

Em 1941, sozinho em seu apartamento em Buenos Aires, o grande contista argentino Jorge Luís Borges escreveu “*La Biblioteca de Babel*”, uma delirante metáfora sobre a forma pela qual o Universo seria organizado. O Universo seria uma biblioteca infinita, com salas hexagonais, escadarias, corredores e estantes cheias de livros que pareciam nunca se repetir, até a eternidade. Nesta imensidão, Borges entreviu uma ordem sutil e inesperada:

“Acabo de escribir [que la biblioteca es] infinita (...) Digo que no es ilógico pensar que el mundo es infinito. Quienes lo juzgam limitado, postulam que en lugares remotos los corredores y escaleras y hexágonos pueden inconcebiblemente cesar – lo cual es absurdo. Quienes lo imaginan sin límites, olvidan que los tiene el número posible de libros. Yo me atrevo a insinuar esta solución del [deste] antiguo problema: La Biblioteca es ilimitada y periódica. Si un eterno viajero la atraviesa en cualquier dirección, comprobaría al cabo de los siglos que los mismos volúmenes se repiten en el mismo desorden (que, repetido, sería un orden: el Orden). Mi soledad se alegra con esa elegante esperanza.”

Borges certamente mal desconfiava disso, mas usando apenas sua imaginação pressentira, sem estudos científicos ou modelos matemáticos, uma das idéias mais profundamente revolucionárias da ciência no século XX: o caos determinístico. Como em tantos outros campos do conhecimento, esta idéia explodiu como uma verdadeira bomba na ecologia de populações. De uma só vez, mostrou que a própria questão que deu origem à disciplina não poderia ser respondida dentro da visão de mundo tradicional, mas que a resposta podia ser encontrada numa nova perspectiva, baseada em uma ordem antes

insuspeitada no Universo, uma ordem desconcertante e de assombrosa beleza.

Para muitos, ou pelo menos para os ingleses, o pai da ecologia acadêmica foi Charles Elton (os americanos preferem atribuir tão honrosa paternidade a George Evelyn Hutchinson; ver capítulo 2). Patriotismos à parte, a maioria dos historiadores concorda que pelo menos o ramo que conhecemos hoje como ecologia de populações nasceu com Elton. E isso aconteceu de forma surpreendente, por volta de 1920, quando o jovem Elton, iniciando carreira em Oxford, pôs os olhos nos registros de comércio de peles pela distante Hudson Bay Company, do Canadá. Os registros davam conta dos números de peles de lebres e de seus predadores, os linceas, que haviam dado entrada nos entrepostos da companhia, ano por ano, desde meados do século XIX. Elton logo observou um fato curioso: havia um padrão na variação do número de peles de lebre de ano para ano, de forma tal que os números pareciam oscilar de forma cíclica, atingindo picos muito altos aproximadamente a cada dez anos, depois caindo vertiginosamente a números muito menores (o chamado “*crash*” populacional) e então se recuperando gradualmente até o pico seguinte.

Elton imediatamente percebeu que esse era um padrão estranho. A maioria das espécies animais, seja de mamíferos, de aves ou de insetos, mostram variações sazonais de suas populações, dentro de um mesmo ano. Por exemplo, a maioria dos roedores silvestres na Europa começam a se reproduzir na primavera, depois de passados os rigores do inverno. Com o início da reprodução, a população começa a aumentar, e continua aumentando durante os meses favoráveis do verão e início do outono, quando muitos frutos e insetos são disponíveis e o clima

esmagadora abalou de vez a credibilidade da hipótese das oscilações acopladas: a constatação de que em várias ilhas no Canadá, onde não haviam lince, as populações de lebres flutuavam com uma periodicidade de cerca de dez anos, assim como no continente. Talvez de alguma forma os lince dependessem das lebres, mas claramente o fato de as populações das lebres serem cíclicas não dependia dos lince como Elton havia sugerido.

Durante as décadas seguintes, muitas hipóteses foram sendo apresentadas para responder à questão de Elton: o que faz uma população ser cíclica? No entanto, várias hipóteses foram descartadas e as restantes, se não descartadas, não puderam ser comprovadas.

A idéia intuitiva de que a disponibilidade de alimentos dirigisse os ciclos foi logo abandonada como explicação, pois no caso dos voles, que são comedores de gramíneas, havia ampla evidência que as populações entravam em declínio mesmo em épocas em que havia grande fartura de alimento nos locais onde eles viviam.

Foi proposto que as flutuações cíclicas seriam causadas por epidemias, mas era difícil explicar pelas epidemias uma periodicidade tão regular como a dos ciclos, e nem era claro se as epidemias que chegavam a acontecer eram um mero efeito de populações altas demais, ao invés de causa das flutuações.

Propôs-se então que o “*crash*” seria causado por estresse excessivo dos animais em números muito altos, mas novamente não foi possível mostrar que o estresse não era um mero efeito colateral do pico populacional, ao invés de ser a causa por trás dos ciclos. O inglês Dennis Chitty aperfeiçoou então a hipótese, propondo no final da década de cinquenta que

havia uma base genética para o estresse e que a composição genética das populações mudaria durante os ciclos: quando o número de animais era pequeno, predominariam genótipos de animais pouco competitivos (daí pouco estressados) mas bons reprodutores, enquanto em altas densidades populacionais seriam selecionados animais que competissem melhor com os outros, e portanto mais estressados e que em função disso deixariam a reprodução de lado. Embora engenhosa, a hipótese de Chitty nunca pode ser comprovada.

Charles Krebs, por sua vez, estudou na América do Norte o papel que a dispersão de indivíduos teria para gerar os ciclos. A idéia básica era que quando os números estivessem subindo demais os animais tenderiam a se mover para áreas adjacentes, levando então os números a se estabilizarem e caírem. Esse mecanismo podia ser acoplado ao de Chitty, admitindo-se que os indivíduos com genótipos para serem menos competitivos seriam os primeiros a migrar, gerando então o tipo de alternância de composição genética que o pesquisador britânico postulava. Durante décadas Krebs trabalhou diligentemente para testar tais idéias, inclusive fazendo interessantes experimentos de campo com cercas, que impediam movimentos de voles, e observando os efeitos disso sobre a dinâmica das populações desses animais. No entanto, ele nunca logrou mostrar convincentemente que a dispersão podia explicar os ciclos.

Os anos se passavam e hipótese após hipótese era apresentada sem que houvesse nenhum consenso entre os ecólogos sobre a causa dos misteriosos ciclos. Explicações cada vez mais bizarras apareciam. Num artigo de título provocativo ("Será que as lebres comem lince?"), o americano Michael Gilpin chamou a atenção em 1973 para o fato de que em vários casos

isso, um dos artigos científicos mais importantes do século XX. Seu autor, Robert May, viria a ser considerado uma das mil personalidades mais importantes do século pelo jornal britânico *The Times*, sendo o único ecólogo – e um dos poucos cientistas de qualquer área – a ser incluído nessa prestigiosa lista.

O que havia no famoso artigo? Anos mais tarde, depois de ter descoberto o caos determinístico por outras fontes e de ver muitas citações do “Simple mathematical models...”, voltei a ele com outros olhos.

O que May fez foi estudar o comportamento de um modelo matemático muito simples, que os ecólogos conheciam havia décadas, e que era usado para descrever o crescimento de uma população de organismos por uma equação de diferença. O modelo utilizado foi o seguinte:

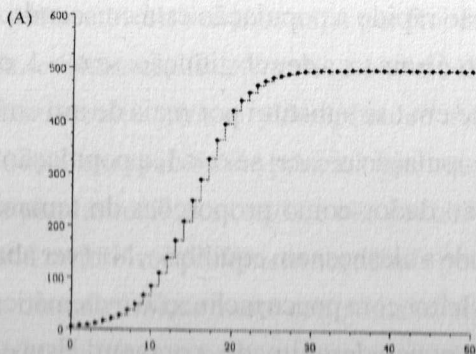
$$N_{t+1} = \alpha \cdot N_t \cdot (1 - N_t)$$

Onde N_{t+1} é o tamanho da população no momento $t + 1$, N_t é o tamanho da população no momento anterior, t , e α é a taxa de crescimento populacional, ou seja, um parâmetro que indica quão rápido a população está crescendo. Para ser mais preciso, α é uma taxa de substituição: se $\alpha > 1$, cada indivíduo presente em t se substitui por mais de um em $t + 1$, de forma que a população cresce; se $\alpha < 1$, a população diminui. Já N_{t+1} e N_t são dados como proporções do tamanho que a população tende a alcançar em equilíbrio, N^* (ver abaixo).

Se o leitor com pouca inclinação matemática começa a se sentir um pouco desanimado, coragem! Esta equação é simples, seu comportamento é inteligível e as recompensas por entendê-lo são enormes, eu garanto. Alternativamente, se o lei-

tor preferir, pode também simplesmente acreditar que todos os gráficos da figura 1 e uma imensa variedade de outros padrões são gerados por esta mesma equação, alterando-se apenas o valor da taxa de crescimento populacional; e então pular as próximas cinco ou seis páginas e ir direto para as conseqüências filosóficas desse fato.

Voltando à equação. Mencionei que se trata de uma equação de diferença, e não de uma equação diferencial. Esta toda a diferença do mundo, como veremos.



plo o primeiro gráfico (Figura 1a), pode-se notar que em momentos diferentes do crescimento populacional uma dada variação de tempo vai corresponder a acréscimos diferentes em N_{t+1} .

Os ecólogos antes de May sabiam bem o que acontecia neste modelo. Como o termo $(1 - N_t)$ multiplica o crescimento populacional (dado por $\alpha \cdot N_t$ na equação), a população cresceria rápido no início (pois com N_t tendendo a zero, $1 - N_t$ tenderia a 1, e portanto o crescimento populacional não seria diminuído). No entanto, à medida que a população presente aumentasse, o termo $(1 - N_t)$ tenderia a valores cada vez menores, que multiplicariam o termo $\alpha \cdot N_t$. Deste modo, o crescimento iria se desacelerando aos poucos à medida que N_t fosse aumentando, até se estabilizar suavemente em um número de equilíbrio (N^*) que corresponderia ao tamanho populacional que o ambiente poderia sustentar. No gráfico, o crescimento populacional seria bem descrito por uma curva em forma de S (Figura 1a). Ou seja, a variação do crescimento populacional é dita dependente de densidade: a própria densidade populacional regularia o crescimento da população, até que ela se estabilizaria.

May começou a estudar o comportamento dinâmico do modelo, ou seja, como se alteravam os valores da variável explicada pelo modelo (no caso N_{t+1}) à medida que se variavam os valores dos parâmetros. O que ele fez foi alterar gradativamente o grau de não-linearidade, aumentando a taxa de crescimento populacional, α . Para seu espanto, ele observou que todo o comportamento do modelo mudava dramaticamente. Aumentando o grau de não-linearidade, o resultado era diferente não só quantitativamente, mas também qualitativamente. Essa simples manipulação afetava não só o tamanho populacional de equilíbrio, mas a própria possibilidade

de alcançar qualquer equilíbrio. Vejamos como foi alcançada esta surpreendente conclusão.

Com valores baixos de α (pouco acima de 1), a população cresce rápido no início, e depois gradativamente cada vez mais devagar, até se estabilizar suavemente em um tamanho populacional de equilíbrio (o já mencionado N^*). Se aumentamos a um pouco mais, o tamanho populacional cresce até na verdade ultrapassar N^* , depois desce até um pouco abaixo do valor de equilíbrio, sobe de novo até um pouquinho acima dele e assim vai, em oscilações progressivamente menores à volta de N^* , até finalmente se estabilizar neste valor (Figura 1 a).

Entender o porquê desta oscilação é simples e importante, pois na verdade é o ponto central de todo o argumento. Lembremos que no modelo a população é regulada pela sua própria densidade, de modo que quanto mais alta, menos cresce. E lembremos também que há um atraso na resposta, ou seja, o crescimento da população é determinado pelo seu tamanho *uma unidade de tempo antes*. Se não houvesse atraso na resposta, quando o tamanho da população chegasse a N^* , o “termo regulador” ($1 - N_t$) imediatamente valeria zero e o crescimento pararia. Mas com atraso na resposta, a “instrução” que o modelo dá ao tamanho da população (no caso, N_{t+1}) quando ele chega a N^* é baseada no valor de N_t , isto é, o tamanho da população uma unidade de tempo antes – quando ela ainda estava um pouco abaixo do equilíbrio. Portanto, $(1 - N_t)$ ainda é ligeiramente positivo: a “instrução” do modelo à população é “você ainda está abaixo de N^* , portanto pode crescer um pouco mais”. Assim ela faz, e portanto ultrapassa N^* . Não ultrapassa muito, pois lembre-se, uma unidade de tempo antes N_t já estava perto de N^* , portanto a “instrução” do modelo é para crescer devagar.

ando meramente ao sabor do acaso. Mas May sabia perfeitamente que não era isso. Ele não fizera nada além de alimentar o computador com valores cada vez maiores para um único parâmetro do modelo mostrado acima, e observar o comportamento da população naquelas condições. E o modelo era absolutamente determinístico: não havia nele nenhum termo que fosse dado por alguma probabilidade, nenhum componente probabilístico, portanto. May percebeu, com um choque, a inacreditável explicação correta: *a periodicidade dos ciclos tinha “explodido”, e aquilo era um ciclo de periodicidade infinita*. Diante de si ele tinha o gráfico de uma flutuação populacional com um número infinito de pontos de equilíbrio instável, que era absolutamente indistinguível de uma flutuação aleatória. E, no entanto, não havia nada de aleatório naquele padrão: ele havia sido gerado por um modelo inteiramente determinístico. Aquela flutuação selvagem, aquele gráfico caótico era apenas um padrão pseudo-aleatório, gerado por processos que nada tinham de acaso: um exemplo do que viria a ser conhecido por caos determinístico.

Os choques estavam apenas começando, e agora se sucediam com violência crescente. May foi aumentando α ainda mais, e o que via nos gráficos era cada vez mais fantástico e perturbador. Durante algum tempo continuavam aparecendo flutuações pseudo-aleatórias. De repente, como que vinda do nada, surgiu uma flutuação populacional de periodicidade três. Depois novamente o período se duplicava e iam aparecendo flutuações de periodicidade seis, 12, 24, 48.... Até que o período novamente explodia até o infinito e se chegava a uma nova faixa de valores de α para os quais as flutuações pareciam aleatórias. Aumentando α ainda mais, repentinamente surgia uma nova faixa na qual

surgiam ciclos de periodicidade sete, 14, 28, 56..., depois outra faixa de flutuações pseudoaleatórias. Perante os olhos fascinados de May, surgiam faixas sucessivas de valores de α que correspondiam a faixas de ciclos de periodicidade regular (“janelas de ordem”), alternadas com faixas de flutuações pseudo-aleatórias (“janelas caóticas”). Novas janelas de ordem apareciam, nas quais o período dos ciclos se iniciava com cada um dos números primos e era então sucessivamente duplicado até explodir rumo ao infinito. Um novo e desconcertante tipo de ordem, de maravilhosa precisão e inacreditável complexidade, aparecia no comportamento daquela equação tão simples.

Ao escrever o famoso artigo, May não sabia de dois pontos que lhe teriam feito perceber que o que tinha em mãos era ainda muito mais fantástico do que ele pensava. O primeiro ponto é que o padrão ali descrito era muito mais universal do que ele ousara imaginar. Trabalhos nos anos seguintes mostraram que uma imensa variedade de modelos, provindos da maioria dos campos da ciência (física, meteorologia, química, etc.) resultam em comportamentos dinâmicos idênticos ao descrito acima. Toda a ordem vislumbrada por May era característica da solução não apenas do modelo que ele usou, mas de toda uma imensa família de modelos, que compartilhavam apenas duas características: não-linearidade e atraso na resposta.

A segunda coisa que May ignorava é que a ordem descrita por ele era ainda muito mais incrivelmente precisa do que podia supor sua mais audaciosa imaginação. Eu mencionei acima que eram necessários aumentos cada vez menores de α para que fossem obtidas duplicações sucessivas de período. Vamos dizer que para uma população passar de um ciclo de período dois para um de período quatro seja preciso aumentar o valor de α de uma

3,000000001 (uma diferença de um bilionésimo de unidade). As variações numéricas das duas populações serão similares no início, mas depois pouco a pouco irão se tornando diferentes, e após poucas unidades de tempo os padrões serão inteiramente diferentes, sem ter absolutamente nenhuma similaridade um com o outro, e não será de modo algum possível reconhecer que os dois padrões vieram de equações similares. Este fenômeno profundamente contra-intuitivo é conhecido tecnicamente por dependência magnificada das condições iniciais, e popularmente por “efeito borboleta”. O termo “efeito borboleta” foi criado por um de seus descobridores, o meteorologista Edward Lorenz, que dizia que “uma borboleta batendo as asas sobre Pequim muda todo o clima em Nova Iorque”. Exageros à parte, o efeito borboleta é um dos aspectos mais característicos do caos determinístico, a ponto de ser chamado de “assinatura do caos” por alguns autores.

O terceiro grande impacto filosófico é dado pelas conseqüências do segundo (o efeito borboleta). Padrões gerados por um modelo caótico determinístico são previsíveis, na prática, apenas a prazo muito curto. Vamos supor que estejamos usando um modelo caótico determinístico que seja o modelo correto para descrever a variação de uma população, e os parâmetros do modelo sejam todos estimados com imensa precisão, com o erro ínfimo de um em um bilhão. Como vimos no parágrafo anterior, o comportamento da população descrito em nosso modelo e da população real serão idênticos no princípio, mas pouco a pouco começarão a diferir e logo serão completamente diferentes. Chegamos a um violento paradoxo. Os modelos caóticos são inteiramente determinísticos, e portanto teoricamente teriam absoluta capacidade de previsão. No entanto, devido ao efeito borboleta,

na prática não têm poder de previsão a não ser num prazo muito curto, uma vez que é impossível estimar os parâmetros com precisão *absoluta*. Novamente, isso é um dos aspectos mais característicos do caos, a ponto de ser utilizado para reconhecer o padrão gerado por um modelo caótico determinístico. A força do impacto desta constatação se faz evidente quando nos lembramos que em toda a história do pensamento ocidental, passando por Aristóteles, Descartes e tantos outros, sempre foram reconhecidos dois tipos de eventos: os ao acaso e os determinísticos. Nos eventos ao acaso, nenhuma previsibilidade é possível, independentemente do prazo (não importando o que achem os apostadores na roleta dos cassinos). Nos determinísticos, se é conhecido o modelo, completa previsibilidade é sempre possível, também independentemente do prazo (isto é, tanto a curto como a longo prazo). Com o caos determinístico, temos um terceiro tipo de evento no Universo. Neste novo tipo de evento, a previsibilidade, ao contrário do que acontece nos dois outros tipos, é dependente do prazo: à medida que se tenta prever mais unidades de tempo à frente, a previsibilidade vai diminuindo até se tornar nula. Uma vez que teoricamente seria possível ter completa previsibilidade num modelo caótico *se fosse possível conhecer todos os parâmetros com perfeita precisão*, pode-se dizer que o caos determinístico seja uma forma particular de determinismo (ao contrário do que sugere seu nome se usado sem o “sobrenome” “determinístico”). No entanto, como na prática isso é impossível, deve-se reconhecer que o caos é um tipo imensamente particular de determinismo, que se comporta como um terceiro tipo de evento. Tudo no Universo costumava ser ou determinado ou ao acaso. Não mais: agora pode também ser caótico.

O quarto impacto do caos não tem implicações tão

“Mas... O que você quer dizer, quarenta e dois ?”

“A resposta é quarenta e dois. Agora... qual é a pergunta ?”

Talvez seja pelo mesmo motivo que a grande questão de Elton não pôde ser respondida apesar de décadas de esforço dele e de tantos outros ecólogos igualmente brilhantes. Com sua ênfase nas diferenças qualitativas entre populações cíclicas e não-cíclicas, a pergunta não deixava margem para perceber que a diferença poderia ser apenas quantitativa. É provável que Elton e seus seguidores não tenham podido achar a resposta simplesmente porque a pergunta que tinham não estava correta. Mas agora, com o caos determinístico, um insuspeitado e maravilhoso mundo novo se abre diante da ecologia de populações.