learning difficulties. The brain mapping technique used in the present study, considers the brain as a complex network where neurons from several areas can be organized on sub-networks allowing a parallel execution of several neural processes. It is shown that the brain area associations disclosed by factorial analysis, are congruent with the neuroscientific models that consider the existence of two possible neurological routes involved in reading besides the participation of the executive functions.

Descriptors: Learning disorders; dyslexia; electroencephalography; graph theory

## 1 - Introdução

A dificuldade de aprendizagem da leitura experimentada por crianças em idade escolar pode ter uma origem biológica, ou seja, as conexões neurais podem não se organizar adequadamente durante o desenvolvimento neurológico desde o feto até a idade atual da criança por causa de fatores tanto genéticos (Tallal, 1991; Alarcón e DeFries, 1997; Knopik et al., 1998; Francks et al., 2002; Pennington, 2004; Shaywitz e Shaywitz, 2005; McGrath et al., 2006; Ramus, 2006; Fisher e Francks, 2006; Gibson e Gruen, 2008) quanto ambientais, como desnutrição (Morgane et al., 1993; Gordon, 1998; Okado et al., 2001), nascimento pré-termo (Ishida et al., 1997), depressão materna (Gordon, 1998), estresse materno durante a gestação (Hayashi et al., 1998; Okado et al., 2001), uso de drogas pela gestante (Okado et al., 2001; Shaywitz e Shaywitz, 2005; Cone-Wesson, 2005), entre outros.

Distúrbios da organização cerebral, necessária para realização da leitura, foram investigados a partir de modelos neurocientíficos e matemáticos que propõem o funcionamento do cérebro como uma rede de conexões neurais paralelas. A partir desses modelos, desenvolveu-se um sistema de questionários e atividades pedagógicas informatizadas para caracterização das dificuldades da criança na escola, bem como uma técnica para mapeamento cerebral que permite estudar a dinâmica da rede neural associada à resolução dessas atividades.

Nessa introdução, apresentaremos criticamente alguns modelos acerca da organização neural, do processamento neurológico da linguagem e dos seus distúrbios de desenvolvimento, bem como dos processos de controle da atenção envolvidos com a habilidade de leitura. Essa introdução pretende embasar nossa discussão acerca dos resultados obtidos com o uso da

referida técnica de mapeamento cerebral durante a leitura de palavras e frases por crianças portadoras de dificuldades no aprendizado da leitura e por crianças normais.

## **1.1 – Modelos neurocientíficos acerca do funcionamento cerebral**

O neurologista francês Paul Broca foi o primeiro neuroanatomista a identificar uma área no cérebro responsável por uma determinada habilidade cognitiva do homem. Fazendo a autópsia, na segunda metade do século XIX, de um paciente que havia perdido a habilidade de produzir a linguagem oral, Broca encontrou uma lesão na área frontal inferior esquerda, ou terceiro giro frontal esquerdo. Assim, essa área passou a se chamar área de Broca e é até hoje associada ao controle motor da fala. A partir dessa descoberta, neurocientistas passaram a tentar mapear no cérebro todas as áreas envolvidas com cada habilidade cognitiva. Surgiu assim o localizacionismo. Dentro do pensamento localizacionista, cada área do cérebro seria responsável pela execução de determinada tarefa ou geração de determinado comportamento por delimitar em si todos os processamentos neurais necessários para a execução dessa tarefa ou geração desse comportamento.

Em contraposição ao localizacionismo modelos matemáticos começaram a ser utilizados para se tentar entender a conectividade existente tanto entre os neurônios das áreas cerebrais associadas a alguma função cognitiva quanto entre essas diversas áreas. Abordaremos primeiramente um modelo envolvendo a teoria de Sistema Inteligente de Processamento Distribuído (Rocha, 1992; Rocha, 1997; Rocha et al., 2005) e em seguida um modelo envolvendo a Teoria de Grafos (Iturria et al., 2008; Van den Heuvel et al., 2008).

### 1.1.1 Sistema Inteligente de Processamento Distribuído

A teoria de Sistema Inteligente de Processamento Distribuído (**DIPS**) foi desenvolvida primeiramente no campo da Inteligência Artificial com o intuito de se formalizar sistemas compostos por múltiplos agentes, onde cada agente se especializaria no processamento de um determinado tipo de informação e poderia participar de diversas associações diferentes com outros agentes para a solução de tarefas complexas (Chandrasekaran, 1981; Davis e Smith, 1983; Hewitt e Inman, 1991; Lesser, 1991; Rocha, 1992; Rocha, 1997; Rocha et al., 2005; Tononi e Edelman, 1998).

Aplicando-se essa teoria ao estudo do funcionamento cerebral, teríamos como agente um grupo de neurônios que compartilham um número maior de conexões entre si e podem ser delimitados em uma determinada área cerebral (ex: Broca), a qual pode se comunicar com outras áreas do cérebro através de fibras nervosas. Essa comunicação deve ser, dentro dessa teoria, uma atividade cooperativa onde a associação entre os agentes possa se dar de uma maneira, tanto quanto possível, descentralizada e frouxa. Por frouxa compreende-se que a associação entre os agentes possa ser facilmente modificada a qualquer momento de acordo com as necessidades impostas pela tarefa a ser solucionada. Por descentralizada, compreende-se que, apesar de agentes especializados lidarem com aspectos específicos da informação, o processamento de uma tarefa qualquer seja distribuído geograficamente podendo envolver diferentes combinações entre diversos agentes.

A transmissão da informação dentro desse sistema pode ocorrer tanto por um mecanismo de envio – onde um agente estabelece uma conexão específica com outro agente permitindo o envio da informação de um para o outro – quanto por um mecanismo de busca – onde um agente gerencia informações provenientes de várias fontes permitindo o acesso de vários outros agentes a essas informações. Assim, inúmeros agentes podem auxiliar na solução de uma determinada

tarefa. Por um lado essa redundância permite um alto grau de degradação do **DIPS**, pois agentes danificados podem ser substituídos por outros agentes do sistema que possuam ferramentas semelhantes. Por outro lado, essa redundância pode causar conflitos, os quais fazem com que a solução da tarefa passe a depender também da participação de agentes especializadas na solução desses conflitos (Davis e Smith, 1983; Lesser, 1991; Rocha et al., 2001; Rocha et al., 2004).

Estudos fisiológicos acerca da inteligência humana sugerem que o sistema neural de indivíduos com maior QI opere de maneira mais eficiente necessitando uma menor ativação global, do que o sistema de indivíduos com QI menor, dando origem à hipótese da eficiência neural (Haier et al., 1988). Segundo essa hipótese, a eficiência de um sistema neural inteligente residiria na otimização das associações entre os agentes que possuam as ferramentas mais eficazes para a solução da tarefa e principalmente na maneira como se dá essas associações (Deary e Caryl, 1997; Neubauer et al., 2002). Assim, propõe-se que quanto mais inteligente for o sistema, menos agentes precisarão ser recrutados e aqueles que o forem serão organizados de maneira a contribuir para a diminuição do consumo global de energia.

Foz et al. (2002) e Rocha et al. (2005), assumindo que o cérebro seja um **DIPS** e baseando-se na eficiência neural, desenvolveram uma nova técnica de mapeamento cerebral que pode ser utilizada para se investigar as possíveis associações entre agentes do sistema durante a solução de uma dada tarefa, ilustrando-se essas associações através de mapas fatoriais.

### 1.1.2 Teoria de Grafos

A teoria de grafos em matemática é uma maneira de se descrever a distribuição de informações de uma maneira inter-relacionada dentro de uma rede composta por pontos de concentração de informação e caminhos ligando esses pontos por onde a informação possa ser transmitida. Esses pontos são denominados de nodos e os caminhos de arcos. Uma conexão aleatória entre nodos caracteriza um tipo de rede randômica, onde todos os nodos possuem a mesma probabilidade de estarem conectados a qualquer outro nodo (Figura 1a). Em contraposição, redes podem ser organizadas de diferentes maneiras dependendo da conectividade entre seus nodos, dando origem a diversos tipos de rede com topologias distintas.

A aplicação dessa teoria é possível na biologia cerebral se associarmos os nodos da rede aos neurônios e os arcos aos axônios ou fibras nervosas. Estudos vêm mostrando que no cérebro se desenvolvem redes bastante organizadas, onde a eficiência tanto local quanto global do processamento da informação dentro dessa rede é muito maior do que em uma rede randômica. Os principais tipos de rede associados ao funcionamento cerebral e discutidos no presente trabalho são: *small-world*, *scale-free* e *broad-scale* (Figura 1).

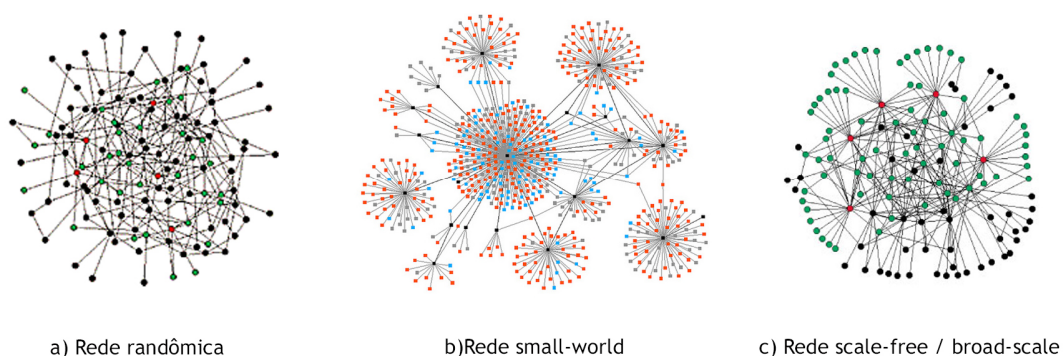
As seguintes medidas são utilizadas para se calcular a conectividade entre nodos e assim descrever as diferentes topologias dessas redes:

1 – A distribuição de graus dos nodos. O grau  $k$  do nodo é o número de arcos, ou conexões, que ele possui e a distribuição de graus é calculada como a probabilidade  $p(k)$  de haver um nodo na rede com  $k$  arcos, ou conexões.

2 – O índice de *clusterização* de nodos. Esse índice é definido como a tendência dos nodos, ou neurônios, se conectarem aos seus vizinhos. O índice da *clusterização* média da rede é calculado como a média dos índices de *clusterização* de cada nodo da rede.

3 – A distância média entre nodos. A distância entre dois nodos, ou neurônios, é definida como o número de arcos, ou conexões, entre eles e a distância média entre nodos de uma rede é dada pela média das vias mais curtas entre seus nodos.

Nodos com alto  $k$  são definidos como *hubs* e facilitam a conectividade entre diversos *clusters*. As eficiências local e global de transmissão de informação na rede são definidas a partir do índice de *clusterização*, da distância média e do número de *hubs* na rede.



**Figura 1 – Modelos de redes**

### 1.1.3 Rede *Small-world*

Watts e Strogatz (1998) propuseram que várias redes do mundo real (redes sociais, mapas rodoviários, etc.) apresentam um alto índice de *clusterização* de seus nodos e uma distância média entre esses nodos pequena. A esse modelo de rede os autores deram o nome



de *small-worlds* (Figura 1b). A topologia de uma rede *small-world* geralmente é associada com um processamento paralelo da informação tanto local quanto globalmente, possuindo uma maior eficiência local do que global se comparada com uma rede randômica.

Iturria et al. (2008) apresentaram um estudo utilizando técnica de Mapeamento de Ressonância Magnética com Peso Difuso (DW-MRI) para aplicar o modelo de *small-worlds* em redes neurais. Técnicas de DW-MRI têm sido utilizadas para estimar as trajetórias de fibras nervosas conectando regiões cerebrais de interesse através da análise anatômica da distribuição dos neurônios e axônios. Dessa forma, os autores propuseram que a comunicação neural ocorresse entre neurônios de uma área delimitada e entre neurônios de áreas diferentes, havendo uma densidade maior de conexões entre neurônios da mesma área do que entre neurônios de áreas distintas. Segundo os autores, o cérebro pode ser representado como uma rede  $G_{\text{brain}}=[N, A, W]$ , onde  $N$  é o conjunto de nodos (neurônios – massa cinzenta) com alguma probabilidade de pertencer a algum tecido cerebral,  $A$  é o conjunto de arcos (axônios – massa branca) entre nodos contíguos em  $N$ , e  $W$  é o conjunto de números reais representando o peso dos arcos. O peso de um arco representa a probabilidade de que nodos contíguos estejam realmente conectados por fibras nervosas. Os autores estimaram, então, a probabilidade de conexão anatômica (PCA) entre 90 áreas corticais e subcorticais de massa cinzenta de 20 voluntários. A PCA representa a probabilidade de que duas áreas estejam conectadas por, ao menos, uma fibra nervosa, ou seja, de que dois *clusters* estejam conectados por, ao menos, um arco. Assim, os autores modelaram o cérebro como uma rede onde o peso dos arcos foi definido pela matriz de PCA. Comparando-se a uma *small-world*, os padrões de conexão anatômica cerebral se caracterizaram por um alto índice de *clusterização* de neurônios e uma distância média pequena entre áreas. Dessa forma, as redes anatômicas cerebrais nesse estudo apresentaram uma maior eficiência local e uma menor eficiência global se comparadas com uma rede randômica.

### 1.1.4 Rede *Scale-free*

O modelo de rede *scale-free* (Figura 1c) implica a existência de *hubs* com possibilidades ilimitadas de estabelecerem conexões entre *clusters*, fazendo com que qualquer área do cérebro tenha a mesma probabilidade de se conectar a qualquer outra área, aumentando assim sua eficiência global. Para se descrever matematicamente esse tipo de rede utiliza-se uma relação polinomial com regime de lei de potência com expoente entre -2 e -3, ou seja,  $p(k) = k^{-\alpha}$ ,  $2 < \alpha < 3$  (Albert et al., 1999).

Van den Heuvel et al. (2008) calcularam a correlação entre a atividade de cada um dos 10.000 voxels registrados pela Ressonância Magnética Funcional gerando uma matriz, da qual pudessem obter os valores para calcular a *clusterização*, a distância média entre nodos e a distribuição de graus entre voxels de mesmo valor de correlação. Dessa forma os autores não se restringiram a estudar a relação entre áreas específicas, mas puderam analisar também o comportamento dos neurônios dentro de cada área. Nas redes geradas a partir dos valores de correlação, o coeficiente de *clusterização* se mostrou muito maior do que aquele extraído de uma rede randômica, além de apresentar uma distância média entre nodos pequena. Além disso, a distribuição de graus ainda seguiu um regime de lei de potência com expoente próximo de 2, sugerindo assim uma topologia *scale-free*. Os resultados sugerem a existência de uma conectividade funcional cerebral extremamente organizada e eficiente, na qual voxels estão principalmente conectados aos seus vizinhos formando áreas *clusterizadas*, as quais podem se conectar através de um pequeno número de *hubs* extremamente conectados, garantido assim um alto grau de conectividade global para a rede.

### 1.1.5 Rede *Broad-scale*

A topologia *broad-scale* modela um tipo de rede onde os nodos utilizados como *hubs* possuem um limite de conexões. Esse tipo de rede é descrito matematicamente por uma distribuição de graus que possui um regime de lei de potência seguido por uma abrupta nota de corte. A nota de corte restringe o número máximo de nodos que podem se conectar a nodos *hub*:  $p(k) = k^{1-\alpha} \exp(\beta k / k_c)$ , onde  $k_c$  é o limite de graus.

Iturria et al., 2008 realizaram um análise da distribuição de graus em seu estudo revelando que as redes cerebrais estudadas apresentaram características *broad-scale*. Segundo os autores, a limitação de conexões em um *hub* prevista por esse tipo de rede seria comparada, dentro das conexões anatômicas cerebrais, ao número máximo de áreas conectadas a um neurônio *hub*, e corresponderia a um processo de otimização do custo estrutural diminuindo o volume de axônios necessários para cobrir conexões inter-regionais.

### 1.1.6 Sub-redes e rede complexa

De acordo com os trabalhos apresentados, áreas específicas do cérebro podem ser definidas a partir de um conjunto de *clusters* de neurônios especializados para o processamento de uma determinada informação. Esses *clusters* podem se conectar dentro de uma mesma área ou entre áreas diferentes das seguintes maneiras:

- a) através de vias de curta distância, definindo-se assim um tipo de rede *small-world*;
- b) através de *hubs* com conexões ilimitadas, definindo-se assim uma topologia de rede *scale-free*; e

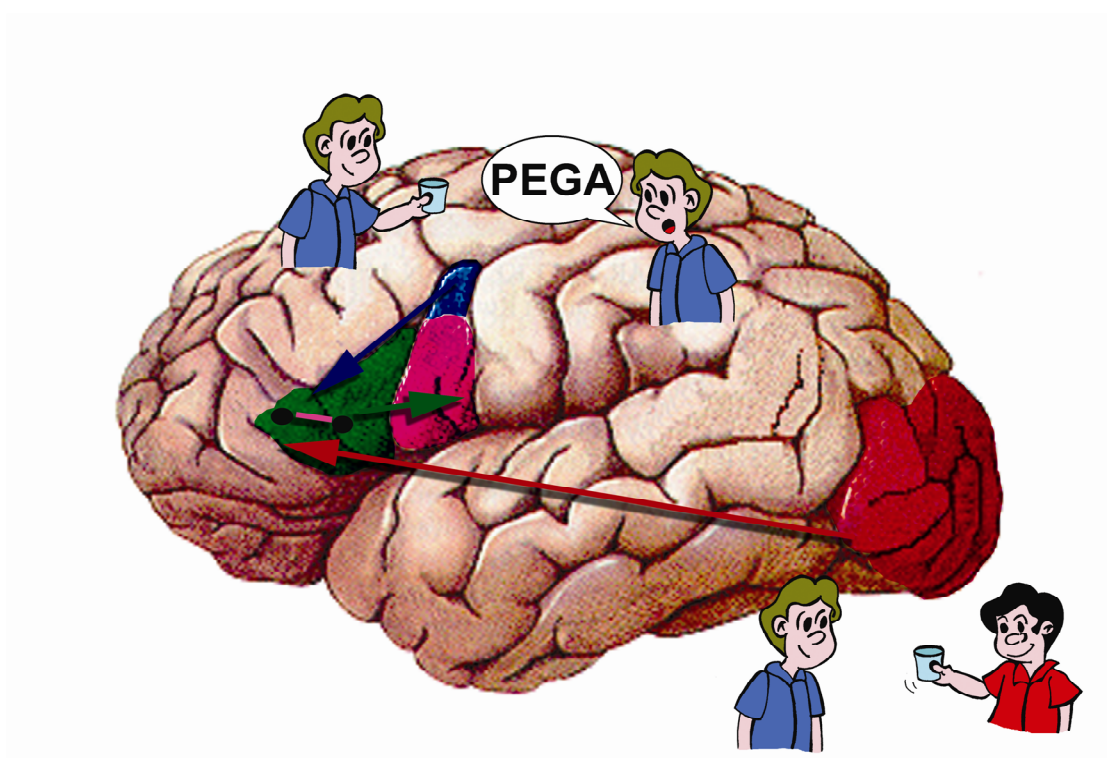
c) através de *hubs* com conexões limitadas, definindo-se assim uma topologia de rede *broad-scale*.

Incorporando-se os modelos apresentados, propomos que a rede neural possa ser mais bem compreendida e modelável se considerarmos que os *clusters* possam ser conectados com diferentes níveis de conectividade. Assim, uma rede complexa como o cérebro pode ser formada por *clusters* de neurônios conectados através de vias locais (distância média pequena), e/ou através de *hubs* com conectividade limitada, estabelecendo-se sub-redes preferenciais, e/ou através de *hubs* com conectividade ilimitada possibilitando-se a criação de novas sub-redes. Essa conectividade ilimitada representa, na realidade, um alto grau de conectividade limitada pelas condições físicas da rede (número de neurônios e distribuição anatômica), ou seja, existe uma limitação para a conectividade de um *hub*, mas, no entanto o seu grau de conectividade pode ser, em termos de possibilidades de modelagem, praticamente ilimitado.

Para exemplificarmos a proposta apresentada, comparamos o neurônio *hub* ao neurônio espelho (*mirror-neuron*), descoberto por Rizzolati et al. (1998). Os autores encontraram neurônios em macacos, em áreas análogas à área de Broca, que respondem tanto à execução de uma ação motora manual quanto à visualização dessa mesma ação motora. Dessa maneira, esse neurônio não pôde ser considerado nem um neurônio motor, nem um neurônio sensorial. Ele passou a ser considerado um inter-neurônio de representação da ação que possui conexões com neurônios tanto de áreas motoras quanto de áreas visuais. Assim, um determinado *cluster* de neurônios da área motora responsável pelo controle do movimento muscular envolvido em uma determinada ação pode estabelecer conexões com um neurônio espelho, ou *hub*, da área de Broca. Esse neurônio por sua vez também pode estabelecer conexões com um determinado *cluster* de neurônios da área visual responsável pela decodificação da imagem gerada por essa mesma ação. Assim, uma conexão preferencial pode ser estabelecida dentro da rede formando-se uma sub-rede envolvendo os *clusters* necessários

para a solução da tarefa executada como, no caso, imitar uma ação motora através da sua visualização.

A organização da rede pode ir se tornando cada vez mais complexa ao passo que outras conexões vão se estabelecendo entre *clusters* de uma mesma área e entre *clusters* de áreas distintas, através de vias de distância média pequena ou através de *hubs* com conectividade limitada ou ainda através de *hubs* com conectividade considerada ilimitada. Portanto, podemos propor que o mesmo neurônio *hub* localizado na área de Broca, que conectou *clusters* motores e sensoriais, possa também estabelecer conexões locais com um *cluster* vizinho dentro da própria área de Broca envolvido com o controle da motricidade da orofaringe, resultando assim na produção de um som que represente a ação linguisticamente (Figura 2). Podemos propor também que esse neurônio *hub* ainda possa estabelecer conexões com outros *clusters* localizados em outras áreas do cérebro cujos neurônios definiriam outros aspectos do significado da ação, como por exemplo, os estados emocionais e as memórias episódicas associadas a essa ação, aspectos esses processados respectivamente por neurônios do sistema límbico e do hipocampo. Quanto menos limitada a conectividade desse *hub*, maior o número de *clusters* que poderão ser recrutados de acordo com a necessidade estabelecida pelo ambiente. Dessa maneira, a rede otimizaria processos recorrentes através da ativação de sub-redes preferenciais para a solução de tarefas conhecidas, enquanto ainda preservaria a possibilidade de estabelecer, dentro dos limites físicos da rede, inúmeras outras combinações entre *clusters*, localizados em todas as áreas cerebrais, para a solução de uma nova tarefa e estabelecimento de novas sub-redes.



**Figura 2 – Neurônio espelho da ação e linguagem**

**Neurônios occipitais (vinho) envolvidos com a visualização de uma ação motora da mão se conectam a um neurônio da área de Broca (verde), considerado um neurônio espelho. Neurônios motores da mão (azul) também se conectam ao mesmo neurônio espelho de Broca. Esse neurônio espelho se conecta a um outro neurônio de Broca que se conecta a neurônios da área motora da orofaringe (rosa).**

Ressaltamos que uma conexão entre dois neurônios pode ser estabelecida através: a) de um novo ponto de aproximação entre eles (axônio – dendrito; axônio – corpo celular; axônio – axônio), criando-se assim uma nova sinapse e da necessária ativação dessa sinapse; ou b) da ativação de uma sinapse já existente. Assim, por um lado, consideramos que uma sinapse seja a possibilidade de dois neurônios se comunicarem por terem pontos de proximidade, independentemente de possuírem, nesses pontos, neurotransmissores e receptores suficientes para transmissão do potencial de ação de um neurônio ao outro. Por outro lado, consideramos que a ativação de uma sinapse seja a alteração morfológica dos pontos de proximidade entre

dois neurônios, através do posicionamento de moléculas neurotransmissoras e receptoras nesses pontos dos neurônios pré e pós-sináptico respectivamente.

## 1.2 Investigando a linguagem dentro de uma rede complexa

Os primeiros modelos acerca da fisiologia cerebral responsável pela linguagem, surgiram na época em que Carl Wernicke propôs que neurônios da área de Broca fossem responsáveis pela produção da linguagem enquanto que neurônios do lóbulo temporal superior esquerdo, área conhecida como área de Wernicke, fossem responsáveis pela compreensão da linguagem (Figura 3). Segundo Wernicke, essas áreas se conectariam através de neurônios corticais (Catani e Mesulam, 2008).

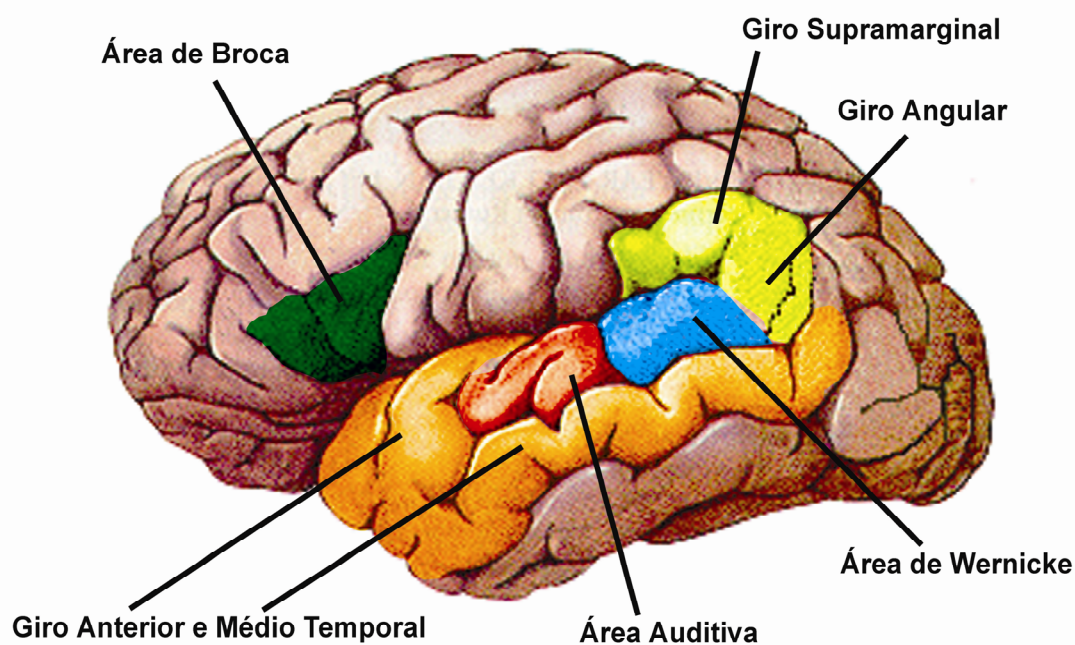
Somente em 1968, essa teoria foi drasticamente modificada pelo modelo de Norman Geschwind, conhecido como modelo Geschwind-Wernicke (Geschwind et al., 1968), no qual os autores propuseram que neurônios da área auditiva verbal ativariam neurônios da área de Wernicke, os quais por sua vez recrutariam os neurônios polissensoriais do lóbulo parietal inferior esquerdo (giro angular e giro supra marginal) ativados quando da visualização e manipulação do objeto, associando assim a palavra ao seu significado. Para a produção da linguagem, esse modelo propôs que neurônios da área de Wernicke deveriam se conectar aos neurônios da área de Broca para fonação das palavras, através não de neurônios corticais, mas sim das fibras do fascículo arcuado (Figura 3).

Como esse modelo propunha uma ativação seqüencial entre os neurônios dessas três áreas (Broca, Wernicke e Parietal Inferior), Mesulam, em 1990, o critica propondo que a linguagem dependesse de um processamento paralelo da informação que se moldaria de acordo com as necessidades lingüísticas. A funcionalidade de uma área cerebral dedicada à linguagem não estaria afixada, mas poderia variar de acordo com o contexto neural do

processamento da informação. O giro frontal inferior (área de Broca), por exemplo, poderia interagir com diferentes áreas dependendo se estivesse processando o som de uma palavra ou o seu significado. Mesulam também propõe o papel de um epicentro ou de uma zona de convergência de determinadas áreas do cérebro, onde as informações vindas de várias modalidades sensoriais poderiam ser combinadas. Uma dessas áreas seria o lóbulo parietal inferior, a qual além de receber informações do hemisfério direito ainda integraria processos emocionais da amígdala e do giro do cíngulo.

Outras proposições foram surgindo a partir de estudos de lesão e de mapeamento cerebral relacionando outras áreas do lóbulo temporal esquerdo com a significação das palavras. Em 1993, Damasio e Tranel mostraram que indivíduos com lesão no lóbulo temporal anterior e médio do hemisfério esquerdo apresentavam dificuldades na produção de nomes a partir do seu significado. Os autores não associaram a funcionalidade dessas áreas com a vocalização da palavra, mas sim com um sistema de recuperação de nomes que representassem objetos concretos. Esse sistema desempenharia o papel de uma via de mediação lexical para nomes concretos promovendo a reconstrução da forma sonora da palavra após o processamento das características sensório-motoras do objeto (Figura 3). Outros estudos começam a diferenciar as regiões do lóbulo temporal de acordo com a categoria semântica das palavras. Assim, o giro fusiforme é associado ao processamento semântico de palavras referentes a seres animados enquanto o giro temporal médio é associado a ferramentas (Perani et al., 1999). Damasio et al. (2004) propuseram que várias outras regiões do cérebro, além das áreas clássicas como Broca e Wernicke, estejam envolvidas na recuperação do nome de objetos concretos, e que haja uma segregação parcial no lóbulo temporal em relação às categorias conceituais a que o objeto faça parte.





**Figura 3 – Áreas cerebrais envolvidas com a linguagem**

Mais recentemente, Catani e Mesulam, 2008 propuseram que o processamento semântico dependesse de uma conexão muito mais complexa entre o córtex temporal, o córtex occipital e áreas clássicas de linguagem através dos fascículos ventrais. O fascículo longitudinal inferior transportaria a informação visual de áreas occipitais ao lóbulo temporal estando envolvido com o reconhecimento visual de objetos e com a ligação entre a representação neural do objeto e a sua forma lexical. O fascículo uncinado, que conecta o lóbulo temporal anterior à área orbitofrontal, incluindo o giro frontal inferior, estaria envolvido com a recuperação lexical, com associações semânticas e com determinados aspectos da nomeação. Essas vias ventrais estão conectadas à região perisilviana em pelo menos duas regiões diferentes, posteriormente através de fibras curtas em forma de U ligando a área de Wernicke ao córtex lateral temporo-occipital e anteriormente através de fibras intra-lobulares ligando o córtex lateral orbito-frontal à área de Broca.

Inúmeros trabalhos vêm confirmando o envolvimento dessas áreas (Broca, Wernicke, Parietal Inferior e Temporal) do hemisfério esquerdo, em indivíduos destros, no processamento denotativo da linguagem, ou seja, dos significados literais das palavras e frases coordenadas pela sintaxe (Dennis e Whitaker, 1976; Soares, 1982; Woods, 1983; Nass e Myerson, 1985; Meyers et al., 1990; Feldman e Holland, 1992; Tzourio et al., 1994; Helmstaedter et al., 1997; Cohen e Le Normand, 1998; Copland et al., 2002; Vanlancker-Sidtis, 2004; Westmacott et al., 2007).

No entanto, já desde 1977 (Day, 1977), se propõe o envolvimento do hemisfério direito no processamento de categorias semânticas, ou seja, no levantamento de características comuns entre um conjunto de palavras. Ross, em 1984, propôs que o hemisfério direito tivesse um papel preponderante em relação aos aspectos emocionais da linguagem uma vez que processa e controla a modulação dos componentes afetivos da prosódia e dos gestos. Kinsbourne (1986) discute evidências de que o hemisfério direito esteja envolvido tanto na compreensão de histórias, quanto na interpretação da prosódia. McDonald (2000) propôs que lesões no hemisfério direito associadas a distúrbios pragmáticos da linguagem podem refletir a deficiência em sintetizar informações de entrada e informações pré-existentes, informações verbais e visuo-espaciais, resultando em uma insensibilidade à veracidade da informação, ou em uma fixação ao significado literal da informação e conseqüentemente a uma alta sensibilidade à veracidade.

Outros trabalhos apontam o envolvimento do hemisfério direito no processamento conotativo da linguagem, ou seja, metáforas (Brownell et al., 1983; Arzouan et al., 2007; Coulson e Van Petten, 2007; Mashal e Faust, 2008), humor (Brownell et al., 1983; Bihle et al., 1986; Heath e Blonder, 2005; Brown et al., 2005; Coulson e Severens, 2007) e prosódia

(Mitchell, 2007; Pell, 2007; Mitchell e Ross, 2008; Ross e Monnot, 2008; Thompson et al., 2008).

### ***Presente trabalho***

A partir dos modelos de rede apresentados e das teorias recorrentes sobre o processamento neurofisiológico da linguagem passaremos a propor como se daria a organização neural envolvida com a linguagem assumindo que tanto a sua compreensão quanto a sua produção dependam de inúmeros *clusters* de neurônios localizados em várias áreas cerebrais de ambos os hemisférios.

Propomos que determinados *clusters* assumam o processamento de características lingüísticas específicas, enquanto que a compreensão global da linguagem dependa da associação entre esses *clusters* lingüísticos e outros *clusters* envolvidos com os diversos aspectos da significação das informações lingüísticas. Os *clusters* que formam uma sub-rede lingüística estariam envolvidos com a produção articulada dos sons (linguagem oral) ou imagens (linguagem escrita) das palavras, frases e textos, bem como pelo processamento auditivo desses sons ou imagens. Os *clusters* que formam uma sub-rede semântica, no caso do processamento lingüístico de uma palavra referente a um objeto, estariam envolvidos com a sua imagem, com o seu uso, com o local em que ele se encontra, com a sensação emocional que ele desencadeia, entre outros aspectos.

Apesar do hemisfério esquerdo ainda ser visto como o hemisfério dominante para a linguagem, o hemisfério direito é fundamental para a compreensão do contexto em que a linguagem é produzida. Assim, propomos que as especializações hemisféricas não devam mais ser consideradas como funções separadas, mas sim como uma variação de habilidades que operam em paralelo e cuja interação torna possível a complexidade da linguagem humana.

Discutiremos a seguir como essa organização se daria envolvendo tanto a linguagem oral quanto a linguagem escrita durante o desenvolvimento da criança em idade escolar. Supõe-se que inicialmente a rede neural do bebê apresente uma menor *clusterização* e um maior número de *hubs* com ilimitadas possibilidades de conexão, possibilitando assim uma alta plasticidade na formação e especialização de *clusters* e de sub-redes. Durante o seu desenvolvimento seus *clusters* e suas sub-redes devem ir se modificando influenciados pelo ambiente, resultando na modificação morfológica desses *clusters* e na alteração da conectividade dos seus *hubs*.

Propomos que o aprendizado da linguagem envolva uma alteração mais complexa na rede deixando-a ainda mais organizada em relação a uma rede randômica. A própria linguagem poderia ser assim vista como uma conseqüência de um alto grau de organização da rede ganhando um aumento em sua eficiência e possibilitando a criação de novas significações.

### **1.2.1 O desenvolvimento da linguagem oral**

Inicialmente, o bebê humano é capaz de produzir todos os sons possíveis de serem gerados pela anatomia e fisionomia do nosso trato orofaríngeo e pelo controle neural dos músculos desse sistema. Porém, todas as línguas do mundo utilizam como fonemas apenas uma parte dos sons que o homem é capaz de produzir e o bebê precisa saber quais são eles. Para que isso ocorra, propomos que haja *clusters* localizados na área de Broca, na área motora, nos gânglios da base e no cerebelo que controlam a musculatura da orofaringe e formam, conectados por meio de *hubs*, uma sub-rede responsável pelo controle motor da fala. Da mesma forma, propomos que haja *clusters* localizados na área auditiva e na área auditiva verbal, que conectados por meio de *hubs*, formam uma sub-rede que reconhece os sons verbais. As sub-redes de fonação e identificação de sons verbais podem, por sua vez, se

relacionarem por meio de outro conjunto de *hubs*. A criança, vivenciando os sons verbais existentes em seu ambiente reforçará a conexão entre essas sub-redes através desses *hubs*, enquanto que enfraquecerá a conectividade dentre os *clusters* associados aos sons não utilizados pela língua materna. Assim, a criança começa a imitar os sons que ouve e perde a capacidade de perceber e de produzir um som estranho à sua língua, assim como um falante nativo do espanhol não percebe a diferença entre *ê* e *é*, uma vez que não possui este último fonema em sua língua. Da mesma forma que *clusters* são reorganizados tanto na sub-rede motora quanto na sub-rede auditiva, a conectividade dos *hubs* também pode ser alterada, fazendo com que a comunicação entre duas sub-redes se torne mais especializada durante o aprendizado dos sons da língua.

### **1.2.2 Conhecimento prévio para a linguagem**

Paralelamente à análise fonêmica da língua que a envolve, a criança está também aprendendo a ver e compreender o que vê, está agindo e compreendendo a consequência também de suas próprias ações, criando assim memórias semânticas, procedurais e episódicas e relacionando essas memórias entre si para dar significado ao mundo em que vive. Para que isso ocorra propomos que cada uma dessas memórias envolva um conjunto de *clusters* localizados nas áreas cerebrais cujos neurônios se especializaram nos determinados tipos de informação armazenada por cada uma dessas memórias, formando-se assim diversas sub-redes que podem inclusive compartilhar determinados *clusters*. Associar essas memórias entre si seria o equivalente a conectar essas sub-redes através de *hubs* com um alto grau de conectividade, criando assim novas possibilidades de conexões entre um número ainda maior de *clusters* localizados em diversas áreas cerebrais. Assim, propomos que a rede deva alcançar esse grau de complexidade para que a linguagem possa evoluir da imitação de sons para a compreensão e produção de significados.

É nossa proposição que a linguagem não é um pré-requisito para o pensamento ou aprendizado humano, mas sim que a linguagem dependa de um conhecimento prévio onde se fundamentar. Muitos pensamentos e aprendizados podem depender da linguagem para existirem, mas sem ela o homem é capaz de criar boa parte de todo o conhecimento que pode possuir bem como de gerar novas idéias e conceitos (Zheng e Goldin-Meadow, 2002). A idéia básica é que, inicialmente, a criança crie uma série de conhecimentos sobre o mundo, organizando sua rede para acomodar esses conhecimentos, a partir dos quais poderá desenvolver sua linguagem, ou seja, aumentar o grau de organização dessa rede associando conhecimentos prévios a uma forma de comunicação, a qual por sua vez, quando alcançar um certo estágio de complexidade, permitirá ao indivíduo criar outros novos conhecimentos sem necessariamente tê-los vivenciado, reorganizando assim sua rede agora através da linguagem.

Organizaremos a discussão acerca dos processos neurais envolvidos com a compreensão da linguagem em dois níveis: palavra e oração, exemplificando como a linguagem representaria os processos neurais responsáveis pela significação dos respectivos objetos e eventos descritos pelas palavras e orações.

### **1.2.3 Palavras**

Pelo termo “palavra” oral designamos unidades fonológicas mínimas da linguagem oral que possuam um significado, sendo significado um processo neural que possa ser descrito pela linguagem. Pelos tipos de significações possíveis de serem representadas pela linguagem podemos distinguir, entre outros, dois tipos de palavras:

*Substantivos:* nome dado a objetos (martelo) e construções (casa) criadas pelo homem, seres vivos (cachorro) e suas partes (pata), formações (montanha) e fenômenos (vento) naturais, emoções (dor) e sensações (amor) humanas, nomes de seres (Fábio), eventos

(mordida), episódios (festa), conceitos (inteligência), categorias semânticas de objetos, seres, eventos, etc. (ferramenta, animal, esporte).

*Verbos*: palavras que podem descrever: a) ações motoras intransitivas (andar) ou transitivas (comer); b) movimentações de matéria ocasionadas por fenômenos físicos (ventar); ou c) processamentos mentais cognitivos (pensar) e afetivos (amar). Essas palavras, em português, variam sua terminação morfológica de acordo com o agente (sujeito), com o momento em que a ação, movimento ou processo ocorreram (tempo), com a sua duração (aspecto) e com a sua subjetividade (modo).

Esses dois tipos de palavras, mais especificamente o substantivo referente a um objeto e o verbo de ação motora, serão discutidos em função da organização cerebral responsável pela sua significação e compreensão lingüística.

Para criar a compreensão de substantivos e verbos dentro da rede, propomos que a criança passe inicialmente a compreender que a ação motora da fala dos adultos tem alguma relação tanto com os objetos que os adultos observam quanto com as ações motoras que eles executam em relação a esses objetos. Essa relação deve, em seguida, ser também compreendida quando ela mesma observa ou manuseia um objeto já conhecido tentando também executar a mesma motricidade da fala dos adultos associada a esse objeto ou ação.

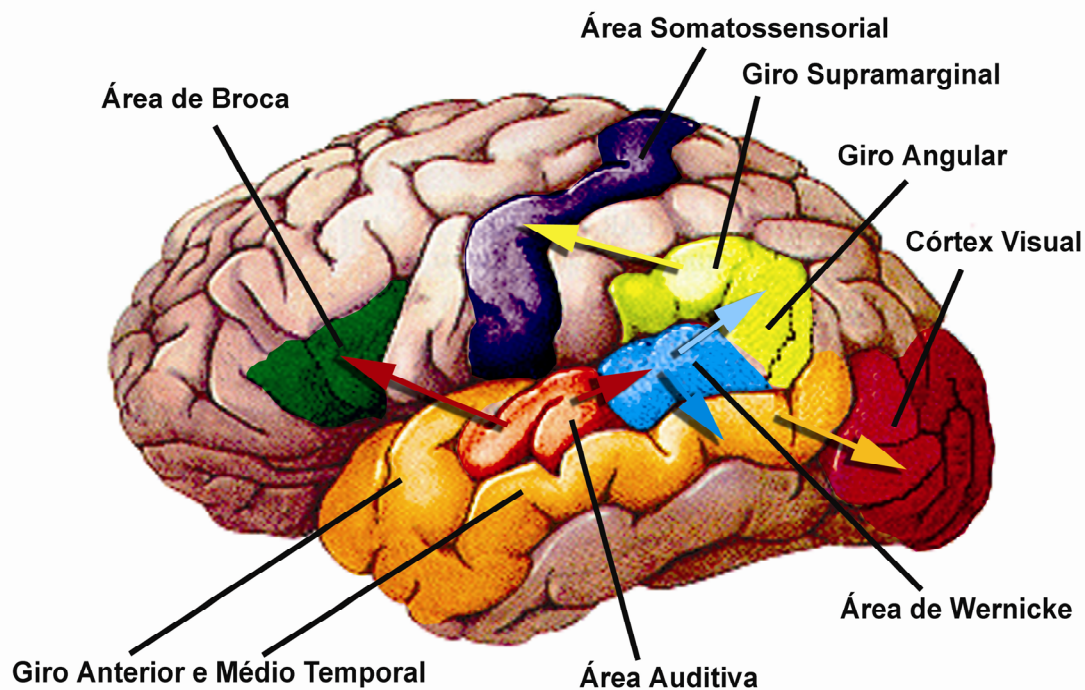
Tomemos como exemplo o evento voluntário mais importante para a vida do indivíduo, a alimentação. A criança sente a sensação de fome e aprende que um determinado objeto satisfará sua necessidade de comida, pois possui em seu interior um alimento e em sua extremidade uma forma que se adapta ao seu movimento de sucção. Ela cria assim uma memória semântica associada à sua memória procedural inata de sucção e às memórias episódicas dos momentos em que foi alimentada, estabelecendo nessa combinação de sub-

redes o significado da mamadeira. Ao observar esse objeto ou mesmo imaginá-lo quando estiver com fome, ela poderá associá-lo a uma motricidade da fala que produza o seu respectivo substantivo, como também poderá associar a ação que executa em relação a esse objeto a uma motricidade da fala que produza o seu respectivo verbo.

### ***Organização neural envolvida na compreensão de substantivos referentes a objetos***

Como sua mãe sempre que o alimenta produz os sons da palavra “mamadeira” ou “tete”, a criança deve associar os neurônios que reconhecem esses sons tanto aos neurônios que controlam a sua motricidade para produção do mesmo som quanto aos neurônios que estabeleceram as memórias envolvidas com o significado desse objeto. Propomos que a criança desenvolva uma *clusterização*, em áreas cerebrais auditivas, responsável pela identificação do som referente a uma palavra. Esse *cluster* pode se conectar a *clusters* localizados em: a) Broca, os quais por sua vez podem se conectar aos neurônios motores que produzirão o som da palavra; e b) Wernicke, os quais por sua vez podem se conectar a *clusters* do parietal inferior para levantamento dos aspectos somatossensoriais, através de conexões com o giro pós-central, e a *clusters* do temporal para levantamento das formas visuais, através de conexões com o occipital (Figura 4).





**Figura 4 – Compreensão de um substantivo produzido oralmente**

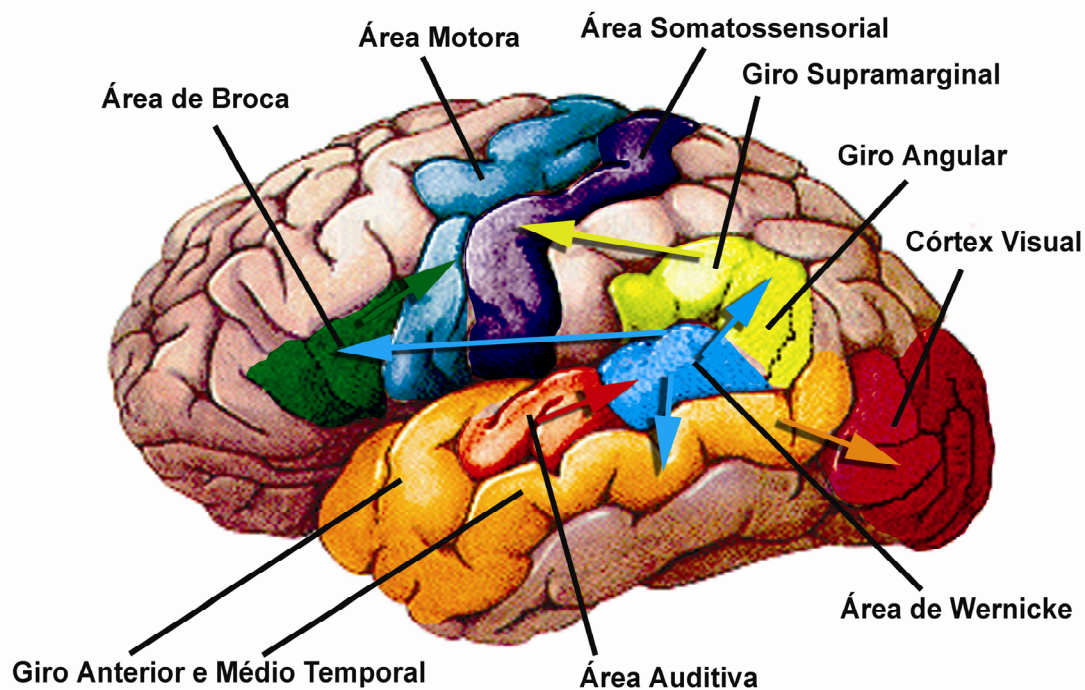
Neurônios da área auditiva verbal (vermelho) reconhecem os sons referentes a uma palavra e se conectam a neurônios de Broca (verde) e a neurônios de Wernicke (azul). Os neurônios de Broca podem reproduzir oralmente a palavra ouvida. Os neurônios de Wernicke estabelecem conexões com neurônios temporais (laranja) e parietais inferiores (amarelo) para levantamento do significado da palavra. Os neurônios parietais estabelecem conexões com os neurônios somatossensoriais do giro pós-central (roxo) e os neurônios temporais se conectam aos neurônios visuais do lóbulo occipital (vinho).

Propomos que a conexão entre os *clusters* da área de Wernicke e do parietal inferior e do temporal possa ser estabelecida através de diversos *hubs*, os quais permitiriam uma ampla conectividade entre todos os *clusters* de áreas somatossensoriais e visuais, cujos neurônios estivessem envolvidos com as diferentes informações sensoriais associadas aos diferentes aspectos dos diversos significados que a palavra pode ter.

### ***Organização neural envolvida na compreensão de verbos referentes a ações motoras***

Consideremos agora o verbo. De acordo com Rizzolatti et al. (1998), neurônios espelhos em Broca, que seriam ativados tanto durante a execução de uma ação motora quanto durante a visualização dessa mesma ação, poderiam conectar-se a outros neurônios da área de Broca responsáveis pela fonação do signo lingüístico associado a essa ação, ou seja, ao verbo. Reconhecendo no contínuo sonoro a palavra “mamá” a criança pode assim associar os neurônios da área auditiva que reconhecem os sons dessa palavra tanto ao neurônio *hub* de representação da ação de mamar, permitindo assim que a criança compreenda a ação motora do verbo, quanto aos neurônios envolvidos com o controle motor para produção desse mesmo som. Essa proposição é fundamentada em vários trabalhos que têm mostrado a dependência de Broca no processamento lingüístico dos verbos (Bates et al., 1991; Damasio e Tranel, 1993; Daniele et al., 1994; Miozzo et al., 1994; Breedin et al., 1998; Berndt et al., 1997; Sörös et al., 2003).

No entanto, considerando todos os aspectos do significado de um verbo, propomos que *clusters* da área auditiva, ativados pelo som de um verbo, se conectem a *clusters* da área de Wernicke, os quais por sua vez possam ativar concomitantemente: a) neurônios da área de Broca responsáveis pela representação da ação motora do verbo, por estarem esses conectados a neurônios do córtex motor; b) neurônios do lóbulo parietal inferior responsáveis em decodificar as informações sensoriais dos objetos associados a essa ação, por estarem esses conectados a neurônios polissensoriais; c) a neurônios temporais visuais para criação da imagem desses objetos; e d) a neurônios do sistema límbico responsáveis pelo processamento das emoções associadas à ação (Figura 5).



**Figura 5 – Compreensão de um verbo produzido oralmente**

Propomos que a compreensão de um verbo de ação motora também ative os processos neurais envolvidos com a compreensão dos substantivos relacionados a ação motora representada pelo verbo. Além dos neurônios temporais e parietais, Wernicke também ativa os neurônios de representação motora da área de Broca que se conectam aos neurônios da área motora envolvidos com o controle muscular da ação.

#### **1.2.4 Orações**

O processamento lingüístico dos verbos permite agora a criança desenvolver o próximo nível da linguagem descrevendo eventos através de orações. Um evento é considerado uma ação motora ocorrida em uma trajetória espacial que pode ser percebida pelos nossos sentidos e descrita pela linguagem. Eventos são expressos linguisticamente em orações contendo verbos que determinam o papel temático do agente da ação e do paciente da ação, aquele que

executa e aquele que sofre a ação respectivamente (quem fez o que a quem) (Chatterjee et al., 1999).

Por volta do primeiro ano de vida, o bebê ainda só produz palavras isoladas que representem substantivos ou verbos. No entanto, seu cérebro também já está, há algum tempo, estabelecendo sinapses entre neurônios motores e de áreas visuais para estabelecer a representação das ações motoras, bem como associando esses neurônios aos neurônios visuais que reconhecem os objetos ou seres envolvidos nessas ações. Com isso está compreendendo que as ações criam sintaxes por envolverem objetos ou seres em uma relação de agente e paciente.

Pesquisas com primatas (Iacoboni e Wilson, 2006) mostram que a mesma estrutura neural envolvida na percepção de um evento pelo macaco aparece ativada, no homem, durante a compreensão da linguagem descrevendo esse mesmo evento. Propõe-se que a estrutura sintática mais simples (uma oração com sujeito, verbo e complemento) que descreva um evento (englobando um agente, uma ação e um paciente) compartilharia os mesmos elementos neurais envolvidos com a própria execução ou percepção desse evento (Caplan, 2006). Assim, a frase “O cachorro mordeu o gato” estaria mimetizando em um ato motor da orofaringe o evento de morder, que envolve uma ação motora (“morder”), um agente (“cachorro”) e um paciente (“gato”). O neurônio de representação dessa ação motora de “morder” pode estabelecer sinapses com neurônios visuais que definem e estabelecem a memória dos possíveis pacientes e dos possíveis agentes que se envolvem com essa ação.

Pela fonação das palavras ser um ato motor, ela precisa ser temporal, ou seja, cada palavra deverá ser fonada antes ou depois da outra. No caso do evento descrito pela frase “O cão mordeu o gato”, independentemente da ordem em que as palavras forem produzidas, compreenderemos que o cão foi o agente e o gato o paciente. Da mesma maneira, se

produzimos as palavras “cão”, “gato” e “arranhou”, entenderemos que o “O gato arranhou o cão”, pois a semântica dos substantivos e do verbo recupera da nossa memória episódica os eventos mais comuns envolvendo essas palavras, ou seja, essa ação e esses seres. No entanto, algumas palavras quando fonadas em seqüência podem criar significados ambíguos por não se saber quem é o agente e quem é o paciente da ação, por exemplo, “João beijou Maria”. Portanto, regras precisam ser criadas.

Dessa maneira, a área de Broca também pode estar envolvida com a sintaxe, ou seja, com a identificação da ordem em que as palavras foram fonadas para que haja a correta compreensão da oração (Blumstei e Milberg, 2000). Friederici e Kotz (2003) procuram estabelecer o papel de Broca na sintaxe e na semântica propondo que a *pars opercularis* esteja mais envolvida com a sintaxe enquanto que a *pars triangularis* esteja mais envolvida com a semântica.

### **1.2.5 O desenvolvimento da linguagem escrita**

Considerando-se apenas o processamento dos aspectos lingüísticos da linguagem teríamos sub-redes específicas para cada uma das modalidades de expressão dessa linguagem: oral ou escrita. A diferença básica entre as duas modalidades da linguagem está no tipo de informação sensorial e na motricidade necessária. Enquanto que a linguagem oral produz sons a partir da motricidade orofaringeana, a linguagem escrita produz imagens a partir da motricidade manual. Além disso, a linguagem oral envolve áreas de processamento auditivo que procuram extrair do contínuo sonoro as possíveis unidades significativas, enquanto que a linguagem escrita envolve áreas de processamento visual para, a partir da imagem das palavras, resgatar seus significados. No entanto, como o nosso sistema de escrita foi desenvolvido a partir da linguagem oral, ambas as expressões ainda podem compartilhar áreas semelhantes.

Veremos duas organizações diferentes da rede neural envolvidas com dois possíveis processos de leitura baseados no modelo *dual-route* de Coltheart (Coltheart et al., 1993; Coltheart e Rastle, 1994; Coltheart et al., 2001): o processo de leitura semântica e o processo de leitura fonológica grafema-fonema. Na organização da leitura semântica, os *clusters* envolvidos com decodificação da imagem das palavras não compartilhariam conexões com os *clusters* envolvidos com a decodificação fonológica. Na organização da leitura fonológica grafema-fonema, os *clusters* envolvidos com o processamento visual compartilhariam conexões com *clusters* envolvidos com o processamento fonológico.

#### **1.2.5.1 Leitura semântica**

No processo de leitura semântica, propõe-se que neurônios do córtex fusiforme sejam capazes de memorizar o formato de uma palavra pela sua composição de letras independentemente dos sons que essas letras possam representar. Essa área foi cunhada como *Word Form Area* (Cohen et al., 2000; Cohen e Dehaene, 2004; Hillis et al., 2005; Martin, 2006). Apesar do cérebro especializar grupos de neurônios para lidar com determinados tipos de informações, propõe-se que essa especialização se trate mais da modalidade da informação e de sua frequência temporal e espacial. Assim, os neurônios dessa área seriam especializados e organizados para processar elementos padrões da visão não só relacionados às palavras, mas também a especificidades em pássaros e carros, como observado em experimentos envolvendo indivíduos especializados nesses campos (McCandliss et al. 2003). Supõe-se que esses neurônios estabeleçam sinapses com neurônios da área de Wernicke para levantamento dos significados das palavras identificadas (Figura 6). Essa conexão não dependeria da seqüência das letras nas palavras, uma vez que somos capazes de compreender o significado do seguinte texto:

**De acordo com uma pesquisa de uma universidade inglesa, não importa em qual ordem as letras de uma palavra estão, a única coisa importante é que a primeira e última letras estejam no lugar certo. O resto pode ser uma palavra qualquer que você pode ainda ler sem problema. Isso é porque nós não lemos cada letra isolada, mas a palavra como um todo. Vdaerde!**

Por um lado, para a constituição de uma palavra oral, a área auditiva verbal teria neurônios especializados em decodificar os distintos fonemas do contínuo sonoro que em conjunto possam ser associados a um significado. Por outro lado, para a constituição de uma palavra escrita, a *Word Form Area* teria neurônios especializados em decodificar as distintas imagens de uma composição gráfica que em conjunto possam ser associadas ao mesmo significado. Assim a área auditiva verbal e a *Word Form Area* teriam a mesma funcionalidade, mas processariam informações sensoriais distintas por terem conexões preferenciais com neurônios auditivos do lóbulo temporal e com neurônios visuais do lóbulo occipital respectivamente (McCandliss et al. 2003).

### **1.2.5.2 Leitura fonológica grafema-fonema**

A leitura fonológica grafema-fonema é um processo de leitura através do qual a criança aprende a relacionar sons às letras, ou a combinações de letras. Na leitura fonologia silábica, a criança aprende a identificar os sons que as sílabas representam. Esse aprendizado se dá através da apresentação de todas as possíveis combinações entre letras, ou seja, das famílias silábicas: BA, BE, BI, BO, BU; CA, CE, CI, CO, CU; etc. A cada uma dessas sílabas é associado um som: /ba/, /be/, /bi/, /bo/, /bu/; /ka/, /ke/, /ki/, /ko/, /ku/. Portanto, a consciência fonológica envolvida nesse tipo de leitura implica em um aprendizado dos possíveis grupos fonêmicos da língua.

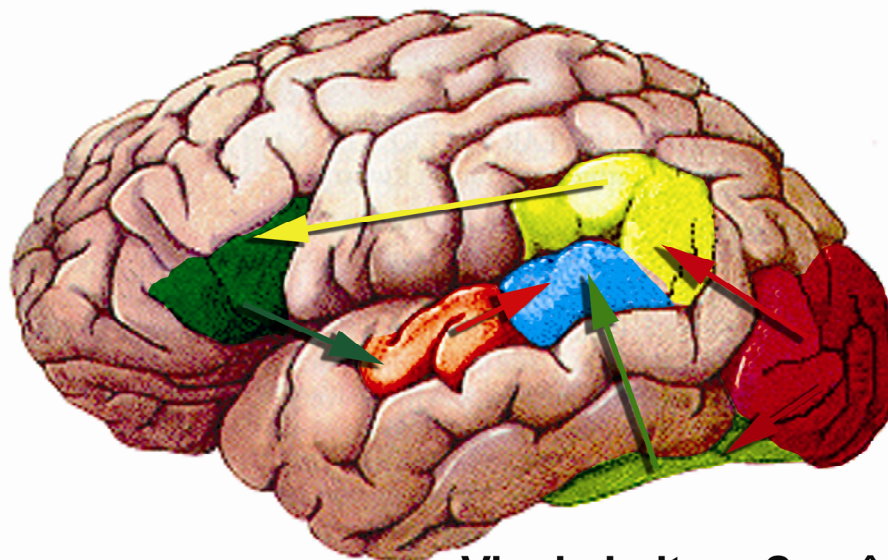
Dessa forma, na leitura da palavra “BOLA”, neurônios de áreas visuais parietais identificam a imagem BO e se associam aos neurônios da área de Broca que controlam as áreas envolvidas com o controle da musculatura da orofaringe responsável pela produção do som /bo/ (Burton, 2001; Booth et al., 2006; Fiez et al., 2006). A ativação desses neurônios motores deve agora ativar neurônios da área auditiva verbal que são ativados quando o indivíduo reconhece oralmente o som /bo/ produzido por ele mesmo. Em seguida, o mesmo processo deve ocorrer para identificação da imagem LA, produção do som /la/ e para o reconhecimento sonoro /la/. Nesse processo de leitura, a compreensão da palavra só ocorrerá se os neurônios da área de Wernicke, que representam o significado da bola, receberem conexões dos neurônios que reconhecem o som /bola/ ou os dos neurônios que reconhecem os sons /bo/ e /la/ (Figura 6). Propomos que nesse modelo de leitura a compreensão do significado pode ser prejudicada caso o leitor não crie conexões dos neurônios que reconheceram o som /bo/ e o som /la/ com os neurônios de representação da bola em Wernicke. Por isso, nos deparamos com situações em que o aluno fona a sílaba /bo/, depois a sílaba /la/ e quando indagado sobre o que acabou de ler, o aluno responde “Não sei!”.

### ***Leitura fonológica x semântica***

Propomos que diversas sub-redes possam operar paralelamente em mais de uma manifestação organizacional da rede. Assim, ambos os processos de leitura podem estar sendo recrutados ao mesmo tempo pelo leitor fazendo com que a rede se organize de maneira mais complexa, apresentando vários padrões de ativação cerebral ao mesmo tempo.



## Via de Leitura Fonológica Grafema-Fonema



## Via de Leitura Semântica

Figura 6 – *Dual-route*

**Via de Leitura Fonológica Grafema-Fonema:** neurônios occipitais (vinho) que identificam as imagens das palavras se conectam a neurônios parietais (amarelo) que identificam as letras e sílabas e ativam os neurônios de Broca (verde), os quais produzem os sons das letras e sílabas que são reconhecidos pela área auditiva verbal (vermelho), a qual ativa neurônios de Wernicke (azul) relacionados com o significado da palavra fonada.

**Via de Leitura Semântica:** neurônios occipitais (vinho) que identificam as letras da palavra se conectam a neurônios do giro fusiforme (verde) que ativam os neurônios de Wernicke (azul) relacionados com o significado da palavra.

### 1.2.6 Dificuldades no aprendizado da leitura

Desde o primeiro modelo de Wernicke em 1874, tem-se associado os distúrbios no desenvolvimento da linguagem a problemas na conexão entre áreas clássicas envolvidas com a linguagem: Broca e Wernicke (Mesulam e Catani, 2008). No entanto, a partir dos modelos e teorias atuais sobre o funcionamento mais global do cérebro no processamento da linguagem

tanto oral quanto escrita, propomos analisar as dificuldades no aprendizado da leitura a partir da organização cerebral em rede, considerando as duas principais vias de leitura.

Seguindo o modelo *Dual-Route* de Coltheart, vários trabalhos vêm identificando basicamente dois tipos de distúrbios no aprendizado da linguagem escrita, cunhando assim a dislexia fonológica e a dislexia superficial, aqui denominada de dislexia semântica (Coltheart et al., 1993; Hanley e Gard, 1995; Manis et al., 1996; Temple, 2006).

### **1.2.6.1 Dislexia semântica**

Friedmann e Lukov (2008) propõem que a deficiência na via semântica pode resultar em três padrões de comportamento da leitura. Por um lado, os três tipos apresentariam o padrão clássico de leitura encontrado em indivíduos com déficit na leitura semântica. Esse padrão inclui a necessidade de leitura oral e a dificuldade na correta fonação de palavras com uma ortografia que permita mais de uma representação oral. Por outro lado, eles diferem no desempenho da decisão lexical, ou seja, decidir se uma palavra pertence ao vocabulário da sua língua ou não, e na compreensão de palavras homófonas, ou seja, palavras com mesma fonação, mas significados distintos possuindo ortografias idênticas “a janta / ele janta” ou semelhantes “concerto / conserto”.

O primeiro comportamento descreve uma situação em que o indivíduo se torna incapaz de criar um léxico ortográfico, ou seja, não consegue estabelecer uma memória das formas das palavras de sua língua. Esse indivíduo terá dificuldades em identificar um conjunto de letras como sendo uma palavra do seu léxico caso a pronuncie errado resultando em uma palavra que não existe na língua oral (barato pronunciado como /barrato/). Ele também terá dificuldades em utilizar essa identificação para acessar o significado correto da palavra, devendo-se basear unicamente na transcrição grafema-fonema. Nesse caso, ele não terá problemas em

reconhecer o correto significado de uma palavra como “banana”, mas terá dificuldades em reconhecer o correto significado de palavras como “concerto / conserto”. Esse indivíduo possui problemas na *Word Form Area*, ou nas conexões necessárias entre neurônios visuais do occipital e neurônios ventrais do lóbulo temporal.

O segundo comportamento descreve um indivíduo que é capaz de construir um léxico ortográfico, mas tem dificuldades em acessar o significado das palavras desse léxico. Assim, mesmo fonando erroneamente uma palavra, ele é capaz de dizer se essa palavra pertence ou não ao seu léxico, mas terá dificuldade em reconhecer o seu significado, pois a via semântica conectando a forma da palavra ao seu significado está danificada, estando sua representação das formas da palavra intacta. Esse indivíduo possui problemas na conexão entre neurônios ventrais do lóbulo temporal e neurônios da área de Wernicke.

Para justificar o terceiro possível comportamento de leitura em indivíduos com déficit na via semântica, apresentamos uma possível terceira via de leitura, a qual realizaria a conversão direta da forma escrita da palavra para a sua forma oral, a partir da qual o leitor poderia acessar o seu significado. Essa via é denominada de via de leitura fonológica direta e envolveria uma conexão direta entre a *Word Form Area* e a área de Broca (Southwood e Chatterjee, 2000).

O terceiro comportamento de leitura em indivíduos com déficit na leitura semântica descreve assim um indivíduo que é capaz de identificar uma palavra como pertencente ao seu léxico assim como é capaz de reconhecer o seu significado, mas tem dificuldades em acessar a forma oral da palavra. Isso decorre de uma desconexão entre a entrada lexical ortográfica e a saída lexical fonológica, tendo preservada a via entre a entrada lexical ortográfica e sua representação semântica. Esse tipo de comportamento é evidenciado quando o indivíduo, apesar de reconhecer o significado da palavra necessita realizar a leitura oral, ou seja, a

transcrição grafema-fonema, para fonar a palavra. Esse indivíduo possui problemas na conexão entre neurônios da *Word Form Area* e neurônios de Broca.

#### **1.2.6.2 Dislexia fonológica grafema-fonema**

Como visto acima, o processo de leitura fonológica grafema-fonema envolve inicialmente a ativação de neurônios de occipito-parietais a partir da imagem das letras e sílabas. Esses neurônios devem se conectar a neurônios da área de Broca para a fonação dessas letras e sílabas. Após a fonação, neurônios do córtex auditivo verbal são ativados e se conectam a neurônios da área de Wernicke envolvidos com a significação da palavra.

Propomos que esse processo esteja mais vulnerável a sofrer um distúrbio por envolver um número maior de *clusters* em diversas áreas cerebrais irrigadas pela artéria cerebral média, a qual pode sofrer lesões durante... Além disso, esse tipo de leitura exige que o processamento fonológico da criança não esteja alterado e que ela ainda tenha uma consciência fonológica acerca das unidades fonológicas mínimas das palavras. Analisaremos as etapas desse processo para discutirmos os possíveis fatores responsáveis pelas dificuldades de leitura bem como suas causas neurológicas. Dentro desse processo, a dificuldade de leitura pode ser ocasionada pelos fatores visual, e/ou visuo-fonológico, e/ou fonológico.

O fator visual envolveria distúrbios na identificação das unidades gráficas que podem ser convertidas em fonemas ou grupos fonêmicos que seriam ocasionados por problemas nos neurônios occipito-parietais.

O fator visuo-fonológico envolveria distúrbios na associação entre a forma gráfica das letras e sílabas e suas respectivas representações fonológicas, devido a má formação das conexões entre neurônios parietais e da área de Broca. Nesse caso, o indivíduo pode não

associar adequadamente a forma visual das letras ou sílabas aos seus respectivos sons produzidos pelos neurônios de Broca, mesmo tendo desenvolvido os *clusters* para fonação desses sons (Tree e Kaya, 2006).

O fator fonológico envolveria: distúrbios na produção dos fonemas da palavra ocasionados pela má formação dos *clusters* da área de Broca; e/ou distúrbios no processamento auditivo dos fonemas das palavras, por déficits dos neurônios da área auditiva verbal; e/ou distúrbios na segmentação fonológica das palavras por não estabelecer as conexões necessárias entre a área auditiva verbal e a área de Wernicke (Burton, 2001; Georgiewa et al., 2002; Rapcsak et al., 2008).

Considerando-se esse quadro, a criança pode ter problemas em qualquer uma dessas etapas: não identificando as unidades gráficas; e/ou identificando as unidades gráficas, mas não conseguindo associá-las aos seus respectivos fonemas; e/ou associando as unidades gráficas a fonemas trocados; e/ou associando aos fonemas corretos, mas não conseguindo acessar sua semântica.

### **1.2.6.3 Dislexia semântica e fonológica**

Apesar de serem feitas essas distinções entre leitura fonológica e semântica, a dislexia pode ser causada por déficits em ambas as vias de leitura (Ziegler et al., 2008).

Southwood e Chatterjee (1999, 2001) acompanharam um paciente que apresentava distúrbios na produção e compreensão da linguagem oral espontânea, bem como déficits na transcrição grafema-fonema e erros na escolha do significado das palavras lidas, indicando assim distúrbios em ambas as vias de leitura, fonológica e semântica. Dentro desse quadro, esse paciente apresentava maior facilidade em compreender neologismos na leitura do que na

fala espontânea, além de apresentar um número maior de erros fonológicos na nomeação de figuras do que na leitura oral. Esse padrão de erros levou os autores a sugerirem que a via semântica, a via fonológica direta e a via fonológica grafema-fonema seriam ativadas simultaneamente durante a leitura e convergiriam na saída lexical fonológica restringindo assim as possíveis opções fonológicas que representassem o significado da palavra escrita. Os erros cometidos na leitura ocorreriam porque a saída lexical fonológica receberia informações ambíguas devido a degradação das três vias. No entanto, com a sua recuperação seus erros na identificação do significado das palavras, na nomeação de figuras e na leitura de pseudo-palavras diminuiriam enquanto que os erros fonológicos na fala permaneceram iguais. A recuperação parcial nas três vias de leitura teria aumentado a restrição na saída lexical fonológica das possíveis opções de fonação, melhorando o seu desempenho de leitura semântica e fonológica.

Cao et al. (2008) analisaram a conectividade entre três áreas do hemisfério esquerdo envolvidas com a leitura (giro frontal inferior – área de Broca, lóbulo parietal inferior – giro Angular e giro fusiforme – *Word Form Area*) e do giro frontal medial bilateral durante atividades de identificação de rimas em palavras apresentadas visualmente. Atividades que apresentavam um maior conflito envolviam tanto palavras com ortografias semelhantes e fonologias distintas (*pint-mint*) quanto fonologias semelhantes e ortografias distintas. Atividades que apresentavam menos conflito envolviam ortografias e fonologias semelhantes (*dime-lime*) ou ortografias e fonologias distintas (*staff-gain*). A modulação da atividade cerebral do giro fusiforme para o lóbulo parietal inferior, bem como a modulação da atividade cerebral do giro fusiforme e do lóbulo parietal inferior para o giro frontal inferior era maior no grupo controle do que em crianças com dificuldades de leitura apenas nas atividades com maior conflito. A modulação da atividade cerebral do giro frontal inferior para o lóbulo parietal inferior, do giro medial frontal para o lóbulo parietal inferior e do lóbulo parietal inferior para o giro medial frontal foram positivamente correlacionadas com a habilidade de leitura apenas no grupo controle. Esses resultados

sugerem que as crianças com dificuldades de aprendizagem têm dificuldade em integrar informações ortográficas, processadas tanto pelo giro fusiforme quanto pelo lóbulo parietal inferior, com informações fonológicas processadas pelo giro frontal inferior, apresentando assim distúrbio tanto na via semântica quanto na via fonológica.

### **1.3 Sistema executivo**

Como visto, tanto o aprendizado quanto a execução de atividades de leitura dependem da combinação de diversas sub-redes cujos *clusters* podem estar processando diversos tipos de informações sensoriais e concomitantemente resgatando informações semânticas memorizadas dentro da própria rede na forma de conexões entre neurônios de diversas áreas envolvidas com as características de significação das informações sensoriais processadas. Essas combinações de conexão entre diversos *clusters* de diversas sub-redes são organizadas em parte pela conectividade dos nodos *hub*, mas podem também ser auxiliadas por *clusters* específicos que influenciariam a maneira como essas combinações se alteram em um dado momento durante a execução de uma tarefa. Dentro dessa proposição, abordaremos um conceito corrente em psicologia e neurociência acerca desse processo de gerenciamento da informação: o sistema executivo.

O sistema executivo é um sistema cerebral que controla e gerencia diversos processos cognitivos, podendo ser denominado também de função(ões) executiva(s) ou de controle cognitivo. A definição desse sistema engloba um conjunto definido de funções cerebrais responsáveis basicamente: a) em orientar a atenção para informações sensoriais relevantes; b) pelo planejamento de ações; c) pela escolha de estratégias; d) pela tomada de decisão; e e) pela iniciação de ações apropriadas e inibição de ações não apropriadas.

O conceito de sistema executivo começou a ser desenvolvido a partir de estudos focados no controle da atenção sensorial e na geração de respostas motoras a esses estímulos sensoriais. Shiffrin e Schneider (1977) discutem a diferença entre o que seriam processos “automáticos” e “controlados” abordando a noção de atenção seletiva. Em 1990, Posner e Petersen propuseram que houvesse um ramo separado do sistema atencional denominado “executivo” que seria responsável em focar a atenção em aspectos específicos do ambiente.

A partir desses autores, surgiu o consenso de que o controle cognitivo fosse realizado por neurônios localizados no córtex pré-frontal (CPF). Em 2001, Miller e Cohen argumentaram que o controle cognitivo fosse a principal função do CPF e que esse controle fosse implementado pelo aumento de sensibilidade de neurônios motores e sensoriais recrutados por elementos relevantes do ambiente externo, gerando assim uma atenção seletiva. Em um parágrafo chave, os autores argumentam que:

... the PFC serves a specific function in cognitive control: the active maintenance of patterns of activity that represent goals and the means to achieve them. They provide bias signals throughout much of the rest of the brain, affecting not only visual processes but also other sensory modalities, as well as systems responsible for response execution, memory retrieval, emotional evaluation, etc. The aggregate effect of these bias signals is to guide the flow of neural activity along pathways that establish the proper mappings between inputs, internal states, and outputs needed to perform a given task.

Os autores se basearam em uma teoria acerca da atenção visual apresentada por Desimone e Duncan, 1995, segundo a qual a percepção visual de uma cena seria o resultado de uma competição entre várias características dessa modalidade sensorial. A atenção visual



seletiva agiria para criar um *bias* dentre essa competição em favor de determinadas características. Por exemplo, imaginando que você esteja procurando por alguém que estivesse com uma blusa vermelha em meio a uma multidão, você seria capaz de estreitar o foco de sua atenção aumentando seletivamente a sensibilidade dos neurônios responsáveis em identificar a cor vermelha, de tal maneira que esses neurônios tenham uma maior probabilidade de gerar um potencial de ação. Segundo Miller e Cohen (2001), esse mecanismo de atenção seletiva é, na realidade, apenas um caso específico do controle cognitivo – no qual o *bias* ocorre no domínio da modalidade sensorial. O CPF, segundo os autores, poderia exercer controle sobre neurônios de entrada (sensorial) ou de saída (motor), bem como sobre neurônios envolvidos na memória semântica ou episódica, ou ainda nas emoções. O controle cognitivo seria, assim, mediado por uma conexão recíproca entre o CPF e os cortes sensorial, motor e límbico. Seguindo essa abordagem o termo “controle cognitivo” pode ser aplicado a qualquer situação na qual o *bias* de um sinal seja utilizado para promover as respostas apropriadas às tarefas ou estímulos apresentados.

### **1.3.1 Memória de trabalho**

Vinculada à noção de controle executivo da informação, está a noção de memória de curto-prazo. Esse tipo de memória diz respeito à capacidade de retermos, temporariamente, informações necessárias para a consolidação de uma ação ou processo cognitivo. Unindo-se esses dois conceitos surgiu uma teoria acerca de como o cérebro organizaria as informações sensoriais apresentadas em função das possíveis respostas a essas informações. Essa teoria de gerenciamento da informação foi cunhada de memória de trabalho.

Baddeley e Hitch (1974) introduziram e popularizaram um modelo de memória de trabalho que envolvia basicamente três componentes: dois “*sistemas de apoio*” responsáveis em manter informações por um curto prazo de tempo, definindo uma memória de curto-prazo, e

uma “*central executiva*” responsável em supervisionar a integração dessas informações e em coordenar os *sistemas de apoio*. Um dos *sistemas de apoio*, o “*laço fonológico*”, retém a informação fonológica prevenindo sua extinção através de uma articulação contínua do seu conteúdo, atualizando a informação em um *looping*, permitindo assim a memorização de um número de telefone conforme alguém o fique repetindo para si mesmo. Outro dos *sistemas de apoio*, o “*armazenamento viso-espacial*”, armazena informações visuais e espaciais. Ele pode ser utilizado, por exemplo, para gerar e manipular, mentalmente, imagens de objetos e mapas geográficos. A *central executiva* é responsável em direcionar a atenção para informações relevantes, suprimir informações irrelevantes e ações não apropriadas, e em coordenar processos cognitivos quando mais de uma tarefa precisa ser executada ao mesmo tempo. Em 2000, Alan Baddeley ampliou o seu modelo adicionando um quarto componente, o “*buffer episódico*”, que criaria e manteria na memória de curto-prazo representações polissensoriais integrando informações fonológicas, visuais e espaciais, e possivelmente informações não englobadas pelos *sistemas de apoio*, como informações semânticas e musicais. Esse componente é denominado episódico por unir informações em uma representação episódica única, assemelhando-se ao conceito de memória episódica, exceto pelo fato do “*buffer episódico*” ser um armazenamento temporário.

### **1.3.2 Memória de longo-prazo**

Propomos que a distinção entre memória de curto-prazo e longo-prazo é feita, na realidade, no nível da observação humana sobre as manifestações motoras em relação às informações sensoriais e não no nível dos sistemas neurológicos. Propomos que memória seja, em termos de conectividade neural dentro de uma rede, o estabelecimento de conexões entre determinados neurônios e sua modelagem temporal seja o fortalecimento ou enfraquecimento dessas conexões através da eficiência sináptica, ou seja, do número de vesículas de neurotransmissores, de receptores e de pontos de contato entre os neurônios pré e pós-

sináptico. De acordo com a intensidade dessa sinapse estabelece-se o período de tempo em que essa conexão permanecerá facilitada, ou ativa. Uma morfologia sináptica alterada localmente, manterá a conexão facilitada por um período de tempo considerado curto pela nossa percepção temporal, enquanto que uma alteração envolvendo a fisiologia celular garantirá uma facilitação sináptica durante um período de tempo considerado longo. Assim, toda e qualquer conexão pode ser temporizada dentro de uma faixa contínua desde milésimos de segundo até toda a duração de vida do indivíduo, estando os termos curto e longo-prazo sujeitos à limitação lingüística da descrição do tempo.

Propomos que durante o aprendizado da linguagem escrita, a organização da rede neural dependa do gerenciamento de informações envolvendo uma memória de curto-prazo para modificar suas memórias de longo-prazo já existente, ou ainda criar novas memórias de longo-prazo.

### **1.3.3 Estruturas de recuperação**

Baseando-se em estudos mnemônicos e em indivíduos peritos em cálculo mental, Chase, Ericsson e Staszewski propuseram que a habilidade desses indivíduos envolveria o que os autores denominaram de *skilled memory theory*, teoria a qual engloba três princípios: a) a informação mantida na memória de curto-prazo é codificada através de numerosas e elaboradas pistas relacionadas ao conhecimento prévio, ou seja, memória de longo-prazo; b) especialistas desenvolvem estruturas de recuperação, que seriam estruturas neurais para indexação de novas informações na memória de longo-prazo; e c) o tempo requerido para codificação e resgate da informação decresce com a prática (Chase e Ericsson, 1982; Ericsson e Staszewski, 1989; Staszewski, 1990). As estruturas de recuperação podem ser comparadas com o *method loci*, segundo o qual indivíduos criariam mentalmente um conjunto de ambientes aos quais associariam as informações apresentadas no formato de objetos desse ambiente,

utilizando-se desses ambientes como pistas para recuperação dos objetos e seus respectivos conteúdos.

Propomos que conforme aprendemos e desenvolvemos nossa habilidade de leitura, tornamo-nos especialistas nessa tarefa. Dessa forma, toda e qualquer pessoa seria capaz de criar estruturas de recuperação. Dentro do modelo de funcionamento cerebral em rede, essas estruturas podem ser representadas pela maneira como os *clusters* são compostos e pelas diferentes combinações possíveis de relacionamento entre esses *clusters*, permitindo assim o desencadeamento de uma ampla gama de informações inter-relacionadas, através da ativação de apenas um dos nodos de um dos *clusters* envolvidos com uma estrutura de recuperação.

A partir da *skilled memory theory* e baseando-se na análise dos processos neurais envolvidos com a compreensão de um texto escrito, Ericsson, Patel e Kintsch, propuseram que o conceito de memória de trabalho devesse incorporar o uso de memórias de longo-prazo também (Ericsson e Kintsch, 1995; Kintsch et al., 1999). Segundo a proposição dos autores, os processos cognitivos são vistos como uma seqüência de estados neurais estáveis que resultam em produtos finais de processamento. Durante o aperfeiçoamento de uma determinada habilidade cognitiva, habilidades de memória permitem que esses produtos finais de processamento sejam armazenados em uma memória de longo-prazo e permaneçam acessíveis diretamente por meio de pistas de recuperação fornecidas pela memória de curto-prazo. Dessa forma, especialistas, armazenariam informações em memórias de longo-prazo através de dois mecanismos: elaboração de padrões e esquemas de memória de longo-prazo e uso de estruturas de recuperação dessa memória. Um leitor seria, dessa forma, capaz de criar uma estrutura episódica textual durante a compreensão de um texto se o texto for bem escrito e seu conteúdo familiar. Propomos que a memória de trabalho poderia lidar com conhecimentos prévios (memória de longo-prazo) armazenados por determinados *clusters* que seriam ligados por *hubs* de alta conectividade para se recriar a originalidade do texto, através de uma nova

combinação entre *clusters* e eventualmente a modelagem de novos *clusters* (estruturas de recuperação).

### 1.3.4 Localizacionismo cerebral

Fuster (1973) registrou a atividade elétrica de neurônios no CPF de primatas enquanto executavam uma tarefa de pareamento com atraso. Nessa tarefa, o primata observa o experimentador colocar comida embaixo de um entre dois copos idênticos. Cobre-se os copos por um determinado período de tempo. Após esse período, os copos são descobertos e o primata pode pegar a comida debaixo do copo. Sucesso na primeira tentativa de escolha do copo correto depende do primata guardar a localização da comida na memória durante o período de atraso. Fuster encontrou neurônios no córtex pré-frontal que disparam principalmente durante o período de atraso, sugerindo que eles representem a localização da comida enquanto sua visão não estivesse disponível. Pesquisas posteriores mostraram esse tipo de ativação também em neurônios do córtex parietal posterior, do tálamo, do núcleo caudado e do globo pálido (Honey et al., 2002; Ashby et al., 2005; Mottaghy, 2006). Propomos assim que o CPF ajudou a manter ativas as conexões dos neurônios que identificaram a posição da comida enquanto o primata estava vendo os copos, influenciando assim, através de um neurônio *hub*, a organização da sub-rede responsável pela localização de objetos no espaço.

O envolvimento do CPF em diversas tarefas que requerem o funcionamento das funções executivas tem levado pesquisadores a argumentar que o papel dessa área cerebral na memória de trabalho esteja relacionado mais ao controle da atenção, à seleção de estratégias, à manipulação da informação, mas não à retenção da informação em si. A retenção seria atribuída a áreas mais posteriores incluindo o córtex parietal (Curtis e D'Esposito, 2003; Postle, 2006).

Mapeamentos cerebrais também têm mostrado que as funções executivas da memória de trabalho podem se distribuir em diferentes áreas do CPF. Estudos que investigam a retenção de informações a curto prazo indicam que diferentes áreas frontais são ativadas em relação a diferentes tipos de informação: retenção de informações verbais ativaria Broca e as áreas suplementar e pré-motora do hemisfério esquerdo; retenção de informações espaciais ativaria o córtex pré-motor do hemisfério direito; por fim retenção de informações referentes a objetos ativaria outras áreas do córtex frontal. Além da retenção de informação a curto-prazo, o controle cognitivo necessário para a execução de uma tarefa ainda dependeria da atenção seletiva e do gerenciamento dos eventos dessa tarefa, habilidades essas possíveis pela participação de neurônios do córtex pré-frontal dorso-lateral na organização estrutural momentânea da rede durante a execução da tarefa. (Smith e Jonides, 1999).

Quanto a lateralidade da ativação cerebral em relação ao controle cognitivo, Smith et al. (1998) propuseram que houvesse uma tendência de tarefas espaciais em recrutar mais áreas do hemisfério direito e de tarefas envolvendo a linguagem e objetos recrutar mais áreas do hemisfério esquerdo. A ativação durante tarefas de memória verbal poderia, segundo o autor, ser dividida em um componente que refletiria a manutenção da informação no córtex parietal posterior esquerdo e um componente refletindo o resgate fonológico no córtex frontal inferior esquerdo, ou seja, área de Broca. Propomos que essa mesma tarefa quando ilustrada visualmente envolva os mesmos mecanismos neurais no hemisfério direito.

### **1.3.5 Controle executivo, memória de trabalho e leitura**

Swanson (1999) comparou o desempenho entre crianças com distúrbios de aprendizagem (**DA**) e crianças normais de mesma idade do grupo **DA** em atividades que mediam o processamento fonológico na memória de curto-prazo, a memória de longo-prazo e o

controle executivo, mostrando que as crianças **DA** tiveram um desempenho inferior nos três tipos de atividade. Já em 2007, Swanson e Jerman haviam acompanhado por três anos um grupo de crianças com (**DL**) e um grupo de crianças sem (**NO**) dificuldades de leitura, investigando seu desenvolvimento em atividades que envolviam a *central executiva* e a memória de curto-prazo e comparando o desempenho nessas atividades com o desenvolvimento da habilidade de leitura. Os resultados mostraram que crianças **NO** tiveram um desenvolvimento superior às crianças **DL** em ambas as habilidades da memória de trabalho, mas principalmente em atividades que envolviam a *central executiva*. Os autores também demonstraram que o desempenho nessas atividades se correlacionou com o desenvolvimento da habilidade de leitura em ambos os grupos, sugerindo que deficiências principalmente no desenvolvimento do componente executivo da memória de trabalho repercutiriam nas dificuldades de leitura. Cohen-Mimran e Sapir (2007) também mostraram que tanto a *central executiva* quanto a memória de curto-prazo tiveram uma correlação na diferença entre crianças com e sem dificuldades de leitura, tendo, no entanto a *central executiva* uma maior influência nessas dificuldades.

Profissionais do “Centre for Working Memory and Learning” da Universidade de Londres têm desenvolvido vários trabalhos procurando evidenciar que o sistema executivo e a memória de trabalho estejam correlacionados com o desempenho do aprendizado na alfabetização e na matemática (Cowan e Alloway, 2008). Em um estudo envolvendo a classificação de 3.000 crianças da Educação Infantil, 10% daquelas crianças matriculadas em classes regulares foram identificadas como portadoras de distúrbios da memória de trabalho. Averiguando-se seu histórico escolar, 2/3 dessa população tiveram um desempenho abaixo da média em linguagem e matemática (Alloway et al., 2008). Outros trabalhos têm confirmado que a capacidade de memória de trabalho e não o quociente de inteligência prediz o aprendizado alcançado dois anos depois (Alloway, 2008). Crianças com distúrbios de aprendizado como dislexia e Transtorno do Déficit de Atenção e Hiperatividade (**TDAH**) apresentam um padrão semelhante

(Alloway e Gathercole, 2006). Características comuns dos distúrbios da memória de trabalho na sala de aula incluem o fracasso em lembrar instruções e dificuldades para conclusão de atividades educativas, pondo em perigo o futuro sucesso acadêmico (Gathercole e Alloway, 2008).

Shaywitz et al. (2001) investigaram três dimensões importantes do controle atencional (atenção seletiva, atenção dividida, e função executiva) utilizando tarefas envolvendo o processamento ou de palavras escritas, ou de palavras faladas ou de ambas. A atenção seletiva resultou no aumento da ativação em áreas parietais e frontais inferiores do hemisfério esquerdo, enquanto que a atenção dividida resultou em um aumento adicional da atividade nessas mesmas áreas, além de aumentar também a atividades em áreas homólogas do hemisfério direito. A função executiva (medida durante uma tarefa complexa dependendo de tomadas de decisão seqüenciais) resultou em um aumento da atividade em áreas frontais em relação às outras condições. Os autores argumentam, segundo seus achados, que aspectos funcionais específicos do controle atencional envolvido com o processamento da linguagem envolve sistemas corticais esparsamente distribuídos, porém especializados à atividade apresentada. Os mecanismos associados com o controle da seleção perceptual recrutariam áreas parietais e frontais inferiores enquanto que as funções executivas recrutariam áreas específicas do córtex frontal.

#### **1.4 Proposição do trabalho de tese**

Propomos que a organização neural do cérebro possa ser vista como um Sistema Inteligente de Processamento Distribuído e comparada com as topologias das redes *small-world*, *scale-free* e *broad-scale*. Uma rede que englobe esses três conceitos acerca da distribuição das conexões entre neurônios deve possuir grupos de neurônios com uma maior conectividade entre si, formando assim *clusters* especializados no processamento de



determinada informação de acordo com sua natureza sensorial e frequência. Esses *clusters* devem guardar a possibilidade de se conectarem com qualquer outro *cluster* da rede através de neurônios que funcionariam como *hubs* de conectividade ilimitada, ou seja, capazes de conectarem todos os *clusters* da rede com qualquer outro *cluster*, através de uma combinação de *hubs*. Esses *clusters* também podem compartilhar seus processamentos com outros *clusters* através de *hubs* com conexões limitadas, estabelecendo-se assim sub-redes especializadas em determinadas funções cognitivas.

Dentro dessa rede propomos que a linguagem oral surge da interação entre sub-redes, denominadas de sub-redes lingüísticas, desenvolvidas especificamente para controle das ações motoras necessárias para fonação e para processamento das informações sensoriais geradas pelos sons verbais. Além disso, as sub-redes lingüísticas devem estabelecer conexões com outras sub-redes, denominadas de significação, para que as informações sensoriais geradas por elas possam transferir informações sobre a dinâmica das sub-redes de significação do indivíduo falante para o ouvinte, o qual poderá utilizar essas informações para alterar a organização das suas sub-redes.

Vários estudos vêm mapeando no cérebro as áreas que estariam envolvidas com cada uma dessas sub-redes, lingüísticas e de significação e têm mostrado que a atividade dessas redes é modulada por outras sub-redes envolvidas com as funções executivas, entre as quais o controle da atenção. Esses estudos têm mostrado também a influência dessas outras redes no desempenho lingüístico.

Assim propomos investigar como o cérebro organizaria essas diversas sub-redes em um processamento paralelo responsável pela habilidade de leitura de palavras e frases simples (contendo apenas uma oração) em um grupo de crianças consideradas normais e em um grupo de crianças consideradas como portadoras de dificuldades no aprendizado da leitura.

## **1.5 Identificação das dificuldades de leitura em escolas públicas do município de Mogi das Cruzes**

Em 2006 teve início um projeto de pesquisa, financiado pela Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp – Processo Nº 04/00743-4) em nome da Disciplina de Informática Médica da Faculdade de Medicina da USP, e desenvolvido na cidade de Mogi das Cruzes. Esse projeto propôs a elaboração e aplicação de questionários e softwares educativos para avaliação das habilidades de linguagem e de matemática, bem como para desenvolvimento dessas habilidades envolvendo alunos indicados por seus professores como portadores de dificuldades de aprendizagem.

A equipe da Secretaria Municipal de Mogi das Cruzes escolheu quatro escolas que se localizam em áreas de maior risco de exclusão social. Os professores de cada uma dessas escolas, em conjunto com a direção e coordenação, indicaram 100 alunos que apresentavam dificuldades de aprendizagem da leitura e defasagem em relação à sua classe, compreendendo as quatro primeiras séries do Ensino Fundamental, e 25 alunos sem histórico de dificuldades de aprendizado para comporem os grupos de estudo e controle respectivamente.

As ações do projeto incluíam:

- a) a coleta de informações acerca da história de vida pregressa do aluno através de um questionário de Anamnese;
- b) a avaliação das habilidades de leitura através de um conjunto de atividades informatizadas;
- c) o mapeamento cerebral com o uso do eletroencefalograma; e

d) o atendimento pedagógico das crianças portadoras de dificuldade de aprendizagem com o uso de um software educativo.

Selecionadas as escolas e os alunos, foi montado em cada uma das escolas um laboratório de informática com seis computadores. Profissionais indicados pela secretaria de educação foram contratados para desenvolverem, nesses laboratórios, as atividades programadas pelos coordenadores do projeto. Essas atividades incluíram:

a) o cadastro dos alunos em um sistema de base de dados, contendo informações como idade, série e queixa relatada pelo professor que o indicou;

b) a entrevista com as mães dos alunos do grupo de estudo e de controle para coleta dos dados de anamnese;

c) a avaliação dos alunos do grupo de estudo e de controle com atividades informatizadas de linguagem e matemática;

d) o registro eletroencefalográfico de uma parcela de alunos do grupo de estudo e de controle;

e) o agrupamento dos alunos do grupo de estudo em 4 níveis de acordo com o seu desempenho nas atividades de avaliação; e

f) o atendimento dos alunos do grupo de estudo com atividades informatizadas de linguagem e matemática.

Uma estatística descritiva do desempenho dos alunos do grupo de estudo e de controle confirmou a indicação dos professores, uma vez que o desempenho dos alunos, indicados como portadores de dificuldades de aprendizagem, foi estatisticamente menor do que o desempenho dos alunos indicados como normais. As análises estatísticas entre os dados de anamnese e desempenho dos alunos nas atividades de avaliação mostraram uma associação entre fatores da vida pregressa do aluno e seu índice de erro nas atividades. A descrição e

discussão desses dados constam nos relatórios científicos entregues à Fapesp e em trabalho aceito para apresentação no Encontro Anual da Associação Americana de Pesquisa em Educação em 2009. No presente trabalho, nos focaremos em apresentar e discutir apenas os resultados do registro eletroencefalográfico durante a realização das atividades de leitura.

## 2. Objetivo

Utilizando-se do registro eletroencefalográfico, realizado em 40 alunos do grupo de estudo e 40 alunos do grupo de controle, do projeto Fapesp nº 04/00743-4, enquanto solucionavam as atividades de avaliação de leitura, propõe-se no presente trabalho:

- 1) realizar o mapeamento cerebral obtido com a técnica desenvolvida por Foz et al. (2002) e Rocha et al. (2005) para melhor compreender a dinâmica cerebral do aluno normal e com dificuldades de aprendizagem da leitura; e
- 2) utilizar os dados assim obtidos para validar os modelos propostos para descrição da dinâmica das redes neurais envolvidas nos processos de aprendizagem da leitura em crianças normais e com dificuldades de aprendizagem.

### 3 - Metodologia

O presente trabalho se propõe a realizar e analisar o mapeamento cerebral registrado, através do projeto nº 04/00743-4 da Fapesp, em uma parcela dos 400 alunos indicados pelos seus professores como portadores de dificuldades de aprendizagem da leitura, grupo (**DL**), e dos 200 alunos indicados como normais, grupo (**NO**). No referido projeto, todos os alunos de ambos os grupos realizaram as mesmas atividades de avaliação inicial da linguagem que incluíam o reconhecimento de palavras, a leitura de palavras e a leitura de frases. Essa avaliação inicial serviu de base para a subdivisão de cada um desses grupos em dois outros subgrupos que correspondessem a dois diferentes graus da habilidade de leitura: a leitura de palavras (grupo **DL1** e **NO1**) e a leitura de frases (grupo **DL2** e **NO2**).

Em seguida, os coordenadores do projeto realizaram o registro eletroencefalográfico em 20 alunos de cada um desses subgrupos enquanto eles realizavam os mesmos tipos de atividades da avaliação inicial, mas com palavras e frases diferentes. O número de acertos e erros desses alunos nessas atividades e os trechos do eletroencefalograma equivalentes a dois segundos antes de cada tomada de decisão foram os dados utilizados pelo presente trabalho.

Com os referidos dados, o presente trabalho utilizou a técnica de mapeamento cerebral descrita em Foz et al. (2002) e Rocha et al. (2005) que calcula em um primeiro momento o valor de entropia associado a cada eletrodo do eletroencefalograma durante a solução de uma dada atividade cognitiva. Com esse valor de entropia se realiza então uma análise fatorial para se desenhar os Mapas Cognitivos Cerebrais (**MCCs**), bem como se realiza uma análise da estrutura de rede, buscando-se a caracterização das topologias *scale-free* e *broad-scale*.

As atividades utilizadas, os critérios para subdivisão dos grupos, a técnica de mapeamento cerebral, a geração dos **MCCs** e a análise da estrutura de rede são descritos a seguir.

### 3.1 Atividades de leitura

Inicialmente, os alunos ouviram uma história ilustrada de dez cenas com seus respectivos textos acerca da rotina escolar (Figura 7A).

Após essa apresentação, os alunos dos grupos **NO1** e **DL1** realizaram as atividades de:

- a) Reconhecimento de Palavras (**RP**), associando a forma escrita da palavra modelo a uma dentre cinco opções de respostas que incluíam a forma escrita da palavra e a ilustração do seu significado (Figura 7B);
- b) Leitura de Palavras (**LP**), associando a forma escrita da palavra modelo a uma dentre cinco opções de significado conforme ilustrado por figuras (Figura 7C).

Enquanto que os alunos dos grupos **NO2** e **DL2** realizaram a atividade de:

- c) Leitura de Frases (**LF**), escolhendo uma dentre cinco cenas ilustradas da história como significado da frase modelo (Figura 7D).

As palavras e frases modelos eram alteradas conforme a criança escolhia a opção de resposta correta ou quando efetuava três erros consecutivos, até que as cinco opções fossem apresentadas como modelo.

A história apresentada foi um texto narrativo, contando o primeiro dia de aula de um personagem na escola. As palavras apresentadas foram todas substantivos referentes a objetos, mais especificamente materiais escolares: “lousa”; “carteira”; “lápiz”; “tesoura”; “cola”. As frases foram retiradas da história e foram todas frases transitivas com uma única oração: “Juca foi para a escola”; “Juca encontrou seu amigo Paulo”; “A professora mostrou os materiais”; “As crianças fizeram a atividade”; “As crianças fizeram fila”.

	
<p><b>A - Apresentação da história</b></p>	<p><b>B - Reconhecimento de Palavras</b></p>
	
<p><b>C - Leitura de Palavras</b></p>	<p><b>D - Leitura de Frases</b></p>

Figura 7 – Atividades de leitura



A atividade de reconhecimento de palavras foi utilizada para se analisar se a dificuldade do grupo **DL1** na leitura de palavras pudesse decorrer de um déficit no processamento visual das letras ou da própria palavra.

### 3.2 Os grupos de estudo

A separação do grupo **DL** em dois subgrupos teve como diretriz a identificação das dificuldades enfrentadas por essas crianças para que se pudesse analisar a sua organização cerebral e assim compreender as possíveis causas neurológicas dessas dificuldades. Assim, o subgrupo **DL1** foi constituído de alunos que tinham dificuldades para realizar a leitura de palavras, enquanto que o subgrupo **DL2** incluiu alunos que já dominavam essa atividade, mas ainda tinham dificuldades na leitura de frases. A separação do grupo **NO**, utilizada para comparação, seguiu a mesma diretriz, mas como os alunos desse grupo não tinham dificuldades para a realização da leitura de palavras, os grupos foram divididos de acordo com o seu desempenho na atividade de leitura de frases. O subgrupo **NO1** agrupou alunos que apresentaram um menor desempenho na leitura de frases, enquanto o subgrupo **NO2** reuniu os alunos que já tinham uma maior facilidade nessa atividade, mas ainda apresentavam uma taxa de erros acima de 10%.

O grupo **DL1** foi formado por 89 alunos que tiveram taxa de erro igual ou acima de 50% na leitura de palavras. Todos esses alunos também tiveram uma taxa de erro acima de 50% na leitura de frases. O grupo **DL2** foi formado por 130 alunos que tiveram taxa de erro abaixo de 50% na atividade de leitura de palavras e igual ou acima de 50% na leitura de frases. Os 181 alunos restantes tiveram uma taxa de erro menor que 50% na leitura de frases e não foram incluídos nesse grupo.

Como o desempenho dos alunos considerados normais foi bem maior que o do grupo de alunos indicados como portadores de dificuldades de aprendizagem, para se definir os critérios de diferenciação dos subgrupos normais teve-se que se considerar uma porcentagem de erros bem abaixo daquela utilizada na diferenciação dos subgrupos **DL**, mesmo se utilizando apenas dos dados de acerto e erro nas atividades de leitura de frases. Assim, o grupo **NO1** foi formado por 32 alunos que tiveram taxa de erro acima de 30% na leitura de frases, enquanto que o grupo **NO2** foi formado por 58 alunos que tiveram taxa de erro entre 10% e 30% na leitura de frases. Os 110 alunos restantes tiveram uma taxa de erro abaixo de 10% nessa atividade.

De cada um desses subgrupos, o projeto selecionou aleatoriamente 20 alunos para realizarem o eletroencefalograma enquanto realizavam as atividades descritas. Os alunos do grupo **NO1** estavam matriculados na 1ª ou 2ª série, enquanto que os alunos do grupo **NO2** estavam matriculados na 2ª ou 3ª. Não houve separação por série nos grupos **DL1** e **DL2**, uma vez que alunos com dificuldades de leitura tanto de palavras quanto de frases estavam matriculados nas quatro séries iniciais do Ensino Fundamental. Os alunos selecionados tiveram o termo de consentimento livre e esclarecido assinado por seus responsáveis, consentimento esse aprovado pela Capesq no momento da aprovação do referido projeto.

### **3.3 O mapeamento cerebral**

Os alunos resolveram as atividades de leitura em um computador enquanto seu eletroencefalograma (EEG) foi registrado por outro computador, utilizando o sistema 10/20; impedância menor que 10 Kohm; filtro de baixa frequência 50Hz; frequência amostral de 256 Hz e resolução de 10 bits.

A análise da atividade cerebral durante as tarefas de leitura utilizou a técnica de mapeamento cerebral já descrita por Foz et al. (2002) e Rocha et al. (2005). Considerando-se o

modelo de funcionamento cerebral associado à teoria de Sistema Inteligente de Processamento Distribuído e à Teoria de Grafos, podemos hipotetizar que o fluxo de informação  $h(c_i)$  registrado pelo eletrodo  $c_i$  de uma rede possa ser mensurado pela entropia da correlação  $c_{i,j}$  entre as mensagens trocadas entre as regiões do eletrodo  $c_i$  e dos outros eletrodos  $c_j$ .

Para se calcular  $h(c_i)$ , efetua-se inicialmente o sincronismo do momento em que o voluntário clica na opção de resposta com o trecho de registro do eletroencefalograma e se separa as épocas do EEG correspondentes a um período de dois segundos antes de cada tomada de decisão em cada uma das atividades realizadas pelo voluntário (Figura 8). Considera-se que nos dois segundos anteriores à tomada de decisão o cérebro do voluntário esteja organizado de maneira a estabelecer as conexões necessárias para a solução da atividade.

Como a frequência de registro da atividade elétrica é de 256 Hz, separa-se assim 512 pontos de cada época do EEG. Com os valores de amplitude elétrica registrados para cada um desses pontos, se calcula os coeficientes de correlação linear  $c_{i,j}$  da atividade elétrica registrada por cada eletrodo  $c_i$  referenciada à atividade registrada por cada um dos demais 19 eletrodos  $c_j$  (Figura 8). Esses  $c_{i,j}$  são utilizados para se calcular a entropia  $h(c_{i,j})$  para cada eletrodo  $c_i$  da seguinte maneira:

$$h(c_{i,j}) = -c_{i,j} \log_2 c_{i,j} - (1 - c_{i,j}) \log_2 (1 - c_{i,j}) \quad (1)$$

tal que  $h(c_{i,j}) \rightarrow 1$  se  $c_{i,j} \rightarrow 0,5$  e  $h(c_{i,j}) \rightarrow 0$ , caso contrário. Esse valor representa a possibilidade da atividade elétrica de cada eletrodo estar associada à atividade elétrica de cada um dos outros eletrodos.

Com esses valores pode-se calcular a entropia da correlação média  $h(\bar{c}_i)$  de cada eletrodo com todos os demais da seguinte forma:

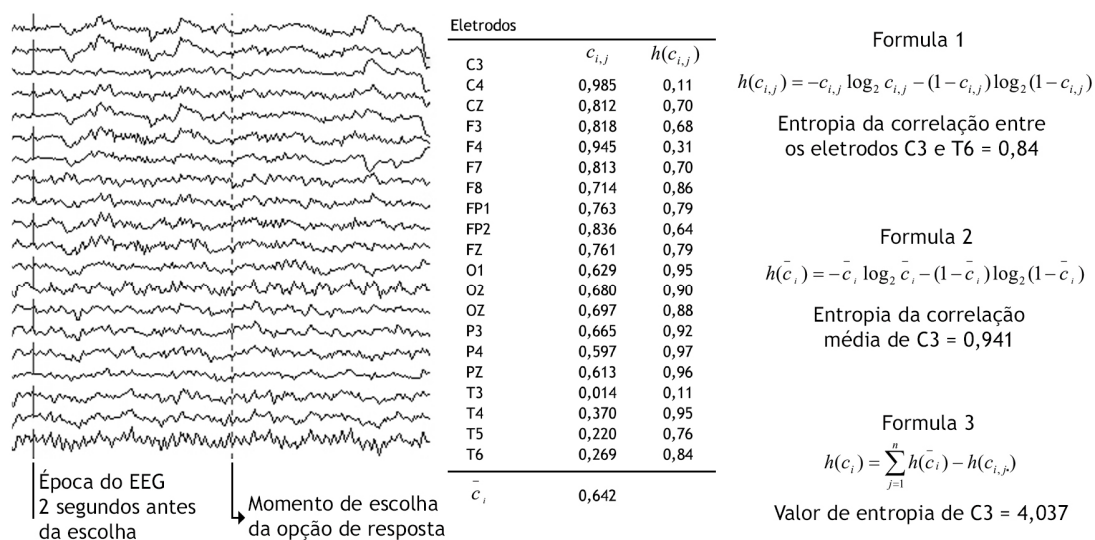
$$h(\bar{c}_i) = -\bar{c}_i \log_2 \bar{c}_i - (1 - \bar{c}_i) \log_2 (1 - \bar{c}_i) \quad (2)$$

de tal maneira que  $h(\bar{c}_i) \rightarrow 1$  se  $\bar{c}_i \rightarrow 0,5$  caso contrário  $h(\bar{c}_i) \rightarrow 0$ . Com esses valores pode-se agora efetuar a somatória das diferenças entre a entropia da correlação média e a entropia de um dado eletrodo com todos os outros.

Assim, o fluxo de informação  $h(c_i)$  no eletrodo  $c_i$  é calculado como:

$$h(c_i) = \sum_{j=1}^n h(\bar{c}_i) - h(c_{i,j}) \quad (3)$$

Em uma rede randômica,  $c_{i,j}$  tende a 0,5 para todo par  $i, j$  de eletrodos e consequentemente  $h(c_i)$  tende a zero. Nas redes *small-world*, a existência de clusters implica em que  $c_{i,j} > 0,5$  para algum par  $i, j$  e  $c_{i,k} < 0,5$  para algum par  $i, k$ , de modo que  $h(c_i) > 0$ . Nas redes *scale-free* e *broad-scale*, a presença de hubs aumenta o número de pares  $i, j$  e  $i, k$ , aumentando assim o valor de  $h(c_i)$ .



**Figura 8 – O cálculo de entropia**

**EEG: eletroencefalograma;  $c_{i,j}$ : correlação entre o eletrodo C3 e cada um dos outros 19 eletrodos;  $h(c_{i,j})$ : entropia da correlação entre o eletrodo C3 e cada um dos outros 19 eletrodos;  $\bar{c}_i$ : correlação média entre os 20 eletrodos.**

Monta-se uma planilha com uma coluna para cada eletrodo  $c_i$  e se preenche as linhas com os valores de entropia gerados a partir de cada época de cada uma das atividades realizadas por cada um dos voluntários (Tabela 1). Os dados dessa planilha são utilizados para geração dos Mapas Cognitivos Cerebrais e para a análise da estrutura de rede.

Voluntário	Atividade	Época	C3	C4	CZ	F3	F4	F7	F8
1	RP	1	7,376	6,973	6,682	6,516	6,367	6,31	6,175
1	RP	2	8,103	7,323	7,265	7,119	6,624	6,332	6,138
1	RP	3	7,879	7,274	7,123	6,737	6,536	6,42	6,231
1	RP	4	7,862	7,553	6,998	6,729	6,608	6,513	6,377
1	RP	5	7,039	6,838	6,779	6,724	6,097	5,913	5,75
1	LP	1	8,475	8,304	8,045	7,839	7,137	6,7	6,382
1	LP	2	8,232	7,662	7,307	7,206	6,576	6,564	6,271
1	LP	3	7,769	7,223	6,655	6,638	6,566	6,511	6,444
1	LF	1	7,901	7,402	6,689	6,614	6,572	6,196	6,165
1	LF	2	7,27	6,96	6,478	6,228	6,053	5,757	5,682
1	LF	3	7,1	7,06	6,929	6,875	6,315	6,026	5,578

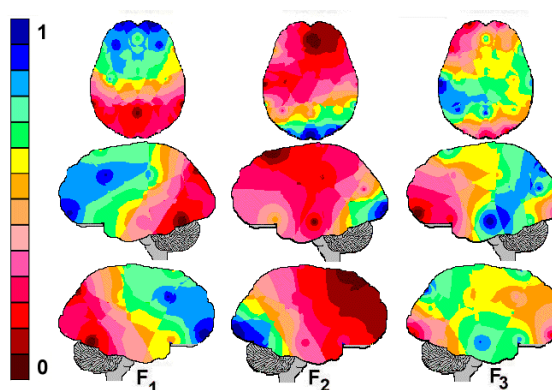
Atividades: RP – Reconhecimento de Palavras; LP – Leitura de Palavras; LF – Leitura de Frases; Época: trecho de 2 segundos antes da escolha de cada uma das cinco opções de resposta; C3, C4, CZ...: Eletrodos segundo o sistema 10/20.

### 3.4 Os Mapas Cognitivos Cerebrais

A análise multivariada exploratória é utilizada para se estudar como a  $h(c_i)$  covaria em uma dada atividade, agrupando-se todas as épocas de todos os voluntários. Se os fatores gerados justificarem 60% ou mais dessa covariância e possuírem autovalores (*eigenvalue*) maior que 1 (Tabela 2), os seus respectivos Mapas Cognitivos Fatoriais são desenhados com suas cores ilustrando o peso da  $h(c_i)$  de cada eletrodo  $c_i$  em cada um dos fatores (Figura 9).

**Tabela 2 – Análise Fatorial**

	Fator 1	Fator 2	Fator 3
Auto- valores	13,63772	2,015992	1,352399
C3	0,136845	0,816973	0,517718
C4	0,792197	0,430938	0,214824
CZ	0,295376	0,779572	-0,26948
F3	0,681121	0,616853	0,030375
F4	0,847009	0,407527	-0,00736
F7	0,720829	0,481198	0,172189
F8	0,869291	0,066089	0,393862
T3	0,802565	0,369907	0,330954
T4	0,726464	0,411529	0,158902
T5	0,315285	0,300425	0,714932



**Figura 9 – Mapas Cognitivos Cerebrais**

### 3.4 As estruturas de rede

A probabilidade  $p(k)$  de um nodo ter  $k$  conexões é dada em uma rede *scale-free* pela equação  $p(k) = k^{-\alpha}$ ,  $2 < \alpha < 3$  e em uma rede *broad-scale* pela equação  $p(k) = k^{1-\alpha} \exp(\beta k / k_c)$ . O valor de  $h(c_i)$  está associado à conectividade  $k$ , portanto pode ser utilizado para estudo da estrutura da rede, envolvida nas tarefas de leitura.

Para se calcular a topologia da rede, faz-se a contagem do número de ocorrências ( $N$ ) em toda a amostra de uma determinada faixa de entropia  $h(c_i)$  (Tabela 1). Essas faixas de entropia variaram de 1,5 a 10 e foram agrupadas em um intervalo de 0,5. Com os valores dessa contagem se monta uma planilha para cada uma das atividades, com os valores de  $k$ , de  $N$ , do logaritmo de  $k$ , do logaritmo de  $N$ , do logaritmo natural de  $k$ , do logaritmo natural de  $N$  e da fração  $(k/k_c)$  (Tabela 2).

Essas tabelas foram utilizadas para se calcular:

- a) a regressão linear entre o logaritmo de  $k$  e o logaritmo de  $N$  para se descrever a topologia de rede do tipo *scale-free*, de modo que o valor de  $\alpha$  é dado pelo coeficiente angular da reta de regressão;
- b) a regressão múltipla entre o logaritmo natural de  $N$ , o valor de  $(k/k_c)$  e o logaritmo natural de  $k$  para se descrever a topologia da rede do tipo *broad-scale*, de modo que os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  são obtidos a partir dos coeficientes angulares da reta de regressão múltipla.

<b>Tabela 3 – Planilha de contagem</b>						
$k$	$N$	$\log k$	$\log N$	$\ln k$	$\ln N$	$(k/k_c)$
1,5	1346	0,176091	3,129045	0,405465	7,204893	0,15
2	1691	0,30103	3,228144	0,693147	7,433075	0,2
2,5	372	0,39794	2,570543	0,916291	5,918894	0,25
3	351	0,477121	2,545307	1,098612	5,860786	0,3
3,5	435	0,544068	2,638489	1,252763	6,075346	0,35
4	648	0,60206	2,811575	1,386294	6,473891	0,4
4,5	714	0,653213	2,853698	1,504077	6,570883	0,45
5	704	0,69897	2,847573	1,609438	6,556778	0,5
5,5	688	0,740363	2,837588	1,704748	6,533789	0,55
6	494	0,778151	2,693727	1,791759	6,202536	0,6
6,5	281	0,812913	2,448706	1,871802	5,638355	0,65
7	160	0,845098	2,20412	1,94591	5,075174	0,7
7,5	124	0,875061	2,093422	2,014903	4,820282	0,75
8	86	0,90309	1,934498	2,079442	4,454347	0,8
8,5	51	0,929419	1,70757	2,140066	3,931826	0,85
9	33	0,954243	1,518514	2,197225	3,496508	0,9
9,5	22	0,977724	1,342423	2,251292	3,091042	0,95
10	6	1	0,778151			

$k$  : faixas de valores de entropia;  $N$  : número de ocorrências de cada faixa de entropia;  
 $\log k$  : logaritmo de  $k$  ;  $\log N$  : logaritmo de  $N$  ;  $\ln k$  : logaritmo natural de  $k$  ;  
 $\ln N$  : logaritmo natural de  $N$  ;  $(k/k_c)$  :  $k$  dividido por  $k$  crítico (10).



## 4 – Resultados

Os resultados apresentados sintetizam os desempenhos de cada um dos subgrupos do **NO** e do **DL**, seus Mapas Cognitivos Cerebrais e suas estruturas de rede associados às atividades de reconhecimento e de leitura de palavras e à atividade de leitura de frases.

### 4.1 Desempenho nas atividades de leitura

O desempenho dos alunos dos quatro grupos nas atividades de leitura durante o registro do eletroencefalograma manteve o mesmo padrão observado na avaliação inicial. Os alunos do grupo **DL1** apresentaram uma alta porcentagem de erros na leitura de palavras e os alunos do grupo **DL2** na leitura de frases, ambos acima de 50%. No reconhecimento de palavras, o desempenho do grupo **DL1** foi menor que o do grupo **NO1**, mas ainda assim foi bem maior que o seu próprio desempenho na leitura de palavras. Na leitura de frases, a porcentagem continuou acima de 30% para o grupo **NO1** e entre 10% e 30% para o grupo **NO2**. Os valores reais estão expressos nos gráficos abaixo.

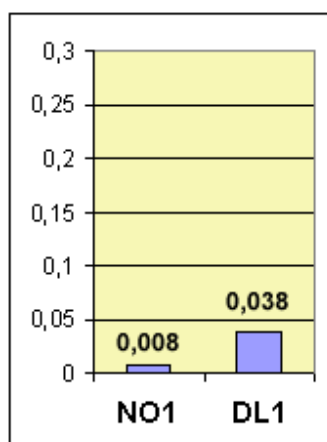


Gráfico 1 - RP

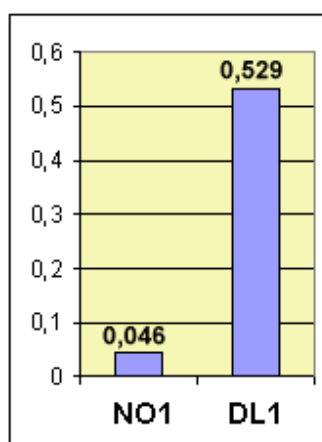


Gráfico 2 - LP

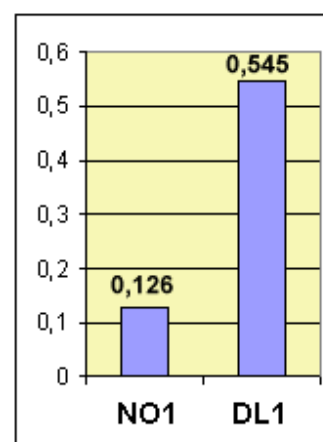
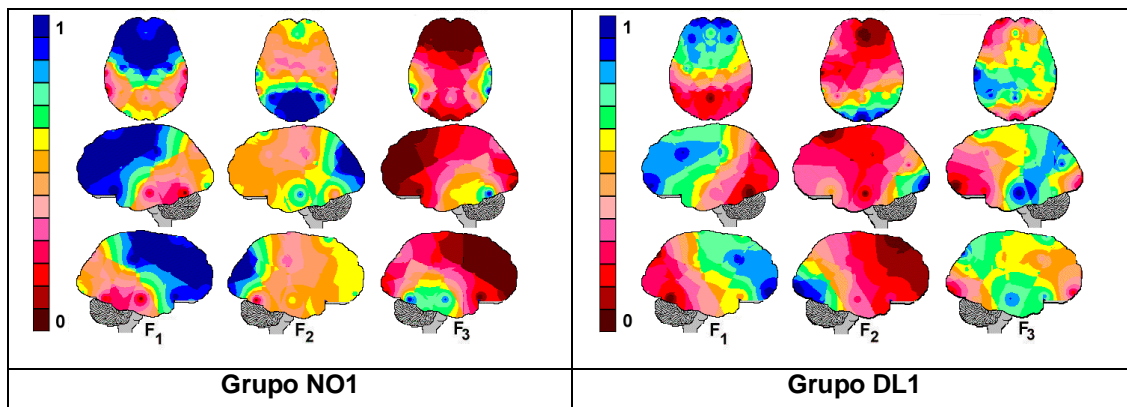


Gráfico 3 - LF

RP – Reconhecimento de palavras; LP – Leitura de palavras; LF – Leitura de frases; NO1 e NO2 – Grupos de alunos normais; DL1 e DL2 – Grupos de alunos com dificuldades de leitura.

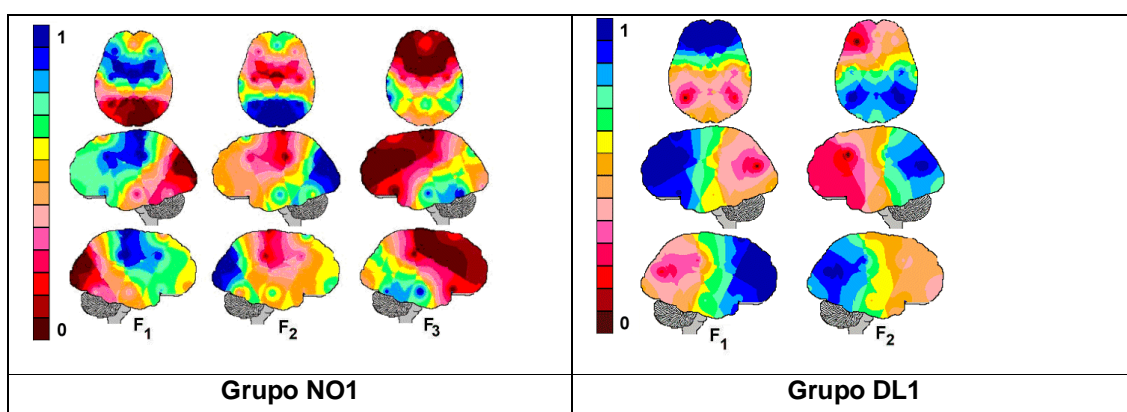
## 4.2 Mapas Cognitivos Cerebrais

Segundo os mapas fatoriais gerados a partir dos valores de entropia de cada eletrodo, observamos que os grupos **NO1** e **DL1** apresentaram três fatores durante a atividade de reconhecimento de palavras (Figura 10). Esses fatores são semelhantes, uma vez que em ambos os grupos observamos um componente mais frontal bilateral; um componente posterior também bilateral; e um terceiro componente temporal posterior no caso do grupo normal, e temporo-parietal no caso do grupo com dificuldades de aprendizagem. Considerando-se apenas os eletrodos com fatores tendendo a um (cor azul nos mapas), o componente anterior do grupo normal envolveu os eletrodos FP1, FP2, F3, F4, F7, F8, FZ, C3, C4 e CZ, o componente posterior envolveu P3, P4, PZ, O1, O2, OZ e T3 e o terceiro componente agrupou os eletrodos T4, T5 e T6. O grupo com dificuldades de aprendizagem recrutou os neurônios localizados em FP1, FP2, F3 e F4 em um componente frontal, os neurônios localizados em O1, O2 e OZ em um componente posterior e os neurônios localizados em T3, T4, P4 e PZ em um componente temporo-parietal.



**Figura 10 – Mapas Cognitivos Cerebrais - Reconhecimento de Palavras**

Já na atividade de leitura de palavras, observamos três fatores para o grupo **NO1** e apenas dois fatores para o grupo **DL1** (Figura 11). Nessa atividade, no grupo **NO1** vemos um componente centro-frontal bilateral, envolvendo os eletrodos C3, C4, CZ, F3 e F4, um componente posterior, envolvendo os eletrodos P3, P4, PZ, O1, O2 e OZ, e um componente temporal, envolvendo os eletrodos T3, T4, T5 e T6. O grupo **DL1** apresenta apenas um componente anterior, envolvendo os eletrodos FP1, FP2, F3, F4, F7, F8 e FZ, e um componente posterior, envolvendo os eletrodos P3, P4, PZ e C4.



**Figura 11 – Mapas Cognitivos Cerebrais - Leitura de Palavras**

Na atividade de leitura de frases, observamos três fatores para o grupo **NO2** e apenas dois fatores para o grupo **DL2** (Figura 12). O grupo **NO2** apresenta um fator envolvendo uma conexão maior entre eletrodos fronto-parietais do hemisfério direito (FP1, FP2, FZ, F4, F8, P4 e T6) e um fator agrupando mais eletrodos centro-parieto-temporais do hemisfério esquerdo (C3, CZ, P3 e T5) mais T4. O terceiro fator mostra uma covariação de  $h(c_i)$  mais fraca (cor verde nos mapas) envolvendo FP1, FZ, C3 e O2. O grupo **DL2** agrupa, em um dos fatores, a atividade de uma grande quantidade de eletrodos frontais (FP1, FP2, F3, F4, F7, F8 e FZ) e centrais (C3, C4 e CZ), além do eletrodo occipital O2, enquanto um segundo fator mostra uma covariação importante entre T3, T4 e T5.

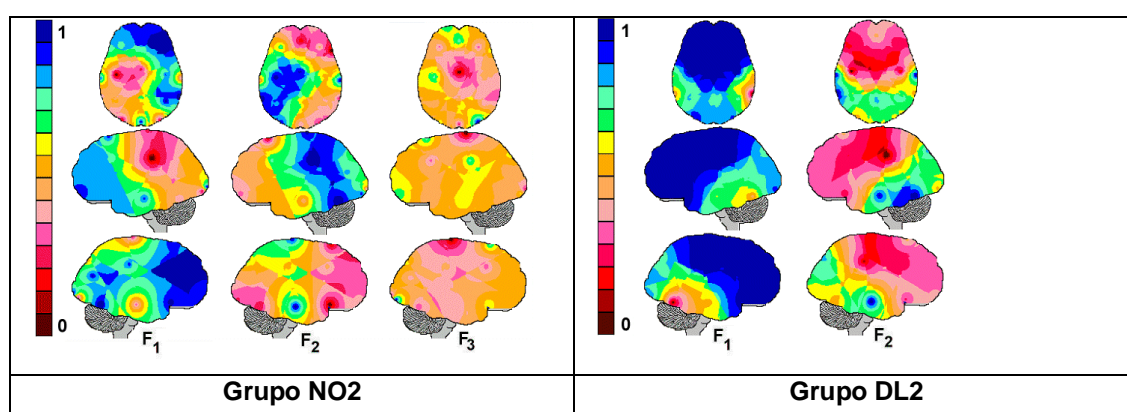


Figura 12 – Mapas Cognitivos Cerebrais - Leitura de Frases

### 4.3 Estruturas de rede

Para os quatro grupos, foram calculadas as estruturas de rede envolvidas com as atividades de leitura de palavras e leitura de frases. Esses cálculos envolveram: a contagem da quantidade de ocorrências ( $N$ ) de determinados valores de entropia ( $k$ ) variando de 1,5 a 10 em um intervalo de 0,5; a regressão linear entre o logaritmo de  $k$  e o logaritmo de  $N$  para caracterização da estrutura de rede do tipo *scale-free*; e a regressão múltipla entre o logaritmo

natural de  $N$ , o valor de  $(k/k_c)$  e o logaritmo natural de  $k$  para caracterização da estrutura de rede do tipo *broad-scale*. Os resultados são apresentados por tipo de atividade contrapondo-se os dados dos grupos **NO** e dos grupos **DL**.

#### 4.3.1 Reconhecimento de palavras dos grupos **NO1** e **DL1**

As Tabelas 4 e 5 mostram as diferenças entre as estruturas de rede dos grupos **NO1** e **DL1** associadas ao **RP**. Ambos os grupos apresentaram uma topologia *scale-free*, com  $\alpha$  de -2,62 e p de 9,08E-06 no caso do grupo **NO1** e com  $\alpha$  de -2,75 e p de 1,57E-05 no caso do grupo **DL1**. Os valores de  $R^2$  para essas regressões foram de 0,79 para o grupo **NO1** e de 0,75 para o grupo **DL1**. Para a topologia *broad-scale*, observamos que o grupo **NO1** apresentou um valor de  $\beta$  de -12,54 (isto é, para o coeficiente angular da variável  $(k/k_c)$ ) com p de 8,87E-06 e o coeficiente  $\alpha$  de 2,55 (isto é, para o coeficiente angular da variável  $\ln k$ ) com um p de 0,00417. O grupo **DL1** apresentou um p de 0,022595 para  $\beta$  igual a -8,99 e um p de 0,484952 para  $\alpha$  igual a 1,10. Os valores de  $R^2$  para essas regressões foram de 0,96 para o grupo **NO1** e de 0,83 para o grupo **DL1**. Deve-se ressaltar ainda que todas as regressões foram altamente significativas com p menor que 0,00002.

<b>Tabela 4 – Estrutura de rede do grupo NO1 para RP</b>						
<b>Topologia <i>scale-free</i></b>						
Regression Summary for Dependent Variable: $\log N$						
R= .88950545 R <sup>2</sup> = .79121995 Adjusted R <sup>2</sup> = .77515995						
F(1,13)=49.266 p<.00001 Std.Error of estimate: .32037						
		St. Err.		St. Err.		
	BETA	of BETA	B	of B	t(13)	p-level
Intercpt			3,913365	0,255814	15,29767	1,08E-09
$\log k$	-0,88951	0,126728	-2,61814	0,373007	-7,01901	9,08E-06
<b>Topologia <i>broad-scale</i></b>						
Regression Summary for Dependent Variable: $\ln N$						
R= .98083611 R <sup>2</sup> = .96203947 Adjusted R <sup>2</sup> = .95571272						
F(2,12)=152.06 p<.00000 Std.Error of estimate: .32739						
		St. Err.		St. Err.		
	BETA	of BETA	B	of B	t(12)	p-level
Intercpt			7,564177	0,327261	23,11361	2,56E-11
$(k/k_c)$	-1,80275	0,245325	-12,5424	1,706813	-7,34841	8,87E-06
$\ln k$	0,865225	0,245325	2,546674	0,722081	3,526853	0,00417

<b>Tabela 5 – Estrutura de rede do grupo LD1 para RP</b>						
<b>Topologia <i>scale-free</i></b>						
Regression Summary for Dependent Variable: $\log N$						
R= .86442850 R <sup>2</sup> = .74723663 Adjusted R <sup>2</sup> = .72918210						
F(1,14)=41.388 p<.00002 Std.Error of estimate: .38842						
		St. Err.		St. Err.		
	BETA	of BETA	B	of B	T(14)	p-level
Intercpt			3,908166	0,301727	12,95266	3,49E-09
$\log k$	-0,86443	0,134367	-2,75104	0,427623	-6,43333	1,57E-05
<b>Topologia <i>broad-scale</i></b>						
Regression Summary for Dependent Variable: $\ln N$						
R= .91274243 R <sup>2</sup> = .83309874 Adjusted R <sup>2</sup> = .80742162						
F(2,13)=32.445 p<.00001 Std.Error of estimate: .75419						
		St. Err.		St. Err.		
	BETA	of BETA	B	of B	t(13)	p-level
Intercpt			7,79336	0,74869	10,40933	1,13E-07
$(k/k_c)$	-1,24563	0,481668	-8,99296	3,477442	-2,58608	0,022595
$\ln k$	0,346249	0,481668	1,101936	1,532906	0,718854	0,484952

### 4.3.2 Leitura de palavras dos grupos NO1 e DL1

As Tabelas 6 e 7 mostram as diferenças entre as estruturas de rede dos grupos **NO1** e **DL1** associadas à **LP**. Ambos os grupos apresentaram uma topologia *scale-free*, com  $\alpha$  de -2,69 e p de 1,31E-07 no caso do grupo **NO1** e com  $\alpha$  de -2,06 e p de 2,42E-08 no caso do grupo **DL1**. Os valores de  $R^2$  para essas regressões foram de 0,87 para o grupo **NO1** e de 0,90 para o grupo **DL1**. Para a topologia *broad-scale*, observamos que o grupo **NO1** apresentou um valor de  $\beta$  de -9,27 com p de 5,93E-07 e o coeficiente  $\alpha$  de 1,28 com um p de 0,014382. O grupo **DL1** apresentou um p de 0,931861 para  $\beta$  igual a 0,16 e um p de 0,021578 para  $\alpha$  igual a -2,13. Os valores de  $R^2$  para essas regressões foram de 0,98 para o grupo **NO1** e de 0,90 para o grupo **DL1**. Deve-se ressaltar ainda que todas as regressões foram altamente significativas com p menor que 0,00000.

Tabela 6 – Estrutura de rede do grupo NO1 para LP						
<b>Topologia <i>scale-free</i></b>						
Regression Summary for Dependent Variable: $\log N$						
R= .93333861 $R^2$ = .87112096 Adjusted $R^2$ = .86191532						
F(1,14)=94.629 p<.00000 Std.Error of estimate: .25124						
		St. Err.		St. Err.		
	BETA	of BETA	B	Of B	t(14)	p-level
Intercpt			3,827751	0,195169	19,61247	1,4E-11
$\log k$	-0,93334	0,095946	-2,69073	0,276604	-9,72774	1,31E-07
<b>Topologia <i>broad-scale</i></b>						
Regression Summary for Dependent Variable: $\ln N$						
R= .99106987 $R^2$ = .98221949 Adjusted $R^2$ = .97948403						
F(2,13)=359.07 p<.00000 Std.Error of estimate: .22299						
		St. Err.		St. Err.		
	BETA	of BETA	B	Of B	t(13)	p-level
Intercpt			7,571519	0,221364	34,20388	4,03E-14
$(k/k_c)$	-1,41691	0,157213	-9,26657	1,028171	-9,01268	5,93E-07
$\ln k$	0,443813	0,157213	1,279474	0,453232	2,822996	0,014382

Tabela 7 – Estrutura de rede do grupo LD1 para LP						
Topologia <i>scale-free</i>						
Regression Summary for Dependent Variable: $\log N$						
R= .94794398 R <sup>2</sup> = .89859779 Adjusted R <sup>2</sup> = .89135478						
F(1,14)=124.06 p<.00000 Std.Error of estimate: .16779						
		St. Err.		St. Err.		
	BETA	of BETA	B	Of B	t(14)	p-level
Intercpt			3,327684	0,13034	25,53072	3,84E-13
$\log k$	-0,94794	0,085106	-2,05754	0,184725	-11,1384	2,42E-08
Topologia <i>broad-scale</i>						
Regression Summary for Dependent Variable: $\ln N$						
R= .94797523 R <sup>2</sup> = .89865703 Adjusted R <sup>2</sup> = .88306581						
F(2,13)=57.639 p<.00000 Std.Error of estimate: .40082						
		St. Err.		St. Err.		
	BETA	of BETA	B	of B	t(13)	p-level
Intercpt			7,683871	0,397894	19,31135	5,91E-11
$(k/k_c)$	0,032719	0,375331	0,161107	1,848099	0,087174	0,931861
$\ln k$	-0,97975	0,375331	-2,12657	0,814668	-2,61035	0,021578

### 4.3.3 Leitura de frases dos grupos NO2 e DL2

As Tabelas 8 e 9 mostram as diferenças entre as estruturas de rede dos grupos **NO2** e **DL2** associadas ao **LF**. Nessa atividade, o grupo **NO2** apresentou na estrutura de rede *scale-free* um  $\alpha$  de -1,85 com p de 0,00011 e grupo **DL2** um  $\alpha$  de -5,41 com p de 0,001738. Os valores de R<sup>2</sup> para essas regressões foram de 0,64 para o grupo **NO2** e de 0,83 para o grupo **DL2**. Para a topologia *broad-scale*, observamos que o grupo **NO2** apresentou um valor de  $\beta$  de -9,22 com p de 0,001117 e o coeficiente  $\alpha$  de 2,25 com um p de 0,047184. O grupo **DL2** apresentou um p de 0,167266 para  $\beta$  igual a 29,03 e um p de 0,047452 para  $\alpha$  igual a -13,84. Os valores de R<sup>2</sup> para essas regressões foram de 0,84 para o grupo **NO1** e de 0,89 para o grupo **DL1**. Deve-se ressaltar ainda que todas as regressões foram altamente significativas com p menor que 0,00436.



<b>Tabela 8 – Estrutura de rede do grupo NO2 para LF</b>						
<b>Topologia <i>scale-free</i></b>						
Regression Summary for Dependent Variable: $\log N$						
R= .80148096 R <sup>2</sup> = .64237172 Adjusted R <sup>2</sup> = .61852984						
F(1,15)=26.943 p<.00011 Std.Error of estimate: .34119						
		St. Err.		St. Err.		
	BETA	of BETA	B	Of B	t(15)	p-level
Intercpt			3,705953	0,258352	14,34459	3,64E-10
$\log k$	-0,80148	0,154408	-1,85113	0,356626	-5,19066	0,00011
<b>Topologia <i>broad-scale</i></b>						
Regression Summary for Dependent Variable: $\ln N$						
R= .91475875 R <sup>2</sup> = .83678357 Adjusted R <sup>2</sup> = .81346694						
F(2,14)=35.888 p<.00000 Std.Error of estimate: .54936						
		St. Err.		St. Err.		
	BETA	of BETA	B	of B	t(14)	p-level
Intercpt			7,12075	0,541007	13,16202	2,83E-09
$(k/k_c)$	-1,83095	0,448367	-9,22393	2,258774	-4,0836	0,001117
$\ln k$	0,975586	0,448367	2,253245	1,035561	2,175868	0,047184

<b>Tabela 9 – Estrutura de rede do grupo DL2 para LF</b>						
<b>Topologia <i>scale-free</i></b>						
Regression Summary for Dependent Variable: $\log N$						
R= .90935565 R <sup>2</sup> = .82692769 Adjusted R <sup>2</sup> = .79808231						
F(1,6)=28.668 p<.00174 Std.Error of estimate: .48303						
		St. Err.		St. Err.		
	BETA	of BETA	B	of B	t(6)	p-level
Intercpt			4,225261	0,515902	8,190038	0,000179
$\log k$	-0,90936	0,169839	-5,41545	1,011437	-5,35421	0,001738
<b>Topologia <i>broad-scale</i></b>						
Regression Summary for Dependent Variable: $\ln N$						
R= .94140961 R <sup>2</sup> = .88625206 Adjusted R <sup>2</sup> = .84075289						
F(2,5)=19.478 p<.00436 Std.Error of estimate: .98773						
		St. Err.		St. Err.		
	BETA	of BETA	B	of B	t(5)	p-level
Intercpt			9,637481	1,056472	9,122325	0,000265
$(k/k_c)$	1,436381	0,889488	29,02876	17,97623	1,614841	0,167266
$\ln k$	-2,32494	0,889488	-13,8456	5,297131	-2,61379	0,047452

## 5 – Discussão

Nessa sessão discutiremos os resultados referentes às atividades de reconhecimento e de leitura de palavras paralelamente, uma vez que compartilham processos neurais mais semelhantes entre si do que com a atividade de leitura de frases. Em seguida discutiremos os resultados referentes às atividades de leitura de frases. Dentro de cada uma dessas sub-sessões, apresentamos inicialmente quais seriam os possíveis procedimentos envolvidos com a solução das atividades para em seguida discutirmos a organização neural de cada um dos grupos através dos resultados dos Mapas Cognitivos Cerebrais, da análise da estrutura de rede e dos desempenhos dos alunos.

### 5.1 Reconhecimento e leitura de palavras

#### 5.1.1 Os procedimentos envolvidos com a solução das atividades

Para a realização das atividades de reconhecimento (**RP**) e de leitura de palavras (**LP**), supõe-se que os alunos executariam basicamente os procedimentos apresentados a seguir, os quais seriam sustentados pelos respectivos processos neurais sugeridos:

*Procedimento A:* reconhecimento da palavra modelo e, no caso do **RP**, das palavras opções de resposta. Esse reconhecimento pode se dar pelos seguintes processos:

Processo 1: conexão entre os neurônios parietais e da área de Broca para associação das letras e sílabas da palavra às suas respectivas formas sonoras;

Processo 2: conexão entre o lóbulo occipital e o giro fusiforme para identificação das letras que em conjunto formem uma palavra;

*Procedimento B:* acesso ao significado da palavra, o qual não é fundamental para a resolução do **RP**, mas o é para a **LP**. A partir da ativação da área de Wernicke por um dos, ou ambos os processos apontados acima, esse procedimento ainda envolveria o processo de conexão entre os neurônios dessa área e os neurônios das áreas parietal e temporal envolvidos respectivamente com o processamento das informações somatossensoriais e visuais do significado da palavra.

Vale ressaltar que consideramos a leitura apenas a combinação dos processos que levam à compreensão do significado da palavra. Assim, a fonação do som da palavra não representa uma leitura, caso a criança não esteja acessando o significado da palavra, ou seja, não esteja associando o procedimento de reconhecimento da palavra ao de significação da palavra.

*Procedimento C:* reconhecimento visual das figuras ilustradas nas opções de resposta, englobando a identificação do seu significado e a memorização de sua posição na tela da atividade. Esse reconhecimento envolveria os seguintes processos neurais:

Processo 1: conexão entre os neurônios occipitais envolvidos com o processamento visual primário e os neurônios temporais envolvidos com o processamento dos detalhes das imagens, resultando no levantamento do seu significado;

Processo 2: conexão entre os neurônios frontais e os neurônios parietais envolvidos com o processamento espacial para memorização da sua posição.

Esse procedimento envolveria principalmente neurônios do hemisfério direito segundo estudos que investigam o processamento da imagem de objetos. Hong et al. (2000) utilizando Estimulação Magnética Transcraniana Repetitiva (**rTMS**), em atividades que dependessem da memória de trabalho para o reconhecimento de imagens de objetos encontraram uma maior influência do **rTMS** quando aplicada ao hemisfério direito. Essa influência foi significativa quando associada à região frontal inferior, temporal inferior e parietal média, sugerindo que essas áreas estejam envolvidas com o gerenciamento de imagens na memória de trabalho. Ishai et al. (2000) também propuseram o envolvimento de áreas parietais e frontais bilaterais na recuperação e retenção momentânea de imagens (memória de trabalho) guardadas em uma memória de longo-prazo. Segundo os autores, essas áreas realizariam um controle *top-down* de áreas ventrais temporais do hemisfério esquerdo durante a visualização mental de imagens. Utilizando atividades de reconhecimento de palavras e de imagens de objetos Haramati et al. (2008) analisaram o desempenho de indivíduos com lesões ou no hemisfério esquerdo ou no direito. Os autores associaram um pior desempenho em atividades de reconhecimento da imagem de objetos em indivíduos com lesões no hemisfério direito envolvendo o lóbulo parietal posterior, áreas frontais e temporais.

### 5.1.2 Organização cerebral do grupo NO1 em RP e LP

A análise da estrutura de rede para o grupo **NO1** durante as atividades de **RP** e **LP** mostrou que esses alunos poderiam estar organizando sua topologia neural como uma rede *scale-free* e/ou *broad-scale*, pois as regressões obtidas para essas redes em ambas as atividades tiveram um  $R^2$  acima de 0,79 com  $p$  altamente significativo, abaixo de 0,00001 (Tabela 4 e 6). Como os valores de  $R^2$  para as redes *broad-scale* durante o **RP** e a **LP** foi maior do que para as redes *scale-free*, se poderia ainda concluir que a topologia da rede tenha se comparado mais a uma rede *broad-scale*, destacando assim a existência de *hubs* conectando *clusters* mais especializados para a solução da tarefa apresentada.

Tanto na atividade de **RP** quanto na de **LP**, o grupo **NO1** mostra, através da análise fatorial, três agrupamentos semelhantes dos valores de  $h(c_i)$  (Figuras 10 e 11). Esses agrupamentos podem representar três principais sub-redes, cada uma envolvendo as áreas cerebrais que contêm os neurônios mais especializados para o processamento de um determinado aspecto da informação ou para a execução de um processo cognitivo necessário para a solução da tarefa apresentada. A semelhança entre as sub-redes de ambas as atividades pode indicar que os alunos desse grupo estivessem realizando o processo envolvido com a leitura também na atividade de **RP**, ou seja, o acesso ao significado das palavras, uma vez que as áreas evidenciadas pelo mapeamento cerebral são condizentes com os modelos propostos para a leitura de palavras, conforme discutido a seguir.

O fator **F1** dos Mapas Cognitivos Cerebrais mostra um agrupamento de neurônios do córtex frontal que podem estar envolvidos com o gerenciamento executivo das informações fonológicas e visuais da atividade (Smith et al., 1998; Smith e Jonides, 1999). Neurônios do hemisfério esquerdo estariam mantendo ativados os sons das palavras (Burton, 2001; Booth et al., 2006; Fiez et al., 2006) enquanto que neurônios do hemisfério direito estariam envolvidos com a memória de trabalho das imagens e de suas posições na tela da atividade (Hong et al., 2000; Ishai et al., 2000; Haramati et al., 2008).

O fator **F2** agrupa neurônios parietais e occipitais que podem estar envolvidos com a decodificação gráfica das palavras e das informações primárias das imagens das opções de resposta (Hinojosa et al., 2000). Hinojosa et al. (2000) investigaram a topografia e a origem neural do Potencial de Reconhecimento evocado por imagens ou por palavras. O Potencial de Reconhecimento é uma medida eletrofisiológica sensível ao processamento semântico dos estímulos apresentados. Assim, os autores encontraram um potencial com amplitude máxima no eletrodo parieto-occipital inferior do hemisfério esquerdo associado ao reconhecimento de

palavras e no eletrodo homólogo do hemisfério direito associado ao reconhecimento de imagens. Ambos os estímulos tiveram como área de origem para a ativação elétrica o giro lingual bilateral, localizado no córtex occipital, sugerindo que tanto palavras quanto imagens, ativariam inicialmente as mesmas áreas occipitais, as quais retransmitiriam a informação para os dois hemisférios de acordo com a natureza visual dos estímulos. Observa-se ainda uma participação da região temporal do hemisfério esquerdo que poderia estar associada aos neurônios occipitais em um processo de leitura semântica (Jobard et al., 2003; Cohen e Dehaene, 2004; Martin, 2006).

Segundo os trabalhos já discutidos na introdução (Damásio e Tranel, 1993; Perani et al., 1999; McCandliss et al. 2003; Damásio et al., 2004; Catani e Mesulam, 2008), o fator **F3** pode estar agrupando neurônios temporais do hemisfério esquerdo envolvidos com o processamento visual dos detalhes dos objetos ilustrados nas opções de resposta, conferindo ao leitor um reconhecimento mais preciso das suas características físicas. Por outro lado, podemos propor que os neurônios do hemisfério direito estivessem mais envolvidos com características mais genéricas do objeto, permitindo ao leitor enquadrar o objeto em seu campo semântico, ou seja, relacioná-lo com outras possíveis formas do mesmo objeto ou com outros objetos que compartilhem características semânticas semelhantes (Damásio et al., 2004; Dien, 2009).

Podemos propor que a correlação da informação entre as três sub-redes envolvidas com a leitura e compreensão de palavras possua a seguinte dinâmica: neurônios temporais visuais que recebem conexões do lóbulo visual occipital, através do fascículo longitudinal inferior, processariam as características visuais da forma da palavra escrita (giro fusiforme) e se conectariam aos neurônios temporais associativos (Wernicke) responsáveis em levantar seu significado; neurônios occipitais também ativam neurônios visuais parietais (giro-angular) que reconhecem a forma visual das sílabas e ativam, através do fascículo arcuado, neurônios

frontais, os quais simulam a produção dos sons representados por essas sílabas (Broca e áreas motoras); essa simulação então ativa os neurônios temporais auditivos que reconhecem esses sons (área auditiva verbal); esses neurônios também ativam neurônios temporais associativos (Wernicke) os quais por sua vez se conectam, através também do fascículo arcuado, aos neurônios associativos polissensoriais do parietal (giro angular) e, através de fibras curtas em forma de U, aos neurônios temporais visuais bilaterais associados às características visuais do objeto (giro temporal inferior e médio); a ativação desses neurônios temporais é suportada pelo processamento das informações visuais básicas realizado pelos neurônios occipitais do hemisfério direito e gerenciada pelos neurônios frontais do mesmo hemisfério.

### ***Reconhecimento versus leitura***

Diferenças entre a organização neural evidenciada durante o reconhecimento e a leitura de palavras podem ser observadas no componente anterior (fator **F1**) e no temporal (fator **F3**). Enquanto no **F1**, a atividade **RP** provoca a ativação de neurônios pré-frontais, frontais e centrais (Figura 10), enquanto que a atividade **LP** recruta neurônios frontais e centrais (Figura 11). No **F3**, observamos uma maior ativação de neurônios temporais do hemisfério esquerdo durante a leitura de palavras (**LP**).

Propomos que o envolvimento de neurônios pré-frontais na atividade de reconhecimento de palavras (Figura 10) esteja relacionado com o controle das ações visomotoras envolvidas com o processo de comparar a forma da palavra modelo com a forma de cada uma das opções de resposta. Mesmo que nessa atividade essas crianças já estivessem realizando a leitura das palavras como proposto, suas respostas também estariam se baseando na confirmação visual das formas das palavras, pois na atividade **RP** os alunos apresentam uma taxa de erro bem menor do que na de **LP** (reconhecimento: 0,008; leitura: 0,046). A maior ativação frontal medial na **RP** pode refletir assim um maior esforço cognitivo decorrente do

possível conflito gerado a partir de dois processos envolvidos nessa atividade. Em um primeiro momento, a criança realiza a leitura da palavra modelo e já inicia a identificação da possível imagem associada ao seu significado. Em um segundo momento, a criança deve comparar a forma da palavra modelo com a forma da palavra na opção de resposta. Como essas crianças apresentaram uma taxa de erro maior na **LP** do que na **RP**, supõe-se que sua leitura ainda não estivesse totalmente desenvolvida, permitindo assim que as crianças cometessem erros na leitura da palavra modelo durante a atividade de **RP**. Esse erro deve ter sido corrigido pela própria criança antes de selecionar a opção de resposta, através da comparação das formas das palavras modelo e de resposta. Associamos assim o maior envolvimento das áreas pré-frontais a esse maior esforço cognitivo.

Propomos que o maior envolvimento de neurônios temporais esquerdos evidenciados na leitura de palavras (Figura 11) esteja relacionado com o necessário levantamento semântico da palavra para solução da tarefa, através de suas características visuais (Damásio e Tranel, 1993; Perani et al., 1999; Damásio et al., 2004; Catani e Mesulam, 2008). Esse acesso semântico não é fundamental na atividade de reconhecimento de palavras, portanto não se mostra tão evidenciado.

A indicação de uma possível organização *broad-scale* e o agrupamento de três sub-redes ilustradas pelo mapeamento cognitivo cerebral, inclusive na **LP**, podem refletir uma rede mais bem organizada desse grupo em relação à rede dos alunos indicados como portadores de dificuldades de aprendizagem.

### **5.1.3 Organização cerebral do grupo DL1 em RP e LP**

A análise da estrutura de rede para o grupo **DL1** durante as atividades de **RP** e **LP** mostrou que esses alunos poderiam estar organizando sua topologia neural como uma rede



*scale-free*, mas não *broad-scale*, pois as regressões obtidas para a rede *scale-free* tiveram  $R^2$  acima de 0,75 com  $p$  abaixo de 0,00002, enquanto que para a rede *broad-scale* o  $p$  do coeficiente  $\alpha$  no **RP** e o  $p$  do coeficiente  $\beta$  na **LP** não foram significativos (Tabelas 5 e 7). A partir do mapeamento cerebral observamos três agrupamentos de áreas, ou sub-redes, durante a atividade de **RP** e apenas dois durante a **LP** (Figuras 10 e 11).

Propomos que a organização cerebral em três sub-redes do grupo **DL1** na atividade de **RP** (Figura 10) esteja associada a sua maior facilidade nessa atividade (taxa de erro 0,038) em relação à atividade de **LP** (taxa de erro 0,529). Essa organização refletiria o recrutamento e relacionamento adequado entre os agentes mais bem preparados para a execução do procedimento de reconhecimento de palavra, considerando-se que esses alunos, uma vez que possuem dificuldades em aceder ao significado das palavras, não utilizariam adequadamente os processos envolvidos com a leitura propriamente dita. Neurônios mais frontais agrupados pelo fator **F1** estariam gerenciando a análise da forma das palavras realizada pelos neurônios agrupados pelos fatores **F2** e **F3**. Os neurônios do fator **F1** estariam envolvidos com o processo de memória de trabalho responsável pela memorização da palavra modelo, enquanto os alunos analisassem as formas das palavras de resposta (Smith et al., 1998; Smith e Jonides, 1999). Os neurônios agrupados pelo fator **F2** estariam processando as informações visuais básicas das palavras, fornecendo aos neurônios agrupados pelo fator **F3** as informações necessárias para os seguintes processos: os neurônios polissensoriais do lóbulo parietal decodificam as sílabas das palavras para em associação com neurônios frontais do fator **F1** resgatarem suas representações fonológicas (Burton, 2001; Booth et al., 2006; Fiez et al., 2006); os neurônios temporais criam uma imagem mental da forma da palavra através do conjunto de letras que a compõem, independentemente de sua estrutura silábica (Cohen et al., 2000; Cohen e Dehaene, 2004; Hillis et al., 2005; Martin, 2006).

Apesar do grupo **DL1** apresentar estruturas de rede *scale-free* para ambas as atividades, o padrão de ativação cerebral é bastante diferente entre as atividades de reconhecimento e leitura de palavras. Quando o grupo **DL1** depende exclusivamente da representação semântica da palavra escrita para resolver a atividade de **LP**, sua rede não consegue ser organizada em três fatores (Figura 11) como observado na atividade de **RP**. Um dos fatores (**F1**) da **LP** envolve todo o córtex pré-frontal, enquanto o outro envolve neurônios occipitais e parietais (**F2**). Essa organização pode refletir o esforço desse grupo em se basear na transcrição grafema-fonema das letras e sílabas da palavra modelo, através dos neurônios do hemisfério esquerdo, enquanto os neurônios do hemisfério direito estariam processando e gerenciando as informações visuais das imagens das opções de resposta.

A organização neural desse grupo em três componentes, durante a atividade de **RP** mostra que sua dificuldade na atividade de **LP** não deve ser proveniente de um distúrbio no processamento visual da forma das palavras, pois na atividade de **RP** eles foram capazes de realizar o processamento visual básico da imagem das palavras pelos neurônios occipitais, a identificação das sílabas pelos neurônios parietais, a identificação do conjunto de letras pelos neurônios temporais e a associação de letras e sílabas com seus respectivos fonemas pelos neurônios frontais. Assim, podemos propor que a dificuldade desses alunos estaria, dentro dos processos de leitura fonológica, em acessar o significado da palavra a partir da fonação segmentada das sílabas e, dentro dos processos de leitura semântica, em associar o conjunto de letras da palavra ao seu respectivo significado.

#### **5.1.4 As diferenças entre os grupos NO1 e DL1 em RP e LP**

O padrão de organização cerebral durante a atividade de **RP** foi muito semelhante entre os grupos **NO1** e **DL1** (Figura 10). No entanto, cada um desses padrões pode ter representado processos neurais distintos. A rede neural do grupo **NO1** poderia estar efetuando

o acesso aos significados das palavras no momento em que as visualiza no modelo, através de uma leitura semântica e/ou fonológica, buscando já na seqüência a figura que correspondesse ao objeto imaginado. O processamento do grupo **DL1** estaria mais focado na comparação da forma das palavras, podendo acessar seu significado somente após o pareamento da forma da palavra e a visualização da respectiva figura.

A diferença entre os mapas do grupo **DL1** e **NO1** na atividade de **RP** é mais marcante no fator **F3**, onde neurônios parietais e temporais no **DL1** poderiam estar envolvidos com um maior processamento visual das sílabas e das letras da palavra e com um maior esforço cognitivo envolvendo uma memória de trabalho para memorização da imagem dessas sílabas e letras. Essa memorização precisava ser mantida a partir do momento em que a palavra modelo fosse processada até o momento em que o aluno encontrasse outra palavra dentre as opções de resposta que coincidissem com a imagem mental da palavra modelo. No grupo **NO1**, neurônios temporais do fator **F3** estariam resgatando o significado das palavras dispensando assim uma memorização da forma da palavra pelos neurônios parietais e temporais. Outra diferença se observa no fator **F2**, segundo o qual se evidencia o envolvimento apenas de neurônios occipitais no grupo **DL1**, envolvidos provavelmente com o processamento visual primário das palavras e figuras, enquanto que no grupo **NO1** se evidencia o agrupamento de neurônios occipitais, parietais e temporais envolvidos com a associação de informações visuais primárias a processamentos mais detalhados da forma da palavra que permitem o levantamento do seu significado (Damásio e Tranel, 1993; Perani et al., 1999; McCandliss et al. 2003; Damásio et al., 2004; Catani e Mesulam, 2008).

Na atividade de **LP**, apesar de ambos os grupos apresentarem um fator anterior e um posterior (Figura 11), a composição dos fatores difere bastante além de não se observar um terceiro fator para o grupo **DL1**. Essa diferença pode evidenciar a dificuldade do grupo **DL1** na atividade de **LP** em relação ao grupo **NO1**.

A ausência de ativação de neurônios temporais no componente posterior do grupo **DL1** sugere que esse grupo tenha dificuldade em realizar o processo de leitura semântica, ou seja, o levantamento do significado da palavra diretamente pela sua composição de letras. A ausência de um terceiro componente temporal pode refletir a dificuldade em acessar o significado das palavras processadas, ficando a associação entre palavra e objeto dependente de uma associação direta entre informações fonológicas e visuais processadas momentaneamente pela memória de trabalho sem acesso à memória de longo-prazo associada ao significado das palavras e objetos.

## **5.2 Leitura de frases**

### **5.2.1 Os procedimentos envolvidos com a solução das atividades**

Para a solução da atividade de leitura de frases os alunos deviam efetuar a leitura de todas as palavras da frase e manter em sua memória de trabalho os significados evocados por cada uma dessas palavras, uma vez que sempre havia nas figuras de opção de respostas mais de uma figura ilustrando cada um dos elementos da frase. Por exemplo, para a frase “Juca foi para a escola”, havia quatro figuras em que estava ilustrado o personagem “Juca”, duas figuras ilustrando um “ambiente escolar” e duas figuras que podiam expressar o movimento de “ir”.

Após a leitura de cada uma das palavras da frase e seu respectivo levantamento semântico, o aluno devia processar visualmente as cenas de cada uma das figuras, reconhecendo os objetos, as pessoas e os ambientes dessas cenas, bem como as possíveis ações executadas pelas pessoas em relação aos objetos, às outras pessoas ou ao ambiente. A escolha da opção de resposta se daria quando o processamento das informações visuais coincidissem com o processamento das informações verbais.

Apesar dos alunos não precisarem necessariamente estabelecer a correta relação entre as palavras para decidirem pela opção de resposta correta, nenhuma das frases possuía ambigüidade. A única frase, cujos elementos poderiam ser interpretados erroneamente, era a frase “Juca encontrou seu amigo Paulo”, na qual o agente “Juca” poderia ser interpretado como o paciente da oração e o paciente “Paulo” como o agente. No entanto, caso isso ocorresse, essa troca não causaria um conflito para a escolha da opção de resposta, uma vez que a figura correta para essa frase exibia os personagens “Juca” e “Paulo” se cumprimentando mutuamente.

### 5.2.2 Organização cerebral do grupo NO2 em LF

A análise da estrutura de rede para o grupo **NO2** durante a atividade de **LF** mostrou que esses alunos poderiam estar organizando sua topologia neural como uma rede *scale-free* e/ou *broad-scale*, pois as regressões obtidas para essas redes tiveram  $R^2$  acima de 0,64 com p abaixo de 0,00011 (Tabela 8). Ressalta-se que não se encontrou um  $2 < \alpha < 3$  para a rede *scale-free*, mas o valor aproximado de 1,85 pode representar um estágio de organização dessa rede. Como o valor de  $R^2$  para a rede *broad-scale* foi maior do que para a rede *scale-free*, se poderia ainda concluir que a topologia da rede tenha se comparado mais a uma rede *broad-scale*, destacando assim a existência de *hubs* conectando *clusters* mais especializados para a solução da tarefa apresentada organizados em três sub-redes conforme evidenciado pelos três fatores da análise fatorial (Figura 12).

O fator **F1** associou a região pré-frontal, principalmente direita, com neurônios posteriores também do hemisfério direito, além de recrutar neurônios da região frontal esquerda; o fator **F2** associou principalmente áreas fronto-parieto-temporais do hemisfério esquerdo, envolvendo apenas um eletrodo temporal direito; e o fator **F3** agrupou neurônios

frontais mediais e centrais do hemisfério esquerdo e occipitais do hemisfério direito (Figura 12). Propomos que o fator **F1** esteja envolvido com o processamento das cenas ilustradas nas opções de resposta por agrupar principalmente neurônios do hemisfério direito, enquanto que o fator **F2** esteja envolvido com o processamento das informações lingüísticas veiculadas pela oração por agrupar principalmente neurônios do hemisfério esquerdo, e finalmente que o fator **F3** esteja envolvido com a solução de um possível conflito gerado entre esses dois processamentos auxiliando os alunos na escolha da cena que represente o mesmo evento expressado pela oração.

A característica básica de uma oração é a presença de um verbo, o qual pode ter associado um agente e/ou um paciente. Todos esses elementos em conjunto definem um evento ocorrido em um espaço. Desde os primeiros trabalhos realizados por Rizzolatti e Arbib, investigando o envolvimento de neurônios da área de Broca na representação da ação motora “pegar”, tem-se associado o comportamento de neurônios espelhos dessa região à produção e compreensão de verbos (Rizzolatti e Arbib, 1998). Seguindo essa suposição, Hamzei et al. (2003), em atividades que envolviam o reconhecimento e produção do evento “pegar um copo e levar à boca”, mostraram ativação do giro frontal inferior, da junção dessa região com o giro pré-central (definida como IFG/PG), da junção ventral occipito-temporal, do córtex parietal superior e inferior e do sulco intraparietal do hemisfério esquerdo. A produção lingüística mental de verbos associados a esse evento promoveu, segundo os autores, ativação neural no giro frontal inferior, na junção IFG/PG e no córtex parietal.

O envolvimento dessas áreas na compreensão e produção de ações e verbos como “pegar”, “tomar”, “agarrar”, etc, tem sido interpretado da seguinte maneira: neurônios frontais estariam envolvidos com o planejamento motor da ação envolvendo sua direção e objetivo, enquanto que neurônios mais posteriores (parietais e temporais) estariam envolvidos com o controle dessa ação por processarem as informações sensoriais resultantes da execução da

ação (Iacoboni e Wilson, 2006; Van Schie et al., 2006). Podemos propor que essa organização seja estendida a outras ações motoras como as utilizadas em nossas orações: “ir”; “encontrar”; “mostrar”; “fazer”; e “voltar”, uma vez que essas ações também englobam uma direção e um objetivo que devem ser planejados em relação aos objetos envolvidos com o evento em que a ação se realiza, bem como dependem de um controle de sua execução.

Além dessas regiões estarem envolvidas com o reconhecimento de uma ação motora e com o processamento lingüístico do verbo, tem sido proposto que elas também estejam envolvidas com a própria compreensão das orações criadas pelo verbo, uma vez que dado um verbo pode-se definir quais seriam os outros possíveis elementos da oração bem como quais seriam os possíveis relacionamentos entre eles. Assim, como a completa compreensão do significado de uma oração envolveria também a compreensão dos substantivos, as áreas parietais e temporais do hemisfério esquerdo também podem ser associadas à compreensão dos outros possíveis elementos envolvidos com os possíveis eventos em que determinada ação pode ser executada. Assim, a própria oração lingüística estaria representada nessa associação anterior-posterior do hemisfério esquerdo (fazer o quê, como, envolvendo quem ou o quê) como ilustrado no fator **F2**.

Caplan (2006) compara o papel da área de Broca com o papel do córtex pré-frontal dorsolateral (**CPF DL**). Segundo o autor, a **CPF DL** seria responsável pelo encadeamento das ações motoras de um evento, assim como Broca encadearia a produção das palavras na ordem sintática. Defende ainda que a área de Broca estaria envolvida com a sintaxe por possuir *mirror-neurons* que são ativados quando uma ação transitiva é executada ou observada pelo sujeito. Como essa ação transitiva envolve um agente, uma ação e um objeto, os neurônios de Broca encadeariam os elementos básicos de uma estrutura sintática simples.

Dessa forma, enquanto neurônios parietais e temporais do hemisfério esquerdo evidenciados pelo fator **F2** se encarregariam das informações sensoriais da ação e do significado dos demais elementos da oração, neurônios frontais do hemisfério esquerdo evidenciados pelos fatores **F1** e **F2** estariam envolvidos com o planejamento da ação e com o encadeamento dos elementos da oração (Figura 12). Os neurônios pré-frontais do fator **F1** também poderiam estabelecer a integração desse processamento com neurônios do hemisfério direito envolvidos com a visualização dos eventos.

Vários trabalhos vêm mostrando o envolvimento de áreas clássicas de linguagem do hemisfério esquerdo, como Broca, Wernicke e giro angular, na compreensão de orações (Blumstein e Milberg, 2000; Sakai et al., 2001; Friederici e Kotz, 2003). No entanto, vem-se mostrando também o envolvimento de áreas do hemisfério direito no processamento da sintaxe das orações (Grodzinsky e Friederici, 2006).

Manenti et al. (2008) utilizaram a técnica de estimulação magnética transcraniana repetitiva (**rTMS**) durante a solução de atividades nas quais os voluntários deviam escolher uma dentre duas figuras que representasse o significado de uma oração escrita. Essa técnica permite o estudo da funcionalidade de determinadas regiões do cérebro que são excitadas magneticamente fazendo com que o tempo de resposta do voluntário seja alterado, caso a região excitada esteja envolvida com a solução da tarefa apresentada. Aplicando-se **rTMS** ao córtex pré-frontal dorsolateral (**CPFDL**) do hemisfério esquerdo, o tempo de resposta dos voluntários aumentou somente em atividades nas quais a figura de resposta incorreta continha imagens de objetos que não coincidam com o sujeito ou objeto da oração. Aplicando-se **rTMS** ao **CPFDL** direito, o tempo de resposta aumentou quando o relacionamento representado na figura entre o sujeito e o objeto não era o mesmo expressado pela oração. Assim, os autores associaram a atividade do hemisfério esquerdo com o processamento semântico dos elementos



da oração enquanto o hemisfério direito estaria mais envolvido com a análise espacial desses elementos.

Podemos assim propor que a própria compreensão de uma oração envolva a recriação das imagens geradas pelo evento descrito pela oração verbal. No caso da atividade de **LF** essa compreensão envolveria o processamento dos eventos representados nas imagens das opções de resposta. Tanto a leitura da oração quanto a visualização das imagens das opções de resposta estariam recriando no cérebro do grupo **NO2** a visualização do próprio evento que envolve uma organização espacial entre as imagens do agente e do paciente da oração bem como da motricidade expressada pelo verbo. Na leitura de uma palavra, tem-se a compreensão de uma unidade mínima de significação, seja um objeto, seja uma ação. Na leitura de uma frase, além de ocorrer o levantamento da significação das palavras pode-se ocorrer o levantamento da significação da relação existente entre essas palavras. Essa significação não depende de uma área específica, mas surge justamente do relacionamento entre diversas áreas cerebrais que quando sincronizadas adequadamente recriam a mesma organização cerebral envolvida com a visualização e processamento do próprio evento. Neurônios do hemisfério esquerdo (fator **F2**) estariam envolvidos com a produção motora e lingüística do evento, enquanto que neurônios do hemisfério direito (fator **F1**) estariam envolvidos com o reprocessamento visual do evento.

Esses processamentos paralelos dos elementos lingüísticos da oração e das cenas ilustradas nas opções de resposta podem gerar um conflito ou uma indecisão acerca da melhor imagem para se parrear com a oração lida. Dessa forma, propomos que os neurônios frontais mediais, evidenciados pelo fator **F3**, pudessem estar relacionados com a solução desse conflito, uma vez que foram associados, nesse fator, com os mesmos neurônios frontais e centrais do hemisfério esquerdo que foram englobados nos agrupamentos dos fatores visual (**F1**) e verbal (**F2**), respectivamente.

### 5.2.3 Organização cerebral do grupo DL2 em LF

A análise da estrutura de rede para o grupo **DL2** durante a atividade de **LF** mostrou que esses alunos não organizaram sua topologia neural como uma rede *scale-free* nem como uma rede *broad-scale*. Apesar dos valores de  $R^2$  terem variado entre 0,83 e 0,89, o valor de  $\alpha$  na análise de rede do tipo *scale-free* foi de -5,41 e o  $p$  de  $\beta$  na análise de rede do tipo *broad-scale* não foi significativo (Tabela 9).

A ausência de *hubs* na rede desses alunos faz com que seus *clusters* não se organizem de maneira otimizada para processamento das informações apresentadas e para as ações exigidas pela atividade em questão. Essa proposição é corroborada pela presença de apenas dois padrões de associação entre áreas evidenciados pela análise fatorial (Figura 12).

O fator **F1** envolve todo o lóbulo frontal bilateral enquanto que o fator **F2** agrupa neurônios temporais que podem estar envolvidos com a decodificação da forma da palavra e de seus possíveis significados, uma vez que esse grupo consegue realizar a leitura de palavras. Dessa forma, a leitura de uma frase por esse grupo se resumiria à compreensão das palavras isoladamente. A tentativa de se estabelecer o relacionamento entre essas palavras acaba recrutando todas as áreas frontais do cérebro de ambos os hemisférios (Figura 12 – **F1**), criando assim uma espécie de competição entre inúmeros *clusters*, o que acaba dificultando a compreensão do significado da oração.

#### 5.2.4 As diferenças entre os grupos NO2 e DL2 em LF

Assim como na leitura de palavras para os grupos **NO1** e **DL1**, a leitura de frases resultou no agrupamento de três conjuntos de áreas no caso do grupo **NO2** e de dois conjuntos no caso do grupo **DL2** (Figura 12).

O grupo **DL2** pode estar reconhecendo o significado das palavras através da ativação dos neurônios temporais e tentando, através do agrupamento de todos os neurônios frontais, manter e gerenciar em uma memória de trabalho os três significados evocados pelas três palavras da frase, ao mesmo tempo em que procuram compará-los aos significados gerados a partir do processamento visual dos elementos das cenas contidas nas figuras de opção de resposta. Esse agrupamento se mostra ineficaz, uma vez que esse grupo apresenta uma taxa de erro de 0,545.

Por outro lado, o fator **F2** do grupo **NO2**, como discutido anteriormente, pode estar agrupando os neurônios temporais e parietais do hemisfério esquerdo envolvidos com a compreensão do significado não só das palavras, mas também do evento expressado pela frase, enquanto que o fator **F1** estaria agrupando os neurônios frontais, temporais e parietais do hemisfério direito que dão significado à cena gerada pelo processamento visual das figuras de opção de resposta. Nesse caso, esses alunos primeiro efetuam a compreensão do significado da frase a partir do processamento lingüístico da leitura para depois procurarem por uma figura que gere o mesmo processamento semântico. Essa organização refletiria o êxito desse grupo nessa atividade uma vez que a sua taxa de erros é bem menor (0,126) se comparada com a do grupo **DL1** (0,545).

## 6 – Conclusões

Concluimos que a metodologia empregada e a interpretação dos resultados permitem uma melhor compreensão dos processos neurais envolvidos com uma atividade cognitiva complexa como a leitura de palavras e frases.

O agrupamento dos valores de  $h(c_i)$  realizado pela análise fatorial evidencia três fatores para os grupos **NO1** e **NO2** em todas as atividades, assim como para o grupo **DL1** na atividade de **RP**, atividade na qual esses alunos não apresentam grandes dificuldades. Para o grupo **DL1** na atividade de **LP** e para o grupo **DL2** na atividade de **LF**, atividades nas quais esses alunos apresentam dificuldades, evidencia-se apenas dois fatores. Essa diferenciação pode representar dois padrões de organização da rede neural, uma mais eficaz, com três sub-redes, conferindo aos alunos um maior desempenho na solução da tarefa, e outra ainda não tão bem estruturada, com apenas duas sub-redes, não sendo capaz de recrutar e associar os neurônios mais adequados da forma mais adequada para a solução da tarefa. Com esses resultados, podemos propor que a técnica empregada se mostra eficaz na identificação de alunos que apresentam dificuldades no aprendizado da leitura por causa de uma desorganização neural dos agentes necessários para tal aprendizado, que pode ser facilmente identificada através da análise fatorial.

Dessa forma, os resultados obtidos com o uso dessa técnica podem ser utilizados para auxiliar o diagnóstico dos distúrbios da aquisição da linguagem escrita, se associados a outros parâmetros que ajudem a evidenciar um possível distúrbio neurológico. Tais parâmetros incluem: o desempenho do aluno em atividades investiguem os dois processos de leitura, o fonológico e o semântico, e excluam a possibilidade de um distúrbio nas sub-redes de

processamento visual; informações acerca da história de vida pregressa do aluno incluindo acontecimentos durante o período de gestação, parto e primeira infância, bem como informações acerca dos antecedentes familiares. Esta abordagem tem sido utilizada com sucesso no projeto Enscer® em desenvolvimento com o apoio da FAPESP.

A técnica empregada se mostrou eficaz não só para se auxiliar um diagnóstico dos distúrbios da aquisição da linguagem escrita, mas também e principalmente para se entender a organização neural dessas crianças e assim favorecer a elaboração de atividades educativas e planos de intervenção que respeitem sua funcionalidade cerebral.

Assim, a ferramenta de avaliação utilizada e a técnica de processamento das informações coletadas com essa ferramenta podem servir de auxílio para a integração das ações da área de saúde e de educação na busca de uma melhor compreensão das necessidades dos alunos que experimentam dificuldades no aprendizado do conteúdo de linguagem pelos métodos tradicionais de ensino. Propomos que o aprendizado da leitura deva considerar os dois processos de leitura, o fonológico e o semântico. Para isso, faz-se necessário se desenvolver o conhecimento dos alunos acerca dos significados das palavras e eventos associados a um contexto vivenciado pela criança. Somente após a criança ter dominado a habilidade de leitura é que podemos garantir a compreensão de novos contextos a partir de um texto sem a necessidade da criança tê-los vivenciado. Essa proposta de ensino vem sendo desenvolvida e aplicada, através do projeto da Fapesp já referenciado (processo nº 04/00743-4). Esse projeto inclui ainda um sistema informatizado para registro e acompanhamento do desempenho dos alunos nas atividades educativas propostas de acordo com os modelos apresentados no presente trabalho. Um exemplo desse sistema encontra-se em <http://www.enscer.com.br/acesso>

## 7 – Referências

Alarcón M, DeFries JC, Reading performance and general cognitive ability in twins with reading difficulties and control pairs. *Personality and Individual Differences*. 1997;22(6):793-803.

Albert R, Jeong H, Barabási AL, Diameter of the World Wide Web. *Nature*. 1999;401:130-131.

Alloway TP, Gathercole SE, Kirkwood HJ, Elliott JE, The cognitive and behavioural characteristics of children with low working memory. *Child Development*. 2008;in Press.

Alloway TP, Gathercole SE, Working memory and neurodevelopmental conditions. Hove, England: Psychology Press; 2006.

Alloway TP, Working memory, but not IQ, predicts subsequent learning in children with learning difficulties. *European Journal of Psychological Assessment*. 2008;in Press.

Arzouan Y, Goldstein A, Faust M, Dynamics of hemispheric activity during metaphor comprehension: Electrophysiological measures. *Neuroimage*. 2007;36(1):222-231.

Ashby FG, Ell SW, Valentin VV, Casale MB, FROST: A Distributed Neurocomputational Model of Working Memory Maintenance. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2005;17:1728-1743.

Baddeley AD, Hitch GJ, Working Memory. *Psychology of Learning and Motivation*. 1974;8:47-89.

Baddeley AD, The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*. 2000;4(11):417-423.

Bates E, Chen S, Tzeng O, Opie PL, The noun-verb problem in Chinese aphasia. *Brain and Language*. 1991;41(2):203-233.

Berndt RS, Mitchum CC, Haendiges AN, Sandson J, Verb Retrieval in Aphasia. 1. Characterizing Single Word Impairments. *Brain and Language*. 1997;56(1):68-106.

Bihrlle AM, Brownell HH, Powelson JA, Gardner H, Comprehension of humorous and nonhumorous materials by left and right brain-damaged patients. *Brain and Cognition*. 1986;5(4):399-411.

Blumstei SE, Milberg WP, Chapter 9 - Language Deficits in Broca's and Wernicke's Aphasia: A Singular Impairment. *Language and the Brain*. 2000:167-183.

Booth JR, Lu D, Burman DD, Chou TL, Jin Z, Peng DL, Zhang L, Ding GS, Deng Y, Liu L, Specialization of phonological and semantic processing in Chinese word reading. *Brain Research*. 2006;1071(1):197-207.

Breedin SD, Saffran EM, Schwartz MF, Semantic Factors in Verb Retrieval: An Effect of Complexity. *Brain and Language*. 1998;63(1):1-31.

Brown WS, Paul LK, Symington M, Dietrich R, Comprehension of humor in primary agenesis of the corpus callosum. *Neuropsychologia*. 2005;43(6):906-916.

Brownell HH, Michel D, Powelson JA, Gardner H, Surprise but not coherence: Sensitivity to verbal humor in right-hemisphere patients. *Brain and Language*. 1983;18(1):20-27.

Burton MW, The role of inferior frontal cortex in phonological processing. *Cognitive Science*. 2001;25(5):695-709.

Cao F, Bitan T, Booth JR, Effective brain connectivity in children with reading difficulties during phonological processing. *Brain and Language*. 2008;107(2):91-101.

Caplan D, Why is broca's area involved in syntax? *Cortex*. 2006;42(4):469-471.

Catani M, Mesulam MM, The arcuate fasciculus and the disconnection theme in language and aphasia: History and current state. *Cortex*. 2008;44(8):953-961.

Chandrasekaran B, Natural and social system metaphors for distributed problem solving: introduction to the issue. *IEEE Trans. Sys. Man and Cybernetics*. 1981;11:11.

Chase WG, Ericsson KA, Skill and working memory. In: Bower GH, editor. *The psychology of learning and motivation*. New York: Academic Press; 1982;16:1-58.

Chatterjee A, Southwood MH, Basilico D, Verbs, events and spatial representations. *Neuropsychologia*. 1999;37(4):395-402.

Cohen H, Le Normand MT, Language Development in Children with Simple-Partial Left-Hemisphere Epilepsy. *Brain and Language*. 1998;64(3):409-422.

Cohen L, Dehaene S, Naccache L, Lehéricy S, Dehaene-Lambertz G, Hénaff MA, Michel F, The visual word form area . Spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain*. 2000;123(2):291-307.

Cohen L, Dehaene S, Specialization within the ventral stream: the case for the visual word form area. *Neuroimage*. 2004;22(1):466-476.

Cohen-Mimran R, Sapir S, Deficits in working memory in young adults with reading disabilities. *Journal of Communication Disorders*. 2007;40(2):168-183.

Coltheart M, Curtis B, Atkins P, Haller M, Models of Reading Aloud: Dual-Route and Parallel-Distributed-Processing Approaches. *Psychological Review*. 1993;100(4):589-608.



Coltheart M, Rastle K, Perry C, Langdon R, Ziegler J, DRC: a dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*. 2001;108(1):204-56.

Coltheart M, Rastle K, Serial Processing in Reading Aloud: Evidence for Dual-Route Models of Reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 1994;20(6):1197-1211.

Cone-Wesson B, Prenatal alcohol and cocaine exposure: Influences on cognition, speech, language, and hearing. *Journal of Communication Disorders*. 2005;38(4):279-302.

Copland DA, Chenery HJ, Murdoch BE, Hemispheric Contributions to Lexical Ambiguity Resolution: Evidence from Individuals with Complex Language Impairment Following. *Brain and Language*. 2002;81(1-3):131-143.

Coulson S, Severens E, Hemispheric asymmetry and pun comprehension: When cowboys have sore calves. *Brain and Language*. 2007;100(2):172-187.

Coulson S, Van Petten C, A special role for the right hemisphere in metaphor comprehension? ERP evidence from hemifield presentation. *Brain Research*. 2007;1146:128-145.

Cowan N, Alloway TP, The development of working memory. In: Cowan N, editor. *Development of Memory in Childhood*. 2nd ed. Hove, England: Psychology Press; 2008;in Press.

Curtis CE, D'Esposito M, Persistent activity in the prefrontal cortex during working memory. *Trends in Cognitive Sciences*. 2003;7(9):415-423.

Damasio AR, Tranel D, Nouns and verbs are retrieved with differently distributed neural systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 1993;90(11):4957-4960.

Damasio H, Tranel D, Grabowski T, Adolphs R, Damasio A, Neural systems behind word and concept retrieval. *Cognition*. 2004;92(1-2):179-229.

Daniele A, Giustolisi L, Silveri MC, Colosimo C, Gainotti G, Evidence for a possible neuroanatomical basis for lexical processing of nouns and verbs. *Neuropsychologia*. 1994;32(11):1325-1341.

Davis R, Smith RG, Negotiation as a metaphor for distributed problem solving. *Artificial Intelligence*. 1983;20:63.

Day J, Right-hemisphere language processing in normal right-handers. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 1977;3:518-528.

Deary IJ, Caryl PG, Neuroscience and human intelligence differences. *Trends in Neurosciences*. 1997;20:365.

Dennis M, Whitaker HA, Language acquisition following hemidecortication: Linguistic superiority of the left over the right hemisphere. *Brain and Language*. 1976;3(3):404-433.

Desimone R, Duncan JS, Neural Mechanisms of Selective Visual Attention. *Annual Review of Neuroscience*. 1995;18:193-222.

Dien J, A tale of two recognition systems: Implications of the fusiform face area and the visual word form area for lateralized object recognition models. *Neuropsychologia*. 2009;47(1):1-16.

Ericsson KA, Kintsch W, Long-Term Working Memory. *Psychological Review*. 1995;102(2):211-245.

Ericsson KA, Staszewski JJ, Skilled memory and expertise: Mechanisms of exceptional performance. In: Klahr D, Kotovsky K, editors. *Complex information processing: The impact of Herbert A. Simon*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum; 1989:235-267.

Feldman HM, Holland AL, A fluent language disorder following antepartum left-hemisphere brain injury. *Journal of Communication Disorders*. 1992;25(2-3):125-142.

Fiez JA, Tranel D, Seager-Frerichs D, Damasio H, Specific Reading and Phonological Processing Deficits are Associated with Damage to the Left Frontal Operculum. *Cortex*. 2006;42:624-643.

Fisher SE, Francks C, Genes, cognition and dyslexia: learning to read the genome. *Trends in Cognitive Sciences*. 2006;10(6):250-257.

Foz FB, Lucchini FLP, Palmieri S, Rocha AF, Rodella EC, Rondó AG, Cardoso MB, Ramazzini PB, Leite CC, Language plasticity revealed by electroencephalogram mapping. *Pediatric Neurology*. 2002;26(2):106-115.

Francks C, MacPhie L, Monaco AP, The genetic basis of dyslexia. *The Lancet Neurology*. 2002;1(8):483-490.

Friederici AD, Kotz AS, The brain basis of syntactic processes: functional imaging and lesion studies. *Neuroimage*. 2003;20(1):S8-S17.

Friedmann N, Lukov L, Developmental surface dyslexias. *Cortex*. 2008;44(9):1146-1160.

Fuster JM, Unit-activity in prefrontal cortex during delayed-response performance - neuronal correlates of transient memory. *Journal of Neurophysiology*. 1973;36:61-78.

Gathercole SE, Alloway TP, Working memory & learning: A practical guide. London: Sage Press; 2008.

Georgiewa P, Rzanny R, Gaser C, Gerhard UJ, Vieweg U, Freesmeyer D, Mentzel HJ, Kaiser WA, Blanz B, Phonological processing in dyslexic children: a study combining functional imaging and event related potentials. *Neuroscience Letters*. 2002;318(1):5-8.

Geschwind N, Quadfasel FA, Segarra JM, Isolation of the speech area. *Neuropsychologia*. 1968;6(4):327-340.

Gibson CJ, Gruen JR, The human lexinome: Genes of language and reading. *Journal of Communication Disorders*. 2008;41(5): 409-420.

Gordon N, Some influences on cognition in early life: A short review of recent opinions. *European Journal of Paediatric Neurology*. 1998;2(1):1-5.

Grodzinsky Y, D Friederici A, Neuroimaging of syntax and syntactic processing. *Current Opinion in Neurobiology*. 2006;16:240-246.

Haier RJ, Siegel BV, Nuechterlein KH, Hazlett E, Wu JC, Paek J, Browning HL, Cortical glucose metabolic rate correlates of abstract reasoning and attention studied with positron emission tomography. *Intelligence*. 1988;12:199-218.

Hamzei F, Rijntjes M, Dettmers C, Glauche V, Weiller C, Büchel C, The human action recognition system and its relationship to Broca's area: an fMRI study. *Neuroimage*. 2003;19(3):637-644.

Hanley JR, Gard F, A dissociation between developmental surface and phonological dyslexia in two undergraduate students. *Neuropsychologia*. 1995;33(7):909-914.

Haramati S, Soroker N, Dudai Y, Levy DA, The posterior parietal cortex in recognition memory: A neuropsychological study. . 2008;46(7):1756-1766.

Hayashi A, Nagaoka M, Yamada K, Ichitani Y, Miake Y, Okado N, Maternal stress induces synaptic loss and developmental disabilities of offspring. *International Journal of Developmental Neuroscience*. 1998;16(3-4):209-216.

Heath RL, Blonder LX, Spontaneous humor among right hemisphere stroke survivors. *Brain and Language*. 2005;93(3):267-276.

Helmstaedter C, Kurthen M, Linke DB, Elger E, Patterns of Language Dominance in Focal Left and Right Hemisphere Epilepsies: Relation to MRI Findings, EEG, Sex, and Age at Onset of Epilepsy. *Brain and Cognition*. 1997;33(2):135-150.

Hewitt C, Inman J, Viewing control structure as patterns of passing messages. *IEEE Trans. Sys. Man and Cybernetics*. 1991;21:1409.

Hillis AE, Newhart M, Heidler J, Barker P, Herskovits E, Degaonkar M, The roles of the "visual word form area" in reading. *Neuroimage*. 2005;24(2):548-559.

Hinojosa JA, Martín-Loeches M, Gómez-jarabo G, Rubia FJ, Common basal extrastriate areas for the semantic processing of words and pictures. *Clinical Neurophysiology*. 2000;111:552-560.

Honey GD, Fu CHY, Kim J, Brammer MJ, Croudace TJ, Suckling J, Pich EM, Williams SCR, Bullmore ET, Effects of Verbal Working Memory Load on Corticocortical Connectivity Modeled by Path Analysis of Functional Magnetic Resonance Imaging. *Neuroimage*. 2002;17(2):573-582.

Hong KS, Lee SK, Kim JY, Kim KK, Nam H, Visual working memory revealed by repetitive transcranial magnetic stimulation. *Journal of the Neurological Sciences*. 2000;181(1-2):50-55.

Iacoboni M, Wilson SM, Beyond a single area: Motor control and language within a neural architecture encompassing broca's area. *Cortex*. 2006;42(4):503-506.

Ishai A, Ungerleider LG, Haxby JV, Distributed Neural Systems for the Generation of Visual Images. *Neuron*. 2000;28(3):979-990.

Ishida A, Nakajima W, Arai H, Takahashi Y, Iijima R, Sawaishi Y, Goto R, Takada G, Cranial computed tomography scans of premature babies predict their eventual learning disabilities. *Pediatric Neurology*. 1997;16(4):319-322.

Iturria-Medina Y, Sotero RC, Canales-Rodríguez EJ, Alemán-Gómez Y, Melie-García L, Studying the human brain anatomical network via diffusion-weighted MRI and Graph Theory. *Neuroimage*. 2008;40(3):1064-1076.

Jobard G, Crivello F, Tzourio N, Evaluation of the dual route theory of reading: a metaanalysis of 35 neuroimaging studies. *Neuroimage*. 2003;20(2):693-712.

Kinsbourne M, Cerebral representation of language in left and right hemispheres. *Journal of Neurolinguistics*. 1986;2(1-2):371-381.

Kintsch W, Patel VL, Ericsson KA, The Role of Long-term Working Memory in Text Comprehension. *Psychologia*. 1999;42(4):186-198.

Knopik VS, Alarcón M, DeFries JC, Common and specific gender influences on individual differences in reading performance: a twin study. *Personality and Individual Differences*. 1998;25(2):269-277.

Lesser VR, A retrospective view of FA/C distributed problem solving. *IEEE Trans. Sys. Man and Cybernetics*. 1991;21:1347.

Manenti R, Cappa SF, Rossini PM, Miniussi C, The role of the prefrontal cortex in sentence comprehension: An rTMS study. *Cortex*. 2008;44:337-344.

Manis FR, Seidenberg MS, Doi LM, McBride-Chang C, Petersen A, On the bases of two subtypes of development dyslexia. *Cognition*. 1996;58(2):157-195.

Martin A, Shades of Déjerine—Forging a Causal Link between the Visual Word Form Area and Reading. *Neuron*. 2006;50(2):173-175.

Mashal N, Faust M, Right hemisphere sensitivity to novel metaphoric relations: Application of the signal detection theory. *Brain and Language*. 2008;104(2):103-112.

McCandliss BD, Cohen L, Dehaene S, The visual word form area: expertise for reading in the fusiform gyrus. *Trends in Cognitive Sciences*. 2003;7(7):293-299.

McDonald S, Exploring the Cognitive Basis of Right-Hemisphere Pragmatic Language Disorders. *Brain and Language*. 2000;75(1):82-107.

McGrath LM, Smith SD, Pennington BF, Breakthroughs in the search for dyslexia candidate genes. *Trends in Molecular Medicine*. 2006;12:333-341.

Mesulam MM, Large-scale neurocognitive networks and distributed processing for attention, language, and memory. *Annals of Neurology*. 1990;28:597-613.

Meyers SCD, Hall NE, Aram DM, Fluency and language recovery in a child with a left hemisphere lesion. *Journal of Fluency Disorders*. 1990;15(3):159-173.

Miller EK, Cohen JD, An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*. 2001;24:167-202.

Miozzo A, Soardi M, Cappa SF, Pure anomia with spared action naming due to a left temporal lesion. *Neuropsychologia*. 1994;32(9):1101-1109.

Mitchell RLC, fMRI delineation of working memory for emotional prosody in the brain: Commonalities with the lexico-semantic emotion network. *Neuroimage*. 2007;36(3):1015-1025.

Mitchell RLC, Mitchell RLC, fMRI evidence for the effect of verbal complexity on lateralisation of the neural response associated with decoding prosodic emotion. *Neuropsychologia*. 2008;46(12):2880-2887.

Morgane PJ, LaFrance RA, Bronzino J, Tonkiss J, Díaz-Cintra S, Cintra L, Kemper T, Galler JR, Prenatal malnutrition and development of the brain. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 1993;17(1):91-128.

Mottaghy FM, What is working memory and how can we study it? Interfering with working memory in humans. *Neuroscience*. 2006;139(1):85-90.

Nass R, Myerson R, Bilateral language: Is the left hemisphere still dominant? *Brain and Language*. 1985;25:342-356.

Neubauer AC, Fink A, Schrausser DG, Intelligence and neural efficiency: The influence of task content and sex on the brain-IQ relationship. *Intelligence*. 2002;30:512-536.

Okado N, Narita M, Narita N, A biogenic amine-synapse mechanism for mental retardation and developmental disabilities. *Brain and Development*. 2001;23(1):S11-S15.

Pell MD, Reduced sensitivity to prosodic attitudes in adults with focal right hemisphere brain damage. *Brain and Language*. 2007;101(1):64-79.

Pennington BF, Dyslexia, Genetics of. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*. 2004;0:3924-3927.

Perani D, Schnur T, Tettamanti M, Italy, Cappa SF, Fazio F, Word and picture matching: a PET study of semantic category effects. *Neuropsychologia*. 1999;37(3):293-306.



Posner MI, Petersen SE, The Attention System of the Human Brain. *Annual Review of Neuroscience*. 1990;13:25-42.

Postle BR, Working memory as an emergent property of the mind and brain. *Neuroscience*. 2006;139(1):23-38.

Ramus F, Genes, brain, and cognition: A roadmap for the cognitive scientist. *Cognition*. 2006;101(2):247-269.

Rapcsak SZ, Beeson PM, Henry ML, Leyden A, Kim E, Rising K, Andersen S, Cho HS, Phonological dyslexia and dysgraphia: Cognitive mechanisms and neural substrates. *Cortex*. 2008;in Press.

Rizzolatti G, Arbib MA, Language within our grasp. *Trends in Neurosciences*. 1998;21(5):188-194.

Rocha AF, Pereira Jr. A, Coutinho FAB, N-methyl- -aspartate channel and consciousness: from signal coincidence detection to quantum computing. *Progress in Neurobiology*. 2001;64(6):555-573.

Rocha AF, Massad E, Coutinho FAB, Can the human brain do quantum computing? *Medical Hypotheses*. 2004;63(5):895-899.

Rocha AF, *Neural Nets: A Theory for Brains and Machine*. Springer-Verlag, Berlin. 1992.

Rocha AF, The brain as a symbol-processing machine. *Progress in Neurobiology*. 1997;53(2):121-198.

Rocha FT, Rocha AF, Massad E, Menezes R, Brain mappings of the arithmetic processing in children and adults. *Cognitive Brain Research*. 2005;22(3):359-372.

Ross ED, Monnot M, Neurology of affective prosody and its functional–anatomic organization in right hemisphere. *Brain and Language*. 2008;104(1):51-74.

Ross ED, Right hemisphere's role in language, affective behavior and emotion. *Trends in Neurosciences*. 1984;7(9):342-346.

Sakai KL, Hashimoto R, Homae F, Sentence processing in the cerebral cortex. *Neuroscience Research*. 2001;39:1-10.

Shaywitz BA, Shaywitz SE, Pugh KR, Fulbright RK, Skudlarski P, Mencl WE, Constable RT, Marchione KE, Fletcher JM, Kloman R, Lacadie C, Gore JC, The Functional Neural Architecture of Components of Attention in Language-Processing Tasks. *Neuroimage*. 2001;13(4):601-612.

Shaywitz SE, Shaywitz BA, Dyslexia (Specific Reading Disability). *Biological Psychiatry*. 2005;57(11):1301-1309.

Shiffrin RM, Schneider W, Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending and a general theory. *Psychological Review*. 1977;84(2):127-190.

Smith EE, Jonides J, Marshuetz C, Koeppel RA, Components of verbal working memory: Evidence from neuroimaging. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 1998;95(3):876-882.

Smith EE, Jonides J, Storage and Executive Processes in the Frontal Lobes. *Science*. 1999;283(5408):1657 - 1661.

Soares C, Converging evidence for left hemisphere language lateralization in bilinguals. *Neuropsychologia*. 1982;20(6):653-659.

Sörös P, Cornelissen K, Laine M, Salmelin R, Naming actions and objects: cortical dynamics in healthy adults and in an anomic patient with a dissociation in action/object naming. *Neuroimage*. 2003;19(4):1787-1801.

Southwood MH, Chatterjee A, Simultaneous Activation of Reading Mechanisms: Evidence from a Case of Deep Dyslexia. *Brain and Language*. 1999;67(1):1-29.

Southwood MH, Chatterjee A, The Interaction of Multiple Routes in Oral Reading: Evidence from Dissociations in Naming and Oral Reading in Phonological Dyslexia. *Brain and Language*. 2000;72(1):14-39.

Southwood MH, Chatterjee A, The Simultaneous Activation Hypothesis: Explaining Recovery from Deep to Phonological Dyslexia. *Brain and Language*. 2001;76(1):18-34.

Staszewski JJ, Exceptional memory: The influence of practice and knowledge on the development of elaborative encoding strategies. In: Schneider W, Weinert FE, editors. *Interactions among aptitudes, strategies, and knowledge in cognitive performance*. New York: Springer-Verlag; 1990:252-285.

Swanson HL, Jerman O, The influence of working memory on reading growth in subgroups of children with reading disabilities. *Journal of Experimental Child Psychology*. 2007;96(4):249-283.

Swanson HL, Reading Comprehension and Working Memory in Learning-Disabled Readers: Is the Phonological Loop More Important Than the Executive System? *Journal of Experimental Child Psychology*. 1999;72(1):1-31.

Tallal P, Hormonal influences in developmental learning disabilities. *Psychoneuroendocrinology*. 1991;16(1-3):203-211.

Temple CM, Developmental and Acquired Dyslexias. *Cortex*. 2006;42(6):898-910.

Thompson LA, Malloy DM, LeBlanc KL, Lateralization of visuospatial attention across face regions varies with emotional prosody. *Brain and Cognition*. 2008;in Press.

Tononi G, Edelman GM, Consciousness and complexity. *Science*. 1998;282:1846.

Tree JJ, Kay J, Phonological dyslexia and phonological impairment: An exception to the rule? *Neuropsychologia*. 2006;44(14):2861-2873.

Tzourio N, Heim A, Zilbovicius M, Gerard C, Mazoyer BM, Abnormal regional CBF response in left hemisphere of dysphasic children during a language task. *Pediatric Neurology*. 1994;10(1):20-26.

Van den Heuvel MP, Stam CJ, Boersma M, Pol HEH, Small-world and scale-free organization of voxel-based resting-state functional connectivity in the human brain. *Neuroimage*. 2008;in press.

Van Schie HT, Toni I, Bekkering H, Comparable Mechanisms for Action and Language: Neural Systems Behind Intentions, Goals, and Means. *Cortex*. 2006;42(4):495-498.

Vanlancker-Sidtis D, When only the right hemisphere is left: Studies in language and communication. *Brain and Language*. 2004;91(2):199-211.

Watts DJ, Strogatz SH, Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*. 1998;393(6684):440-442.

Westmacott R, Mcandrews MP, Silver FL, Altered effective connectivity within language networks following left hemisphere stroke. *Brain and Cognition*. 2007;63(2):199.

Woods BT, Is the left hemisphere specialized for language at birth? *Trends in Neurosciences*. 1983;6:115-117.

Zheng M, Goldin-Meadow S, Thought before language: how deaf and hearing children express motion events across cultures. *Cognition*. 2002;85(2):145-175.

Ziegler JC, Pech-Georgel C, George F, Alario FX, Perry C, Castel C, Developmental dyslexia and the dual route model of reading: Simulating individual differences and subtypes. *Cognition*. 2008;107(1):151-178.