

MODELO PRODUTIVO, AMBIENTE E ENTROPIA: COMPREENDENDO ESTA RELAÇÃO PELA ÓTICA DA FÍSICA

Autores: Bruno Rogério Ferreira de Moraes¹

Prof. Dr. Ivan Fortunato²

Prof. Dr. Vicente Pereira de Barros³

RESUMO

Diversos efeitos negativos do atual modelo de produção são visivelmente evidenciados no cotidiano, como a poluição de fontes de água e geração de lixo. Outros são inferidos, como a elevação da temperatura média global. Estes, e vários outros efeitos negativos ao ambiente, devem ser compreendidos à luz de um pensamento holístico, que busca compreender a complexidade da vida, a partir de múltiplas variáveis. Assim, por meio de uma revisão crítica de literatura, o presente artigo tem como objetivo abordar tal visão holística para o contexto ambiental a partir da segunda lei da termodinâmica, a entropia, e suas possíveis implicações negativas (ou positivas) ao ambiente.

Palavras-chave: Degradação ambiental. Termodinâmica. Entropia.

INTRODUÇÃO

Desde a fixação do homem com o desenvolvimento da agricultura e criação de animais, o ambiente já começou a ser modificado. Esse processo foi se intensificando no decorrer da história, com destaque para a Revolução Industrial iniciada no século XVIII, momento em que combustíveis fósseis começaram a ser explorados e utilizados em maior escala, aumentando a emissão de gases na atmosfera. Diversos efeitos negativos do atual modelo de produção são observados, como a associação da elevação da temperatura média global com o aumento de emissão de gases de efeito estufa, poluição de fontes de água, geração de lixo entre outros.

Em outro artigo (FORTUNATO; PENTEADO, 2013) já foi discutido o paradoxo que envolve a energia: sua geração e uso são fundamentais para as atividades civilizadas, mas, por outro lado, causam diversos impactos ambientais negativos quando usada em excesso. Nessa mesma direção, Chu e colaboradores (2010) afirmaram que o desenvolvimento econômico atual e os métodos atuais de exploração desmedida de combustíveis fósseis, gases naturais, dentre outros, não são sustentáveis porque provocam danos ambientais e sociais.

Estes, e vários outros efeitos negativos ao ambiente, devem ser compreendidos à luz de um pensamento holístico, que busca compreender a complexidade da vida, a partir de múltiplas variáveis. Assim, por meio de uma revisão crítica de literatura, o presente artigo tem como objetivo abordar essa visão holística para o contexto ambiental a partir da segunda lei da termodinâmica, a entropia, e suas possíveis implicações negativas (ou positivas) ao ambiente. Para atingir o objetivo proposto, partimos da relação entre a energia e o meio ambiente, como forma de contextualizar a necessidade de discussão sobre o conceito de entropia. Em seguida, buscamos recuperar o aspecto histórico do entendimento da segunda lei da termodinâmica – a entropia. Na terceira parte, discutimos como a entropia está relacionada ao modelo atual de sociedade. Ao final, espera-se que este trabalho venha a contribuir com a busca de novas variáveis que estão presentes no cotidiano e que, de alguma forma, interferem no meio.

Energia no contexto ambiental

Marion (2013), ao tomar por base o pensamento a respeito da complexidade e racionalidade ambiental de Leff (2009) e as ideias holísticas sobre a teia da vida de Capra (2006), reforça a ideia de que os efeitos negativos ao meio ambiente, como poluição da atmosfera e o excesso de lixo industrial, não podem ser trabalhados isoladamente, ou seja, são problemas sistêmicos, interligados e interdependentes com os aspectos culturais da economia atual. Nessa direção, torna-se pertinente olhar de perto uma das importantes variáveis dessa complexidade, que é a interação social.

A discussão sobre como modelar a dinâmica de sistemas sociais utilizando ferramentas das Ciências Exatas é um anseio que foi citado por Mario Bunge (1974) como uma proposta de descrição da sociedade, sem necessariamente ser capaz de criar uma teoria mais profunda indicando a essência dos indivíduos. Na mesma direção, o estudo de como modelar a dinâmica de populações e suas interações

¹ Graduado em Tecnologia em Agronegócio pela Fatec Itapetininga e licenciado em Física pelo IFSP Itapetininga. Contato: morais.brf14@gmail.com

² Pós-doutorado em Ciências Humanas e Sociais pela Universidade Federal do ABC. Doutor em Geografia pela UNESP, Rio Claro. Professor do Programa de Pós-Graduação em Educação da UFSCAr-Sorocaba e do Programa de Pós-Graduação em Ciências Humanas e Sociais da UFABC. Professor em regime de dedicação exclusiva do IFSP Itapetininga. Contato: ivanfrt@yahoo.com.br

³ Graduado, mestre e doutor em Física pela Universidade de São Paulo com estágio na Augsburg Universität. Professor em regime de dedicação exclusiva do IFSP Itapetininga.

com outros indivíduos já tinham sido iniciadas no final do século XIX com os trabalhos, dentre outros, de Lotka e Volterra.

Lotka⁴ (1925) publicou o livro *Elements of Physical Biology* (Elementos da Biologia Física), no qual apresentou um tratamento matemático para grandezas mensuráveis em fenômenos de dinâmica de populações (número de indivíduos, densidade populacional etc.) de maneira análoga ao que a Física trata grandezas mensuráveis, como energia livre, energia total etc.

Volterra (1926) estudou a interação entre as populações de peixes no Mar Adriático de forma matemática e conseguiu prever muitas das observações relatadas àquela época. O autor apresentava uma forma de modelagem por meio de equações diferenciais e modelos miméticos da Mecânica Clássica, o que representava um retorno ao ideal determinístico, que foi o paradigma vigente no século XVIII. Este ideal tem como objetivo mostrar, em essência, o que ocorre com indivíduos que interagem entre si.

Por causa do esforço de ambos, portanto, o modelo que descreve com maior simplicidade a dinâmica de duas populações interagentes é denominado de modelo Lotka-Volterra. Este modelo tem sido discutido em vários trabalhos, incluindo uma analogia em Física (BARROS, 2010), demonstrando seu caráter interdisciplinar, mobilizando o pensar holístico. Matematicamente, o modelo pode ser sintetizado da seguinte maneira:

$$\frac{dP(t)}{dt} = -aP + bPV$$

Nas equações, a variável $P(t)$ descreve a quantidade de predadores dos indivíduos cuja quantidade é dada pela variável $N(t)$. Na ausência de presas, a população de predadores decai a uma taxa a , e as presas crescem naturalmente a uma taxa c , sem a presença dos predadores. A interação entre predadores e presas favorece a população de predadores a uma taxa b , enquanto essa oprime a população de presas a uma taxa d . Com isso, matematicamente temos:

$$\frac{dN(t)}{dt} = cP - dPV$$

Usando um sistema de adimensionalização⁵ da população (BARROS, 2010), encontramos uma razão entre as taxas c e a , que pode ser entendida como um fator de troca energética entre as populações denominada de α (alfa).

Para exemplificar a modelagem de sistemas sociais dinâmicos, Murray (2002) apresentou e descreveu um modelo para previsões sobre divórcios. Neste modelo, uma grandeza observável (respostas em questionários de acompanhamento psicológico) é modelada dentro de uma teoria de interação entre indivíduos que possuem um parâmetro igualmente observável e quantificável (monitora-

mento por vídeo). Essa modelagem permite fazer previsões sobre a probabilidade e a quantidade de divórcios esperados em uma dada população, bem como permite formular algumas políticas sociais para recuperação de matrimônios. Isso torna possível tentar modelar interações sociais a partir de variáveis matemáticas, introduzindo-as em modelos que podem ou não mimetizar sistemas físicos. Assim, pensar em modelos que possam descrever as dinâmicas sociais e o uso dos recursos naturais é um desafio muito interessante e até mesmo útil para a atual situação ambiental no mundo.

Murray (2002) também usa um tratamento semelhante ao de sistemas dinâmicos na determinação de órbitas planetárias em mecânica clássica (cf. SYMON, 1996) para descrever a interação entre as populações, pelo modelo de Lotka-Volterra. Uma constante H é determinada para populações estacionárias do sistema predador-presa (P^s, N^s). Essa constante descreve a evolução temporal das populações, da mesma maneira que dada energia mecânica, associada a um momento angular constante, descreve a órbita planetária:

$$H = \alpha u + v - \ln(u^{\alpha}v), \text{ com } u = \frac{d}{c} P^s, v = \frac{b}{a} N^s$$

Continuando na linha de descrever fenômenos populacionais por meio de grandezas físicas temos a entropia – importante grandeza física relacionada à segunda lei da termodinâmica –, que pode ser definida como a quantidade de energia degradada num sistema (ODUM; BARRET, 2007). Ou seja, essa grandeza pode ser associada à utilização de recursos naturais por parte das populações do planeta. Podemos considerar, por exemplo, a relação que Glasby (1988) faz entre entropia, crescimento populacional e o aumento de consumo de energia, bem como o estudo de Gabor e Colombo (1976) que, ao contabilizar a geração e consumo de energia (em todas as suas formas) em função do tempo, concluíram que houve um crescimento exponencial de geração e consumo de energia no período por eles estudado. Sendo estes processos irreversíveis, a entropia também cresceu exponencialmente.

Termodinâmica e entropia: um apanhado histórico

Segundo Medina e Nisenbaun (2011), a história da termodinâmica está relacionada com o desenvolvimento das máquinas térmicas. Desde a bomba para retirar a água das minas de carvão da Inglaterra produzida por Thomas Savery, por volta do ano de 1700, ainda com partes móveis, passando para o equipamento desenvolvido por Thomas Newcomen em 1705, esta já com um pistão móvel, até a aperfeiçoada em 1763, pelo escocês James Watt, com a ajuda de Joseph Black. Esta, criada para tentar compreender as propriedades do vapor d'água, usadas para acionar moinhos, movimentar trens, teares, além, é claro, de bombear água.

4. Curiosamente, apesar de todas as suas contribuições para a área acadêmica, Lotka viveu boa parte de sua vida como estatístico, aplicando seu trabalho na Companhia Metropolitana de Seguro de Vida (VERON, 2008).

5. Adimensionalização é uma técnica de reescrever variáveis dentro de um modelo matemático que descreve um fenômeno físico sem o uso de dimensões. Esta técnica permite visualização do comportamento relevante do fenômeno.

Ainda de acordo com Medina e Nisenbaun (2011), um dos mais importantes princípios da física e da química é o da conservação da energia, pois esta estabelece uma conexão entre fenômenos aparentemente distintos. Teria sido o médico e físico alemão, Julius Robert Von Mayer, em 1842, o primeiro a propor que a energia vital era energia química, que por sua vez, era transformada em calor. Outro importante nome da história da termodinâmica foi o cervejeiro e físico inglês James Prescott Joule que, na década de 1840, por meio de seu famoso experimento do calorímetro, também encontrou o equivalente mecânico do calor. Tal equivalente é a Primeira Lei da Termodinâmica, que pode ser expressa pela equação $\Delta U = Q - W$, na qual a variação de energia interna num sistema fechado é igual à diferença do calor Q e ao trabalho W .

Segundo Passos (2003), a segunda lei da termodinâmica teve sua origem no trabalho do francês Sadi Carnot, apresentado em sua única obra, publicada em 1824, na qual descreve o funcionamento de “máquinas a fogo” (como eram chamadas na época). Carnot descobriu que estas trabalhavam devido à diferença de temperatura em diferentes partes do sistema, sendo que o trabalho ocorre quando a energia passa de um nível de concentração mais alto para um nível mais baixo. Ao estudar a obra original de Carnot, Passos (2003) pôde constatar que o francês seria um vanguardista, pois, ao escrever que eram necessários novos conhecimentos para se analisar as máquinas, cujo movimento dependia do calor, ele estava propondo meios de superar as máquinas comuns da época, em que o movimento era baseado no esforço humano ou animal, na queda d’água ou na corrente de ar.

Segundo Nussenzveig (2002), após o trabalho de Carnot, a segunda lei da termodinâmica foi formulada de maneira mais precisa por Lord Kelvin e por Clausius, no início da década de 1850. Lord Kelvin associou a termodinâmica à impossibilidade da transferência de calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente. Clausius, por sua vez, apresentou-a como a impossibilidade da realização de um processo que removia uma quantidade infinitesimal de calor (dQ) de um reservatório térmico, ao mesmo tempo em que produzia uma quantidade equivalente de trabalho. A equação a seguir apresenta essa desigualdade de Clausius, na qual C é o caminho fechado e T é a temperatura em que o ciclo opera:

$$\oint_C \frac{dQ}{T} \leq 0$$

De acordo com Halliday, Resnick e Walker (2012), outra forma de representar matematicamente a segunda lei da termodinâmica é pela desigualdade $\Delta S \geq 0$ (aplicada apenas em sistemas fechados), onde ΔS representa a variação de entropia entre um estado termodinâmico final e inicial (propriedade de estado), sendo que o sinal de igualdade se aplica a processos reversíveis, enquanto o sinal de desigualdade se aplica a processos irreversíveis. Nesse sentido, embora a entropia diminua numa parte do sistema (fechado) sempre haverá um aumento no mínimo igual em outra parte. Por isso, para esses autores, no mundo “real”, todos os processos são irreversíveis.

De acordo com Silva (1995), o conceito de entropia também está associado à desordem molecular, que foi quantitativamente demons-

trada por Ludwig Boltzmann, por volta de 1866, no estudo da teoria cinética dos gases. Para Gilbert (1982), a interpretação de Boltzmann admite que os estados de maior entropia são os mais prováveis de ocorrerem em um sistema termodinâmico, além destes também serem os de maior desordem, o que implica afirmar que os sistemas evoluem no sentido de uma maior desordem quando a sua entropia aumenta.

De acordo com Press (2006), quando analisada pela ótica dos estudos sobre energia, a Terra é um sistema alimentado por dois mecanismos: o interno, que controla os movimentos no manto e no núcleo, suprimindo energia para fundir rochas, mover continentes e erguer montanhas; e o externo, sendo controlado pela energia solar, que energiza a atmosfera e os oceanos, tornando-se responsável pelo nosso clima e tempo. Para Odum e Barret (2007), as leis da termodinâmica se aplicam a todos os sistemas biológicos e ecológicos, portanto, os autores entendem que qualquer sistema dinâmico, seja este cultural ou natural, está em conformidade com essas leis. Isso implica afirmar que os ecossistemas e organismos são sistemas termodinâmicos abertos não equilibrados, ou seja, trocam energia e matéria com o ambiente externo para reduzir a entropia interna, ao mesmo tempo em que aumentam a entropia externa.

Entropia e os sistemas produtivos

Cechin (2008), ao fazer um apanhado das diversas contribuições para a teoria econômica desde Adam Smith no século XVIII até os neoclássicos do século passado, constatou que tal teoria foi baseada na Mecânica (área da Física que estuda o movimento) e no princípio de conservação de energia. Esta visão considera a Economia como um sistema isolado, desprezando o fluxo de materiais e energia que entram e saem do processo produtivo. Um exemplo disso é o clássico Fluxo Circular da Renda, que representa apenas a circulação do dinheiro na Economia.

Mueller (2005) complementa indicando que é como se a economia operasse sem importação de matéria e energia do ambiente externo, ou como se o ambiente fosse uma fonte ilimitada de recursos e um depósito ilimitado de rejeitos. Mas a economia não pode ser considerada como um sistema fechado, absoluto, que opera fora de uma complexidade cultural e ambiental muito maior.

“O pioneiro a considerar a economia como subsistema do ecossistema global finito, dependendo dele tanto para extrair baixa entropia como para, ao usá-la, despejá-la na forma de alta entropia, foi Nicholas Georgescu-Roegen (1906-1994). A contribuição de Roegen na função de produção foi a inserção do fator tempo. Para Cechin e Veiga (2010): ‘Não era mais possível que as representações continuassem a ignorar os diferentes intervalos de tempo nos quais participam os fatores de produção. A função de produção convencional que relaciona quantidades de fatores $[P = f(K; H; L)]$ seria substituída por uma funcional $[P(t) = f\{R(t), I(t), M(t), W(t), K(t), H(t), L(t)\}]$, analiticamente muito mais rigorosa. Para Georgescu-Roegen, o produto é uma função de uma série de outras funções relacionadas ao intervalo de tempo nos quais participam os fatores de produção’.” (CECHIN; VEIGA, 2010, p. 443)

De acordo com Mueller (2005) além dos fatores clássicos como capital, força de trabalho e terra (K, H e L, respectivamente), que Georgescu-Roegen nomeia como categoria de fundo (agentes do processo, prestam serviços na transformação de insumos em produtos), há também a categoria de fluxo, que são insumos fornecidos pela natureza, insumos correntes (insumos materiais transformados pelo processo produtivo, que se originam de outros processos de produção) e manutenção (R, I e M, respectivamente), além do produto final e os rejeitos/ resíduos (W) que deixam a fronteira do processo.

Odum e Barret (2007) lançam o olhar para a economia industrial e a urbanização, anotando suas interferências na dinâmica da Terra enquanto sistema dinâmico, ao qual, portanto, se aplicam as leis da termodinâmica, incluindo-se, obviamente, a entropia. De acordo com Odum e Barret (2007), esse modelo de sociedade cria novos sistemas, nomeados de “tecnocossistemas”, os quais não apenas competem com os ecossistemas naturais, mas também tornam-se parasitários destes. Ainda, esses tecnocossistemas necessitam de grande quantidade de energia, e a tem gerado a partir de fontes esgotáveis, ou danificando, massivamente, o ambiente natural para poder gerá-la. Por isso, afirmam: “se as sociedades urbano-industriais tiverem de sobreviver em um mundo finito, é imperativo que o tecnocossistema faça a interface com os ecossistemas de suporte à vida de um modo mais positivo e mutualístico que o atual” (p. 71).

O que podemos anotar é que nesse atual modelo social ou tecnocossistema, há entradas de fontes energéticas (combustíveis fósseis e urânio) e demais recursos naturais (água, minerais etc.), e saídas na forma de poluentes de ar, água e de resíduos sólidos de efeitos negativos ao ambiente. Isso cria, segundo Oliveira Filho (2011), uma crise ao sistema Terra, porque há um descompasso entre o tempo da natureza, de ciclos biogeoquímicos que datam das eras geológicas, e o tempo da sociedade, que vive em consumo acelerado de recursos.

Um exemplo desta dinâmica de entrada e saída de energia é o setor de papel e celulose no Brasil, apesar de o setor se preocupar com os impactos ambientais causados pela produção e se adequar às normas internacionais como ISO 14000 e outras certificações como requisitos de importadores, é impossível produzir de maneira totalmente sustentável.

Miranda (2008), ao estudar os impactos ambientais gerados na produção de papel e celulose, apresenta a seguinte consideração:

“É bem verdade que esses resíduos são, em grande maioria, passíveis de reaproveitamento, como na produção de compostagem, corretivo de acidez do solo etc. Os resíduos que não são passíveis de reaproveitamento vão para o aterro industrial. Os resíduos sólidos apresentam elevado teor de matéria orgânica e não são considerados tóxicos pela legislação, mas tornam-se problemáticos devido à grande quantidade acumulada. Já alguns efluentes líquidos e emissões gasosas são altamente tóxicos podendo, no caso de falhas em alguma das etapas da produção, ocorrer vazamentos causando graves danos ao ambiente”. (MIRANDA, 2008, p. 25).

Podemos afirmar que o tempo social tem superado a disponibilidade de recursos naturais e a capacidade de resiliência orgânica. Isso quer dizer que a renovação da natureza e sua capacidade de absorver os resíduos negativos, originados do sistema tecnointustrial de produção de bens de consumo, não conseguem acompanhar o ritmo de crescimento acelerado da economia.

Para Furks (2012), a visão entrópica do processo econômico é igualmente contundente em relação ao papel das indústrias, pois estas, geralmente, fabricam produtos mais complexos que os insumos utilizados para sua fabricação, requerendo para isso energia, aumentando a entropia do sistema nas quais estão inseridas, ou seja, do ambiente. Por isso, o autor considera que “produzir, mesmo de modo ecoeficiente, acelera o déficit entrópico global” (p. 107).

CONCLUSÃO

“Ao se acionar a economia, de fato, não se pode ignorar que a depreciação dos ativos naturais (capital natural) é real. Quer dizer, existem custos de oportunidade ecológicos. Aumentar a produção econômica implica sacrifício de recursos, tais como florestas, solo, água, ar, biodiversidade, estabilidade climática etc. Ter noção desse problema leva à necessidade da visão ecológica da economia.” (CAVALCANTI, 2010, p. 10).

Diante da evidente influência das atividades humanas no desequilíbrio da natureza, tornam-se necessárias mais pesquisas na área ambiental que abranjam também as esferas políticas, econômicas e sociais. Como reforçam Andrade e Romeiro (2011, p. 8), “é necessária a integração transdisciplinar para a construção de referenciais que elucidem limiares seguros até os quais a atividade econômica pode avançar”, pois, diminuir os efeitos negativos da economia é algo que diz muito mais respeito à busca por formas menos destrutivas e mais sustentáveis, do que simplesmente propor o retrocesso produtivo.

Cavalcanti (2010), por exemplo, propõe um modelo biofísico para o sistema econômico, com este sendo aberto, imerso num sistema maior, o ambiente, no qual estão a matéria e a energia que são processadas (transumo) e cujos produtos são bens de consumo como já sabemos e também rejeitos (matéria e energia de alta entropia) que retornam ao ambiente na forma de lixo.

A modelagem dos sistemas naturais que apresentam uma evolução temporal por meio de processos reversíveis foi bem-sucedida utilizando-se o princípio da entropia que é uma construção teórica bem antiga dentro da Física. A entropia ao medir o grau de desordem de um sistema físico quando comparado a outro pode ser uma candidata a explicar os fenômenos complexos que existem na produção humana. Esta proposição pode parecer contraditória, pois pretende explicar sistemas complexos, que assumimos no início deste capítulo, necessitarem de respostas holísticas, com uma ferramenta que é uma simplificação e especificação de um fenômeno na natureza. No entanto, nossa mente ainda se apegue a estas poucas ferramentas determinísticas que nos restaram. A transcendência para um raciocínio mais amplo ainda é um desafio dentro da literatura de Ciências Exatas no momento. ■

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, D. C.; ROMERO, A. D. Degradação Ambiental e Teoria Econômica: Algumas Reflexões sobre uma “Economia dos Ecossistemas”. **Economia**, Brasília (DF), v. 12, n. 1, p. 3-26. 2011.
- BARROS, V. P. Escalas e simplificações: exemplos em sistemas físicos e biológicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física** (Online), v. 32, p. 1303, 2010.
- BUNGE, M. **Teoria e realidade**. São Paulo: Editora Perspectiva, 1974.
- CAPRA, F. **A teia da vida: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos**. São Paulo: Editora Cultrix, 2006.
- CAVALCANTI, C. Concepções da economia ecológica: suas relações com a economia dominante e a economia ambiental. **Estudos Avançados** 24 (68), 2010.
- CECHIN, A. D. **Georgescu-Roegen e o desenvolvimento sustentável: diálogo ou anátema?** São Paulo. 2008. (Dissertação de mestrado). Universidade de São Paulo (USP).
- CECHIN, A. D.; VEIGA, J. L. A economia ecológica e evolucionária de Georgescu-Roegen. **Revista de Economia Política**, v. 30, n. 3 (119), p. 438-454, julho-setembro/2010.
- CHU, S. *et al.* **Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho**. Tradução de Maria Cristina Vidal Borba e Neide Ferreira Gaspar. São Paulo: FAPESP; Amsterdam: Inter Academy Council; Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2010.
- FORTUNATO, I.; PENTEADO, C. L. C. Educação, percepção ambiental e interferência midiática: a energia como exemplo. **Communicare**, São Paulo, v. 13, n. 1, p. 147-160, 2013.
- FURKS, M. Reflexões sobre o paradigma da economia ecológica para a gestão ambiental. **Estudos avançados**, São Paulo, v. 26, n. 74, p. 105 -119, 2012.
- GABOR, D.; COLOMBO, U. A. Das Ende der Verschwendung zur materiellen Lage der Menschheit – Ein Tatsachenbericht na den Club of Rome, **Deutsche Verlag Anstalt**. Stuttgart, 1976.
- GLASBY, G. P. Entropy and environmental degradation. **Ambio**, v. 17, n. 5, p. 330-335, 1988.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. São Paulo: Ed. LTC., v. 2. 9 ed. 2012.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual 2016, ano base 2015**. Brasília, 2016. Disponível em: < http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2017.
- LEFF, E. Complexidade, racionalidade ambiental e diálogo de saberes. **Educação & Realidade**, Porto Alegre, v. 34, n. 3, p. 17-24, set./dez. 2009.
- LOTKA, A. J. **Elements of physical biology**, Baltimore: Williams & Wilkins Company, 1925.
- MARION, C. V. A questão ambiental e suas problemáticas atuais: Uma visão sistêmica da crise ambiental. Congresso internacional de direito e contemporaneidade. Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) p. 657-669. 2003.
- MEDINA, M. N.; NISENBAUN, M. A. **A primeira Lei da Termodinâmica**. Conteúdos Educacionais Digitais. Química. PUC Rio, 2011. Disponível em: <http://goo.gl/AqcndK>. Acesso em: 7 jul. 2015.
- MUELLER, C. C. O Debate dos Economistas sobre a Sustentabilidade – uma avaliação sob a ótica da análise do processo produtivo de Georgescu-Roegen. **Estudos econômicos**, São Paulo, v. 35, n. 4, p. 687-713, 2005.
- MIRANDA, R. E. S. **Impactos ambientais decorrentes dos resíduos gerados na produção de papel e celulose**. 2008. 37 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia florestal). Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica, 2008.
- NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica: Eletromagnetismo**, v. 3. 4 ed. Edgard Blücher, 2002.
- MURRAY, J. D. **Modelling the Dynamics of Marital interaction: Divorce prediction and Marriage repair in Mathematical Biology: an introduction**. Berlin: Springer-Verlag, 2002.
- ODUM, E.; BARRETT, G. W. **Fundamentos de Ecologia**. 5 ed. São Paulo: Cengage Learning, 2007, 612 p.
- OLIVEIRA FILHO, G. R. O sistema Terra e a problemática da exploração dos recursos naturais. **CES Revista**, v. 25, Juiz de Fora. 2011, p. 82-94.
- PASSOS, J. C. A importância do trabalho de Carnot para o ensino de termodinâmica. Congresso brasileiro de educação em engenharia, 31. 2003. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Hotel Glória, 2003. 11 p.
- PRESS, F. *et al.* **Para entender a Terra**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- SILVA, D. Estudo das trajetórias cognitivas de alunos no ensino da diferenciação dos conceitos de calor e temperatura. Tese (Doutorado) – Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1995.
- SYMON, K. R. **Mecânica**. Rio de Janeiro: Ed. Campus, 1996.
- VERON, J. Alfred Lotka and the Mathematics of Population. **Electronic Journal for History of Probability and Statistics**, v. 4, n. 1, 2008.
- VOLTERRA, V. Fluctuations in the abundance of a species considered mathematically, **Nature**, 118, p. 558-560, 1926.