

EXPLORANDO A CAUSALIDADE COMPLEXA NO ENSINO FUNDAMENTAL*

EXPLORING COMPLEX CAUSALITY IN FUNDAMENTAL TEACHING

Alexandre Alex Barbosa Xavier¹
Antonio Tarciso Borges²

¹Universidade Federal de Minas Gerais, lex.lutor@globo.com

²Universidade Federal de Minas Gerais, tarciso@coltec.ufmg.br

Resumo

A pesquisa conduzida nas últimas décadas evidenciou as dificuldades que os estudantes enfrentam na aprendizagem de diversos conceitos da ciência. No entanto, as iniciativas de ensino baseadas nestas evidências, no entanto, lograram pouco sucesso. Uma nova forma de explicar essas dificuldades vem sendo articulada, com base na incomensurabilidade entre as estruturas ontológicas e causais que os estudantes atribuem às suas construções e aquelas adotadas pela Ciência. Por exemplo, os estudantes tendem a usar esquemas causais simples ao modelar e produzir explicações para fenômenos emergentes e para o comportamento de sistemas complexos. Este trabalho explora, através de atividades simples, o comportamento de fenômenos emergentes com estudantes do ensino fundamental. O objetivo é tornar mais rico o repertório de formas causais a que os estudantes podem recorrer para explicar um amplo conjunto de fenômenos nas várias áreas da ciência.

Palavras-chave: ensino de ciências, sistemas complexos, emergência, simulação.

Abstract

Throughout the last few decades, educational research has consistently documented students' difficulties in learning about a number of science concepts. However, teaching initiatives based on such corpus of evidence have reached scarce success. A new way of explaining why learning science is so demanding has been proposed based on the assumed incommensurability between the ontological and causal structures students ascribe to their constructions and those assumed by Science. For instance, students tend to use simple causal schema to model and to produce explanations for emergent phenomena and complex systems behaviour. This work explores the behaviour of emergent phenomena by using simple activities with a group of elementary school students. It aims at the enrichment of the causal forms repertoire students can draw on to construct deeper understanding and sound explanations for many phenomena in many areas of science.

Keywords: science education, complex systems, emergency, simulation.

* Apoio: CNPq

INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas três décadas, os estudiosos da Educação em Ciências se empenharam em investigar mais profundamente os entendimentos dos estudantes acerca de vários domínios do conhecimento. A própria noção de conhecimento tornou-se mais discutida ao longo deste período, com críticas à concepção de conhecimento como algo que é adquirido da observação ou recebido de professores e livros. A concepção de mente como um container que corresponde ao cérebro, foi substituída por uma outra visão que considera o entorno sócio-cultural, bem como os artefatos que utilizamos para aprender.

Estas pesquisas produziram inúmeras evidências de que alguns conceitos da ciência escolar são particularmente difíceis para os estudantes aprenderem (Driver, Guesne e Tiberghien, 1985, Driver et al, 1994). Conceitos como calor e temperatura, corrente elétrica, difusão, seleção natural, inércia, energia, entre outros são particularmente difíceis para a maioria dos estudantes. Uma das explicações mais frequentemente mencionadas é que os modelos da ciência postulam a existência de entidades invisíveis e mecanismos complicados para explicar fenômenos e situações. Tem-se argumentado que as dificuldades dos estudantes em apropriar-se ou em construir modelos que lhes permitam tratar as situações de interesse do currículo deve-se ao fato de que eles envolvem conceitos abstratos, intrinsecamente complicados e afastados da experiência cotidiana dos estudantes.

Os currículos de ciências que foram desenvolvidos neste período com base nas melhores evidências disponíveis sobre as dificuldades de aprendizagem dos estudantes, lograram pouco sucesso. Hodson (1988) percebeu bem o sentimento que predominava nos anos 80 e agora entre os pesquisadores da educação em ciências, ao comentar que depois de décadas de experiências de desenvolvimento de novos currículos, o que se podia afirmar com certeza era que alguns currículos funcionam para certos alunos em algumas escolas e nós nem sabemos ao certo porque sim ou porque não funcionam.

Diante desse quadro, como explicar as dificuldades de aprendizagem dos estudantes, especialmente em Física? As nossas ações futuras como professores, pesquisadores em ensino e formadores de professores dependem de um entendimento profundo sobre o que as pesquisas nesse campo têm apontado. Uma nova linha de explicação surgiu dos trabalhos de uma série de pesquisadores, especialmente Chi e colaboradores (1992, 1994, 1997), mas também com contribuições do grupo de Wilensky e Resnick (1999) e outros.

A idéia básica de Chi é que tais conceitos são difíceis de serem aprendidos em vista da incomensurabilidade entre as suas estruturas categóricas na ciência escolar e os esquemas ontológicos que os estudantes usam para assimilá-los. Chi aponta que estes conceitos, em geral, são relacionados a um tipo de processo em que o fenômeno observável global emerge de um conjunto de processos interativos locais e subjacentes. Ou seja, eles estão relacionados a fenômenos acessíveis à percepção e observação, mas que resultam do comportamento coletivo de um grande número de processos que ocorrem em escalas de tempo ou espaço muito pequenas, embora algumas vezes estas escalas possam ser muito grandes. Mas são distintas das escalas às quais estamos habituados. Por exemplo, quando os estudantes estudam o comportamento térmico dos materiais, aprendem que as partículas atômicas estão em contínuo movimento aleatório. Depois, quando estudam a condução de eletricidade nos metais, eles têm que integrar aquele conhecimento com o fato de que os elétrons participam do processo de condução elétrica. Não é

tarefa simples relacionar os dois conhecimentos, pois não é fácil imaginar como é que as partículas em movimento aleatório podem produzir uma corrente constante num circuito, sempre com o mesmo sentido. Não há conexão simples entre o comportamento das partículas individuais e seu comportamento coletivo.

Um outro exemplo é o da difusão de uma certa quantidade de tinta de escrever em um recipiente com água. O que se observa é que a mancha de tinta se dilui gradualmente, enquanto toda a água adquire uma leve tonalidade azulada. Os estudantes quase sempre acreditam que o processo termina depois de algum tempo, atingindo um estado invariável de igual concentração de tinta em qualquer local. Os estudantes tendem a pensar que a tinta move-se de regiões de maior concentração para regiões de menor concentração, até que um estado final se estabeleça e que a concentração de tinta permanece inalterada. Resultado parecido ocorre com situações de equilíbrio termodinâmico e equilíbrio químico.

Os estudantes também atribuem intencionalidade ao processo: isso acontece para que a concentração de tinta fique igual em toda a extensão de água. É como se houvesse um agente comandando o movimento das moléculas, com o objetivo de alcançar um estado de equilíbrio caracterizado por concentração uniforme. Wilensky e Resnick (1999) aponta o mesmo com relação ao movimento das células do limo ou ao movimento de um bando de pássaros migratórios. Eles voam juntos e de maneira organizada porque têm um líder, que comanda todo o bando.

Os estudantes também atribuem uma ordenação espacial ou temporal aos processos envolvendo grande quantidade de entidades. E atribuem ações distintas aos constituintes destes processos, mesmo quando não há nenhuma distinção. Tendem a acreditar que os processos são do tipo evento, portanto, limitados no tempo. Assim, depois que se atinge um determinado estado cessa-se o processo. Essa forma de pensar constitui um sério obstáculo ao entendimento de conceitos importantes nas ciências, que envolvem situações estacionárias, mas dinâmicas. Por exemplo, dois sistemas em equilíbrio térmico, ou situações envolvendo equilíbrio químico.

Chi aponta que os processos naturais não têm estes atributos, muito menos são limitados temporalmente. Uma colônia de bactérias vir a se extinguir completa e permanentemente, mas isso não pode ser antecipado ou garantido de antemão, a partir da análise do comportamento dos membros da colônia. A história da colônia é determinada tanto por fatores endógenos quanto exógenos. Este padrão de atribuições é muito típico de eventos do nosso cotidiano. Por exemplo, um espetáculo de artes ou um jogo de futebol. Ambos têm começo e final, em ambos há diferenciação de ações entre os participantes, ambos são caracterizados por intencionalidades.

Ao contrário, muitos dos fenômenos de interesse das ciências resultam de ações, independentes, simultâneas, uniformes e não-dirigidas, de um número muito grande de entidades. Este conjunto de atributos constitui o 'esquema emergente' (Chi, 1997), contrariamente ao esquema causal, característico do pensamento das crianças e adolescentes. O resultado é que os estudantes aprendem ciências utilizando os mesmos recursos e estratégias cognitivas que utilizam em situações do cotidiano. Se nós pretendemos que os nossos estudantes desenvolvam uma compreensão mais sofisticada e aprofundada desses fenômenos, devemos criar as condições para o desenvolvimento do seu pensar científico, enriquecendo seu repertório de formas de conhecer e explicar. Devemos facilitar a criação e ativação de esquemas apropriados para o entendimento de sistemas complexos, ao invés de reforçar ainda mais os esquemas causais inadequados, derivados de suas vivências cotidianas.

SIMULANDO SISTEMAS COMPLEXOS

O mundo exibe uma rica diversidade de sistemas e fenômenos complexos, abrangendo desde nossos próprios corpos até os ecossistemas e sistemas econômicos. A ciência escolar, por outro lado, estuda sistemas idealizados ou simplificados, pois podem ser descritos e explicados através de princípios mais gerais. O problema é que os sistemas reais encontrados a todo o momento são principalmente não-lineares. Como podemos incentivar a compreensão de sistemas não-lineares, numa cultura escolar tão amplamente confinada à linearidade?

Um dos aspectos intrigantes dos sistemas complexos é que eles podem apresentar comportamentos coerentes, envolvendo todo o organismo, revelando extraordinária organização, realizando atividades altamente cooperativas, ou até mesmo passar por transições que os conduzam a um comportamento inteiramente caótico.

A pesquisa em sistemas complexos, além de contribuir para uma nova forma de descrever, observar e significar os fenômenos no mundo, aborda também algumas questões de profunda importância na ciência e na filosofia como: ordem e caos, aleatoriedade e determinismo, análise e síntese. Dessa forma, uma visão de ciência baseada numa causalidade central e determinista, abre espaço para uma ciência de sistemas descentralizados e para explicações probabilísticas (Gleick, 1990; Prigogine, 1996; Johnson, 2002).

No ensino de ciências, o desenvolvimento de atividades para explorar o comportamento desses sistemas, tende, provavelmente, a ajudar na compreensão dos mesmos. O entendimento de como um fenômeno complexo emerge de simples interações e como padrões surgem de eventos aleatórios, remete ao reconhecimento de que a existência de uma causa central é desnecessária, à distinção entre o nível micro e macro e à compreensão de que pequenas mudanças nas interações das partes podem trazer significativas mudanças no comportamento global do sistema.

Apesar da diversidade, os sistemas complexos têm muitas características estruturais e funcionais em comum que podem ser efetivamente simuladas usando ambientes computacionais, propiciando um rico engajamento com esses sistemas descentralizados. Como resultado, qualquer um pode explorar, virtualmente, a natureza dos sistemas complexos e seu comportamento dinâmico sob uma gama de suposições e condições. O desenvolvimento da habilidade de modelar sistemas dinâmicos tem poderosa influência sobre o ensino e o estudo da complexidade (Jacobson, 2000).

Neste artigo, que expõe parte de um trabalho mais amplo (Xavier, 2003), utilizamos uma ferramenta baseada na teoria dos autômatos celulares - o Jogo da Vida - para abordar sistemas complexos com um grupo de estudantes do ensino fundamental (8^a. série) e, assim, mostrar as potencialidades dessa ferramenta na abordagem desses sistemas.

Os aspectos a serem ressaltados consistirão na análise do processo de entendimento dos estudantes da utilização do Jogo da Vida e como esses estudantes entenderam a influência das condições iniciais no desenvolvimento dos padrões globais que aparecem no autômato ao longo do tempo.

O ensino dos sistemas complexos evidencia-se, não só como um tópico no programa escolar, mas como um importante tema que manifesta uma nova forma de se discutir causalidade, relações macro-micro e previsibilidade, constituindo momentos relevantes para a construção de uma visão diferente da natureza da ciência e, mais adiante, do próprio mundo.

Os Autômatos Celulares constituem uma classe de ferramentas gerais e simples para a simulação de fenômenos em diversas áreas do conhecimento. Um dos mais conhecidos modelos de AC é o “Jogo da Vida” inventado pelo matemático John H. Conway da Universidade de Princeton na década de 60. Aparentemente motivado por questões de lógica matemática, e em parte pelo trabalho em simulações realizado por Ulam e outros, Conway iniciou, em 1968, fazendo experimentos com uma variedade de diferentes regras para autômatos celulares bidimensionais que culminou na obtenção de um conjunto de regras simples que ele chamou “Jogo da Vida” e que exibiu uma série de comportamentos complexos.

O jogo acontece sobre uma grade infinita de células. Cada célula é inicialmente marcada como ocupada ou vazia (viva ou morta), criando algum tipo de configuração inicial arbitrária. A grade pode ter apenas uma dimensão sendo exibida como um arranjo retilíneo de células, ou duas ou três dimensões. O AC exibido na figura 1 é uma grade bidimensional onde cada célula pode ter dois estados, vivo/morto.

A não ser pelo estado vivo/morto (ligado/desligado), todas as células são idênticas e submetidas ao mesmo conjunto de regras que determinam sua evolução temporal, e de seus vizinhos, nas próximas gerações.. Embora vários tipos de regras sejam possíveis, aquelas definidas por Conway são:

Uma célula viva com um ou nenhum vizinho vivo, morre na próxima geração.

Uma célula viva com 4 ou mais vizinhos vivos, morre devido à superpopulação

Uma célula morta com exatamente 3 vizinhos vivos torna-se viva, na geração seguinte.

Todas as outras células permanecem inalteradas, na próxima geração.

Essas regras são aplicadas para todas as células simultaneamente e cada vez que toda a matriz é recalculada, obtém-se uma nova geração. Cada geração é assim o padrão de todo o conjunto, como se fossem instantâneos congelados de todo o sistema, em sucessivos momentos de sua evolução. Como o programa roda através de múltiplas gerações, a matriz pode parecer se modificar apresentando as mais diversas configurações. Na verdade, essas regras simples engendram um mundo complexo surpreendente que mostra uma ampla gama de interessantes eventos e padrões.

A configuração exibida pela próxima geração depende da configuração da geração atual e das regras que determinam o estado futuro de cada célula. Dada uma certa configuração inicial e o conjunto de regras, qualquer pessoa pode determinar a configuração da geração seguinte e das outras futuras gerações, de modo simples. Basta dispor de um retículo vazio, e ir aplicando as regras a cada célula da geração atual, determinando se aquela célula estará viva ou morta na próxima geração. O resultado é representado no retículo. Isso pode ser feito sucessivamente, sobre cada geração para determinar a próxima.

A princípio, pode parecer que um esquema simples de causalidade se aplica ao jogo, determinando a evolução das sucessivas configurações, que pode ser tomado como sua evolução temporal. No entanto, o conjunto de regras constrange esta evolução. Se trabalharmos num espaço com um número grande de células, a previsão do comportamento do sistema se torna muito difícil.

Assim, um AC é um modelo que pode ser usado para mostrar como os elementos de um sistema interagem. É na verdade, um universo virtual em que as mudanças de estado são realizadas de acordo com um pequeno conjunto de regras. Ao final da década de 60 iniciaram-se

tentativas de relacionar os autômatos celulares às discussões matemáticas sobre sistemas dinâmicos e aos fractais. Tipos específicos de AC surgiram, normalmente sob diferentes nomenclaturas (espaços celulares, autômato iterativo, estruturas homogêneas e espaços universais), associados a um vasto conjunto de situações. Através de suas características e dos diversos trabalhos realizados a partir da década de 80, principalmente aqueles realizados por Stephen Wolfram, o autômato celular tem provado ser uma estrutura extraordinariamente rica para a exploração de fenômenos de auto-organização e caoticidade. (Wolfram, 1986; Wolfram, 2002, Green, 1990; Green, 1993; Green, 1994).

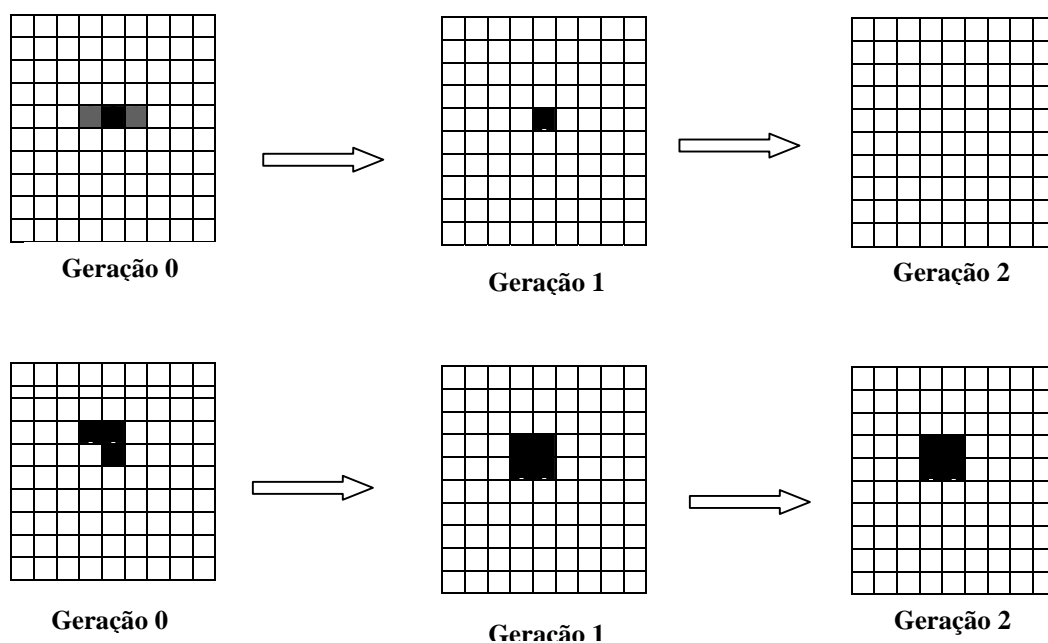


Figura 1 - As gerações e as configurações

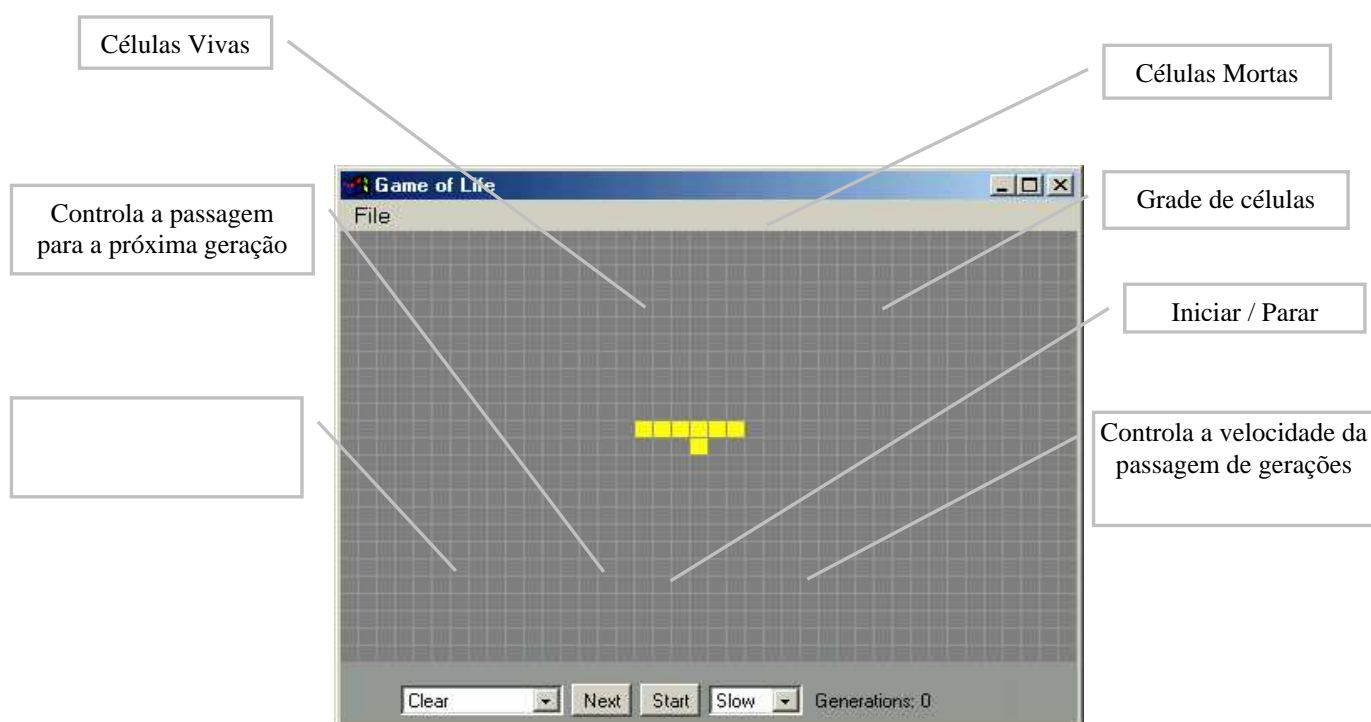
No trabalho realizado (Xavier, 2003) optamos por implementar um híbrido dessas estratégias e, assim, tanto trabalhar com um ambiente de simulação de sistemas complexos em computador, quanto com atividades de lápis e papel. Escolhemos como ferramenta de simulação o “Jogo da Vida”, o AC bidimensional já descrito, que por sua simplicidade pode ser implementado com lápis e papel quadriculado, além de poder ser utilizado em computadores, principalmente, quando se deseja padrões mais complexos (figura 3).

Deste trabalho participaram 6 estudantes (14-15 anos) que cursavam a 8ª. série do ensino fundamental. Estamos interessados em analisar o pensamento que os participantes expressavam sobre o comportamento dos padrões que apareciam no AC e a avaliação as potencialidades do Jogo da Vida como ferramenta pedagógica para a discussão de comportamentos complexos.

O trabalho com os estudantes se dividiu, basicamente, em duas etapas: a etapa exploratória e a etapa expressiva. Na etapa exploratória, os estudantes entraram em contato com as noções básicas sobre os autômatos celulares através de um conjunto de atividades realizadas com lápis e papel. Essa etapa tinha por objetivo permitir a familiarização dos participantes com a dinâmica do jogo, como as sucessivas gerações são produzidas a partir da aplicação do conjunto de regras, suas regras e aplicação, reconhecimento de alguns padrões

típicos que surgem no curso de sua evolução e os efeitos da configuração inicial sobre o estado final do sistema.

Essa etapa, propiciou também oportunidades para a observação do engajamento dos participantes na atividade e a sua relação com o AC, através de suas reações de curiosidade ou de enfado, as dúvidas mais frequentes e os erros mais comuns. Na etapa expressiva foram realizadas atividades onde aconteciam discussões em grupo sobre a evolução de configurações implementadas, utilizando-se do computador. Essas discussões contemplavam a influência das condições iniciais na evolução das gerações, a previsibilidade do comportamento e a possibilidade de relacionar os autômatos celulares com alguns fenômenos reais conhecidos, isto é, sobre a possibilidade de usá-los como modelos de algum aspecto da realidade.



Ainda nessa segunda etapa foram realizadas entrevistas como uma das estratégias para a explicitação do entendimento dos estudantes acerca do sistema. Os estudantes eram solicitados a prever, observar e explicar eventos e/ou situações relacionadas ao tema proposto, com o propósito de desencadear suas explicações sobre o comportamento e a causalidade dos sistemas complexos.

Neste artigo, os aspectos da pesquisa a serem ressaltados consistirão na análise do processo de reconhecimento pelos estudantes, da causa dos padrões emergentes de células no AC. O que o trabalho pretende á analisar como os estudantes relacionam os padrões emergentes em larga escala, que depende basicamente das dimensões escolhidas para a grade, com as interações de curto alcance que governam a evolução temporal dos padrões produzidos pelo AC. Enquanto as dimensões do espaço virtual em que o sistema evolui é de livre escolha do implementador, respeitados alguns cuidados, o alcance das interações que governam o estado futuro de cada célula é limitado às células imediatamente vizinhas.

A CAUSA DOS PADRÕES EMERGENTES

Uma característica muito importante no comportamento dos padrões que surgem ao se implementar qualquer forma no Jogo da Vida é a emergência. Os padrões de comportamento que aparecem na forma de diferentes desenhos são resultados de uma história de interações locais entre as células. Essas interações locais que seguem um conjunto de regras fazem emergir um padrão global de comportamento para o conjunto de gerações.

Nas diversas atividades desenvolvidas, foram especificados momentos em que procurei incentivar os estudantes a explicitarem como eles achavam que os padrões surgiam na matriz. Após trabalharem com um certo número de formas no computador foi solicitado a eles que identificassem o que ocasionava a mudança nas gerações.

- 1 Ian: *Por causa da reprodução e da morte*
 2 Luiz: *É tudo programado! (levanta a mão)*
 3 Ian: *Não é programado não! Vai acontecendo. Depende das regras!*
 4 Joara: *Eu acho que é o número de células que determina o final .*
 5 Ian: *Não! Acho que é...*
 6 Joara: *A forma! A forma, também, determina o final !*
 7 Ian: *Se mudar uma, pode mudar tudo!*

O estudante Ian atribui, primeiramente, à morte e reprodução das células (1) a causa da modificação nos padrões observados. O estudante Luiz aponta para uma programação de padrões (2), mas Ian contra-argumenta negando a idéia de programação (3) e afirmando as regras como causadoras. A estudante Joara afirma que é o número de células e a forma da geração (4,6) que causam as mudanças e Ian ratifica o papel da configuração inicial dos estados das células do autômato ao argumentar sobre a sensibilidade às condições iniciais (7).

Esse trecho indica um certo grau de confusão entre os estudantes ao tentarem entrar em acordo sobre o que causa as alterações nos padrões observados no computador. Nascimento e morte, as regras, forma inicial, número de células e programação, todos esses fatores foram levantados pelos estudantes nesse episódio.

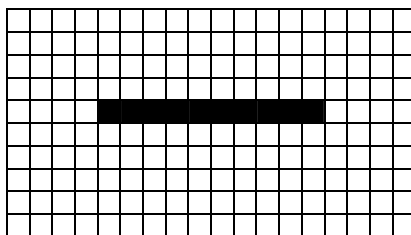
A estudante Joara aponta para um fator que é a dependência do aspecto das gerações futuras em relação às condições iniciais com o que ocasiona o surgimento dos padrões e parece, também, ter influenciado o pensamento de Ian. Este demonstrou uma tentativa maior de elaboração, quando em sua fala aparece “vai acontecendo”.

Essa frase transparece que não há uma programação prévia, mas que os padrões vão se alterando para a aplicação das regras em cada instante. A fala de Ian parece explicitar seu entendimento, ainda incipiente de que não há um direcionamento rígido do futuro das gerações. A questão voltou a ser discutida quando foi implementada uma forma que resultava num movimento semelhante ao de uma minhoca.

- 8 Luiz: *Esse movimento é programado!*
 9 Joara: *O movimento não é programado. Aparece das regras.*
 10 Marcus: *Eu acho que não está programado. Eu acho que o computador só aplica as regras, como a gente faz!*

O estudante Luiz afirma novamente sua idéia da programação das gerações (2,8) nesse outro momento. No entanto, Joara e Marcus (9,10) retornam com a idéia inicialmente exposta por Ian (3) de que as gerações se alteram devido às regras que são aplicadas sobre as formas e ainda, como Marcus ressaltou, compara a atuação do computador com o processo que eles mesmos fizeram utilizando lápis e papel. Nesse segundo episódio os estudantes parecem relacionar mais as mudanças às regras do que a outros fatores.

Nas entrevistas o assunto voltou a ser abordado num momento onde foi implementada uma forma com 10 células vivas em linha.



Essa forma inicial se modifica com o passar das gerações apresentando um comportamento oscilatório, repetindo constantemente uma seqüência de padrões. Questionei-os sobre como o surgimento dos padrões poderia ser explicado:

- 11 Luiz: *(Demora a responder) Surge das regrinhas que são colocadas no jogo. De certa forma são programados. As regras são programadas!*
- 12 Bruno: *É programado pelas regras. O jogo tem um conjunto de regras que com o passar do tempo vai desenvolvendo. O computador é mais rápido, então ele consegue resolver numa fração de segundo o que vai acontecer na próxima geração.*
- 13 Marcus: *As regras é que controlam. Existem as regras que controlam o desenho. Acho que sem as regras não tinham o desenho. Por exemplo, tem que ter uma ordem. Essa ordem seria as regras.*
- 14 Joara: *É a regra! O computador vai aplicando a regra e vai surgindo. Nada é programado. Ele não sabe o que vai dar!*

O estudante Luiz afirma que os padrões surgem das regras que são programados (11) e Bruno propõe que os comportamentos são programados através das regras (12). Ambos estão certos ao afirmar que o comportamento surge das regras e que estas estão programadas no computador. Marcus e Joara, por outro lado, parecem entender que a programação das regras no computador é um detalhe. Que qualquer um deles aplicando as réguas produziriam o conjunto de padrões.

Para eles, portanto, as regras é que são determinantes. Marcus não usa a palavra "programado", mas afirma que os desenhos (padrões) são controlados pelas regras (13). Joara afirma que não há programação e que a regra é aplicada fazendo surgir padrões diferentes (14). Nos dois trechos, Marcus e Joara parecem mais próximos de um entendimento adequado de que

os padrões emergem como resultado das configurações anteriores e das interações locais, do que seus colegas.

Esses trechos que foram extraídos das entrevistas individualizadas com os estudantes e representam os caminhos que conseguiram elaborar para tentar explicar o surgimento dos padrões.

Vale ressaltar que os estudantes demoravam muito para verbalizar mesmo que indiretamente uma indicação dos mecanismos que explicassem a emergência dos padrões que observaram. E normalmente, como pode ser visto, elaboravam respostas que tinham como elemento principal o conjunto de regras.

As regras para os estudantes, mesmo para aqueles que não tiveram aqui suas falas explicitadas, foram o cerne das explicações fornecidas, no entanto, a essas regras foram atribuídos papéis diferentes nessas explicações:

- As regras podem fazer parte de uma programação para o surgimento dos padrões visuais e de comportamento das gerações (11) e são as ordenadoras das modificações, elas controlam todos os padrões no jogo (13).
- As regras podem ser aplicadas sobre uma geração, mas ainda ter um caráter de determinante dos padrões (12).
- As regras podem ser aplicadas, mas não serem consideradas como algo que programa os padrões (14).

Apesar do último trecho (14) parecer sinalizar para uma perspectiva onde as regras são as mesmas para qualquer forma de geração e que os padrões vão surgindo sem uma programação prévia, a maioria das respostas aponta para um causador, o conjunto de regras, que seria o responsável pela modificação nas gerações. Esse tipo de resposta não explica, na sua totalidade, o surgimento dos novos padrões e comportamentos. Apesar de eles demonstrarem um bom entendimento da sensibilidade às condições iniciais, ou seja, da dependência da disposição e número das células vivas no autômato, esses fatores não foram acrescentados ou abordados na resposta.

Esses fatores últimos apontam para a importância das relações locais, ou microcosmo do jogo, para a emergência dos comportamentos e padrões visuais. Esses aspectos, na reflexão sobre a dinâmica do jogo, ao longo das entrevistas, não foram abordados e a ausência aponta para uma dificuldade que os estudantes apresentaram para ampliarem o repertório de formas de causalidade que pudessem ser aplicadas para explicar os comportamentos visualizados.

Todos os estudantes foram incapazes de dizer mais sobre as suas explicações sobre o surgimento dos padrões. Normalmente, a resposta era “está programado!” ou “as regras é que fazem isso”, mostrando até mesmo sinais de irritação quando eu insisti na reflexão sobre as causas. O que me transpareceu foi uma certa convicção quanto ao papel programador das regras que para essa tarefa as respostas foram pouco diferenciadas do que já foi exposto.

A importância de se ampliar o leque de causalidade dos estudantes, constitui um elemento fundamental para o entendimento dos sistemas complexos. A vivência e a exploração do Jogo da Vida constituiu um recurso para que tal objetivo fosse atingido, mas que, através das respostas, fica explícita, a idéia de causalidade simples que direciona as linhas de pensamento

dos estudantes. Em outros momentos da entrevista os estudantes foram novamente abordados sobre o assunto, no entanto, em contextos diferentes do contexto do jogo, na tentativa de relacionar aspectos de fenômenos estudados nas ciências das escolas com os comportamentos observados no Jogo da Vida, com resultados satisfatórios. Mas não podemos generalizar, face ao número limitado de estudantes envolvidos e à natureza exploratória do estudo.

CONCLUSÃO

No que concerne à causalidade, a discussão não conseguiu se desprender da concepção de causalidade que os estudantes já possuíam. Os estudantes interpretaram o surgimento dos padrões no autômato partindo da existência de uma causa central para o fenômeno. Este tipo de causalidade simples é recorrente no dia-a-dia, e era o comportamento que esperávamos que os estudantes utilizassem nos seus primeiros contatos com fenômenos emergentes, como na atividade.

Para todos os estudantes, contemplando algumas diferenças, as regras desempenham o papel central para a causa do aparecimento dos padrões no autômato. Foi possível perceber a dificuldade que os estudantes apresentaram na ampliação do pensamento sobre o tipo de causalidade necessária para a explicação dos padrões observados.

Ao final da fase expressiva, constata-se um início de movimento realizado pelos estudantes no sentido de produzir explicações mais ricas e interessantes sobre os padrões emergentes que se apresentavam no autômato. Nossos resultados dão suporte à idéia de que é de fundamental importância promover a ampliação dos modos de compreender e explicar fenômenos se pretendemos que os estudantes aprendam sobre sistemas e fenômenos complexos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHI, M. T. H., SLOTTA, J. D., de LEEUW, N.. From things to processes: a theory of conceptual change for learning science concepts. **Learning and Instruction**, vol. 4, pág. 27-43, Elsevier Science Ltd, 1994.

_____. Creativity: Shifting Across Ontological Categories Flexibly. In: WARD, T. B., SMITH, S. M., VAID, J. (ed). **Creative Thought: An investigation of conceptual structures and processes**. Pág. 209-234, Washington, DC: American Psychological Association. 1997.

DRIVER, R., GUESNE, E. & TIBERGHIE, A. (Eds.); **Children's Ideas in Science**. Milton Keynes: UK, Open University Press. 1985.

DRIVER, R., SQUIRES, A, RUSHWORTH, P. WOOD-ROBINSON, V.; **Making sense of Secondary Science: Research into Children's Ideas**. London: Routledge. 1994.

GLEICK, J. **Caos : a criação de uma nova ciência** . Rio de Janeiro: Campus, 1990.

GREEN, D. G. Emergent Behavior in Biological Systems. In Green, D. G.; Bossomaier, T. J. (eds.). **Complex Systems – From Biology to Computation**. Amsterdam: IOS Press, 1993.

GREEN, D. G. Landscapes, cataclysm and Population Explosions. **Mathematical and Computer Modelling**, v.13, n.6, p.75-82, 1990.

- HODSON, D.; Towards a philosophically more valid science curriculum. *Science Education*, 72 (1), 1988.
- JACOBSON, M.J Problem Solving About Complex Systems: Differences Between Experts and Novices. In B. Fishman & S. O'Connor-Divelbiss (Eds.), **Fourth International Conference of the Learning Sciences**. Mahwah, NJ: Erlbaum, p. 14-21, 2000.
- JOHNSON, S. **Emergência: a vida integrada de formigas, cérebros, cidades e softwares**. Rio de Janeiro: Ed. Jorge Zahar, 2003.
- PERKINS, D.N., GROTZER, T.A. Models and moves: Focusing on dimensions of causal complexity to achieve deeper scientific understanding. Trabalho apresentado no Encontro Anual da AERA. New Orleans: LA. 2000.
- PRIGOGINE, I. **A Nova Aliança: A Metamorfose da Ciência**. Brasília: EdUnB, 1984.
- PRIGOGINE, I. **O fim das certezas: tempo, caos e as leis da natureza**. São Paulo: UNESP, 1996.
- REINER, M., SLOTTA, J. D., CHI, M. T. H.; RESNICK, L. B. Naive physics reasoning: a commitment to substance-based conceptions. In: **Cognition and Instruction**, Lawrence Erlbaum: Hillsdale, vol. 18, no. 1, pág. 1-34, 2000.
- WOLFRAM, S. **Theory and Applications of Cellular Automata**. Singapura: World Scientific, 1986.
- WOLFRAM, S. **New Kind of Science**. Wolfram Media Inc, 2002.
- WILENSKY, U. & RESNICK, M. Thinking in Levels: A Dynamic Systems Perspective to Making Sense of the World. **Journal of Science Education and Technology**. Vol. 8, pp 3-19. 1999.
- XAVIER, A. Explorando Sistemas Complexos no Ensino Fundamental. 2003. 162f.Dissertação (Mestrado em Educação) – Faculdade de Educação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.