
Recebido: 31-12-2020 | Aprovado: 26-02-2021 | DOI: <https://doi.org/10.23882/NE2145>

Alguns contributos das Neurociências para a Educação: os ambientes enriquecidos aumentam a capacidade de aprendizagem do nosso cérebro?

Some contributions from Neurosciences to Education:
do enriched environments increase the learning capacity of our brain?

Luís Cesariny Calafate, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Portugal (lcalafat@fc.up.pt)

Sara Cesariny Calafate, VIB Center for Brain & Disease Research, KU Leuven
Department of Neuroscience, België (sara.calafate@kuleuven.be)

Resumo: A reflexão e a discussão sobre o papel da especificação genética e da experiência na aquisição de uma função e no desenvolvimento de um indivíduo traduz um debate fascinante e muito atual entre quem trabalha na área do desenvolvimento do comportamento. Acerca do desenvolvimento do comportamento humano e da influência da herança biológica e do meio ambiente estabeleceram-se posições desencontradas e, por vezes, exclusivistas. De um lado, os adeptos da herança genética excluem a possibilidade da influência do meio ambiente. Do outro lado, os adeptos do meio ambiente excluem a herança genética. Existe também uma posição eclética, conciliando ambos os extremos. Além disso, no âmbito das próprias tendências surgem matizes diferenciadoras. Trata-se, portanto, de um assunto bastante polémico ao qual dedicamos este trabalho numa perspetiva das Neurociências. Abordaremos a neuroplasticidade cerebral como a capacidade que o sistema nervoso possui de mudar e adaptar-se, em resposta a estímulos internos e externos, induzindo alterações estruturais e / ou funcionais, ao longo da vida. A plasticidade cerebral constitui um dos pilares dos processos de aprendizagem e de memória. Quando se aprende e se memoriza ou quando se descobre algo desconhecido, a nova experiência deixa uma marca que se traduz em alterações no cérebro. Em suma, o papel das Neurociências no domínio das Ciências da Educação vai ganhando corpo e o conceito de neuroplasticidade é uma condição *sine qua non* para se tentar estabelecer uma ligação entre a educação, o comportamento e o cérebro.

Palavras-Chave: ambiente; educação; genes; neurociências; neuroplasticidade

Abstract: The reflection and discussion on the role of genetic specification and experience in the acquisition of a function and in the development of an individual reflects a fascinating and very current debate among those working in the area of behavior and development. Concerning the development of human behavior and the influence of biological heritage and the environment, conflicting and sometimes exclusive positions were established. On the one hand, adherents of genetic inheritance exclude the possibility of the influence of the environment. On the other hand, supporters of the environment exclude genetic inheritance. There is also an eclectic position, reconciling both extremes. Furthermore, within the scope of the trends themselves, differentiating nuances emerge. It is therefore, a very controversial subject to which we dedicate this work from a Neuroscience perspective. We will approach brain neuroplasticity as the ability of the nervous system to change and adapt, in response to internal and external stimuli, including structural and / or functional changes throughout life. Brain plasticity is one of the pillars of learning and memory processes. In short, the role of Neurosciences in the field of Educational Sciences is taking shape and the concept of neuroplasticity is a *sine qua non* condition for trying to establish a connection between education, behavior and the brain.

Keywords: education; environment; genes; neuroplasticity; neurosciences

1. Introdução

Quando um jornalista perguntou a Donald Olding Hebb (1904-1985) se eram os genes ou o ambiente o que mais contribuía para o desenvolvimento da personalidade de uma pessoa, este resumiu a sua visão, perguntando ao jornalista o que era mais importante para a área de um retângulo: o comprimento ou a largura (Francis & Kaufer, 2011). De facto, a questão central não deve ser qual dos dois elementos é predominante, mas antes como funcionam em conjunto. Por exemplo, como é que a experiência integra e complementa o trabalho dos genes. Visto desta perspetiva, os genes constituem a base biológica das potencialidades do desenvolvimento de uma determinada estrutura ou função.

O debate entre “inato” e “adquirido” constituiu sempre motivo de polémica. Por um lado, o campo do “adquirido” acredita que o comportamento é moldado pela experiência, excluindo a herança genética e, por outro lado, o campo do “inato” vê os genes como determinantes do comportamento, excluindo a possibilidade da influência do meio ambiente (Calafate, 1989, 2001). Com o conceito de “neuroplasticidade”, as Neurociências contribuíram para resolver a disputa entre inato e adquirido, mostrando que a experiência repetida pode modificar o cérebro (Goleman & Davidson, 2018). Deste ponto de vista, o conceito de neuroplasticidade é uma condição *sine qua non* para o estabelecimento de uma ligação entre a educação, o comportamento e o cérebro (Masson & Brault Foisy, 2014).

Durante o seu desenvolvimento, apesar do cérebro se construir a partir de “planos genéticos” pré-determinados, o equilíbrio entre a informação intrínseca (genética) e a informação extrínseca (proveniente de estímulos do exterior) desempenha um papel crucial no progresso da conectividade cerebral da qual emerge a nossa mente. Por outras palavras, o desenvolvimento do cérebro e o seu funcionamento não são concebíveis sem o contributo permanente do meio envolvente, seja este o próprio organismo ou o ambiente celular, ecológico e social em que se desenvolve (Dierssen, 2019a). Todavia, segundo Castro Caldas (2016), podemos admitir que a genética é mais importante no período de gestação (embora no terceiro trimestre de formação do feto se registre já a influência do meio externo) e tem

influência marcada quando faz emergir no corpo diversas “novidades” como, por exemplo, as hormonas sexuais na adolescência.

O facto de a experiência poder deixar uma marca no cérebro constituiu um desafio às crenças dominantes na área das Neurociências durante o século XX. No início, a ideia aceite era a de que, no momento do nascimento, possuímos no nosso cérebro um número máximo de neurónios e que, depois, os perdemos numa contínua morte no decurso da vida (Gregorio, 2019).

A reflexão sobre o papel da especificação genética e da experiência na aquisição de uma função e no desenvolvimento de um indivíduo continua a ser um tema de debate muito atual entre os estudiosos do desenvolvimento do comportamento (Berardi & Sale, 2019). Este trabalho de revisão de factos e teorias pretende explorar o vasto e importante problema do “paradigma do enriquecimento ambiental”, da propriedade da “plasticidade neuronal” e das eventuais implicações destes conhecimentos na prática da educação em geral. Temos plena consciência que não compete às ciências do cérebro discutir os temas e conteúdos das matérias a lecionar em contexto escolar. Todavia, sentimos que só agora começamos a adquirir os materiais necessários para fazer uma síntese dos conhecimentos e que algumas sugestões merecem ser exploradas quanto à criação de ambientes proporcionando experiências de aprendizagem com grande significado para a educação dos seres humanos.

2. A plasticidade fenotípica

Na Biologia, a plasticidade fenotípica é considerada como ocorrendo quando o fenótipo expresso por um dado genótipo se altera em consequência de mudanças das condições ambientais. Por outras palavras, o genótipo de cada indivíduo produz diferentes fenótipos quando exposto a diferentes condições ambientais (Pigliucci, Murren & Schlitching, 2006).

Os seres vivos desenvolveram uma variada gama de estratégias para lidar com as flutuações dos recursos e da temperatura, recorrendo a uma combinação de mudanças na morfologia, fisiologia e comportamento. Assim, os animais exibem adaptações etológicas em resposta às variações ecológicas que en-

frentam. Por exemplo, durante o inverno, os vertebrados recorrem a duas estratégias: migração ou hibernação (Alcock, 1988).

O órgão responsável pela regulação do comportamento, o cérebro, também apresenta a capacidade para mudar em resposta a mudanças ambientais, a necessidades comportamentais, a lesões, ou à formação de novas memórias. Algumas das mais surpreendentes alterações plásticas e reversíveis no cérebro, relacionadas com os ciclos sazonais da natureza, foram observadas em pequenos mamíferos como o musaranho e a doninha (Lázaro et al., 2019; Ray et al., 2020).

3. Neuroplasticidade: alguns exemplos

Desde o aparecimento do sistema nervoso durante a evolução, os neurónios especializaram-se em captar a informação do ambiente que os organismos necessitavam para a sua sobrevivência. Quando o meio se tornou mais complexo, muitos organismos também se concentraram na análise e avaliação do significado das mudanças ambientais. A forma de canalizar estas influências surgiu com o desenvolvimento da capacidade de adaptação contínua do cérebro a um ambiente em permanente mudança, através de modificações físicas, estruturais e funcionais (Godfrey-Smith, 2017). Uma intrigante característica do cérebro adulto é, precisamente, esta capacidade para uma modificação estrutural e funcional em resposta a estímulos externos. Neste âmbito, a plasticidade do sistema nervoso adulto tem constituído o foco da investigação durante décadas (Mohammed, 2002). Já Charles Darwin, na sua obra “A Origem do Homem e a Seleção Sexual”, publicada em 1871, chamava a atenção para o impacto do ambiente no cérebro, aludindo na sua descrição dos coelhos selvagens, como possuindo um cérebro maior quando comparados com os coelhos domésticos. Darwin (1871) atribui esta diferença no volume do cérebro ao facto de os coelhos domésticos terem estado confinados durante muitas gerações, não podendo exercitar plenamente a sua inteligência, instintos, sentidos e movimentos voluntários.

De facto, os circuitos neuronais podem mudar ou reorganizar-se em resposta à experiência. Esta capacidade é definida como “neuroplasticidade” e dela

dependem o desenvolvimento do comportamento e a sua adaptabilidade e flexibilidade (Sale, 2018). Neste sentido, a plasticidade cerebral refere-se à capacidade intrínseca dos neurónios para criar, modificar ou desfazer conexões sinápticas baseando-se na aprendizagem, na repetição ou no hábito (Sepulcre, 2019). Todavia, existem alguns limites a esta plasticidade neural.

A plasticidade possibilita mudanças e adaptações, tanto a curto prazo (segundos, minutos) como a longo prazo (dias, semanas, anos), afetando tanto a estrutura (plasticidade estrutural) como as funções (plasticidade funcional) das redes neuronais. Assim, a plasticidade estrutural é a capacidade do cérebro para modificar a sua estrutura física (tamanho e/ou volume de fibras e áreas neuronais) como resultado da aprendizagem, enquanto a plasticidade funcional está relacionada com o aumento do número de sinapses ou conexões entre neurónios. Durante o desenvolvimento, a plasticidade permite a formação de mapas de conectividade cerebral, de tal forma, que o resultado final é produto da interação entre o código genético de cada indivíduo e o seu meio ambiente (Dierssen, 2019b). Resumindo, a plasticidade do sistema nervoso é alcançada por diferentes formas, incluindo níveis distintos: vai desde a plasticidade sináptica, passando pela dos circuitos neuronais até à plasticidade do genoma e à plasticidade comportamental. Segundo Bentivoglio & Grassi-Zucconi (2019), cada uma destas formas de plasticidade está relacionada com as restantes.

Por exemplo, o sistema visual – composto pelo olho, o nervo ótico e as regiões associadas - é um conjunto de órgãos extremamente sofisticado. Ninguém duvida que se trate de uma adaptação evolutiva, que aumenta o *fitness* dos seres vivos com ela equipados. É maioritariamente inato: conhecem-se mutações que afetam diferentes componentes, da visão das cores aos pormenores anatómicos (Sacks, 1998). Assim, podemos perguntar o que acontece ao sistema visual se não houver estímulos de entrada nas primeiras fases do seu desenvolvimento? Ora, David Hubel (1926-2013) e Torsten Wiesel, ambos Prémio Nobel da Medicina em 1981, pelas suas descobertas sobre o córtex visual, em estudos sobre am-

bliopia induzida em gatos (privação visual forçada durante a maturação cerebral) mostraram fenômenos essenciais para entender a plasticidade cortical durante o desenvolvimento (Wiesel & Hubel, 1963, 1965). Se a um mamífero com visão binocular se fechar ou tapar um olho, durante o período de desenvolvimento, as conexões óticas, que vão do corpo geniculado lateral até ao córtex visual, retraem-se lentamente e, em parte, atrofiam, provocando a perda de visão no olho que não recebeu estímulos visuais. Assim, os gatos jovens não desenvolvem a visão se os seus olhos forem vendados. No entanto, se a venda for removida antes das oito semanas de vida, o olho retoma o seu desenvolvimento normal, mas, se a venda for retirada mais tarde, a deficiência mantém-se para o resto da vida. Aparentemente, existe um período crítico durante o qual o sistema visual precisa de receber estímulos externos para se desenvolver. Conhece-se relativamente bem a neuroanatomia do sistema visual e, hoje, sabemos que as ligações sinápticas entre neurónios se desenvolvem em resposta a estímulos, e são eliminadas na sua ausência. Portanto, no caso dos gatos existe um aparelho de aquisição da visão inato, o qual, desde que receba o estímulo de entrada visual apropriado, é útil ao organismo. Por outro lado, a capacidade de desenvolver a visão requer uma região específica do cérebro, com ligações estabelecidas previamente – isto é, outras partes do cérebro não a conseguem substituir. O estabelecimento de um sistema visual adequado é conseguido se os próprios estímulos externos funcionarem como guias do processo. Portanto, o desenvolvimento sistema visual pode depender de entradas apropriadas de estímulos, nas fases iniciais, e também de estruturas cerebrais geneticamente determinadas. O que percebemos visualmente é o resultado da forma como os nossos circuitos nervosos visuais operam e depende de como estes funcionam.

Um grupo de neurocientistas da University College of London descobriu que os motoristas de táxi de Londres têm um hipocampo maior, demonstrando a relação entre o exercício de uma função cerebral e o desenvolvimento da região responsável por essa função (Maguire et al., 2000). Os candidatos submetem-se a quatro anos de aprendizagem para passarem num exame designado “Knowledge of London”, memori-

zando inúmeros trajetos das ruas londrinas com todas as combinações possíveis: 320 rotas diferentes através da cidade, 25 mil ruas e 20 mil pontos de referência e de atração turística. Nordengen (2018) refere que, depois de tal preparação, a percentagem de reprovações nos exames de admissão é de quase 50 por cento. O hipocampo, que é vital para a memória (sobretudo, a espacial), apresentava um tamanho maior nestes taxistas do que no grupo de controlo, presumivelmente associado ao incremento da sua memória espacial. Maguire et al. (2000) também descobriram que quanto mais anos de experiência tinha um taxista, maior era a alteração nessa região cerebral, o que sugeria tratar-se de um efeito da experiência. Neste caso, o estudo dos taxistas demonstra que o cérebro adulto não tem uma configuração fixa: pode treinar-se o hipocampo. Atualmente, sabemos que o hipocampo é um dos poucos locais do cérebro em que se geram neurónios novos, outra manifestação da plasticidade. Assim, este estudo é um dos claros exemplos demonstrando que a experiência molda o nosso cérebro e, muito provavelmente, este resultado depende da extensão do detalhe e/ou da duração da utilização das representações espaciais adquiridas e não de uma capacidade de navegação inata (Maguire et al., 2003). Com efeito, no hipocampo, ao contrário do que acontece nas outras partes do cérebro, o aumento ou a redução da formação de novas células nervosas pode continuar durante toda a vida.

Na Natureza, à medida que os animais encontram nova informação e adquirem experiências são formadas memórias. O papel do hipocampo na memória é um dos temas centrais da Neuroetologia e da Neuroecologia (Clayton, 1995; Sherry, 2006). Entre as variadas funções da memória atribuídas ao hipocampo temos o seu envolvimento com aspetos espaciais do ambiente (Sherry et al., 1989). No caso das aves que armazenam o alimento em esconderijos o hipocampo desenvolve-se mais do que nas espécies que não apresentam este comportamento. Por outro lado, se estas aves não tiverem oportunidade de armazenar o alimento o hipocampo também não se desenvolve tanto. Em aves criadas em laboratório essa oportunidade pode ser protelada para além da idade normal. Todavia, quando tornado possível estas aves fazem-no pronta-

mente e o hipocampo reflete essa experiência desenvolvendo-se mais relativamente ao resto do telencéfalo (Clayton, 1995).

A memória espacial relacionada com o comportamento armazenamento de alimento é um exemplo de especialização filogenética do cérebro (Krebs et al., 1989). Deste ponto de vista, os estudos do hipocampo das aves podem contribuir para comparações com a literatura do hipocampo dos mamíferos (Figura 1), porque parecem existir semelhanças funcionais. Os vertebrados partilham as mesmas partes do cérebro (continuidade), mas essas partes têm formas, tamanhos e ocupam posições diferentes (diversidade), conforme a história evolutiva – a forma como se adaptaram a diferentes ambientes, ao longo do tempo. Todavia, como as aves e os mamíferos divergiram e evoluíram independentemente há, aproximadamente, 250 milhões de anos, existirão diferenças anatômicas consideráveis no hipocampo (Sherry, 2006).

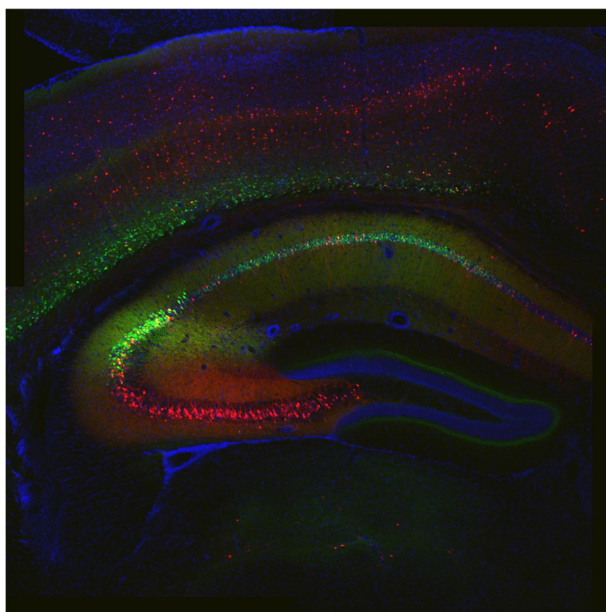


Figura 1 A figura representa um corte coronal do hipocampo de murgo após a expressão de proteínas fluorescentes, utilizando vetores virais nas diferentes sub-regiões do hipocampo.

Os mais variados estudos têm mostrado que o cérebro em desenvolvimento das aves e dos mamíferos, incluindo o hipocampo dos mamíferos, é plástico em resposta às hormonas e a certas modalidades de estímulos sensoriais ou experiências. Por outro lado, a

duração dos períodos críticos está relacionada com a duração da vida. Por isso, quanto mais longa esta for, mais longa será a janela de oportunidade durante a qual o efeito da experiência pode moldar o desenvolvimento. Uma vida mais longa significa também que as funções cerebrais têm um maior período de desenvolvimento ontogenético (Berardi & Sale, 2019). Nos invertebrados, os efeitos anatómicos do treino e da experiência diferencial também foram identificados, por exemplo, em regiões específicas do cérebro de *Drosophila* (Heisenberg et al., 1995). Podemos concluir que esta plasticidade estrutural dos artrópodes é uma propriedade de todos os cérebros, permitindo aos organismos ambulatórios ajustarem-se às mudanças das suas condições de existência ao longo da vida.

Na opinião de Maffei (2018), a instrução disponibilizada pela sociedade não pode deixar de considerar a existência dos períodos de grande plasticidade do cérebro, durante os quais a aprendizagem é facilitada e otimizada. Desde o jardim de infância até ao secundário, a educação escolar entre os três anos e a adolescência é fundamental para o desenvolvimento do indivíduo. A escola em todas as idades é importante, todavia, torna-se numa janela crítica de oportunidades nos primeiros anos, quando se está a formar o cérebro. Todas as funções associadas a uma determinada estrutura cerebral amadurecem durante o desenvolvimento, cada uma delas num período crítico específico. A duração destes períodos críticos harmoniza-se para alinhar temporalmente as trajetórias de desenvolvimento dos vários processos neuronais realizados pelos mesmos circuitos nervosos.

4. Ambiente enriquecido: um paradigma experimental

O ambiente em que vivemos é constituído pelo conjunto de lugares, pessoas e circunstâncias que geram diferentes estímulos nas nossas vivências. Para Berardi & Sale (2019), o ambiente é uma sucessão de estímulos passados pelo filtro dos sentidos e conduzidos ao cérebro, onde são processados, armazenados e usados para a configuração do comportamento. Conhece-se há muito tempo o efeito positivo da estimulação e do enriquecimento ambiental para o cérebro (Sepulcre, 2019). O modelo clássico para o estudo do

impacto da experiência no cérebro em estudos com animais é, precisamente, o “ambiente enriquecido”. Mas o que se entende por “ambiente enriquecido”, “complexidade ambiental” ou “ambiente complexo”, no âmbito neurocientífico?

Em meados do século XX, Donald Hebb (1904-1985) propôs o conceito de ambiente enriquecido como modelo experimental. Ao estudar os princípios que subjazem às regras básicas de aprendizagem, explorou como a experiência precoce influenciava, posteriormente, as capacidades cognitivas. Segundo Hebb (1947, 1949), os ratos que tinha em casa, temporariamente, apresentavam um melhoramento (*enhancement*) cognitivo em relação aos seus congêneres da mesma ninhada que permaneceram no laboratório. Assim, descobriu que os ratos criados como animais de estimação, quando eram levados novamente para o laboratório, eram superiores a resolver variados problemas quando comparados com os ratos criados em gaiolas standard de laboratório. Os primeiros desenvolveram mais as suas capacidades e, em resultado de um meio exterior mais estimulante, apresentavam melhorias concretas. Em 1952, Forgyays & Forgyays (1952), estudantes de Donald Hebb, confirmaram que a experiência enriquecida melhora o comportamento de resolução de problemas espaciais de ratos, quando comparados com animais em condições standard de laboratório.

Assim, a investigação quanto aos efeitos do “ambiente enriquecido, nos anos 1950 e 1970, tornou-se no paradigma central da Psicologia do Desenvolvimento, permitindo aos investigadores formular experimentalmente questões fundamentais relacionadas, por exemplo, com as contribuições da hereditariedade e educação. De um ponto de vista biológico, é o equivalente a perguntar-se pela contribuição respetiva dos genes e do ambiente no desenvolvimento (Rosenzweig, 1996; Rosenzweig, 2003; Kempermann et al., 2010). Em contexto de laboratório, o ambiente enriquecido consiste numa jaula com algumas particularidades onde os roedores são alojados. Em geral, é mais ampla e contém um número adequado de animais com oportunidade para interagir socialmente de forma mais rica e complexa. Nestas jaulas, há jogos de todo o tipo, túneis e casinhas de várias cores, e o lugar onde se coloca o alimento muda diariamente.

Como se pode intuir, a definição de ambiente enriquecido implica que a relevância de todos os fatores individuais que contribuem para o enriquecimento não pode ser facilmente isolada, havendo boas razões para supor que é a interação de todos estes fatores que constitui um elemento essencial do ambiente enriquecido. Por outro lado, estudos experimentais em animais de laboratório demonstraram que ratos colocados em “ambientes empobrecidos”, isto é, privados de estímulos, diminuem as suas capacidades de reação ao ambiente. Também no homem, em experiências de privação sensorial ou motora são evidentes perturbações motoras ou cognitivas (Maffei, 2019).

Atualmente, é indiscutível que o modelo de ambiente enriquecido é o mais apropriado para a aprendizagem. Ao nível do comportamento, o enriquecimento está relacionado com a aprendizagem e a memória e uma redução no declínio da memória à medida que aumenta a idade (Rampon et al., 2000; van Praag et al., 2000). A nível celular, o enriquecimento resulta na proliferação de células no hipocampo, angiogénese e ativação das células de microglia (Kempermann et al., 1997; Gage, 2002).

5. Interação com o ambiente: neurogénese

Já referimos que o ambiente constitui um estímulo fundamental tanto para o nascimento de novos neurónios como para a capacidade de os neurónios estabelecerem um maior número de conexões com outros neurónios. De acordo com um grande número de experiências realizadas com animais de laboratório e reproduzidas em seres humanos, a interação com o ambiente é determinante para estimular, ou reduzir, a neurogénese no cérebro maduro e determinar conexões com outros neurónios, potenciando a sua arborização dendrítica.

O chamado “ambiente enriquecido” e a atividade física constituem os dois estímulos fisiológicos mais fortes que atuam na neurogénese do hipocampo adulto. Vários grupos de investigação demonstraram que, numa região do hipocampo chamada “giro dentado”, começam a desenvolver-se novos neurónios também no indivíduo adulto, o que destrói o mito de que com a maturidade deixam de formar-se células nervosas (Nithianantharajah & Hannan, 2006).

Num animal mantido num ambiente complexo com estímulos sensoriais (introduzindo na jaula objetos novos com odores e formas diferentes) ou sociais (introduzindo na jaula vários congêneres), a neurogênese e o desenvolvimento das dendrites aumentam, tal como quando o animal sobe voluntariamente para uma pequena roda que está na jaula e realiza atividade física. Consequentemente, um ambiente privado de estímulos sensoriais e sociais determina, num animal de laboratório, uma arborização dos neurónios inferior em relação à que se desenvolve num ambiente com estímulos variados abundantes.

Embora hoje ainda existam muitas teorias que tentam explicar a forma como o ambiente enriquecido influencia o cérebro, não há dúvida de que este tem efeitos benéficos no comportamento e potencia meca-

nismos de plasticidade sináptica, em grande parte acionados pelas neurotrofinas (Cotrufo, 2019). Por exemplo, verifica-se um aumento das espinhas (espículas) dendríticas, que são estruturas celulares que promovem as ligações – sinapses – entre as células (Figura 2).

6. O recém-nascido: sinaptogênese

Durante o desenvolvimento do sistema nervoso (central e periférico) ocorre a formação de um número excessivo de sinapses. Nas etapas seguintes existe um processo de refinamento dos contactos sinápticos designado eliminação sináptica. Nos estados finais do desenvolvimento embrionário e durante o desenvolvimento pós-natal, os circuitos neurais formados com base na informação fornecida pelos genes são aperfei-

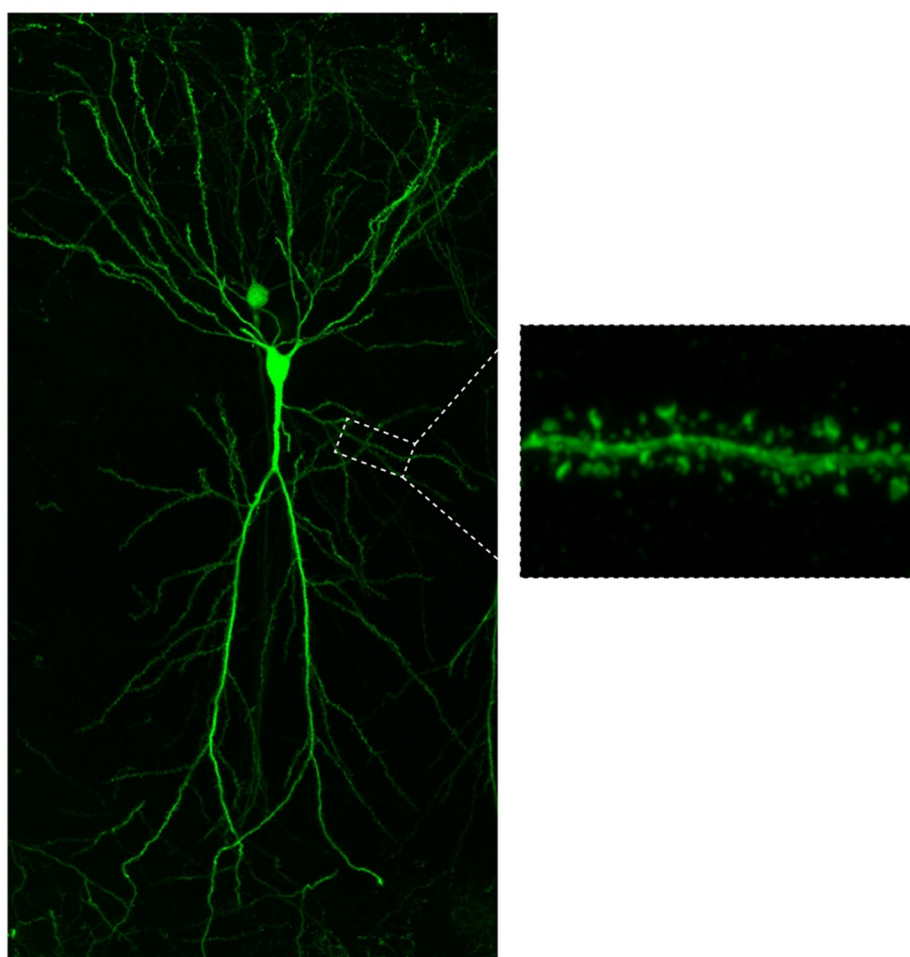


Figura 2 Neurónio do hipocampo de murgancho. No lado esquerdo, temos um neurónio do hipocampo visualizado com um microscópio confocal de fluorescência, utilizando uma magnificação de 20x. No lado direito, temos uma área de dendrite, visualizada com uma magnificação de 63x. A imagem da direita corresponde a uma ampliação da área limitada pelo retângulo da figura da esquerda.

coados através da experiência, ou seja, através da atividade elétrica que provoca nos próprios circuitos e que promove a maturação definitiva das conexões nervosas. No ser humano e noutros mamíferos a sinaptogênese continua após o nascimento, sendo, por conseguinte, um estágio de desenvolvimento muito sensível aos efeitos da experiência e do ambiente (Berardi & Sale, 2019).

No recém-nascido, a interação social e os estímulos sensoriais que derivam do ambiente dependem da qualidade e quantidade de interações que o bebê estabelece com a sua mãe. Em animais de laboratório, verificou-se que a neurogênese no hipocampo adulto de bebês criados por mães muito atenciosas e dedicadas é significativamente mais consistente do que nos filhos de mães que lhes prestam atenção apenas de forma esporádica. Além disso, a neurogênese no cérebro adulto diminui no caso de uma separação da mãe durante períodos prolongados na fase pós-natal, o que constitui inclusivamente um modelo animal de *stress* infantil, bem caracterizado nas ratazanas (Bentivoglio & Grassi-Zucconi, 2019).

Resumindo, para a reconfiguração sináptica, que dura toda a infância, o papel do ambiente é essencial. A experiência específica do indivíduo e as suas interações com o ambiente modulam especialmente as fases finais do desenvolvimento dos circuitos cerebrais até se atingir um estado de maturação e, por conseguinte, influenciam o desenvolvimento do comportamento de uma forma específica em cada indivíduo: “experiências diferentes, cérebros diferentes”.

7. A criança: cérebro & ambiente

Do ponto de vista filogenético, o homem conserva durante toda a sua vida características neoténicas e, com elas, também a curiosidade e a sede do conhecimento. Este acontecimento determinou alguns marcos significativos durante o desenvolvimento, como uma longa infância e os cuidados parentais. A infância prolongada do homem possibilitou o aparecimento de um cérebro que continua durante dezenas de anos a formar-se, tanto do ponto de vista funcional como do ponto de vista estrutural. Trata-se de um período de grande plasticidade do homem (Calafate, 2000b).

A criança de 5 anos é capaz de “desenvolver capacidades” muito distintas do bebé de poucos meses, não só porque o ambiente lhe forneceu conteúdos adicionais, mas também e, sobretudo, porque o seu cérebro se diferenciou (Calafate, 2000a). Todavia, o ambiente, como experiência do indivíduo, torna-se fator decisivo e diferencia mente e comportamento. Para Berardi & Sale (2019), a possibilidade de otimizar o desenvolvimento cerebral da criança através de programas de enriquecimento ambiental constitui um tema de grande interesse e atualidade, com implicações de grande potencialidade na pedagogia e na sociedade.

Na opinião de Castro Caldas (2016), como muito se tem aprendido nos últimos anos sobre as funções cerebrais e sobre a forma como o cérebro lida com a informação, é natural que este conhecimento extravase para os programas escolares. Assim, é muito provável que a novidade e a variedade dos estímulos desempenhem um papel fundamental na melhoria da aprendizagem escolar e na obtenção de uma educação integral (Ortiz Alonso, 2019). A escola dos dias de hoje não pode prescindir deste novo conhecimento, devendo saber gerir as fases de desenvolvimento e as suas características para ajudar as crianças e os adolescentes a maximizar as potencialidades dos seus cérebros, o que também irá moldar o seu comportamento (Rato & Castro Caldas, 2017).

Todavia, o problema atual não se limita à falta de reformas educativas que tenham em consideração os conhecimentos recentes das Neurociências. Segundo Cotrufo (2019), o que é realmente necessário é falar da perspectiva da Neuroeducação, ou seja, da utilidade da aplicação dos conhecimentos das Neurociências e das evidências obtidas na investigação para desenvolver e implementar métodos de ensino mais adequados, em vez de ilusórias estimulações precoces a qualquer preço.

8. Neuromito: os “ambientes enriquecidos” aumentam a capacidade de aprendizagem

Na sua recente obra, Castro Caldas & Rato (2020) realçam, com alguma preocupação, que os neuromitos têm vindo a propagar-se com uma grande rapidez, abarcando uma série de domínios, desde a arquitetura do cérebro, passando por questões ligadas à inteligên-

cia, ao desenvolvimento, à memória, à linguagem e aos contextos e métodos de aprendizagem. No entanto, a neuroplasticidade é um facto bem estabelecido suportado por estudos credíveis e também existe uma forte evidência acerca dos períodos sensíveis, embora nem todos os estudos sejam realizados com seres humanos. Em geral, pode dizer-se que, durante o período crítico, a diminuição ou a ausência de estímulos sensoriais externos ou internos induzem um atrofiamento lento e progressivo das conexões e uma diminuição do número de sinapses envolvidas na elaboração de uma determinada modalidade sensorial. Já o aumento oportuno e adequado de estímulos produz efeitos positivos.

A propósito do aumento dos estímulos podemos mencionar o caso do chamado neuromito do ambiente enriquecido. Na opinião de Cotrufo (2019), este neuromito afirma que, para as capacidades cerebrais ou intelectuais de uma criança se desenvolverem o melhor possível, entre os 0 aos 13 anos, é necessário um ambiente com estímulos abundantes. Ora, segundo Blakemore & Frith (2009), há muitas ideias falsas sobre o desenvolvimento do cérebro a impregnar o dogma educacional como é o caso, por exemplo, dos períodos críticos de aprendizagem. Assim, Blakemore & Frith (2009) interrogam-se se os ambientes enriquecidos das crianças pequenas melhoram o desenvolvimento do cérebro ou, pelo contrário, serão suficientes os ambientes “normalmente” ricos.

Se interpretarmos corretamente o significado de um ambiente enriquecido, concluiremos que basta a uma criança crescer num ambiente onde as interações sociais são livres e naturais, com uma mãe que tenha tranquilidade e disponibilidade para cuidar dela, onde haja bastante espaço para correr e a possibilidade de fazer exercício e jogos. Contudo, na nossa sociedade, a ideia de um ambiente enriquecido é percebida como uma oferta de atividades e de estímulos que não é fácil encontrar à nossa volta. Neste âmbito, podemos perguntar se existe um limiar de qualidade para um desenvolvimento ótimo? Neste caso, Blakemore & Frith (2009) sugerem que há um limiar de “riqueza” abaixo do qual um ambiente carenciado pode pôr em risco o desenvolvimento do cérebro. Não obstante, uma estimulação excessiva

também pode ter um efeito nefasto. Na opinião de Castro Caldas (2016), pouca estimulação pode limitar o desenvolvimento do cérebro, mas nada sabemos sobre o que acontece quando se altera esse regime. De qualquer modo, Castro Caldas & Rato (2020) defendem que, embora exista um componente genético na aprendizagem, a experiência de vida altera a inteligência ao longo da vida.

9. Neurotecnologias: Rede Cerebral & Conectoma

Como o cérebro é um órgão complexo e, consequentemente, difícil de compreender não é de estranhar existirem muitos mitos sobre o seu funcionamento (Masson, 2015). Ao longo do século XX, as Neurociências foram amadurecendo, cartografando o mapa do cérebro e, pouco a pouco, foi-se construindo uma visão do cérebro como uma rede de redes (Viosca, 2019).

O que acontece no nosso cérebro quando aprendemos algo de novo? Como é que as alterações nos neurónios e nas sinapses levam à formação de novas memórias? Em 1949, Donald Hebb supôs que a aprendizagem e a memória poderiam depender de um processo simples no qual “os neurónios que disparam em simultâneo se ligam entre si”, ilustrando assim o conceito de sinapse hebbiana. Todavia, as dificuldades no domínio das neurotecnologias mantiveram a maioria dos investigadores longe de tentar avaliar experimentalmente as ideias sobre as populações neuronais, como base da função cerebral, introduzidas por Hebb. No entanto, o seu trabalho pioneiro teve grande influência, relevância e alcance, continuando a ser a base de muitos progressos na Robótica, na Ciência da Computação, na Inteligência Artificial e na Engenharia, bem como nas Neurociências e na Psicologia do desenvolvimento.

Atualmente, sabemos que os neurónios estão organizados em redes que viabilizam o processamento de informação e que processos mentais concretos podem localizar-se em regiões cerebrais discretas. Assim, o comportamento ou a cognição não se podem explicar a partir da atividade de um neurónio, mas decorrem da sincronização da atividade de redes neuronais sobrepostas, distribuídas por todo o encéfalo. A investigação recente em Neurociências alertou para a exis-

tência e importância daquilo a que hoje chamamos conectoma, isto é, o nosso “mapa” de conexões neuronais no cérebro (Seung, 2013). As numerosas regiões do cérebro estão ligadas entre si por 160 mil quilómetros de fibras de matéria branca que se dispõem numa estrutura reticulada. Podemos mesmo admitir que a nossa mente é uma propriedade emergente de redes neuronais em que o elemento-chave é a topologia das conexões (Dehaene, 2014). Tudo isto torna ainda mais importante compreender como se constrói e como é modificável esta rede de conexões.

Ora, o estudo do cérebro humano e das suas redes *in vivo* exige a utilização de técnicas de neuroimagem estrutural e funcional. Até ao desenvolvimento do electroencefalograma e da ressonância magnética, os investigadores apenas podiam imaginar como era o estado estrutural e funcional do cérebro vivo (Alonso & Esquisábel, 2019b). Felizmente, nas últimas décadas, os métodos de visualização do cérebro sofreram um grande desenvolvimento tecnológico, permitindo realizar estudos cada vez mais precisos (Sepulcre, 2019).

De facto, a imagiologia cerebral serve para estudar cérebros vivos de forma segura e indolor, explorando propriedades do cérebro em atividade. Existem diferentes técnicas funcionais que utilizam diferentes detetores para captar sinais da atividade cerebral. Na Figura 3 é possível visualizar a atividade neural de um cérebro a partir da técnica do electroencefalograma (EEG) de medição da atividade elétrica. O EEG é uma técnica não invasiva utilizada para medir a atividade direta das diversas áreas do cérebro por meio da colocação de uma série de eletrodos em várias partes do crânio, recorrendo a um capacete ou a uma touca, e facilitando a visualização dessa atividade através de um amplificador. Esta técnica permite detetar flutuações globais da voltagem no cérebro, resultando do somatório das alterações das correntes iónicas de centenas de milhares de neurónios numa região. O EEG tem uma grande resolução temporal (na

ordem do milissegundo) e é capaz de captar diferentes espectros de frequência dos sinais elétricos cerebrais. Todavia, o EEG tem uma má resolução espacial e não fornece uma informação detalhada sobre a origem neuroanatômica das flutuações eletrofisiológicas, não sendo capaz de registar individualmente a atividade de cada neurónio ou de populações neuronais específicas (Maojo, 2019; Solarz, 2019).

Os dados obtidos com o EEG são vários tipos de oscilações neuronais que correspondem a diferentes frequências. O EEG traduz o espectro das diversas ondas cerebrais de atividade elétrica características do funcionamento das redes neurais e da comunicação dentro de áreas ou entre áreas cerebrais diferentes (Chiamulera, 2019). Para termos uma pequena ideia da complexidade destes sinais eletrofisiológicos cerebrais, Solarz (2019) propõe imaginarmos que a atividade cerebral produz uma sinfonia elétrica como resultado da ação de milhares de milhões de músicos com instrumentos interligados que funcionam através de mecanismos diferentes.

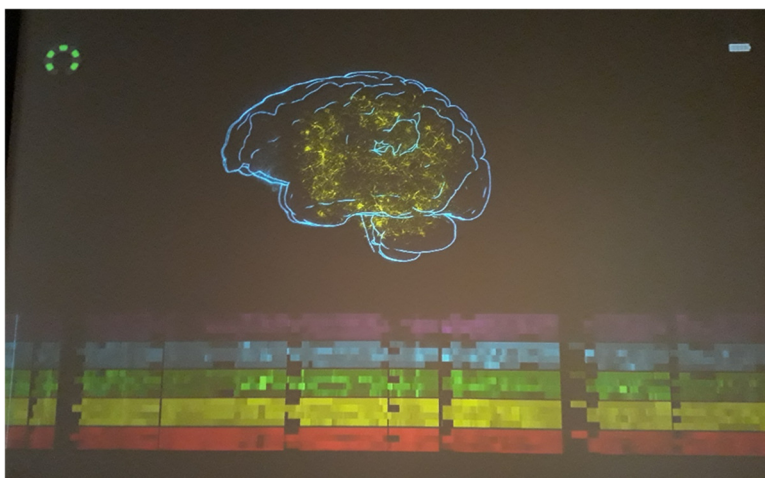


Figura 3 Visualização da atividade neural do cérebro de Luís Calafate, a partir de EEG, no módulo “Orquestra de Cérebros”. Os sinais eletrofisiológicos, captados por um capacete ao nível do couro cabeludo e do crânio, foram projetados numa tela de grandes dimensões e a sua tradução em sons foi desenvolvida por Rodrigo Leão. Exposição “Cérebro” 15 março-10 junho 2019 na Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.

As neurotecnologias também podem ser aplicadas à educação para conhecer a relação entre a atividade cerebral e os processos requeridos durante tarefas levadas a cabo num ambiente pedagógico. Neste âmbito, um recente estudo desenvolvido por Dikker et al.

(2017) mediu a atividade cerebral de um pequeno grupo de estudantes enquanto interagiam em contexto de sala aula. Foram utilizados equipamentos portáteis de eletroencefalografia (EEG) de baixo custo para detectar e medir as modificações nas ondas cerebrais de cada aluno em cada momento didático. Os resultados indicaram que o maior interesse por aspetos específicos das aulas era influenciado por uma combinação de dois fatores: os estímulos recebidos e as diferenças individuais. A descoberta mais surpreendente foi a de que as flutuações de atenção dos estudantes estavam relacionadas com o grau de semelhança entre a atividade cerebral individual e a do resto do grupo, ou seja, a medida com que o aluno estava cerebralmente sincronizado com os outros. Estes dados sugerem que a sincronia de “cérebro-a-cérebro” poderá ser um marcador neuronal para interações sociais dinâmicas, especialmente relevantes nos contextos educativos. Quanto mais os estudantes apreciavam o curso de Biologia e a pedagogia do professor mais as suas atividades cerebrais se sincronizavam. Recorrendo a uma analogia, Houdé (2017) considera que o bom professor, isto é, aquele que consegue a adesão dos estudantes, representa um verdadeiro chefe de orquestra neuronal numa escola de cérebros.

10. Conclusão

Ao longo deste trabalho, tentamos tornar evidente que uma propriedade notável do cérebro é, precisamente, a sua plasticidade. Com a descoberta da neuroplasticidade, percebeu-se que o sistema nervoso pode mudar de estrutura, de função e de conexões em resposta a estímulos intrínsecos ou extrínsecos. Consequentemente, o cérebro está preparado para a aprendizagem e para adaptar-se ao meio ambiente ao longo da vida. Por exemplo, durante a aprendizagem de uma palavra são criadas ligações na rede do nosso cérebro através da aprendizagem hebbiana.

Há 600 milhões de anos deu-se uma bifurcação de grande importância durante a evolução dos seres vivos: enquanto muitos organismos adotaram uma relação mais passiva e sedentária com o meio ambiente, outros responderam ao contínuo desafio de sobreviver num meio ambiente variável com o desenvolvimento de um tecido especializado em recolher informação

do meio envolvente, processá-la e reagir de forma favorável à sua sobrevivência (Damásio, 2020; Gould, 1995; Sagan, 1985).

O caso particular da ascídia, um animal marinho, mostra-nos como as necessidades que ligam a biologia e o ambiente marcam o modo como os organismos acabam por se desenvolver e evoluir. Os tunicados na vida adulta são organismos sésseis, ancorados numa base firme da qual não se desprendem e pela qual não se deslocam. Porém, durante o seu estado larvar, movimentam-se até encontrar um local no qual ficar ancorados para o resto da sua existência. A partir do momento que a ascídia passa de um estado móvel a um estado fixo, adota uma estratégia de sobrevivência baseada na filtração da água, aproveitando os nutrientes arrastados pela corrente. Essa mudança de vida comporta uma modificação biológica surpreendente. Apesar de se tratar de um ser vivo relativamente simples, a ascídia nasce com sistema nervoso central, que se pode equiparar a um cérebro primitivo e quando passa ao estado sésseis, digere esta estrutura, ficando no seu lugar um pequeno gânglio. Uma explicação possível é que já não necessita desse cérebro primitivo. Geralmente, a lógica comum leva-nos a crer que qualquer organismo tende a adquirir sucessivas camadas de maior complexidade para enfrentar novos desafios. Todavia, a natureza mostra-nos que tais mudanças nos organismos só se produzem se as condições exteriores o exigirem para a sua sobrevivência (Romoli, & Calabresi, 2019; Triglia, Regarder & García-Allen, 2019). Assim, podemos concluir que a seleção natural não tem memória nem é previsível, e que a evolução nem sempre significa progresso.

Durante muito tempo acreditou-se que o cérebro, à medida que envelhecia, perdia neurónios definitivamente. Hoje, sabemos que o cérebro está sujeito a um processo contínuo de remodelação: o número de neurónios altera-se, alguns perdem-se e nascem outros, embora isto não se verifique em todas as regiões do cérebro, modificando-se também o número e a força das conexões neuronais. Esta capacidade está presente no cérebro, não só, durante a fase de desenvolvimento, como também, na idade adulta, e perdura no cérebro idoso, tornando-o capaz de continuar a aprender ao longo da vida (Bentivoglio & Grassi-Zucconi,

2019). Assim, não sendo um órgão estático, podemos admitir que é possível a reabilitação cognitiva na idade adulta mediante interação com ambientes adequadamente construídos para o efeito, tirando o máximo proveito da neuroplasticidade.

Do ponto de vista dos seres humanos, a plasticidade cerebral significa facilidade de aprendizagem e de adaptação ao ambiente em função de uma sociedade que muda. Para Maffei (2018), temos a missão, enquanto sociedade, de propor os estímulos adequados para os nossos jovens, ajudando-os a construir o seu cérebro e a moldar o seu comportamento. Deste ponto de vista, Masson & Brault Foisy (2014) consideram que a neuroplasticidade é uma das mais importantes e significativas descobertas das Neurociências com potenciais implicações na educação.

A característica fundamental do cérebro é que as experiências ambientais são tão importantes como os programas genéticos, descartando-se a mera disputa entre genética e ambiente como escolha dicotômica. Por um lado, o cérebro não é uma tábua rasa, pois apresenta uma série de circuitos e estruturas predeterminadas geneticamente, estabelecidos durante o desenvolvimento pré-natal e que se especializam durante o desenvolvimento pós-natal. Por outro lado, o impacto do ambiente neles é enorme, uma vez que molda e afina cada uma das funções mentais. Segundo Alonso & Esquisábel (2019a), nas últimas décadas, vários cientistas têm apostado nesta perspectiva integradora.

Assim, encarados de uma perspectiva integradora, os genes constituem a base biológica das potencialidades do cérebro, pois sem uma especificação genética a experiência é inútil. Porém, quando a experiência falta, a potencialidade dos genes não se expressa. É neste sentido que a experiência desempenha um papel determinante. Muito provavelmente, um ambiente “normal” cria mais conexões sinápticas do que um

ambiente desprovido de estímulos e, eventualmente, haverá um limiar de “riqueza” ambiental abaixo do qual um ambiente empobrecido pode prejudicar o cérebro em desenvolvimento do ser humano. Não obstante, segundo Blakemore & Frith (2009), não podemos concluir pela necessidade de um “foco educacional seletivo” nos primeiros anos de vida das nossas crianças. De qualquer modo, parece óbvio que o problema da estimulação adequada do sistema nervoso é fundamental para a saúde do cérebro e que a neuroplasticidade tem implicações e potencialidades muito interessantes e promissoras para a educação do futuro.

Como grande parte do cérebro se desenvolve depois do nascimento, a natureza concedeu aos seres humanos uma genética bastante aberta e permissiva. A genética e o instinto são, em certa medida, anulados pelo que adquirimos através da socialização. Ironicamente, para Nordegen (2018), é a nossa biologia humana em comum que nos permite exibir grandes diferenças culturais. Genes e experiência, durante o período crítico, constroem o potencial do cérebro criativo, enquanto outros fatores, como a situação social e económica, permitem ou facilitam as suas manifestações. Por exemplo, quando se estuda os circuitos da leitura em diferentes partes do mundo, quer seja utilizada uma escrita alfabética ou a escrita dos ideogramas, são sempre as mesmas zonas do cérebro que são ativadas (Dehaene, 2018).

Para terminar, com o surgir da mente consciente, o ambiente tornou-se ainda mais interveniente, enriquecendo-se com a educação, a cultura, a liberdade, os valores, a história, o que, em certa medida, veio diminuir, na vida humana, a influência dos genes. Do nosso ponto de vista, os ambientes com inúmeras possibilidades de atividade e com elementos constantemente novos, dos quais o indivíduo extrai os estímulos que mais o motivam, desempenham um papel crucial.

Referências

- Alcock, J. (1998). *Animal behavior: an evolutionary approach*. Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates.
- Alonso, J.R., & Esquisábel, I.A. (2019a). *O Cérebro Nasce ou Faz-se? Genes e ambiente*. Atlântico Press.
- Alonso, J.R., & Esquisábel, I.A. (2019b). *Da Alma à Neurociência. Breve história do conhecimento sobre o cérebro*. Atlântico Press.
- Bentivoglio, M., & Grassi-Zucconi, G. (2019). *Quando o cérebro envelhece. Mitos e certezas sobre um processo universal (e inevitável)*. Atlântico Press.
- Berardi, N., & Sale, A. (2019). *Ambiente, Plasticidade e Desenvolvimento Cerebral. Os efeitos do ambiente na construção do indivíduo*. Atlântico Press.
- Blakemore, S.J., & Frith, U. (2009). *O Cérebro que Aprende. Lições para a Educação*. Lisboa: Gradiva.
- Calafate, L. (1989). Biologia e Comportamento em Jean Piaget: o ambiente social e o desenvolvimento dos comportamentos aprendidos. *Inovação*, 2(4), 454-466.
- Calafate, L. (2000a). Etologia da Criança: uma perspectiva Ontogenética das “Competências-Alicerce”. *Saber e Educar*, 5, 49-81.
- Calafate, L. (2000b). Biologia e desenvolvimento: algumas implicações do padrão de crescimento do homem para a educação. *O Professor*, 68, 43-51.
- Calafate, L. (2001). Psicologia Comparada & Etologia Clássica: o binómio instinto-aprendizagem. *O Professor*, 72, 45-54.
- Castro Caldas, A. (2016). *A Vida do Cérebro. Da gestação à idade avançada*. Lisboa: Verso de Kapa.
- Castro Caldas, A. & Rato, J. (2020). *Neuromitos*. Lisboa: Contraponto.
- Chiamulera, C. (2019). *Realidade Virtual. As chaves da interação entre tecnologia e cérebro humano*. Atlântico Press.
- Clayton, N.S. (1995). The neuroethological development of food-storing memory: a case of use it, or lose it! *Behavioural Brain Research*, 70, 95-102.
- Cotrufo, T. (2019). *Na mente da criança. O cérebro nos seus primeiros anos*. Atlântico Press.
- Damásio, A. (2020). *Sentir & Saber – A Caminho da Consciência*. Lisboa: Círculo de Leitores.
- Darwin, C. (1871, 2009). *A Origem do Homem e a Seleção Sexual*. Lisboa: Relógio D’Água Editores.
- Dehaene, S. (2014). *Consciousness and the Brain. Deciphering How the Brain Codes Our Thoughts*. London: Penguin Books.
- Dehaene, S. (2018). *Apprendre! Les talents du cerveau, le défi des machines*. Paris: Odile Jacob.
- Dierssen, M. (2019a). *Como Aprende (e Recorda) o Cérebro? Princípios da neurociência para aplicar à educação*. Atlântico Press.
- Dierssen, M. (2019b). *O Cérebro Artístico. A criatividade segundo a neurociência*. Atlântico Press.
- Dikker, S., Wan, L., Davidescu, I., Kaggen, L., Oostrik, M., McClintock, J., Rowland, J., Michalareas, G., Van Bavel, J.J., Ding, M., & Poeppel, D. (2017). Brain-to-brain synchrony tracks real-world dynamic group interactions in the classroom. *Current Biology*, 27, 1-6.
- Forgays, D.G. & Forgays, J.W. (1952). The nature of the effect of free-environmental experience in the rat. *Journal of Comparative and Physiological Psychological*, 45(4), 322-328.
- Francis, D., & Kaufer, D. (2011). Beyond Nature vs. Nurture. *The Scientist*, 1, October.

- Gage, F.H. (2002). Neurogenesis in the Adult Brain. *The Journal of Neuroscience*, 22(3), 612-613.
- Godfrey-Smith, P. (2017). *Outras Mentas. O Polvo, o Mar e a Origem Profunda da Consciência*. Lisboa: Círculo de Leitores.
- Goleman, D., & Davidson, R.J. (2018). *Traços Alterados*. Lisboa: Círculo de Leitores.
- Gould, S.J. (1995). *A Vida é Bela. O Xisto de Burgess e a natureza da história*. Lisboa: Gradiva.
- Gregorio, P.G. (2019). *Neurodegeneração. Alzheimer, Parkinson e ELA*. Atlântico Press.
- Hebb, D.O. (1947). The effects of early experience on problem solving at maturity. *American Psychologist*, 2, 306-307.
- Hebb, D.O. (1949). *The Organization of Behavior. A Neuropsychological Theory*. New York: John Wiley & Sons.
- Heisenberg, M., Heusipp, M., & Wanke, C. (1995). Structural plasticity in the *Drosophila* brain. *Journal of Neuroscience*, 15(3), 1951-1960.
- Houdé, O. (2017). Des cerveaux en phase pour des élèves motivés. *Cerveau & Psycho*, 90, 86-87.
- Kempermann, G., Kuhn, H.G., & Gage, F.H. (1997). More hippocampal neurons in adult mice living in an enriched environment. *Nature*, 386, 493-495.
- Kempermann, G., Fabel, K., Ehninger, D., Babu, H., Leal-Galicia, P., Garthe, A., & Wolf, S.A. (2010). Why and how physical activity promotes experience-induced brain plasticity. *Frontiers in Neuroscience*, 4, 189.
- Krebs, J., Sherry, D., Healy, S., Hugh Perry, V., & Vaccarino, A. (1989). Hippocampal specialization of food-storing birds. *Proceedings National Academy Sciences USA*, 86, 1388-1392.
- Lázaro, J., Hertel, M. Muturi, M., & Dechmann, D.K.N. (2019). Seasonal reversible size changes in the braincase and mass of common shrews are flexible modified by environmental conditions. *Scientific Reports*, 9, 2489.
- Maffei, L. (2018). *Elogio da Lentidão*. Lisboa: Edições 70.
- Maffei, L. (2019). *Elogio da Palavra*. Lisboa: Edições 70.
- Maguire, E.A., Gadian, D.G., Johnsrude, I.S., Good, C.D., Ashburner, J., Frackowiak, R.S.J., & Frith, C.D. (2000). Navigation-related structural change in the hippocampi of taxi drivers. *PNAS*, 11(8), 4398-4403.
- Maguire, E.A., Spiers, H.J., Good, C.D., Hartley, T., Frackowiak, R.S.J., & Burgess, N. (2003). Navigation Expertise and the Human Hippocampus: A structural Brain Imaging Analysis. *Hippocampus*, 13, 208-217.
- Maojo, V. (2019). *Cérebro e Música. Entre a neurociência, a tecnologia e a arte*. Atlântico Press.
- Masson, S. (2015). Les apports de la neuroéducation à l'enseignement: des neuromythes aux découvertes actuelles. *Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant*, 134: 11-22.
- Masson, S., & Brault Foisy, L-M. (2014). Fundamental Concepts Bridging Education and the Brain. *McGill Journal of Education*, 49(2): 501-512.
- Mohammed, A.H., Zhu, S.W., Darmopil, S., Leffler, J.H., Ernforts, P., Winblad, B., Diamond, M.C., Eriksson, P.S., & Bogdanovic, N. (2002). Environmental enrichment and the brain. *Progress in Brain Research*, 138, 109-133.
- Nithianantharajah, J., & Hannan, A.J. (2006). Enriched environments, experience-dependent plasticity and disorders of the nervous system. *Nature Reviews Neuroscience*, 7, 697-709.
- Nordengen, K. (2018). *O Poder do Nosso cérebro. Desvendando os segredos da mente humana*. Lisboa: Planeta.
- Ortiz Alonso, T. (2019). *Neurociência em Casa. Mais do que os trabalhos escolares*. Atlântico Press.

- Pigliucci, M., Murren, C.J., & Schlichting, C.D. (2006). Phenotypic plasticity and evolution by genetic assimilation. *The Journal of Experimental Biology*, 209, 2362-2367.
- Rampon, C., Jiang, C.H., Dong, H., Tang, Y-P., Lockhart, D.J., Schultz, P.G., Tsien, J.Z., & Hu, Y. (2000). Effects of environmental enrichment on gene expression in the brain. *PNAS*, 97(23), 12880-12884.
- Rato, J., & Castro Caldas, A. (2017). *Quando o Cérebro do seu filho vai à escola. Boas práticas para melhorar a aprendizagem*. Lisboa: Verso de Kapa.
- Ray, S., Li, M., Koch, S.P., Mueller, S., Boehm-Sturm, P., Wang, H., Brecht, M., & Naumann, R.K. (2020). Seasonal plasticity in the adult somatosensory cortex. *PNAS*, 117(50), 32136-32144.
- Romoli, M. & Calabresi, P. (2019). *Como nos movemos. Uma viagem ao sistema cerebral que controla o movimento*. Atlântico Press.
- Rosenzweig, M.R. (1996). Aspects of the search for neural mechanisms of memory. *Annual Review of Psychology*, 47, 1-32.
- Rosenzweig, M.R. (2003). Effects of Differential Experience on the Brain and Behavior. *Developmental Neuropsychology*, 24 (2&3), 523-540.
- Sacks, O. (1998). *A Ilha sem Cor*. Lisboa: Relógio D'Água.
- Sagan, C. (1985). *Os Dragões do Eden*. Lisboa: Gradiva.
- Sale, A. (2018). A systematic look at environmental modulation and its impact in brain development. *Trends in Neurosciences*, 41(1), 4-17.
- Sepulcre, J. (2019). *Redes Cerebrais e Plasticidade Funcional. O cérebro que se modifica e adapta*. Atlântico Press.
- Seung, S. (2013). *Connectome. How the Brain's Wiring Makes Us Who We Are*. London: Penguin Books.
- Sherry, D. (2006). Neuroecology. *Annu. Rev. Psychol.*, 57, 167-97.
- Sherry, D., Vaccarino, A., Buckenham, & Herz, R. (1989). The Hippocamal Complex of Food-Storing Birds. *Brain Behavioural Evolution*, 34, 308-317.
- Solarz, S.C. (2019). *Cyborgs. A fusão de mente e máquina*. Atlântico Press.
- Triglia, A., Regarder, B., & García-Allen, J. (2019). *O que é a inteligência? Do QI às inteligências múltiplas*. Atlântico Press.
- van Praag, H., Kemperman, G., & Gage, F.H. (2000). Neural consequences of environmental enrichment. *Nature Reviews Neuroscience*, 1, 191-198.
- Viosca, J. (2019). *Mentes Prodigiosas. Fundamentos psicológicos e neuronais das capacidades excepcionais*. Atlântico Press.
- Wiesel, T.N., & Hubel, D.H. (1963). Single-cell response in striate cortex of kittens deprived of vision in one eye. *Journal Neurophysiology*, 26, 1003-1017.
- Wiesel, T.N., & Hubel, D.H. (1965). Extent of recovery from the effects of visual deprivation in kittens. *Journal Neurophysiology*, 28, 1060-1072.