

Entre Receitas, Programas e Códigos: Metáforas e Idéias Sobre Genes na Divulgação Científica e no Contexto Escolar¹

TÂNIA GOLDBACH¹ e CHARBEL NIÑO EL-HANI²

¹*Centro Federal de Educação Tecnológica de Química – RJ – Unidade Maracanã e Programa de Pós Graduação Lato Sensu em Ensino de Ciências (tania@cefeteq.br)*

²*Instituto de Biologia, Universidade Federal da Bahia. Programa de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências, UFBA/UEFS. Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Biomonitoramento, UFBA (charbel@ufba.br, charbel.elhani@pesquisador.cnpq.br)*

Resumo. Este artigo discute o uso de metáforas em revistas de divulgação científica para referir-se a genes e seu papel nos sistemas vivos. Abordamos também a apropriação destas metáforas por pesquisadores e por estudantes e professores de escolas de ensino médio do Rio de Janeiro. Elas são discutidas à luz de dificuldades do ensino de genética e da abordagem do conceito de gene na literatura filosófica. Estas metáforas buscam esclarecer aspectos funcionais e estruturais dos genes, mas suscitam dificuldades para a compreensão dos genes e de sua relação com sistemas vivos. Assim, elas precisam ser usadas com cuidado e algumas, como ‘programa’, ‘manual de instruções’, ‘código’, devem ser evitadas. Elas estão, afinal, intimamente relacionadas ao determinismo genético, que tem conseqüências políticas, sociais, econômicas e éticas importantes. Entre as metáforas analisadas, ‘mensagem’ parece ser mais adequada, mas demanda uma teoria da informação biológica, ainda não-disponível na biologia, para que seu significado seja claramente explicado.

Abstract. This paper addresses metaphors about genes and their role in living systems used in Brazilian popular science magazines. We also consider the appropriation of these metaphors by researchers and high school teachers and students from Rio de Janeiro, Brazil. They are discussed on the grounds of difficulties in genetics teaching and the treatment of the gene concept in the philosophical literature. These metaphors try to clarify functional and structural aspects of genes, but raise difficulties regarding the understanding of genes and their relation with living systems. Thus, they should be carefully used and some, such as ‘program’, ‘instruction book’, and ‘code’, should be avoided. They are closely related, after all, with genetic determinism, which has important political, social, economical, and ethical consequences. Among the analyzed metaphors, ‘message’ seems to be more adequate, but demands a theory of biological information, not yet available in biology, for its meaning to be clearly explained.

Palavras-chave: divulgação científica, educação científica, metáforas, gene, informação

Keywords: popular science, science education, metaphors, gene, information.

1. Introdução

Não é difícil reconhecer que, hoje, idéias sobre genes – ou, pelo menos, o termo ‘gene’ – estão fortemente disseminadas entre a população, e não somente no contexto escolar. Em particular, o impacto das aplicações biotecnológicas tem contribuído para que um discurso sobre genes venha marcando nossas sociedades, desde os anos 1990, veiculando visões sobre a relação entre genes e características fenotípicas que geralmente perdem de vista a complexidade dos sistemas vivos e se comprometem com idéias deterministas que não têm sustentação frente ao que sabemos hoje sobre tais sistemas. Muitas vezes, esse discurso

¹ Os dados empíricos discutidos neste artigo foram derivados da tese de doutorado de T. Goldbach, intitulada “Entre Receitas, Programas e Códigos: As Idéias sobre Gene em Diferentes Contextos” e defendida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – Área de Difusão de Ciência & Tecnologia - COPPE/UF RJ.

sobre genes carrega em si visões sobre intervenções capazes de modificar características dos seres humanos, de modo a reunir num indivíduo traços considerados interessantes, sendo tais possibilidades de intervenção tipicamente superestimadas, ao mesmo tempo em que problemas éticos e sociais não são levados em consideração ou são minimizados.

Diante deste discurso sobre genes e de todos os problemas que ele acarreta, coloca-se a necessidade de que pesquisadores e educadores envolvidos com ensino de ciências contribuam para uma apropriação mais crítica de tal discurso e das relações entre ciência, tecnologia e sociedade que se configuram em seu interior. Nesses termos, mostra-se necessário rever a forma como se aborda o assunto nos ambientes escolares e também na divulgação científica (GOLDBACH,2006).

Neste artigo, apresentamos resultados de uma investigação sobre o uso de metáforas no tratamento sobre genes em revistas de divulgação científica e a sua apropriação por alguns pesquisadores que trabalham em genética, biologia molecular e área afins, bem como por estudantes e professores de uma amostra de escolas de ensino médio da cidade do Rio de Janeiro.

Inicialmente, faremos um breve apanhado sobre dificuldades do ensino de genética apontadas na literatura. Em seguida, discutiremos o problema do conceito de gene, principalmente a partir de sua abordagem na literatura sobre filosofia da biologia. Por fim, discutiremos metáforas utilizadas por textos de divulgação científica para explicar o que são genes e como eles atuam nos sistemas vivos, à luz das dificuldades do ensino de genética e do problema do gene.

2. Dificuldades do ensino de genética

O ensino de genética tem sido um dos tópicos mais investigados pelos pesquisadores que se dedicam ao ensino de biologia devido a uma variedade de fatores, que se estendem da relevância social e econômica da genética, com todas as implicações tecnológicas, sociais e éticas envolvidas, à sua importância na estrutura conceitual das ciências biológicas (RODRÍGUEZ, 1995; LEWIS & WOOD-ROBINSON, 2000; BANET & AYUSO, 2003).

Banet e Ayuso (2003) destacam, por exemplo, o fato de que questões relativas ao genoma humano, à prevenção de doenças genéticas, aos alimentos transgênicos, entre outros, são tópicos presentes nos meios de comunicação sobre os quais os estudantes geralmente desejam saber mais. Estes são, além disso, temas sobre os quais pairam suspeitas e

confusões, diante das quais o conhecimento dos estudantes sobre genética se torna particularmente importante para seus posicionamentos conscientes e críticos frente às implicações sociais, políticas, econômicas e éticas dos desenvolvimentos neste campo do conhecimento.

A genética traz, além disso, respostas a questões fundamentais sobre a vida, que os estudantes freqüentemente trazem para a sala de aula, tais como: “Por que do ovo de galinha se desenvolve um pintinho? Qual é o ‘segredo’ existente dentro dele? Por que nem sempre o ovo gera pintinho? Por que as galinhas são diferentes umas das outras?” Todas estas questões dizem respeito à transmissão e ao desenvolvimento das características, trazendo à tona conceitos e processos ligados à hereditariedade.

Outra razão pela qual o ensino de genética se reveste de importância diz respeito ao fato de que uma série de tópicos da biologia tem como uma de suas bases os conceitos de herança e o entendimento do fluxo gênico, como é o caso do estudo da evolução e da diversidade dos seres vivos (JIMÉNEZ ALEIXANDRE, 1992; BANET & AYUSO, 2003).

Contudo, em paralelo à importância atribuída ao ensino de genética, têm sido ressaltadas inúmeras dificuldades associadas, sendo esta temática considerada uma das mais difíceis de se ensinar e aprender (STEWART, 1983; BANET & AYUSO, 2003). Nesta seção, discutimos algumas das principais dificuldades do ensino de genética apontadas na literatura.

Revisões da literatura indicam que esta temática é mal compreendida em todas as faixas etárias (WOOD-ROBINSON, 1994; TURNEY, 1995; RICHARDS & PONDER, 1996). Vários trabalhos relatam que estudantes de diversos países, das mais distintas regiões e culturas do globo, compartilham concepções alternativas neste campo (HACKLING & TREAGUST, 1984; STEWART et al., 1990). Foi também sugerido que estas concepções alternativas são devidas, em alguma medida, aos conteúdos apresentados por livros didáticos (TOLMAN, 1982; CHO et al., 1985).

Um dos focos de dificuldade diz respeito à compreensão dos elementos envolvidos na herança. Em vários estudos, foi observada uma grande dificuldade de os estudantes compreenderem a natureza da informação genética e o mecanismo de transferência de informação de uma célula a outra e entre as gerações. A localização e dimensão corretas dos elementos envolvidos na herança também são geralmente confusas para os estudantes (LEWIS, LEACH & WOOD-ROBINSON, 2000 a,b,c,d). Outras dificuldades estão

relacionadas à abordagem pouco integrada e fragmentada dos conteúdos de genética, freqüente nos currículos e nos livros didáticos (REZNIK [atual GOLDBACH], 1995; CANTIELLO & TRIVELATO, 2001; MARBACH, 2001; SILVEIRA & AMABIS, 2003; CHATTOPADHYAY, 2005). Esta abordagem não favorece a associação entre conteúdos centrais, como DNA e cromossomos, meiose e leis de Mendel etc.

A resolução de problemas traz outra série de dificuldades para a apropriação dos conteúdos de genética pelos estudantes, que, por vezes, conseguem resolver problemas relativos a este campo do conhecimento de modo algorítmico, sem de fato compreender os conceitos envolvidos. Ou seja, a capacidade de resolver corretamente os tipos de problemas de genética mais freqüentes nos livros didáticos e salas de aula de biologia parece independe do domínio dos conteúdos da área (e.g., STEWART, 1983; AYUSO, BANET & ABELLAN, 1996; THOMSON & STEWART, 2003; BANET & AYUSO, 2003; AZNAR & IBANEZ, 2005). As dificuldades envolvidas com a resolução de problemas estão também relacionadas ao nível de habilidade matemática e capacidade analítica necessária para lidar com problemas de genética com sucesso.

O excesso de vocabulário utilizado no conhecimento escolar de genética é outra fonte de dificuldades, somando-se a já destacada falta de articulação dos conteúdos (RODRÍGUEZ, 1995; BAHAR et al., 1999). Como exemplo, temos as similaridades superficiais entre mitose e meiose, que levam a confusões terminológicas que terminam por obscurecer, por sua vez, importantes diferenças entre estes processos (RADFORD & BIRD-STEWART, 1982); o uso errôneo e ambíguo de termos da genética em livros didáticos, como, por exemplo, o uso indiscriminado de ‘gene’ e ‘alelo’, sem esclarecer as diferenças de significado entre os dois termos (CHO et al., 1985); e a confusão entre os significados de termos como ‘mutação’ e ‘ligação’ na linguagem cotidiana e na linguagem técnica da genética (ALBADALEJO & LUCAS, 1988; KINNEAR, 1991), assim como a falta de precisão ao se aplicar os termos ‘código genético’ – expressando as relações entre códons e aminoácidos - e ‘mensagem/informação genética’, referindo-se a certa seqüência de nucleotídeos específica (LEWIS, 2004). Acerca das relações entre conceitos, os principais problemas no ensino de genética se referem à meiose. Radford e Bird-Stewart (1982), por exemplo, enfatizam a importância de relacionar a meiose à fertilização, aos ciclos de vida e à alternância de gerações haplóides e diplóides. Dificuldades para a aprendizagem de genética também resultam da falha no estabelecimento de importantes relações quando outros

conteúdos são trabalhados, como, por exemplo, aquelas entre a separação dos cromossomos e a replicação do DNA, ou entre pares alélicos e a expressão de fenótipos.

Gericke e Hagberg (2007) comentam que a biologia contemporânea, com o grande desenvolvimento de áreas como a biologia molecular e a biologia do desenvolvimento, trouxe novas luzes para o entendimento dos genes e de sua expressão, além de um sem número de possibilidades de intervenção no material genético. Estes avanços têm levado a aplicações tecnológicas com considerável impacto sobre a vida social e coletiva. Contudo, o ensino de genética também tem sido criticado pela reduzida problematização das relações ciência-tecnologia-sociedade (CTS). Uma série de pesquisas vinculadas às abordagens CTS tem destacado a carência de temas contemporâneos e de discussões de ordem ética e política no ensino de genética (NASCIMENTO & ROSA, 2003; DOMINGUES et al., 2003; BONZANINI & BASTOS, 2003). Autores vinculados a outras tradições de pesquisa também têm questionado a presença insuficiente de tópicos da ‘nova biologia’ no ensino de genética. Xavier et al. (2006) e Loreto & Sepel (2003), por exemplo, comentam sobre a frequência baixa com que são abordados no conhecimento escolar temas aplicados da biologia celular e molecular, atualmente enfocados pela mídia e de conhecimento dos alunos, como, por exemplo, clonagem, organismos transgênicos, projetos genoma, terapia gênica, testes de DNA, testes diagnósticos etc. Como principais fatores que dificultam tal abordagem, eles se referem à carência de materiais didáticos, a problemas relacionados ao tempo escolar, em particular à carga horária dedicado ao ensino de genética, e a questões relativas à formação dos professores. O fato de que estes avanços mais recentes não têm sido considerados no ensino médio de biologia é muito relevante, porque este nível de escolaridade corresponde, para a maioria das pessoas, à última oportunidade para a construção de um conhecimento adequado sobre os sistemas vivos.

Em livros didáticos de biologia do ensino médio, por exemplo, é ainda freqüente uma visão simplista sobre genes, de acordo com as quais haveria uma correspondência de um-para-um entre genes, proteínas e características fenotípicas (REZNIK [atual Goldbach], 1995; EL-HANI et al., 2007; SANTOS & EL-HANI, no prelo). Não se trata de exigir dos livros didáticos e professores de Biologia que estejam familiarizados com todo e qualquer avanço recente nas ciências biológicas, mas de que, neste caso particular, os avanços comentados acima devem cumprir um papel fundamental na superação de um discurso simplista e determinista sobre genes que tem importantes implicações sócio-políticas. Diante

de tal cenário, é preciso considerar, no conhecimento escolar, diferentes modelos interpretativos da estrutura e dinâmica dos genes, tratando-se conteúdos de genética desde a perspectiva de uma abordagem contextual, informada pela dimensão histórica, filosófica e sociológica do conhecimento científico. Desse modo, os estudantes poderão vir a compreender as mudanças que ocorreram em nossa percepção sobre os genes e de seu papel nos sistemas vivos ao longo do século XX, o que, por sua vez, poderá propiciar-lhes referenciais que permitam uma apropriação crítica do discurso determinista genético que tem marcado as representações sociais sobre genes. Além disso, uma compreensão mais sofisticada da natureza da ciência pode advir de uma discussão dos diferentes modelos construídos para a explicação da estrutura e dinâmica do material genético.

A necessidade de que estudantes compreendam melhor a natureza de genes e da informação genética, já mencionada acima, é vigorosamente apontada na literatura sobre ensino de genética. Lewis e Wood-Robinson (2000), por exemplo, observaram que a maioria dos estudantes que investigaram era capaz de identificar os genes como depositários de informação hereditária, mas não apresentavam uma compreensão clara dos genes como “... entidades físicas com uma localização específica num cromossomo” (p. 181). À luz dos debates atuais sobre a natureza dos genes, poder-se-ia, inclusive, questionar se esta seria mesmo uma compreensão adequada dos genes (FOGLE, 1990; KELLER, 2000; EL-HANI, 2007, ver abaixo). Contudo, a dificuldade enfrentada por estes estudantes está muito distante de discussões contemporâneas sobre genes: o que emergiu dos resultados de Lewis e Wood-Robinson foi constatar uma grande confusão sobre as relações entre genes e cromossomos. Os estudantes também se mostravam confusos quanto ao significado da expressão ‘informação genética’, o que não causa surpresa, já que esta expressão não é mais do que uma metáfora na linguagem biológica, na medida em que não há uma teoria da informação biológica disponível, que possa conferir-lhe significado preciso (GRIFFITHS, 2001; EL-HANI et al., 2006). Os estudantes concebiam que a informação genética está relacionada de algum modo às características, mas havia incerteza quanto à natureza desta relação. Outro achado relevante é o de que muitos estudantes consideravam que a expressão ‘informação genética’ se referia a informações que podem ser usadas por seres humanos. Esta confusão também é observada entre biólogos moleculares e geneticistas, que, na falta de uma teoria da informação biológica, terminam não diferenciando a informação usada pelos organismos e por um observador externo (BRUNI, 2003). Lewis e Wood-Robinson (2000) também

verificaram que a maioria dos investigados (73%) se mostrou comprometida com visões deterministas genéticas, uma vez que consideravam os genes importantes por estarem envolvidos na determinação das características e quase dez por cento relacionaram a importância dos genes à idéia de que todas as características são determinadas geneticamente, incluindo características comportamentais e de personalidade. Este compromisso com o determinismo genético não parecia passível de crítica pelos próprios estudantes, uma vez que a maioria deles não tinha idéia clara sobre como genes poderiam determinar características.

Estes resultados são preocupantes, diante das implicações cognitivas, sociais, políticas, econômicas e éticas do compromisso com o determinismo genético (e.g., ROSE et al., 1984; LEWONTIN, 1993; OYAMA, 2000; MOSS, 2003). Além disso, pode-se conjecturar que o determinismo genético decorre de uma tendência dos seres humanos de essencializar tipos biológicos, de tal maneira que, na medida em que um indivíduo assume uma visão científica sobre os seres vivos e, assim, não pode mais recorrer a essências atribuídas a estes seres por um agente criador externo, os genes e/ou o DNA passam a cumprir o papel de uma essência da vida. Afinal, investigações no campo da psicologia cognitiva sugerem que indivíduos de todas as faixas etárias e culturas tendem a assumir que a aparência externa e o comportamento de uma espécie são determinadas por um tipo de poder causal oculto ou ‘essência’ (SHTULMAN, 2006). Desse modo, razões mais profundas do que se costuma pensar podem estar subjacentes ao discurso sobre genes nas sociedades contemporâneas, no qual vemos o genoma elevado à condição de essência, livro da vida, Santo Graal (ver, p. ex., GILBERT, 2001), e genes ‘para’ todo e qualquer tipo de característica são propostos (JUDSON, 2001). Diante destes achados da psicologia cognitiva, a tarefa de promover a crítica e eventual superação do determinismo genético parece maior do que poderíamos imaginar à primeira vista. Uma abordagem dos debates contemporâneos sobre a estrutura e a dinâmica do genoma não resolve, por si só, o problema, mas certamente contribui para o questionamento do determinismo genético.

3. A crise do conceito de gene

Avanços recentes da biologia molecular, genômica e proteômica resultaram em novas perspectivas sobre genes, produtos gênicos e seus padrões de interação em sistemas celulares complexos. Torna-se cada vez mais claro que a informação biológica opera em múltiplos níveis hierárquicos, nos quais redes complexas de interações entre os componentes são a

regra e, conseqüentemente, a compreensão da dinâmica e até mesmo da estrutura dos genes demanda que estes sejam localizados em redes e vias informacionais complexas (IDEKER et al., 2001; KELLER, 2005). Este novo modo de compreender os sistemas biológicos torna necessário que superemos o tratamento de genes como unidades de estrutura e função que, secundariamente, interagem em redes complexas. Isso significa que devemos ir além da compreensão dos genes como segmentos de DNA que produzem uma proteína única com função unívoca, que ainda predomina no conhecimento escolar, até mesmo no nível superior (PITOMBO et al., 2007, no prelo).

Mas como chegamos a esta situação em que um modo de entender os genes que foi dominante durante pelo menos quatro décadas veio a ser questionado? Para responder esta pergunta, é necessário tratar das mudanças sofridas pelos modelos interpretativos da estrutura e dinâmica dos genes ao longo do século XX, particularmente nas últimas duas décadas.

Embora o conceito de gene tenha sido certamente um dos marcos da história da ciência no século XX (GELBART, 1998; KELLER, 2000; MOSS, 2003), para alguns autores, seu futuro não parecia muito promissor na virada do século XXI. Keller (2000), por exemplo, chega a sugerir que talvez tenha chegado o tempo de forjar novas palavras e deixar o conceito de gene de lado. Outros filósofos e cientistas vêem, contudo, um futuro mais brilhante para o conceito de gene. Falk, por exemplo, assume uma posição mais otimista: embora admita que o gene é um conceito ‘em tensão’ (FALK, 2000), ele busca maneiras de ‘salvá-lo’ (FALK, 2001). Hall (2001) também se mostra otimista, argumentando que, apesar dos obituários publicados, o gene não está morto, mas vivo e saudável, embora ‘órfão’, ‘desabrigado’, e buscando um porto do qual possa lançar-se no curso de sua casa ‘natural’, a célula, como unidade morfogênética fundamental. A própria Keller (2005) repensa suas idéias anteriores em artigo recente, à luz de desenvolvimentos na biologia molecular, genômica e áreas correlatas desde a publicação de “O Século do Gene”, terminando por assumir uma posição mais otimista em relação a este conceito.

De qualquer modo, podemos falar hoje de uma crise do conceito de gene, diante de uma série de fenômenos descobertos principalmente a partir da década de 1970, como, por exemplo, os genes interrompidos, a emenda (*splicing*) alternativa de RNA, genes superpostos, edição de RNAm, modos alternativos de tradução etc. Esta é, sobretudo, uma crise de um conceito de gene particular, que se tornou dominante na genética e biologia molecular a partir da década de 1950. Trata-se do conceito molecular clássico de gene

(GRIFFITHS & NEUMANN-HELD, 1999; STOTZ, GRIFFITHS & KNIGHT, 2004), segundo o qual um gene é um segmento de DNA que codifica um produto funcional, que pode ser uma cadeia polipeptídica ou uma molécula de RNA. Este modo de compreender os genes foi construído, inicialmente, a partir da hipótese ‘um gene-uma enzima’, proposta por Beadle and Tatum (1941) para expressar a relação entre a natureza e a função fisiológica do material genético, que foi gradualmente reformulada ao longo das décadas de 1950 e 1960 até chegar-se à fórmula ‘um gene-um polipeptídeo ou RNA’. Contudo, o evento mais decisivo para que o conceito molecular clássico viesse a ser largamente aceito foi a proposição do modelo da dupla hélice para a estrutura do DNA, por Watson e Crick (1953).

No conceito molecular clássico, um gene é tratado como uma unidade linear sem interrupções no genoma, com um começo e um término claros, que realiza uma única função. Ele corresponde, assim, ao conceito de uma unidade estrutural e funcional no genoma e, ao combinar numa única explicação estrutura e função gênicas, este conceito apresentou notável poder explicativo, preditivo e heurístico, o que permite compreender sua larga aceitação: o gene molecular tinha inicialmente uma estrutura bem definida, com fronteiras facilmente determináveis, uma função única e uma mecânica prontamente compreensível.

No entanto, o crescimento do conhecimento sobre a estrutura e dinâmica do genoma, principalmente de eucariotos, resultou numa série de anomalias, que vêm minando a aceitabilidade deste conceito. Os problemas com o conceito molecular clássico dizem respeito ao seu compromisso com o conceito de unidade estrutural e funcional (FOGLE, 1990) e podem ser compreendidos em termos de três aspectos estabelecidos pela biologia molecular e genética (EL-HANI, 2007): (1) correspondências de um-para-muitos entre segmentos de DNA e RNAs/polipeptídeos (como no caso da emenda alternativa de RNA); (2) correspondências de muitos-para-um entre segmentos de DNA e RNAs/polipeptídeos (como no caso de rearranjos genômicos, como os que ocorrem na geração da diversidade de anticorpos no sistema imune) (TONEGAWA, 1985); e (3) ausência de correspondência entre segmentos de DNA e RNAs/polipeptídeos (como na edição de RNAm).

Passaremos agora a discutir um dos achados que colocaram em xeque o conceito molecular clássico e, além disso, conduziram a uma nova visão sobre a estrutura e dinâmica do genoma e dos sistemas celulares, mais complexo do que aquele usualmente apresentado em diferentes instrumentos de ensino e divulgação da ciência.

Uma das principais descobertas que trouxeram dificuldades para o conceito molecular clássico foi a dos genes interrompidos. Boa parte dos genes encontrados em genomas eucarióticos são interrompidos, com seqüências não-codificantes – íntrons –, intercaladas com seqüências codificantes – éxons –, o que requer um processo de retirada dos íntrons do transcrito primário e subsequente emenda de éxons num RNA mensageiro maduro, para que a síntese protéica seja possível. Com o reconhecimento dos íntrons no genoma dos eucariotos, a idéia dos genes como unidades contínuas e lineares foi frontalmente abalada. Esse processo, por si só, é suficiente para desafiar a relação de um para um entre a unidade de transcrição e um produto funcional, RNA ou polipeptídeo. Mas a situação se agrava ainda mais com a emenda alternativa de RNA, que resulta em combinações diferenciais de éxons, que possibilitam, por sua vez, que múltiplas proteínas relacionadas (isoformas) sejam sintetizadas a partir de um único gene (BLACK, 2003), a depender, por exemplo, do genótipo sexual, do estado de desenvolvimento/ diferenciação celular, da idade da célula e/ou da ativação de uma via particular de sinalização celular.

Pode-se dizer, assim, que fenômenos como a existência de genes interrompidos e a emenda alternativa tornam difícil sustentar a idéia geral de genes como unidades (sejam estruturais, funcionais ou informacionais), que é parte essencial do conceito molecular clássico (FOGLE, 1990). Isso fica reforçado frente à freqüência elevada de sua ocorrência; estimativas recentes apontam que cerca de 40 a 60% dos genes humanos são processados alternativamente e este número tenderá a crescer à medida que nosso genoma é esquadrihado (MODREK & LEE, 2002).

O conceito molecular clássico é freqüentemente combinado com a chamada concepção informacional dos genes (STOTZ, GRIFFITHS & KNIGHT, 2004), como mostram análises de livros didáticos do ensino superior (PITOMBO et al., 2007, no prelo) e do ensino médio (EL-HANI et al., 2007; SANTOS & EL-HANI, no prelo). Desde a proposição do modelo da dupla hélice por Watson e Crick, o gene tem sido tratado simultaneamente como matéria física e informação, uma substância química e um programa que governa a vida. Esta idéia, no entanto, nada tem de trivial. A incorporação de um vocabulário informacional na biologia molecular e na genética, desde a década de 1950 (KAY, 2000), resultou no chamado “discurso da informação” (*information-talk*), caracterizado pelo uso de termos tais como ‘informação genética’, ‘código genético’, ‘mensagem genética’, ‘sinalização’ etc. No entanto, estes termos podem ser considerados, no

presente, como nada mais que metáforas à espera de uma teoria que lhes possa conferir significado mais preciso (GRIFFITHS, 2001; EL-HANI et al., 2006).

Apesar de ‘informação genética’ não ser, nesses termos, um conceito claro na estrutura da biologia, mas uma metáfora que demanda formulação adequada no contexto de uma teoria da informação biológica ainda por ser desenvolvida, os genes são frequentemente tratados como unidades informacionais, como será discutido na próxima seção.

Leite (2003), em palestra proferida na sessão de abertura do 49º Congresso da Sociedade Brasileira de Genética, trata do problema do gene desde sua larga experiência na divulgação de idéias científicas:

“... a insatisfação com a estreiteza unidimensional da noção de ‘gene’ não surge apenas entre críticos contumazes do projeto reducionista, mas também entre os próprios pesquisadores desse programa experimental, diante da crescente complexidade do genoma constatada na prática dos laboratórios” (LEITE, 2003, p.7).

Para este autor, o genoma que emerge da genética e biologia molecular contemporâneas “é uma entidade complexa, sujeita a uma miríade de relações, influências e interações com sinais vindos do citoplasma e, em última instância, do ambiente da célula, entre as quais se incluem indicações hereditárias não-mediadas por ácidos nucleicos acerca de padrões conservados de expressão gênica” (LEITE, 2003, p.10).

Stotz e Griffiths vêm desenvolvendo desde 2003 um projeto denominado “Representing Genes”, que pretende examinar os conceitos de genes usados por biólogos de diferentes campos do conhecimento, bem como tratar de discrepâncias entre análises filosóficas alternativas sobre estes conceitos (STOTZ, GRIFFITHS & KNIGHT, 2004; STOTZ, BOSTANCI & GRIFFITHS, no prelo). Seus resultados mostram que genes são compreendidos de diferentes maneiras em diferentes áreas da biologia, o que adiciona mais um elemento de complexidade à relação entre o conhecimento científico, o conhecimento escolar e o discurso sobre genes na sociedade. Esta variação conceitual em torno dos genes está relacionada a um dos aspectos da crise discutida nesta seção. A tentativa de preservar a idéia de genes como unidades de estrutura e/ou função (ou, ainda, informação), apesar dos inúmeros desafios com que ela se defronta, conduziu a uma proliferação de significados do termo ‘gene’. Contudo, o fato de o termo ‘gene’ ter vários significados não é, em si, o problema, dado que muitos termos científicos são polissêmicos e isso nem sempre implica confusão semântica. O problema reside, antes, em que os diversos significados de ‘gene’ e

seus contextos de aplicação não são clara e suficientemente demarcados, tornando muito provável que ambigüidade e confusão semântica decorram da polissemia do termo. Sintomaticamente, é agora clara para muitos filósofos e cientistas a necessidade de uma análise cuidadosa e até mesmo uma reformulação deste conceito central no pensamento biológico (ver FOGLE, 1990, 2000; FALK, 1986, 2000; PARDINI & GUIMARÃES, 1992; PORTIN, 1993; GRIFFITHS & NEUMANN-HELD, 1999; KELLER, 2000; MOSS, 2001, 2003; EL-HANI et al., 2006; PEARSON, 2006; NEUMANN-HELD & SUTTER, 2006; EL-HANI, 2007).

Não se trata de que devemos necessariamente buscar um conceito único de gene, que pudesse dar conta da grande diversidade de significados do termo na literatura científica. Um conceito de gene não precisa ser completamente geral e inclusivo para servir aos propósitos práticos da pesquisa genética e uma diversidade de concepções sobre genes pode apresentar, no fim das contas, maior poder explicativo e heurístico. Trata-se apenas de que o significado e o domínio de aplicação de cada conceito de gene precisam ser cuidadosamente delimitados (EL-HANI, 2007), tanto na prática da ciência, quanto em seu ensino e divulgação. Na literatura, encontramos algumas tentativas interessantes de demarcar diferentes conceitos de gene e seus domínios de aplicação.

Nesta seção, pudemos ver como, na era pós-genômica, a compreensão da complexidade estrutural e funcional do genoma tornou o conceito molecular clássico de gene cada vez mais problemático. Discutimos também como a popular concepção informacional do gene não se assenta sobre uma base sólida, na medida em que não existe uma teoria da informação biológica que possa lhe conferir significado claro. Diante destes referenciais teóricos, podemos lançar um olhar sobre as idéias e, em particular, as metáforas relativas a genes encontradas na divulgação científica e no contexto escolar, de modo a verificar se elas tendem a aproximar ou distanciar as pessoas de uma compreensão da complexidade dos sistemas celulares e do genoma.

4. Metáforas sobre genes em revistas de divulgação científica e sua apropriação por pesquisadores, professores e estudantes

Esta seção discute dados de uma pesquisa de doutorado acerca de idéias sobre genes presentes em quatro revistas brasileiras de divulgação científica (RDC), nos anos de 1997, 2001 e 2003, marcados pela forte presença na mídia de assuntos ligados à genética. Estes

foram os anos em que ocorreram, respectivamente, os anúncios da clonagem da ovelha Dolly, do rascunho do Projeto Genoma Humano e do seqüenciamento quase completo do genoma de um indivíduo, neste caso, conjuntamente com a comemoração do cinquentenário do modelo da dupla hélice do DNA (GOLDBACH, 2006). As quatro revistas escolhidas – Ciência Hoje (CH), Superinteressante (SI), Galileu (GAL) e Scientific American-Brasil (SAB) – foram identificadas por professores como fontes importantes para a preparação de aulas, em levantamento realizado nesta mesma investigação. Além disso, outros estudos indicam que elas são tomadas pelos professores como meios de atualização de seus conhecimentos (KAWAMURA & SALÉM, 1996; GOLDBACH, FRIEDRICH & GANDARA, 2005).

Foram selecionados 154 textos das revistas que tratavam direta ou indiretamente de genes, sendo destacadas, quando presentes, as diferentes metáforas usadas para designá-los. De posse deste material, foram produzidos protocolos que orientaram a realização de entrevistas com nove pesquisadores que trabalham em genética, biologia molecular e áreas afins, bem como questionários que foram aplicados a 387 estudantes e 38 professores de ensino médio de escolas públicas e particulares do Rio de Janeiro.²

Na análise dos textos selecionados, além de identificar as metáforas, examinamos suas relações com o entorno textual e, em particular, com trechos que denotavam identificação com, ou crítica ao, reducionismo, determinismo e/ou gene-centrismo (EL-HANI, 1997, 2000).

Metáforas são freqüentemente usadas na construção do conhecimento e na comunicação em ciência. Elas também são muito usadas no conhecimento escolar, como tem sido reconhecido há muito tempo pela pesquisa em educação científica.

Segundo Bradie (1994), metáforas e modelos têm um importante papel no pensamento científico como ferramentas para sugerir novas explicações para um fenômeno, novos experimentos e teorias, ou maneiras de expandir velhas teorias, cumprindo papéis importantes na construção do conhecimento científico. Apesar de as metáforas carecerem de explicitude e precisão (BOYD, 1993) e, portanto, ser necessário sempre apreciá-las com um olhar bastante crítico, elas desempenham papéis cognitivos, heurísticos e retóricos fundamentais nas ciências, não parecendo possível dispensá-las (BRADIE, 1994, 1999; ORTONY, 1993; ROCHA & EL-HANI, 1996; LEWONTIN, 2002). Brown (2003) afirma que este recurso

² Maiores informações sobre a metodologia utilizada na realização das entrevistas e aplicação dos questionários, bem como os próprios instrumentos, podem ser obtidas em Goldbach (2006).

constitui um instrumento de grande força conceitual, não somente como elemento de gramática e de estilo, mas como ferramenta para a construção de significados no trabalho científico:

“... a metáfora é essencial para todos os aspectos da ciência. Ela se encontra no âmago do que consideramos ciência criativa: o acoplamento interativo entre modelo, teoria e observação que caracteriza a formulação e o teste de hipóteses e teorias. Nenhuma das idéias brilhantes dos cientistas acerca de novos experimentos, nenhuma interpretação inspirada de observações, nem qualquer comunicação destas idéias e resultados para outros ocorre sem o uso da metáfora” (BROWN, 2003, p. 15).

No contexto da pesquisa em ensino de ciências, Ferraz e Terrazzan (2003), por exemplo, acentuam o papel das metáforas e das analogias. Eles partem do pressuposto de que o recurso ao raciocínio analógico auxilia na compreensão do conhecimento científico, na medida em que aproxima assuntos heterogêneos:

“Os conceitos científicos considerados pelos alunos um tanto ‘indigestos’ são mais facilmente compreendidos com o uso destes recursos que tornam os conceitos mais ‘palatáveis’. Sendo sistemas conceituais diferenciados é evidente que ‘alvo’ e ‘análogo’ são de diferente natureza e, portanto, é preciso ter cuidado na hora de avaliar os tipos de semelhanças e diferenças entre ‘alvo’ e ‘análogo’” (FERRAZ & TERRAZZAN, 2003, p.214).

No âmbito da divulgação científica, Hernando (2003) afirma que as metáforas também desempenham papel fundamental, porque organizam a percepção do que se quer comunicar, cumprindo a tarefa de facilitar a compreensão de conceitos abstratos a partir de conceitos mais concretos. Desse modo, as metáforas são um dos recursos mais importantes para explicar, comunicar e persuadir a audiência dos textos de divulgação. Para ele, a linguagem do divulgador goza de liberdade criativa, mas esta deve ser mediada pelo que ele chama de ‘retórica oficial’ da ciência. Nos termos de um modelo de transposição didática, como o de Chevallard (1991) ou de Clément (2006), trata-se de uma tensão entre as transformações necessárias para que o conhecimento científico seja compreensível e a vigilância epistemológica necessária para que o conhecimento transformado não se afaste demasiadamente do conhecimento de referência.

Um rico apanhado de metáforas relativas ao DNA, aos genes e ao genoma foi realizado por Weigmann (2004), tendo sido por nós utilizado na discussão de nossos resultados. Esta autora destaca que a origem da idéia de ‘código’, em referência ao DNA, se encontra no

famoso livro *'What is life?'* (1944), de Schrödinger, a partir de sua descrição do material genético como um cristal aperiódico. Em um dos artigos clássicos em que apresentam seu modelo da estrutura do DNA, Watson e Crick (1953, p. 965) utilizam esta mesma metáfora quando afirmam que “é na precisa seqüência de bases que se encontra o código que carrega a informação genética”. Até os nossos dias, quando se pensa em bases moleculares da herança, a metáfora do ‘código’, intimamente relacionada à concepção informacional do gene, vem logo à mente. Esta visão foi complementada pela decifração ou ‘decodificação’ do código genético, na década de 1960. Pode-se perceber, assim, que uma das confusões mais comuns atualmente na mídia e nos livros didáticos (EL-HANI et al., 2007), entre informação genética e código genético, é mais profunda do que se poderia pensar, remontando aos primeiros dias da biologia molecular.

Weigmann discute a utilização problemática da metáfora do código e de outras metáforas empregadas por ocasião dos anúncios dos resultados do Projeto Genoma Humano, quando se usou e abusou de expressões como ‘decodificando o livro da vida’, ‘rompendo o código da vida’, ‘abrindo o código da vida’ etc., para fazer referência ao seqüenciamento do genoma. Estas expressões reforçam a tendência dos seres humanos de essencializar tipos biológicos, discutida na seção 2 deste artigo, colocando genes e/ou DNA na condição de essência da vida. Elas projetam a idéia incorreta de que a obtenção da seqüência total dos nucleotídeos de um genoma seria suficiente para descrever tudo que um organismo é e faz. Este gene-centrismo é merecedor de uma crítica radical, tal como faz Nelkin (2001, p. 559), ao afirmar que, considerado em si mesmo, o DNA “... é um texto sem contexto”. Como comenta Weigmann,

“... os genes por si próprios fazem muito pouca coisa. Os genes apenas descrevem como fazer proteínas, ou deixar de fazê-las, ou regular sua produção, conforme dirigida por outras proteínas. Nem mesmo os aspectos básicos da função protéica, ao nível da conformação espacial das proteínas, podem ser deduzidos dos genes. Não são os genes, mas intrincadas redes de proteínas que monitoram constantemente o ambiente externo à célula, monitoram os processos metabólicos e integram esta informação em função física. Portanto, simplesmente decifrar o texto tal como presente no genoma não prevê necessariamente como a vida funciona no nível celular, muito menos no nível do organismo. No entanto, metáforas de ‘decodificação’ são usadas tanto pela mídia quanto pelos cientistas...” (WEIGMANN, 2004, p.117).

Weigmann também comenta sobre outras metáforas usuais quando se faz referência aos genes, ao DNA e ao genoma, tais como ‘linguagem’, ‘livro’ e ‘texto’ da vida. A autora se refere, por exemplo, ao uso de uma destas metáforas por George e Muriel Beadle, em seu livro *The language of life*, de 1966, no qual escrevem que “... a decifração do código do DNA revelou uma linguagem [...] tão antiga como a própria vida, uma linguagem que é a mais viva de todas as linguagens” (*apud* WEIGMANN, 2004, p.117). Este modo de referir-se ao genoma foi também usado por Francis Collins, diretor do *National Human Genome Research Institute*, no anúncio do rascunho do genoma humano, em cerimônia oficial na Casa Branca. Nesta ocasião, ele tratou o genoma humano como sendo nosso livro de instruções e chegou a afirmar que anteriormente ele era conhecido só por Deus. Em seguida, o então presidente Clinton deu continuidade à mesma linha argumentativa, ao afirmar que estávamos aprendendo a linguagem com a qual Deus criou a vida.

Como Weigmann comenta, entre os problemas acarretados pelo mau uso das metáforas, ou, podemos acrescentar, por metáforas que se mostram limitadas ou mesmo arriscadas, em vista das diferenças entre os campos semânticos que estão sendo aproximados, temos: 1) o obscurecimento do significado do conceito que se quer esclarecer por meio da metáfora, e 2) a produção de associações que, mesmo não sendo necessariamente pretendidas, terminam por prejudicar a compreensão de uma idéia.

Leite (2005) também discute um rico conjunto de metáforas utilizadas na literatura científica e na mídia para referir-se a DNA, genes e genoma, como, por exemplo, ‘pedra de Rosetta’, ‘livro do homem’, ‘código dos códigos’, ‘tabela periódica’, ‘projeto’ ou ‘plano-mestre’ (*blueprint*), ‘livro de receitas’, ‘arquivo digital do Plioceno africano’ (usada por Richard Dawkins), ‘Santo Graal da genética humana’ (popularizada pelo biólogo molecular Walter Gilbert), ‘lista de peças ou componentes’, ‘cofre de códigos secretos’ etc.

Lewontin (2002) reconhece o papel das metáforas na ciência, mas chama a atenção – como os autores citados anteriormente – para os cuidados necessários em sua utilização, uma vez que “existe um risco de que venhamos a confundir a metáfora com aquilo que realmente interessa” (p. 10). Uma das metáforas criticadas por este autor é a de que o genoma, os genes ou o DNA constituiriam ‘projetos’ ou ‘programas’ para o desenvolvimento.³ Buscando a etimologia do termo ‘desenvolvimento’, Lewontin comenta:

³ Esta metáfora é intimamente relacionada à concepção informacional do gene e foi criticada por muitos outros autores, como Nijhout (1990), El-Hani (1997), Griffiths & Neumann-Held (1999), Oyama (2000) e Keller (2000).

“... o termo desenvolvimento é uma metáfora que traz consigo um compromisso anterior quanto à natureza do processo. Desenvolvimento [...] é, literalmente, o desdobrar ou desenrolar de algo que já está presente e, em certo sentido, pré-formado. Essa mesma palavra é utilizada em inglês para nomear o processo de revelar uma imagem fotográfica. A imagem já está imanente no filme, no interior da câmara, e o processo de revelação [...] simplesmente torna visível a imagem latente” (Lewontin, 2002, p.11).

Lewontin tem criticado reiteradamente a visão de que os genes determinam o estado final do organismo, enquanto o ambiente, no qual o desenvolvimento ocorre, é tão somente um conjunto de condições propícias para que os genes se expressem. Tal como num filme fotográfico, acima citado, a imagem produzida já estaria latente e apenas se revelaria quando o filme fosse submerso nas soluções apropriadas, sob certas condições ambientais. Esta é uma visão bastante comum na biologia moderna, que é reforçada toda vez que se pensa no genoma como um projeto ou programa de desenvolvimento.

Em lugar desta visão determinista e gene-cêntrica do desenvolvimento, ele sustenta que existem inúmeras evidências de que a

“ontogenia de um organismo é conseqüência de uma interação singular entre os genes que ele possui, a seqüência temporal dos ambientes externos aos quais está sujeito durante a vida e eventos aleatórios de interações moleculares que ocorrem dentro de células individuais” (id., *ibid.*, p.24).

Passando agora a discutir especificamente os textos de divulgação científica que analisamos, podemos reconhecer a ocorrência das metáforas discutidas acima, freqüentemente veiculando visões deterministas das relações entre genes, desenvolvimento e características fenotípicas. Uma das metáforas encontradas foi a de que o DNA seria um ‘manual de instruções’, como podemos ver no seguinte exemplo:

“Os genes são seqüências de DNA que possuem o manual de instruções para fabricar proteínas” (SI, Agosto/1997, p.14).

Outro exemplo se encontra na seguinte afirmação:

“O DNA é hoje o guardião de toda a informação genética das espécies e é nele que ficam as ‘instruções’ usadas pelo organismo para fazer proteínas - as moléculas que de fato ‘trabalham’ para manter uma célula viva” (GAL, Maio/2003, p. 57).

Outra metáfora encontrada foi a do genoma como um ‘livro de receitas’. Um exemplo desta metáfora é encontrado na seguinte afirmação, que deixa clara, ainda, sua conexão com o determinismo genético:

“Os genes são pedaços de DNA que, em conjunto, determinam características do organismo que os carrega – eles possuem a receita para a produção de proteínas e as ordens sobre quando e onde essas substâncias devem surgir no organismo” (GAL, Abril/2003, p.55).

A sentença abaixo oferece mais um exemplo de ocorrência desta metáfora:

“A troca das letras que formam o grande livro de receitas de seres vivos – o DNA – não tem, na maioria das vezes, conseqüências sérias. Mas, quando ela se dá em algum gene importante para o funcionamento do corpo, o resultado é um bolo que desanda, isto é, um distúrbio ou uma doença” (SI, Agosto/1997, p.14).

A metáfora do ‘livro da vida’, bem como outras metáforas lingüísticas, também foi encontrada. Na seguinte sentença, temos um exemplo, acompanhado por uma visão um pouco mais crítica do papel do genoma nos sistemas vivos:

“... aprendemos e começamos a folheá-lo. Mas sabemos apenas algumas poucas palavras e, para ler e entender totalmente a obra, precisamos obter um vocabulário mais rico e saber ainda o significado das palavras em conjunto na formação de frases, parágrafos e capítulos. Essa analogia revela o quadro atual do conhecimento científico sobre a biologia e o desenvolvimento dos organismos. O seqüenciamento da molécula de DNA de um organismo nos revela o que está escrito no ‘livro da vida’ dele. No entanto, a informação contida no DNA precisa ser ‘traduzida’ em proteínas, as palavras do livro, para que seu conteúdo seja utilizado” (CH, Abril/2003, p.16).

Outro exemplo é encontrado na seguinte passagem:

“A mutação de uma única letra do genoma é responsável pela síndrome de Van der Woude, anomalia caracterizada sobretudo por deformações semelhantes a fissuras no lábio inferior e no palato (porção superior da cavidade bucal)” (CH, Abril/2003, p.21).

Metáforas computacionais também estão presentes. É o caso, por exemplo, da comparação entre uma máquina que lê os comandos gravados em programas e o corpo, que seguiria as ordens escritas nos genes (SI, Novembro/1997, p. 57). Outra comparação usual é aquela entre genes e software, como na seguinte passagem, em que ela aparece conectada com a idéia do genoma como um conjunto de instruções:

“... uma pessoa da área de ciências exatas, [ao explicar] como funciona nosso material genético, certamente faria uma analogia com um software. Da mesma forma que um computador, os seres vivos funcionam graças a um programa sensacional, escrito em uma linguagem simples, que utiliza apenas quatro letras ou variantes. Tal programa está dividido em uma série *de instruções = os genes*” (CH, Maio/2001, p.35).

A metáfora do código é também bastante encontrada, podendo ser ilustrada pela seguinte passagem, na qual é evidente a confusão entre informação e código genético, freqüente e prejudicial à aprendizagem dos estudantes:

“Como se sabe, os genes são compostos por quatro diferentes nucleotídeos, dispostos em uma seqüência específica. Uma seqüência de três nucleotídeos forma um códon. Cada códon é o código para um aminoácido, e vários aminoácidos ligados em seqüência formam uma proteína. Por isso se diz que o DNA é um código genético: as informações contidas nesse código são usadas para expressar, ou seja, produzir as proteínas, as executoras das ordens do gene” (CH, Abril/2003, p.18).

Encontramos nos textos analisados algumas metáforas que incorporavam elementos críticos ao gene-centrismo. Em um destes casos, destacamos uma sentença na qual se afirma, por um lado, que os genes, em si mesmos, não realizam tarefa alguma, o que sugere uma compreensão de que a agência nas células se encontra em redes multimoleculares de proteínas e RNAs coordenadas pela própria célula. Contudo, por outro lado, afirma-se que os genes enviam ordens, o que é certamente uma ação ou tarefa, e de que eles são mestres-de-obras, o que confere a eles mais uma vez o papel de controlar os sistemas celulares. Este é, assim, um trecho que nos parece muito interessante, porque ilustra como, mesmo quando se busca deixar de lado o gene-centrismo, seu apelo é tão forte, à luz de como se estruturou o conhecimento biológico da segunda metade do século XX, em termos fortemente molecularizados, que esta visão sobre genes e suas relações com os sistemas celulares pode entrar pela porta dos fundos:

“O interessante é que os genes, em si, não realizam tarefa alguma. Eles, na verdade, apenas enviam ordens para que as proteínas, essas sim, metam a mão na massa. Pense nos genes como os mestres-de-obra do organismo. E nas proteínas, que as células obtêm dos alimentos, como os operários” (SI, Janeiro/2001, p.41).

É evidente a existência de uma relação íntima entre estas metáforas e a concepção informacional do gene, que cumpre um papel importante nas áreas de genética e biologia

molecular, e também se mostra prevalente em livros didáticos de ensino médio (SANTOS & EL-HANI, no prelo) e superior (PITOMBO et al., 2007, no prelo), bem como em concepções de estudantes de biologia (JOAQUIM et al., no prelo). O uso de metáforas como ‘instruções’, ‘código’, ‘programa’ etc. está, afinal, claramente vinculado a este modo de compreender os genes, que, apesar de sua prevalência, não tem, como vimos acima, bases teóricas consistentes.

Como comentamos acima, o uso de metáforas é um recurso importante na construção e comunicação do conhecimento científico, mas também pode dar vez a distorções e simplificações que podem ter conseqüências bastante prejudiciais. Este é o caso quando as metáforas usadas para fazer referência a genes, DNA e genoma não permitem uma compreensão apropriada da complexidade da estrutura e dinâmica dos sistemas genéticos e, tampouco, da complexidade de suas relações com sistemas celulares e supracelulares, com o desenvolvimento e com a origem das características fenotípicas. Esta compreensão, por sua vez, é muito necessária em nossas sociedades tecnocientíficas, nas quais aplicações biotecnológicas têm sido constantemente buscadas e/ou prometidas para solucionar problemas nas mais diversas e importantes áreas, como saúde pública, produção de alimentos e obtenção de energia.

Nas entrevistas realizadas com pesquisadores tomando como base as metáforas retiradas dos textos de divulgação científica analisados, foi possível perceber que idéias gene-cêntricas e deterministas não gozam da mesma popularidade entre eles. Foi pedido aos pesquisadores que escolhessem a(s) melhor(es) metáfora(s) para se referir aos genes, dentre as seguintes: ‘programa’, ‘receita’, ‘código’, ‘mensagem’, ‘instrução’ e ‘mestre-de-obras’. Foi solicitado, ainda, que tecessem considerações sobre cada metáfora, ao relatarem suas escolhas. A Tabela 1 apresenta uma síntese de trechos das entrevistas com os pesquisadores. Esta síntese foi validada pelos próprios pesquisadores, a partir de sua confirmação de que ela refletia o que haviam expressado nas entrevistas.

Foi possível identificar diferentes elementos críticos ao gene-centrismo nas entrevistas dos pesquisadores, muitos deles expressos nas sínteses apresentadas na Tabela 1, bem como comentários sobre a dificuldade de tratar genes como seqüências de DNA que constituiriam unidades estruturais e funcionais no genoma, conforme sustentado no conceito molecular clássico. Os entrevistados 1 e 6, em particular, destacaram o papel do ambiente ‘interno’ da célula na regulação da expressão gênica. O pesquisador 1 comentou, por

exemplo, que “a idéia mais conservadora do genoma como um ‘plano mestre’ não faz sentido. Hoje temos que considerar que existe uma incrível modulação no genoma”. Entre as metáforas consideradas mais inapropriadas pelos pesquisadores, temos a de ‘receita’, em virtude de implicar a noção de algo pré-determinado, que deveria ser seguido à risca para que o desenvolvimento das características se realizasse, exclusivamente, a partir da informação disponível no genoma. Somente os pesquisadores 3 e 7 apontaram pontos positivos no uso de metáforas que mais se aproximam de uma visão gene-cêntrica, destacando seu papel de facilitar a comunicação com o público e procurando ver como elas podem ser usadas, da perspectiva de quem as utiliza. Os demais pesquisadores enfatizaram limitações e riscos de seu uso.

Tabela 1: Síntese das escolhas e dos comentários dos pesquisadores sobre metáforas extraídas dos textos de divulgação científica.

Pesquisador 1 – biólogo molecular de microorganismos.	- Melhor metáfora: programa (propôs incluir a presença de comandos do tipo “e se...”, apontando as interações). - Argumentou que se deve ter cuidado com metáforas que colocam o DNA como depositário de informações fixas e autônomas. Chamou a atenção para a importância das proteínas que participam do processo e das diferentes formas de leitura das informações.
Pesquisador 2 – biólogo molecular.	- Melhores metáforas: mensagem e código . - Julgou inapropriadas as idéias de receita e programa , por sugerirem algo pré-programado.
Pesquisador 3 – bioquímico de proteínas.	- Não escolheu as melhores metáforas, mas buscou entender suas associações: - Instrução e mensagem – associadas ao gene expresso. - Código e programa – associadas ao gene em si. - Mestre-de-obras – associadas à síntese das proteínas.
Pesquisador 4 – geneticista de populações.	- Melhores metáforas: mensagem e código . - Julgou inapropriadas programa e software , embora reconheça que sejam muito usadas. Para ele, estas comparações estão marcadas por um enfoque ideológico, dando uma imensa primazia ao papel dos genes, do DNA.
Pesquisador 5 – biólogo evolutivo.	- Melhores metáforas: mensagem e código , assim como as expressões ‘transcrição’ e ‘tradução’, oriundas da lingüística, que ajudam na explicação dos processos. - Julgou a metáfora receita inapropriada, porque carrega a noção de algo pré-determinado, escrito por alguém. Programas e software são modismos. Mestre-de-obra e instrução indicam um propósito prévio, com o qual não concorda, como evolucionista.
Pesquisador 6 – biofísico.	- Achou prudente tomar cuidado com as comparações veiculadas pelas metáforas, já que o conteúdo de informação que está presente no gene é algo permissivo, isto é, não é determinante, não determina por si. Isso porque depende do resultado das interações celulares, envolvendo as proteínas, suas modificações, seu tráfego, suas compartimentalizações. Isso ultrapassa o genoma e é fortemente dependente de situações externas a ele.
Pesquisador 7 – biólogo molecular vegetal.	- Melhores metáforas: mensagem , código e programas . - Julgou plausível utilizar, para um público leigo, as metáforas receita , mestre-de-obras , instrutor , porque ajudam didaticamente.
Pesquisador 8 – imunologista.	- Melhores metáforas: mensagem e código , porque expressam a idéia de passagem de informação, sem ignorar que podem ter outros fatores atuando também no processo.
Pesquisador 9 – bioinformata.	- Melhores metáforas: mensagem e código , no sentido de ser informação contida no gene, que pode ser usada para as diferentes funções celulares. - Julgou inapropriadas receita , programa e software . Os dois últimos são instrumentos que ajudam a inferir onde estão os genes.

As metáforas ‘código’ e ‘mensagem’, por sua vez, foram as mais escolhidas nos questionários aplicados a estudantes e professores. As Tabelas 2A e 2B mostram as opções feitas por eles, diante da seguinte pergunta do questionário: Marque a metáfora associada à idéia de gene que você prefere.

A maioria dos estudantes deu preferência à metáfora ‘código’, que foi prevalente entre estudantes de escolas estaduais, colégios de aplicação e do CEFET Química do Rio de Janeiro. Também entre estudantes de escolas particulares, esta metáfora foi escolhida com grande

frequência, tendo sido, contudo, suplantada pela metáfora ‘receita’, que, em termos gerais, foi a segunda mais selecionada pelos estudantes. Os estudantes optaram com menor frequência pelas metáforas ‘programa/software’ e ‘mensagem’.

Entre os professores, a metáfora ‘código’ também foi a mais preferida. Contudo, a metáfora ‘receita’ foi a menos representada, em contraste com os resultados obtidos para os estudantes. Tanto ‘programa/software’ quanto ‘mensagem’ foram mais frequentemente escolhidas pelos professores. A maior prevalência destas últimas metáforas foi, contudo, claramente o resultado da inclusão de uma amostra muito particular de professores, que trabalham em colégios de aplicação e no CEFET Química. Se considerarmos, por exemplo, a amostra de professores das escolas públicas estaduais e municipais, teremos o mesmo padrão observado no caso dos estudantes. Quanto aos professores da rede particular, a amostra foi limitada demais para que qualquer conclusão segura possa ser tirada. Em suma, podemos dizer que as diferenças entre os perfis de respostas de professores e estudantes não devem ser ressaltadas, uma vez que foram, muito provavelmente, uma decorrência dos procedimentos de amostragem.

Tabela 2A – Síntese das respostas dos estudantes quanto às metáforas associadas aos genes. As metáforas que apareceram com maior frequência estão indicadas em cinza. O somatório das respostas classificadas em cada categoria não corresponde ao total de alunos de cada tipo de escola porque houve respostas que incluíam mais de uma categoria.

TIPO DE ESCOLA	Total de alunos	Receita	Programa /Software	Mensagem	Código	Outras	Não-respondida
ESCOLAS ESTADUAIS (N=8 escolas)	172	24	30	34	58	6	26
%		13,5%	16,9%	19,1%	32,6%	3,4%	14,6%
COLÉGIO DE APLICAÇÃO (N = 2 turmas)	44	8	7	-	22	5	2
%		18,2%	15,9%	-	50%	11,4%	4,5%
CEFET QUÍMICA-RJ (N = 2 turmas)	75	10	3	8	53	1	0
%	73	13,3%	4%	10,7%	70,7%	1,3%	-
ESCOLAS PARTICULARES (N = 5 turmas)	110	41	7	8	39	1	7
%	98	37,3%	6,4%	7,3%	35,5%	0,9%	6,4%
TOTAL	423	83	7	50	172	13	3
%		20,8%	11,8%	12,5%	43,1%	3,3%	8,5%

Tabela 2B– Síntese das respostas dos professores quanto às metáforas associadas aos genes. As metáforas que apareceram com maior frequência estão indicadas em cinza. O somatório das respostas classificadas em cada categoria não corresponde ao total de professores de cada tipo de escola porque houve respostas que incluíam mais de uma categoria.

TIPO DE ESCOLA	Total de professores	receita	programa software	mensagem	código	outro
ESCOLAS ESTADUAIS E MUNICIPAIS	15	4	2	3	9	-
COLÉGIO DE APLICAÇÃO E CEFET QUÍMICA-RJ	7	-	4	3	-	1 ('banco de dados')
ESCOLAS PARTICULARES	3	-	1	1	1	-
TOTAIS	25	4	7	7	10	1

A preferência de pesquisadores, professores e estudantes pela metáfora ‘código’ pode ser relacionada ao papel que ela é aparentemente capaz de cumprir na tentativa de dar conta da forma como o DNA pode ser portador da informação genética. Seu uso para construir uma compreensão sobre genes e informação genética se torna mais atraente, em particular, diante da falta na biologia de uma teoria da informação biológica (que pudesse explicar com maior precisão este conceito). Várias respostas, tanto dos estudantes, quanto dos professores, fornecem apoio a esta explicação, na medida em que sua escolha foi justificada, por exemplo, pelo fato de o material genético ser “algo que é lido e interpretado” (professor), ou ser “como um alfabeto” (estudante), ou por explicações como a de que “este código tem letras” (estudante), “tem informação dentro” (estudante), “são inúmeras combinações” (estudante), “o código se transforma em mensagem e depois em proteínas” (estudante), “é preciso ser decifrado” (estudante), “são pequenos pedaços que são identificados e significam algo” (professor) etc. Não se deve perder de vista, ainda, que esta metáfora não é utilizada desta maneira apenas em revistas de divulgação científica, mas também – e com grande frequência – na mídia e em livros didáticos (EL-HANI et al., 2007), exercendo, assim, forte influência sobre o modo como as pessoas entendem os genes e seu papel nos sistemas vivos. Contudo, ela apresenta limitações importantes, podendo ser prejudicial para a aprendizagem em genética. Utilizada desta maneira, ela conduz, por exemplo, a uma confusão entre código genético e informação genética, que pode conduzir a paradoxos importantes. É evidente que uma fonte importante de confusão reside no fato de que o código genético corresponde a

regras de relação entre códons (contendo nucleotídeos) e aminoácidos (ou sinais de iniciação e terminação da síntese protéica), sendo este código geralmente o mesmo em todos os organismos, enquanto a informação genética está relacionada a longas seqüências codificantes de nucleotídeos e está sujeito a variação na história dos organismos. El-Hani e colaboradores (2007) discutem, por exemplo, o caso de um livro didático no qual o uso da metáfora ‘código’ nestes dois contextos termina por conduzir o estudante à conclusão potencial de que os organismos ao mesmo tempo variam e não variam em seu ‘código genético’. No entanto, esta proximidade entre a metáfora do ‘código’, quando aplicada para explicar a natureza da informação genética, e o conceito de código genético, um tema familiar da biologia escolar, constitui também uma fonte da própria metáfora, por assim dizer, retroalimentando positivamente esta confusão.

Uma metáfora que se mostra mais apropriada para referir-se à informação genética, a de ‘mensagem’, também esteve entre as principais escolhas feitas pelos pesquisadores, mas não foi freqüente entre as opções dos estudantes e professores, com exceção da amostra de professores de colégios de aplicação e do CEFET Química. Neste caso, coloca-se a necessidade, contudo, de ir além do sentido puramente metafórico, explicando como seqüências de nucleotídeos podem carregar mensagens, no contexto de um conceito teoricamente bem informado de informação genética. Embora possamos explicar de modo satisfatório a base material das mensagens genéticas, a ausência de uma teoria da informação biológica não torna possível ir além do tratamento da informação genética como uma metáfora (GRIFFITHS, 2001; EL-HANI et al., 2006). Isso reforça a importância de construir tal teoria. O interesse de tal empreitada teórica não se resume, contudo, à tarefa interna à comunidade científica de buscar explicações claras e precisas do significado dos termos que empregamos. Há uma relação íntima entre o uso da linguagem da informação e o determinismo genético, que não escapou aos olhos de críticos desta última visão (por exemplo, OYAMA, 2000) e desempenha um papel importante na visão sobre genes que predomina em nossas sociedades, com importantes conseqüências sociais, políticas, econômicas e éticas. Um dos problemas reside numa extrapolação da idéia de código da relação entre DNA e proteínas para níveis de organização superiores, concebendo-se, então, que o material genético é também determinante das características fenotípicas e perdendo-se de vista o papel dos fatores ambientais e a complexidade dos processos de desenvolvimento:

“Na biologia, o termo informação é usado com dois significados muito diferentes. O primeiro se refere ao fato que a seqüência de bases no DNA codifica uma seqüência de aminoácidos nas proteínas. Neste sentido restrito, o DNA contém informação, a saber, sobre a estrutura primária das proteínas. O segundo uso do termo informação é uma extrapolação: ele significa a crença ou expectativa de que o genoma, de alguma maneira, também codifica as propriedades superiores ou mais complexas das coisas vivas. Está claro que o segundo tipo de informação, se é que existe, deve ser muito diferente da simples criptografia [...] do código genético”. (Nijhout, 1990, p.443).⁴

A metáfora ‘programa’ foi bem aceita por alguns pesquisadores e professores, principalmente aqueles de colégios de aplicação e do CEFET Química. Esta é também uma metáfora que tem sido criticada na literatura, como vimos acima, na medida em que traz consigo, em geral, o entendimento do desenvolvimento e do funcionamento celular/orgânico como se fossem controlados pelos genes, perdendo de vista a complexidade das redes de regulação do desenvolvimento e do metabolismo. Vale destacar que reconhecemos nas respostas, pelo menos, dois sentidos dados a este termo: 1) programa entendido como software; 2) programa entendido como projeto. No primeiro caso, seguem algumas das justificativas dadas por professores e estudantes para a escolha desta metáfora: “o gene é igual a um programa de computador... complicado!” (estudante); “tem comandos como um programa de PC” (estudante); “pode guardar, estocar, muita informação” (professor); “os softwares nada mais são do que uma combinação de zeros(0) e uns(1) que determinam uma série de instruções. Caso separados, perdem totalmente seu contexto. Os genes também são combinações de quatro nucleotídeos, numa seqüência específica, que determina um polipeptídeo” (professor); “o software (gene) permite o desenvolvimento de coisas tanto dentro quanto fora da máquina (corpo ou célula). Mas é a partir de códigos (detalhes do DNA) que este software funciona. Muitas vezes é necessário mais de um software para desenvolver uma ou mais funções” (professor).

O segundo sentido em que a metáfora ‘programa’ é utilizada se aproxima ainda mais dos problemas apontados na literatura, na medida em que seu entendimento como ‘projeto’, ‘plano’ etc. indica a compreensão do desenvolvimento e do funcionamento celular/orgânico como determinados ao nível do genoma, de um modo preformacionista, ou seja, como se as características e a dinâmica do organismo estivessem predeterminadas em um programa

⁴ Para uma discussão sobre o sentido em que se pode afirmar que o DNA contém informação sobre a estrutura primária das proteínas, ver El-Hani et al. (2006).

escrito no genoma, sendo necessário apenas ler esse programa do modo correto (ver SMITH, 1994).

O uso das metáforas ‘manual de instruções’ e ‘receita’ também reforça visões deterministas sobre o papel dos genes nos sistemas vivos. Os textos de divulgação as utilizam para tentar esclarecer as funções dos genes, mas terminam por valorizar excessivamente seu papel em tais sistemas. Esta supervalorização dos genes foi diretamente criticada por vários pesquisadores entrevistados, ao explicarem por que estas são, para eles, metáforas inapropriadas, baseando-se na idéia de que não existem informações *a priori* presentes nos genes, que poderiam funcionar por si mesmas, sem uma interpretação apropriada pelo sistema celular (ver tb. EL-HANI et al., 2006). Afinal, é necessário todo um conjunto de interações com redes de interação de componentes celulares, especialmente RNAs e proteínas, para que ocorra a ativação e a regulação da expressão dos genes.

5. Conclusões

Discutimos ao longo desse artigo metáforas usadas por textos de divulgação científica para tratar do DNA, dos genes e do genoma. Estas metáforas buscam esclarecer aspectos funcionais e estruturais dos genes, mas também suscitam uma série de dificuldades para a compreensão dos genes e de sua relação com os sistemas vivos, reforçando dificuldades já apontadas na literatura sobre ensino de genética (que revisamos na seção 2 deste artigo), bem como problemas relativos ao conceito de gene discutidos na literatura filosófica (abordados na seção 3 do artigo). Isso indica que tais metáforas precisam ser usadas com muito cuidado e, além disso, que algumas delas, como ‘programa’, ‘manual de instruções’, ‘código’, não devem ser usadas para caracterizar os genes e/ou a informação genética. De todas as metáforas que encontramos, ‘mensagem’ parece ser a mais adequada, demandando, contudo, uma teoria da informação biológica, que ainda não temos em mãos, para explicar de modo mais preciso seu significado. Este não é, contudo, um problema da divulgação científica ou do ensino de ciências apenas, mas um problema mais geral da estrutura do próprio conhecimento biológico.

Entre pesquisadores, estudantes e professores, observamos uma aceitação de metáforas problemáticas, como as de ‘código’ e ‘receita’. Contudo, pesquisadores e professores de colégios de aplicação e do CEFET Química mostraram uma perspectiva mais crítica sobre as metáforas investigadas, bem como, em termos gerais, quanto ao papel dos genes nos sistemas vivos. Nossos resultados indicam, assim, uma série de questões que merecem discussão na

educação científica e na literatura sobre ensino de ciências, na medida em que se relacionam a uma visão determinista do papel dos genes que tem penetrado substancialmente na mídia e na opinião pública, com conseqüências sociais, políticas, éticas e econômicas importantes. Estas questões podem ser relacionadas a muitas dimensões do sistema educacional, incluindo documentos oficiais que apresentam orientações curriculares. Por exemplo, em um trecho dos PCN+, encontramos o uso de metáforas que podem confundir mais do que explicar a estrutura e função do material genético:

“A biologia molecular escreve as frases fundamentais da vida, no DNA, com letras ou tijolos elementares já mais complexos, os nucleotídeos. Essas poucas letras se combinam três a três, formando palavras, que codificam cerca de duas dezenas de aminoácidos. O código genético é essa ‘linguagem natural’ que traduz ‘letras nucléicas’ em ‘palavras aminoácidos’, de cuja combinação depende a formação de proteínas. ‘Versos completos’, no DNA, correspondem a genes, que são estruturas funcionais mais elaboradas, e assim vai se organizando a complexidade dos organismos vivos...” (MEC-SEMTEC, PCN +, 2002, p.25).

Consideramos que se deve ter muito cuidado com o uso de tais metáforas lingüísticas, na medida em que as diferenças entre os campos semânticos que estão sendo aproximadas superam as similaridades que se está procurando destacar. Genes podem ser, de fato, explicados como tipos especiais de signos complexos (EL-HANI et al., 2006), mas suas propriedades não podem ser confundidas com aquelas que encontramos na linguagem e nos signos humanos.⁵ Em suma, um tratamento de genes como signos pode ser adequado, desde que se tome como base uma interpretação semiótica consistente, mas não se deve levar as metáforas lingüísticas longe demais, como esse trecho dos PCN+ claramente faz. No trecho acima, não existe um significado claro das metáforas – versos, frases, palavras, letras etc. – no contexto da genética e biologia molecular, isto é, os significados destas expressões em seu campo semântico de origem não estão associados aos seus respectivos alvos de forma coerente.

Não será possível tratarmos dos sistemas vivos sem usar metáforas. Estas são parte inelutável da pesquisa e da comunicação científicas. Devemos, contudo, ter muito cuidado com

⁵ Emmeche e Hoffmeyer (1991) apresentam argumentos interessantes contra uma analogia estrita entre signos genéticos e lingüísticos. Guimarães e Moreira (2000) explicam, similarmente, como segmentos de DNA não podem ser concebidos como se fossem organizados como substantivos, predicados, verbos etc., com sintaxe similar às linguagens humanas. Em suma, metáforas lingüísticas devem ser usadas com muito cuidado na compreensão dos genes, partindo-se de uma análise semiótica aprofundada de como genes atuam como signos. Certamente, tal análise não pode ser feita em termos apenas de metáforas. A necessidade de uma teoria da informação biológica também se coloca desta perspectiva.

as metáforas que utilizamos para tratar dos genes, nos contextos do ensino de genética e de divulgação de idéias deste campo do conhecimento. Afinal, temos um imenso desafio pela frente: propiciar aos nossos estudantes a possibilidade de construir um entendimento do papel dos genes como importantes elementos na vida das células, dos organismos e das linhagens, mas que operam no interior de redes de relações complexas, sendo atores e sujeitos dos processos relacionados com a manutenção, o desenvolvimento, o funcionamento e a reprodução dos sistemas vivos. Em particular, é cada vez mais necessário, no contexto contemporâneo, entender os genes para além do conceito molecular clássico, que reforça a idéia de uma unidade linear estrutural e funcional no genoma. É preciso, em suma, incorporar em nosso discurso sobre genes, seja na sala de aula, na mídia ou na divulgação científica, elementos que denotem a complexidade da estrutura e da dinâmica do genoma, sempre considerado em sua condição de parte de sistemas celulares muito complexos, inseridos, por sua vez, em sistemas supracelulares, no caso de organismos multicelulares. Faz-se necessário, por fim, entender o conceito de gene numa perspectiva histórica, de modo que professores e estudantes possam entender os diversos modelos que foram propostos para compreender a estrutura e a função dos genes ao longo do século XX, tanto em suas possibilidades, quanto em suas limitações.

Referências

- ALBADALEJO, C. & LUCAS, A. Pupil's meanings for 'mutation'. *Journal of Biological Education*, v.22, p.215-219, 1988.
- AYUSO, G.E.; BANET, E.; ABELLAN, M.T. Introducción a la genética en la enseñanza secundaria y bachillerato: II – Resolución de problemas o realización de ejercicios? *Enseñanza de las Ciencias*, v.14, n.2, p.127-142, 1996.
- AZNAR, M.M.; IBANEZ, O.T. Solving problems in genetics. *International Journal of Science Education*, v.27, p.101-121, 2005.
- BAHAR, J., JOHNSTONE, A.H., HANSELL, H. Revisiting Learning Difficulties in Biology. *Journal of Biological Education*, v.33, p.84-86, 1999.
- BANET, E.; AYUSO, G. E. Teaching of Biological Inheritance and Evolution of Living Beings in Secondary School. *International Journal of Science Education*, v.25, p.373-407, 2003.
- BEADLE, G.W.; TATUM, E.L. Genetic control of biochemical reactions in Neurospora. *PNAS*, v.27, p.499-506, 1941.

BLACK, D.L. Mechanisms of alternative pre-messenger RNA splicing. *Annual Review of Biochemistry*, v.72, p.291-336, 2003.

BONZANINI, T.K.; BASTOS, F. Avanços científicos recentes como temas para o ensino de biologia na escola média: exemplo do Projeto Genoma Humano. In: Anais do IV ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM ENSINO DE CIÊNCIAS, Bauru-SP, 2003.

BOYD, R. Metaphor and theory change: what is “metaphor” a metaphor for? In ORTONY, A. (ed.), *Metaphor and thought*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 481-494, 1993.

BRADIE, M. Epistemology from an evolutionary point of view. In: E. SOBER (Ed.) *Conceptual Issues in Evolutionary Biology*, Cambridge-MA: MIT Press, 1994.

BRADIE, M. Science and Metaphor. *Biology and Philosophy*, v.14, p.159-166, 1999.

BROWN, T.L. *Making Truth: Metaphor in Science*. Champaign-IL: University of Illinois Press, 2003.

BRUNI, L. E. *A Sign-theoretic Approach to Biotechnology*. Tese de doutorado - Institute of Molecular Biology, University of Copenhagen, 2003.

CANTIELLO, A.C.; TRIVELATO, L.F. O Conceito de herança biológica no currículo do ensino médio. In Anais do III ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA. EM ENSINO DE CIÊNCIAS, Atibaia-SP, 2001.

CHATTOPADHYAY, A. Understanding of genetic information in higher secondary students in Northeast India and the implications for genetics education. *Cell Biology Education*, v.4, p. 97–104, 2005.

CHEVALLARD, Y. *La Transposición Didáctica: Del Saber Sabio al Saber Enseñado*. Buenos Aires: Aique, 1991.

CHO, H.M.; KAHLE, J.B. & NORDLAND, F.H. An investigation of high school biology textbooks as sources of misconceptions and difficulties in genetics and some suggestions for teaching genetics. *Science Education*, v.69, p.707-719, 1985.

CLÉMENT, P. *Didactic Transposition and KVP Model: Conceptions as Interactions Between Scientific Knowledge, Values and Social Practices*. In: ESERA SUMMER SCHOOL, Braga, Portugal, 2006.

DOMINGUES, D.S.; FAVARO, R.D.; MAIA, I.G.; DINIZ, R.E.S. A discussão de tópicos de engenharia genética e biologia molecular na escola: o que pensam alunos de ensino médio, In: Anais do IV ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA. EM ENSINO DE CIÊNCIAS, Bauru-SP, 2003.

EL-HANI, C.N. Explicações causais do desenvolvimento: são os genes suficientes? *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, v.7, p.121-167, 1997.

EL-HANI, C.N. *Níveis da Ciência, Níveis da Realidade: Evitando o Dilema Holismo/Reduccionismo no Ensino de Ciências e Biologia*. São Paulo: Faculdade de Educação/USP. Tese de doutorado, 2000.

EL-HANI, C.N. Between the cross and the sword: The crisis of the gene concept, *Genetics and Molecular Biology*, v.30, p.297-307, 2007.

EL-HANI, C.N.; QUEIROZ, J.; EMMECHE, C. A semiotic analysis of the genetic information system. *Semiotica*, v.160, p.1-68, 2006.

EL-HANI *et al.* Brazilian High School Biology textbooks: main conceptual problems in genetics and cell & molecular biology. In: Proceedings of the IOSTE INTERNATIONAL MEETING ON CRITICAL ANALYSIS OF SCHOOL SCIENCE TEXTBOOK, University of Tunis, p. 494-504, 2007.

EMMECHE, C.; HOFFMEYER, J. From language to nature: the semiotic metaphor in biology. *Semiotica*, v.84, p.1-42, 1991.

FALK, R. What is a gene? *Studies in the History and Philosophy of Science*, v.17, p.133-173, 1986.

FALK, R. The gene – A concept in tension. In: BEURTON P.J.; FALK R.; RHEINBERGER H (eds.). *The Concept of the Gene in Development and Evolution*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 317-348, 2000.

FALK, R. Can the norm of reaction save the gene concept? In: SINGH, R.S.; KRIMBAS, C.B.; PAUL, D.B.; BEATTY, J. (eds.). *Thinking about Evolution: Historical, Philosophical and Political Perspectives*. New York: Cambridge University Press, p. 119-140, 2001.

FERRAZ, D.F.; TERRAZZAN, E.A. O uso espontâneo de analogias por professores de biologia e o uso sistemático de analogias: que relação? *Ciência & Educação*, v.9, p.213-227, 2003.

FOGLE, T. Are genes units of inheritance? *Biology and Philosophy*, v.5, p.349-71, 1990.

FOGLE, T. The Dissolution of Protein Coding Genes, in: BEURTON, P.; FALK, R.; RHEINBERGER, H.J. *The Concept of the Gene in Development and Evolution*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 3-25, 2000.

GELBART, W.M. Databases in genomic research. *Science*, v.282, p.659-661, 1998.

GERICKE, N.M & HAGBERG, E.M. Definition of historical models of gene function and their relation to students' understanding of genetics. *Science and Education*, v.16, p.849-881, 2007.

GILBERT, W. A vision of the grail, in: KEVLES, D.; HOOD, L. (ed.). *The Code of Codes: Scientific and Social Issues in the Human Genome Project*. Cambridge-MA: Harvard University Press, p.83-97, 2001.

GOLDBACH, T. *Entre códigos, receitas e programs: as idéias sobre genes em diferentes contextos*. Tese de Doutorado em Engenharia de Produção (Área Difusão de Ciência & Tecnologia). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Abril 2006.

GOLDBACH, T.; FRIEDRICH, M.P.; GANDARA, A.C. A utilização de artigos de divulgação científica no trabalho docente. In: Anais do I ENEBIO/ III EREBIO RJ/ES, 2005.

GRIFFITHS, P.E. Genetic information: a metaphor in search of a theory. *Philosophy of Science*, v.68, p.394-403, 2001.

GRIFFITHS, P.E. & NEUMANN-HELD, E. The many faces of the gene. *BioScience*, v.49, p.656-662, 1999.

GUIMARÃES, R.C.; MOREIRA, C.H.C. O conceito sistêmico de gene – uma década depois. In: *Auto-Organização: Estudos Interdisciplinares 2*, D’OTTAVIANO, Í. M. L..

GONZÁLES, M. E. Q. (Orgs.), Coleção CLE (Centro de Lógica e Epistemologia) vol. 30, p. 249-280, Campinas: UNICAMP, 2000.

HACKLING, M.W. & TREAGUST, D. Research data necessary for meaningful review of grade ten high school genetics curricula. *Journal of Research in Science Teaching*, v.21, p.197-209, 1984.

HALL, B.K. The gene is not dead, merely orphaned and seeking a home. *Evolution and Development*, v.3, p.225-228, 2001.

HERNANDO, M.C. Metáfora y divulgación. *Revista Eletrônica Espiral – NJR-ECA-USP – jul-ag-set*, 2003. Disponível em <http://www.eca.usp.br/nucleos/njr/espiral/>. Acessado em 18 Out. 2007.

JIMÉNEZ ALEIXANDRE, M.P. Thinking about theories or thinking with theories? A classroom study with Natural Selection. *International Journal of Science Education*, v. 14, p. 51-61, 1992.

IDEKER, T.; GALITSKI, T.; HOOD, L. A new approach to decoding life: systems biology. *Annual Review of Genomics and Human Genetics*, v.2, p.343-372, 2001.

KAWAMURA, M; SALÉM, S. O texto de divulgação e o texto didático; conhecimentos diferentes? In: Anais do V ENCONTRO DE PESQUISADORES EM ENSINO DE FÍSICA. São Paulo: Sociedade Brasileira de Física, 1996.

KAY, L.E. *Who Wrote the Book of Life? A History of the Genetic Code*. Stanford: Stanford University Press, 2000.

KELLER, E.F. *The century of the gene*. Cambridge-MA: Harvard University Press, 2000.

KELLER, E.F. The century beyond the gene. *Journal of Biosciences*, v.30, p.3-10, 2005.

KINNEAR, J.F. Using a historical perspective to enrich the teaching of linkage in Genetics. *Science Education*, v.75, p.69-85, 1991.

JOAQUIM, L.M.; SANTOS, V.C.; ALMEIDA, A.M.R.; MAGALHÃES, J.C.; EL-HANI, C. N. Concepções de estudantes de graduação de biologia da UFPR e UFBA sobre genes e sua mudança pelo ensino de genética. Atas do VI ENCONTRO DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, no prelo.

JUDSON, H.F. Talking about the genome. *Nature*, v.409, p.769, 2001.

LEITE, M. *Promessas do Genoma*. São Paulo: UNESP, 2007.

LEITE, M. *Hegemonia e crise da noção de 'gene' nos 50 anos do DNA*, palestra inaugural do 49º Congresso Nacional de Genética, Águas de Lindóia, set-2003. Disponível em www.sbg.com.br, acessado em 18 out. 2007.

LEWIS, R. In search of the human genetic code. *The Scientist*, v.18-20, p.8, 2004.

LEWIS, J. & WOOD-ROBINSON, C. Genes, chromosomes, cell division and inheritance – do students see any relationship? *International Journal of Science Education*, v. 22, p. 177-195, 2000.

LEWIS, J.; LEACH, J.; WOOD-ROBINSON, C. All in the genes ? - Young people's understanding of the nature of genes. *Journal of Biological Education*, v.34, p.74– 79, 2000a.

LEWIS, J.; LEACH, J.; WOOD-ROBINSON, C. What's in a cell? - Young people's understanding of the genetic relationship between cells within an individual. *Journal of Biological Education*, v.34, p.129-132, 2000b.

LEWIS, J.; LEACH, J.; WOOD-ROBINSON, C. Chromosomes: the missing link - young people's understanding of mitosis, meiosis and fertilization. *Journal of Biological Education*, v.34, p.189–199, 2000c.

LEWIS, J.; LEACH, J.; WOOD-ROBINSON, C. Young people's understanding of the nature of genetic information in the cells of an organism. *Journal of Biological Education*, v. 35(1),p.29-35, 2000d.

LEWONTIN, R.C. *Biology as Ideology: The Doctrine of DNA*. New York: HarperCollins. 1993.

LEWONTIN, R.C. *A Tripla Hélice: Gene, Organismo e Ambiente*. São Paulo: Companhia das Letras, 2002.

LORETO, E.L.S.; SEPEL, L.M.N. A escola na era do DNA e da genética. *Ciência e Ambiente*, v.1, p.149-156, 2003.

MARBACH, A.D.G. Attempting to break the code in student comprehension of genetic concepts. *Journal of Biological Education*, v.35, n. 4, p.183-189, 2001.

MEC-SEMTEC. Parâmetros Curriculares Nacionais – PCN+-Área de Ciências da Natureza e Matemática, 2002. Disponível em <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>. Acessado em 18 Out. 2007.

MODREK, B. & LEE, C. A genomic view of alternative splicing. *Nature Genetics*, v.30, p.13-19, 2003.

MOSS, L. Deconstructing the gene and reconstructing molecular developmental systems, In: OYAMA, S.; GRIFFITHS, P.E.; GRAY, R.D. *Cycles of Contingency: Developmental Systems and Evolution*. Cambridge-MA: MIT Press, p.85-98, 2001.

MOSS, L.. *What Genes Can't Do*. Cambridge-MA: MIT Press. 2003.

NASCIMENTO, J.F.M. & ROSA, V.L. O vestibular e suas implicações nos programas escolares. In: Anais do V ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA. EM ENSINO DE CIÊNCIAS, Bauru-SP, 2003.

NELKIN, D. Molecular metaphors: the gene in popular discourse. *Nature Reviews Genetics*, v.2, p.555-559, 2001.

NEUMMAN-HELD, E.; REHMANN-SUTTER, C. *Genes in Development*. Durham: Duke University Press, 2006.

NIJHOUT, H.F.. Metaphors and the role of genes in development. *BioEssays*, v.12, p.441-446, 1990.

ORTONY, A. (ed.) *Metaphor and Thought*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

OYAMA, S. *The Ontogeny of Information: Developmental Systems and Evolution* (2nd Ed). Cambridge: Cambridge University Press. 2000.

PARDINI, M.I.M.C.; GUIMARÃES, R.C. A systemic concept of the gene. *Genetics and Molecular Biology*, v.15:, p.713-721, 1992.

PEARSON, H. What is a gene? *Nature*, v.441, p.399-401, 2006.

PITOMBO, M.A.; ALMEIDA, A.M.R. & EL-HANI, C.N. Gene concepts in higher education cell & molecular biology textbooks. In: Proceedings of the IOSTE INTERNATIONAL MEETING ON CRITICAL ANALYSIS OF SCHOOL SCIENCE TEXTBOOK, University of Tunis, p.855-864, 2007.

PITOMBO, M.A.; ALMEIDA, A.M.R. & EL-HANI, C.N. Conceitos de gene e idéias sobre função gênica em livros didáticos de Biologia Celular e Molecular do ensino superior. *Contexto e Educação*, no prelo.

PORTIN, P. The concept of the gene: short history and present status. *Quarterly Review of Biology*, v.56, p.173-223, 1993.

RADFORD, A. & BIRD-STEWART, J.A. Teaching genetics in schools. *Journal of Biological Education*, v.16, p.177-180, 1982.

REZNIK [atual: GOLDBACH], T. *O desenvolvimento do conceito de gene e sua apropriação nos livros didáticos de biologia*. Dissertação de Mestrado, Fac. de Educação, UFF, Niterói, 1995.

RICHARDS, M.P.M. & PONDER, M. Lay understanding of genetics: a test of hypothesis. *Journal of Medical Genetics* v.33, p.1032-1036, 1996.

ROCHA, P.L.B.; EL-HANI, C.N. The description of the evolutionary process as a metaphor of phylogenetic systematics. *Journal of Comparative Biology*, v.1, p.17-28, 1996.

RODRÍGUEZ, B. A., La didáctica de la genética: revisión bibliográfica. *Ensenanza de las Ciencias*, v. 13, p. 397-385, 1995.

ROSE, S.; LEWONTIN, R.C. & KAMIN, L.J. *Not in Our Genes: Biology, Ideology and Human Nature*. London: Penguin. 1984.

SANTOS, V.C. & EL-HANI, C.N. Idéias sobre genes em livros didáticos de Biologia do Ensino Médio publicados no Brasil. Atas do VI ENCONTRO DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, no prelo.

SCHRÖDINGER, E. *What Is Life?* Cambridge: Cambridge University Press, 1944.

SHTULMAN, A. Qualitative differences between naïve and scientific theories of evolution. *Cognitive Psychology*, v.52, p.170-194, 2006.

SILVEIRA, R.V.M. & AMABIS, J.M. Como os estudantes do ensino médio relacionam os conceitos de localização e organização do material genético?. In: IV ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA. EM ENSINO DE CIÊNCIAS. Bauru-SP, 2003.

SMITH, K.C. *The Emperor's New Genes: the Role of the Genome in Development and Evolution*. Durham: Duke University. Tese de Doutorado, 1994.

STEWART, J. Student problem solving in high school Genetics. *Science Education* v.67, p. 523-540, 1983.

STEWART, J.; HAFNER, R. & DALE, M. Students' alternative views of meiosis. *The American Biology Teacher* v.52, p.228-232, 1990.

STOTZ, K., BOSTANCI, A.; GRIFFITHS, P.E. Tracking the shift to post-genomics. *Community Genetics*, no prelo.

STOTZ, K., GRIFFITHS, P.E.; KNIGHT, R. How biologists conceptualize genes: an empirical study. *Studies in the History and Philosophy of Biological & Biomedical Sciences*, v.35, p.647-673, 2004.

THOMSON, N.; STEWART, J. Genetics inquiry: strategies and knowledge geneticists use in solving transmission genetics problems. *Science Education*, v.87, p.161-180, 2003.

TOLMAN, R.R. Difficulties in genetics problem solving. *The American Biology Teacher* v.44, p.525-527, 1982.

TONEGAWA, S. The molecules of the immune system. *Scientific American*, v.253, p.104-113, 1985.

TURNEY, K. The public understanding of genetics – where next? *European Journal of Genetics Society* v.1, p.5-20, 1995.

WATSON, J.D.; CRICK, F.H.C. Genetical implications of the structure of deoxyribonucleic acid. *Nature*, v.171, p.964-967, 1953.

WEIGMANN, W. The code, the text and the language of God. *EMBO reports -European Molecular Biology Organization*, v.5, p.116-118, 2004.

WOOD-ROBINSON, C. Young people's ideas about inheritance and evolution. *Studies in Science Education* v.24, p.29-47, 1994.

XAVIER, M.F.; FREIRE, A.S; MORAES, M.O. A nova (moderna) biologia e a genética nos livros didáticos de biologia no ensino médio. *Ciência e Educação*, v.12, p.275-289, 2006.

TÂNIA GOLDBACH: é professora de Biologia dos Cursos Técnicos Integrados e do Curso de Especialização em Ensino de Ciências, com Ênfase em Biologia e Química do Centro Federal de Educação Tecnológica de Química–RJ (CEFET Química), Unidade Maracanã. Coordena o Grupo de Pesquisa em Ensino e Divulgação das Ciências da Natureza, no qual orienta bolsistas de iniciação científica, especialização e mestrado. É graduada em Licenciatura em Ciências Biológicas pela UFRJ (1984), Mestre em Educação pela UFF (1995) e Doutora em Ciências pelo Programa de Engenharia de Produção, na linha Difusão de Ciência e Tecnologia da COPPE-UFRJ (2006). Suas investigações estão situadas na pesquisa em educação e divulgação científicas, com destaque para o ensino de biologia, análise de materiais didáticos e estratégias de ensino. Tem atuado em apoio, organização e assessoria a eventos divulgação científica (Feiras, Jornadas e Mostras).

CHARBEL NINO EL-HANI: é professor adjunto do Departamento de Biologia Geral, Instituto de Biologia, Universidade Federal da Bahia, Brasil. Coordena o Grupo de Pesquisa em História, Filosofia e Ensino de Ciências Biológicas e é bolsista de produtividade em pesquisa do CNPq. Ensina e orienta nos Programas de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências (Universidade Federal da Bahia/Universidade Estadual de Feira de Santana) e em Ecologia e Biomonitoramento (Universidade Federal da Bahia). É graduado em Ciências Biológicas pela UFBA (1992), Mestre em Educação pela UFBA (1995) e Doutor em Educação pela USP (2000). Fez pós-doutorado no Centro de Filosofia da

Natureza e Estudos da Ciência, no Instituto Niels Bohr, Faculdade de Ciências, Universidade de Copenhague, Dinamarca, de 2003 a 2004. Suas investigações estão situadas na pesquisa em educação científica, filosofia da biologia, biossemiótica, biologia teórica e comportamento animal. Ele é membro de conselhos editoriais de periódicos brasileiros e internacionais nas áreas de pesquisa em educação científica e filosofia da ciência.