

## Sustentabilidade ambiental e postulados termodinâmicos à luz da obra de Nicholas Georgescu-Roegen

*Environmental sustainability and postulates of thermodynamics: an essay from the work of Nicholas Georgescu-Roegen*

Leila Cristina Aoyama Barbosa<sup>1</sup>, Carlos Alberto Marques<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil

<sup>2</sup>Doutor em Ciências Químicas, Departamento de Metodologia de Ensino, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil

### Resumo

*Este ensaio trata do tema da sustentabilidade ambiental a partir da Segunda Lei da Termodinâmica - Lei da Entropia -, tendo como referência as discussões do economista e matemático Nicholas Georgescu-Roegen sobre os limites ambientais ao desenvolvimento econômico. Ao considerar a Entropia como a mais econômica de todas as leis físicas, o autor analisa as inevitáveis consequências entrópicas das atividades humanas; criticando a tese do equilíbrio entre meio ambiente e desenvolvimento econômico, coloca em xeque o próprio conceito de desenvolvimento sustentável. As bases teóricas de suas ideias, fundamentadas nos postulados clássicos das ciências da natureza, trazem contribuições importantes à perspectiva crítica da Educação Ambiental e à educação científica.*

**Palavras-chave:** Sustentabilidade ambiental. Entropia. Educação Ambiental Crítica.

### Abstract

*This essay discusses the environmental sustainability theme from the Second Law of Thermodynamics - Entropy Law - with reference to the discussions of the economist and mathematician Nicholas Georgescu-Roegen on the environmental limits to economic development. When considering the entropy as the most economical of all physical laws, the author analyzes the inevitable consequences of entropic processes of human activities, criticizing the theory of balance between the environment and economic development, calls into question the very concept of sustainable development. The theoretical bases of their ideas, based on the classic postulates of the natural sciences, have important contributions for the critical perspective of environmental education and for the science education.*

**Keywords:** Environmental Sustainability, Entropy, Critical Environmental Education.

## 1 Introdução

A crise ambiental que atinge o mundo atual tem se tornado, cada vez mais, tema de discussões entre líderes políticos, cientistas, o mundo acadêmico e a sociedade em geral, especialmente por meio das mídias e dos discursos e ações das organizações ambientais. Uma crise que vem se manifestando através de vários indicadores: a diminuição da biodiversidade, o aumento do despejo - pelas indústrias e automóveis - de gases como o CO<sub>2</sub> na atmosfera, e muito fortemente pelo quadro de mudanças climáticas cuja origem se associa ao aquecimento global (LÉNA, 2012).

Sua constatação e o modo de enfrentamento, por outro lado, exige desde já, e no mínimo, mudanças de hábitos e atitudes da sociedade, principalmente a promoção de alterações no sistema econômico, envolvendo a diminuição do consumo e melhorias na produção de bens e serviços; ainda que o ritmo e a amplitude desses enfrentamentos não sejam de consenso, até o momento. Foi na esteira desse debate que em 1983 a Organização das Nações Unidas criou a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, a qual produziu o Relatório Brundtland (WCED, 1987) propondo um novo modelo de desenvolvimento, cuja essência é uma formulação conceitual (ideia-força ou conjunto de princípios) sobre o Desenvolvimento Sustentável (DS). Simplificadamente, o conceito busca indicar a necessária harmonização entre desenvolvimento econômico e salvaguarda do ambiente como modo de garantir as condições de vida das pessoas, tanto no presente como às gerações futuras.

Loureiro (2012) analisa que o conceito de sustentabilidade é “oriundo das ciências biológicas e se refere à capacidade de suporte de um ecossistema, permitindo sua reprodução ou permanência no tempo” (p. 56).

Sem dúvida, o conceito de sustentabilidade é instigante, complexo e desafiador. Faz-nos pensar sobre múltiplas dimensões e suas relações. Mas o que houve de mais interessante ao se trazer um conceito biológico para a política e a economia foi não só admitir a dinâmica do contexto ecológico como uma condição objetiva de qualquer atividade social, mas também pensar em um desenvolvimento que fosse duradouro e atribuir responsabilidade pela vida das pessoas no futuro a partir do que o cidadão realiza no presente. Em um momento de tanta ênfase no imediato e na efemeridade, propor o inverso é algo consideravelmente radical e tem seu mérito (LOUREIRO, 2012, p. 57).

Apesar do mérito em se fazer com que a geração presente se sensibilize com as gerações futuras, a estreita relação de alcance do equilíbrio entre o atual sistema econômico mundial e a preservação ambiental - que é a essência do conceito de DS formulado em Brundtland - é avaliada crítica e negativamente por muitos que se ocupam desse tema; entre estes estão aqueles que defendem a Educação Ambiental Crítica. Para estes estudiosos, entre outras coisas, o discurso e as ações dos atores do sistema econômico deturpam o conceito de DS ao incentivar o consumismo e o desenvolvimento científico e tecnológico desenfreado (LAYRARGUES, 2002; MEIRA; SATO, 2005; LOUREIRO, 2012). Acredita-se que a crise ambiental que vivenciamos - a qual não estaria expressando problemas da natureza em si, mas problemas que se manifestam na natureza - somente poderá ser resolvida pelo enfrentamento político das desigualdades e da injustiça socioambiental, a partir da articulação das diversas dimensões da sustentabilidade, e a problematização das contradições dos modelos de desenvolvimento e de sociedade que experimentamos. (LAYRARGUES; LIMA, 2011). Perspectivas estas que, portanto, se colocam no campo da crítica política ao conceito de DS formulado pelo Relatório Brundtland. Todavia, o que não transparece nessa crítica é uma base analítico-conceitual fundada em aspectos físico-químicos do ambiente; isto é, dos limites biofísicos que constituem a base natural onde se realizam as condições de vida. É justamente sobre estes aspectos que buscamos explorar nesse ensaio e, para tanto, acrescenta-se uma outra dimensão, por vezes

esquecida ou ignorada, que faz referência aos postulados termodinâmicos – particularmente o da Segunda Lei, que trata da Entropia, quando discute sobre alguns fundamentos das teorias econômicas no enfrentamento do problema da sustentabilidade ambiental.

Para muitos como nós, é impossível pensar a educação ambiental e o tema da sustentabilidade dissociada das questões econômicas, a qual constitui uma de suas três dimensões. Assim, este ensaio teórico foi buscar apoio nas ideias de Nicholas Georgescu-Roegen – expressas principalmente na sua obra “O Decrescimento: entropia, ecologia, economia” (2012) – procurando dialogar com alguns fundamentos da vertente Crítica da Educação Ambiental, especialmente na sua análise sobre o conceito e o alcance da sustentabilidade ambiental. Nosso estudo trata, portanto, de ampliar a análise sobre as possibilidades e os limites desse grande desafio humanitário. E, ao dialogar e reconhecer a tese sobre a finitude dos recursos biofísicos naturais do planeta Terra frente aos impactos antropocêntricos, buscamos auxiliar e reforçar o campo da Educação Ambiental indicando-lhe um aporte teórico mais amplo baseado nas ciências da natureza, cujos efeitos pedagógicos fortalece também uma perspectiva de educação científica crítica.

Dito de outra forma, acreditamos que para melhor compreender o que está por traz do irremediável esforço humanitário de busca e construção da sustentabilidade ambiental em um planeta cujos recursos biofísicos são finitos, esta deve fundamentar-se nos postulados termodinâmicos. Portanto é importante articular-se aos fundamentos da Educação Ambiental Crítica – de justiça ambiental e transformação social, dentre outros. Estes fundamentos que oferecerão uma base complementar e mais sólida ao entendimento das pessoas tanto para uma visão mais crítica da ciência e da tecnologia quanto da impossibilidade física da sustentabilidade; algo que vai de encontro ao ideário baseado no alcance pleno e duradouro, portanto estável, do equilíbrio entre homem e natureza. É esse entendimento crítico que, por sua vez, abrirá espaço para a compreensão da dimensão intertemporal da sustentabilidade ambiental (MARQUES; MACHADO, 2014) enquanto uma construção sócio-histórica. Compreensão conceitual esta que se aproxima daquela da "ecologia política" que, segundo Loureiro (2012), procura "recuperar a materialidade dos processos sociais e da natureza [que] é fundamental para não perdermos a dimensão concreta e histórica dos discursos ambientais que buscam se afirmar como verdades" (p. 14), ainda que o mesmo não aprofunde, em bases termodinâmicas, sua descrição de alguns pressupostos para uma sociedade sustentável no que tange "a produção de condições dignas para todas as pessoas sem destruir a base natural" (p. 15, grifo nosso).

Enfim, o fato é que tais compreensões são bastante diversas do modo pelo qual o conceito de DS vem sendo difundido contemporaneamente, seja pelas empresas, pelo sistema econômico e mesmo nos meios acadêmicos.

## **2 A entropia e o alcance da sustentabilidade ambiental: os escritos de Georgescu-Roegen**

Nicholas Georgescu-Roegen (G-R) (1906-1994) foi um matemático romeno que trilhou sua carreira acadêmico-profissional no campo da ciência econômica e, que desde 1966, escreveu artigos e livros que aproximavam as teorias econômicas e os fundamentos básicos das ciências naturais, principalmente dos da física termodinâmica e dos do evolucionismo darwiniano (VEIGA, 2012). Ao fazer isso, combateu as bases da teoria econômica clássica e firmou as ideias fundamentais da denominada bioeconomia (CECHIN, 2012).

A indicação de ideias tão revolucionárias para a economia e a industrialização mundial que se instituíam nos anos de 1970 não teve grande destaque no mundo acadêmico da época e nem entre os economistas ortodoxos, porém, conforme descreve Montibeller-Filho (2008), foi essencial para fundamentar a economia ecológica, que considera os limites impostos à sustentabilidade pelos fatores termodinâmicos.

Em “O decrescimento: entropia, ecologia, economia”, cujo livro foi traduzido da obra original em francês e que compila quatro artigos de G-R publicados entre os anos de 1971 e 1982, o autor defende que o pensamento econômico não pode continuar embasado no dogma mecanicista oriundo

da física que torna o processo econômico “um diagrama circular que encerra o movimento de vai e vem entre a produção e o consumo num sistema totalmente fechado” (GEORGESCU-ROEGEN, 2012, p. 33), isto é, isolado da fonte/base biofísica que sustenta esse processo: a natureza.

Para o autor, a mecânica leva em conta elementos como: massa, velocidade e posição, para fundamentar os conceitos de energia cinética e energia potencial, de modo que esta reduz todo processo ao movimento e à mudança na distribuição da energia. Quando a economia busca se embasar neste modelo, fica a crença de reversibilidade dos processos, isto é, “se alguns acontecimentos modificam a estrutura da oferta e da procura, uma vez que esses acontecimentos desaparecem, o mundo econômico sempre retorna às condições iniciais” (GEORGESCU-ROEGEN, 2012, p. 74). Entretanto, como ressalta G-R, logo em seguida a esta sua afirmação, sabemos que, nos processos para produção de bens de consumo, esta reversibilidade é impossível.

A representação de um diagrama circular e fechado em si promove o entendimento de que o processo econômico se mantém sem a produção de resíduos, de maneira a consumir integralmente todos os recursos materiais e energéticos envolvidos. Caso isto fosse possível, poderia se considerar que a sustentabilidade ambiental seria perfeita, seguindo os preceitos propostos no Relatório Brundtland, pois, sendo os recursos físicos infinitos (reversíveis em última instância), bastaria seu uso parcimonioso de modo a garanti-los às gerações futuras. No entanto, ao observar qualquer atividade econômica (produção e circulação de mercadorias) podemos notar que não é bem isto que acontece, pois há geração de resíduos e, G-R nos ressalta que, pelos fundamentos da Termodinâmica, o ser humano só pode utilizar uma forma particular de energia denominada exergia<sup>1</sup>, dado que a outra (anergia) encontra-se em uma forma não utilizável: a entropia<sup>2</sup>.

O principal objetivo dos textos de G-R era destacar o fato dos economistas não se atentarem aos conhecimentos oriundos das ciências da natureza para compreender o processo econômico como algo insustentável, especialmente pelo modo como vem sendo desenvolvido, devido ao exacerbado uso de energia e matéria para a produção de bens de consumo para a sociedade. Algo que atualmente, podemos dizer, deve servir de alerta não somente aos economistas; deve ultrapassar as barreiras de áreas científicas e se tornar tema de discussão para toda a sociedade.

O autor romeno considera a Termodinâmica, em sua natureza, “como a mais econômica de todas as leis físicas” (GEORGESCU-ROEGEN, 2012, p. 83). Os postulados fundamentais desta Lei foram enunciados a partir dos estudos do engenheiro francês Sadi Carnot, o qual buscava resolver um problema econômico, de eficiência técnica, sobre as condições nas quais seria máximo o rendimento de máquinas movidas à combustão.

Nos escritos de G-R, a Segunda Lei da Termodinâmica, também denominada Lei da Entropia, é assim enunciada: “a entropia de um sistema isolado aumenta contínua (e irrevogavelmente) para um ponto máximo; isso significa que energia utilizável é continuamente transformada em energia não utilizável até desaparecer completamente” (GEORGESCU-ROEGEN, 2012, p. 81), isto é, “todas as formas de energia são gradativamente transformadas em calor, e o calor, afinal, torna-se tão difuso que o homem não pode mais utilizá-lo” (GEORGESCU-ROEGEN, 2012, p. 82).

Dentro deste conceito, G-R conclui que a matéria-energia absorvida pelo processo econômico ocorre num estado de baixa entropia e retorna num estado de alta entropia. Considerando que o calor não pode se reverter em matéria nos processos de produção e que nem toda a energia está disponível para ser utilizada (somente a parte da exergia e somente uma vez), percebe-se que, com o passar dos tempos, nossos estoques energéticos e material se reduzem. Dessa forma, “nos termos da lei fundamental da termodinâmica, o dote da humanidade é limitado” (GEORGESCU-ROEGEN, 2012, p. 103).

Tais fundamentos permite-nos sair do senso comum, por exemplo, sobre o uso parcimonioso ou da economia de recursos naturais – ainda que importantes – e aceitar a ideia da finitude destes em

<sup>1</sup> Segundo princípios da Termodinâmica, a energia se compõe de uma parte disponível para produzir trabalho útil, chamada de exergia, e de uma quantidade de energia que não está disponível para a realização de trabalho, conhecida como anergia. Os textos de Georgescu-Roegen não utilizam essas nomenclaturas, porém cita os termos *energia utilizável* e *energia não utilizável*.

<sup>2</sup> Georgescu-Roegen (2012) destaca que o conceito de entropia não é facilmente compreendido nem mesmo pelos físicos. Em sua obra, entropia é entendida como uma medida de desordem e conceituada como “um índice da qualidade de energia não utilizável contida num dado sistema termodinâmico num determinado momento da sua evolução” (p. 81).

nosso planeta. Isto nos faz refletir ainda sobre o papel da ciência e da tecnologia - elementos essenciais e muito presentes nos discursos defensores da ecoeficiência<sup>3</sup> - como meios que poderão sanar este problema da inevitabilidade da degradação entrópica. Nesse sentido, é muito provável que o máximo que conseguiremos é protelar tal esgotamento, a partir das ações preventivas, como a do desperdício e da deterioração do meio ambiente com o aumento da poluição material e entrópica, a menos que, como indica Georgescu-Roegen (2012), o ser humano consiga melhor explorar o sol como fonte energética ou aperfeiçoe a utilização da energia termonuclear, entre outras medidas. Todavia, mesmo que seja possível aperfeiçoar o modo de extração e uso de energia, nem toda energia pode ser utilizada nas atividades humanas, pois parte dela encontra-se indisponível para ser transformada em trabalho (conforme já comentado pelos conceitos de exergia e anergia).

Por outro lado, o matemático-economista lembra ainda que o processo entrópico deve ser considerado não só como uma dissipação de energia, mas também da matéria, pois ao fazer uso de fontes minerais – por exemplo, para a produção de bens de consumo, como automóveis, refrigeradores e computadores – o ser humano está esgotando estas fontes que não retornam ao ambiente em sua forma físico-química original. É necessário considerar que do ponto de vista temporal (na escala da "máquina do mundo"), todos os objetos materiais se desgastam e que "não há estruturas imutáveis porque a matéria, a exemplo da energia, se dissipa contínua e irrevogavelmente" (GEORGESCU-ROEGEN, 2012, p.148). Isto nos confirma a tese de que a matéria (composto conversor de energia) se transforma qualitativamente de forma irreversível. A base para tal conclusão é, segundo o autor, o prescrito nos manuais termodinâmicos, que diz que "todos os processos que se desenvolvem numa velocidade infinitamente pequena são reversíveis, pois nesse ritmo, praticamente não há atrito [...] é a razão pela qual a reversibilidade não é possível na realidade" (GEORGESCU-ROEGEN, 2012, p. 150).

Corroborando com esta análise termodinâmica sobre as transformações qualitativas irreversíveis da matéria, Cechin (2008, citando outros autores) lembra-nos do papel dos seres vivos no processo de ciclagem da mesma e na transformação da energia solar em energia química pelo processo de fotossíntese:

A energia solar é convertida para energia química, por meio da fotossíntese, e estocada em moléculas de açúcares. Assim, a fotossíntese é o processo de conversão de energia mais importante na Terra, pois a energia química resultante é a base das cadeias alimentares que sustentam a maioria das outras formas de vida. Todos os outros seres vivos, que não produzem seu próprio alimento, buscam energia disponível comendo a biomassa ou outros seres animais. Processos heterótrofos (incapazes de produzir o próprio alimento) liberam a energia solar de alta qualidade, obtida dos produtos da fotossíntese, em forma de calor (SCHNEIDER; SAGAN, 2005; KAUFMANN; CLEVELAND, 2007 apud CECHIN, 2008, p. 63).

Os mecanismos de plantas e animais para captura de energia de forma mais eficiente, a fim de direcionar a energia disponível em canais favoráveis à preservação da espécie, segundo Lotka (1922 apud Cechin, 2008) torna-se critério para a seleção natural de organismos que resulta na evolução biológica das espécies. Portanto, a energia disponível sempre foi objeto de disputa na "luta pela vida" dos seres vivos em que os mais adaptados ao meio se sobressaíam aos demais. A partir destas ideias, G-R afirma que o próprio processo evolutivo é irreversível, pois corresponde às adaptações dos organismos ao ambiente, e se torna cada vez mais complexo<sup>4</sup>.

Outro ponto de destaque dos escritos de G-R são seus apontamentos críticos sobre o processo de reciclagem que, segundo o autor, parece ser entendido pelos economistas ortodoxos como a

<sup>3</sup> A ecoeficiência é um conceito oriundo da gestão empresarial e em prol do desenvolvimento econômico que visa "fazer mais com menos" (WEIZSACHER et al, 2009 apud LÉNA, 2012). A aplicação desse conceito pelas empresas visa a utilização de recursos naturais de maneira parcimoniosa e com pouca geração de impactos ambientais, porém alcançando os objetivos de produção e de qualidade de produtos. Segundo o *World Business Council for Sustainable Development*, o uso da ecoeficiência nos programas institucionais permite às empresas tornarem-se mais responsáveis do ponto de vista ambiental e mais lucrativas do ponto de vista econômico (WBSCD, 2000 apud MUNCK; CELLA-DE-OLIVEIRA; BANSI, 2011). Para atingir tal objetivo existe a forte crença no poder da ciência e da tecnologia para a geração de inovações tecnológicas.

<sup>4</sup> Na obra analisada (*O Decrescimento: entropia, ecologia, economia*), G-R explica das dificuldades de compreender o surgimento, organização e evolução de todas as formas de vida no planeta Terra a partir da diminuição da entropia. Para tanto, se baseia nos estudos da termodinâmica de não equilíbrio de Erwin Schrödinger, Alfred Lotka, Lars Onsager e Ilya Prigogine (CECHIN, 2008).

solução para a geração de resíduos nos processos produtivos e um modo de retornar a matéria para uma nova utilização. Apesar de considerar os processos de reciclagem e reutilização de matéria como importantes meios para garantir a melhor utilização dos recursos naturais, o matemático-economista ressalta que a reciclagem de materiais não leva à eliminação da poluição de maneira gratuita em termos energéticos; pois além de inevitáveis (todo processo de transformação de materiais produz resíduos), existe um consumo de energia para estes processos de transformação e a matéria nunca é totalmente reaproveitada. Sua crítica nesse aspecto encontra-se principalmente na ideia da reciclagem completa, a qual afirma se constituir em uma "perigosa miragem" (GEORGESCU-ROEGEN, 2012, p. 150).

Nesse tema, ao que nos parece, se encontram convergências entre o pensamento do autor com o campo de Educação Ambiental Crítica, pois Layrargues (2002) já fez alertas sobre os objetivos de se fazer reciclagem no Brasil. O autor questiona a função da reciclagem das latas de alumínio como alienação do consumismo à degradação ambiental. Ainda segundo ele, o paradigma da reciclagem faz uso do discurso da ecoeficiência para justificar o combate ao desperdício pela utilização de inovações tecnológicas. Como já mencionado anteriormente, ecoeficiência é um conceito fortemente presente no discurso moderno do modelo econômico vigente e usado para demonstrar a preocupação das empresas com os impactos ambientais sem reduzir a produtividade. Pautado na crença no poder da ciência e tecnologia para a geração de inovações tecnológicas, cria-se uma imagem totalmente benéfica de ambas; todavia, essa crença não diz nada sobre os limites impostos pelos postulados termodinâmicos.

Reafirma-se aqui, como G-R o fez, que não se desconhece o importante papel que a técnica tem em construir bem estar e resolver muitos problemas humanos e ambientais (GRINEVALD; RENS, 2012). Entretanto apresenta-se a crítica formulada pelo autor romeno sobre a visão salvacionista de ciência e tecnologia ao indicar a crença de economistas ortodoxos e heterodoxos no "poder ilimitado da técnica", em que "seríamos sempre capazes não só de encontrar um substituto para um recurso que se tornou escasso, mas também de aumentar a produtividade de qualquer espécie de energia e de matéria" (GEORGESCU-ROEGEN, 2012, p. 98). É como se pudéssemos melhorar o meio ambiente por meio da inversão do curso da entropia.

Discursos como estes, sobre a reciclagem voltada à sustentabilidade ou o poder da ciência e tecnologia em encontrar soluções aos problemas existentes – naquilo que denominamos como perspectiva salvacionista da ciência e tecnologia (AULER; DELIZOICOV, 2001), são muito disseminados entre as sociedades contemporâneas, que reforçam a ideia de sustentabilidade impressa no conceito de DS proposto no Relatório Brundtland. Assim, as sociedades acreditam no consumo sustentável, no capitalismo verde e na capacidade das inovações tecnológicas para sanar os problemas ambientais sem tomar consciência de que a finitude dos recursos naturais é algo fisicamente inevitável. Tal visão de DS, reforçamos, não encontra suporte nos postulados termodinâmicos e, acreditamos, se distancia enormemente das bases teóricas da Educação Ambiental Crítica.

A partir da relação que buscamos esclarecer e reforçar entre os princípios da Termodinâmica e a sustentabilidade ambiental, corroboramos com o pensamento de autores das ciências econômicas, como Montibeller-Filho (2008) e Stahel (1995), que afirmam que a sustentabilidade em sua dimensão ambiental é impossível de ser alcançada. Acrescentamos a essa assertiva, o termo "fisicamente" impossível, mas sócio-historicamente necessária. Algo que concorre com o sistema econômico capitalista vigente, cujo ritmo de destruição entrópico se torna sempre maior devido ao uso desenfreado dos recursos materiais e energéticos do planeta: produzimos muito além das necessidades e para nossa felicidade, produzimos o extravagante, o supérfluo e a destruição.

Sabe-se que esta crítica também é feita pelos integrantes da Educação Ambiental Crítica, no entanto, o que se quer destacar neste breve ensaio é a necessidade das ciências da natureza também integrem as discussões sobre a sustentabilidade ambiental – conceito originalmente oriundo das ciências biológicas – a fim de fortalecer os discursos da Educação Ambiental. E este apoio pode ser encontrado, por exemplo, nos textos de crítica econômica de G-R.

Para a discussão dos aspectos termodinâmicos, a área das ciências da natureza, por meio da educação científica, pode ser um importante aliado à disciplina de Educação Ambiental, bem como

quando em uma abordagem transversal e interdisciplinar em disciplinas curriculares na educação formal, articulando-se também aos trabalhos da perspectiva CTS (Ciência, Tecnologia e Sociedade) que são desenvolvidos em ambiente escolar. Cabe ressaltar, que não se defende a somente inserção destes conteúdos (princípios da Termodinâmica) em sala de aula, dado que em algumas áreas disciplinares o mesmo já é discutido em algum grau, mas sim abordá-los quando se estudam os limites biofísicos do planeta. Torna-se necessário que os princípios da Termodinâmica sejam incorporados ao debate e estudos socioambientais de maneira a contextualizar a realidade de crise ambiental que vivenciamos.

### 3 Considerações finais

Os textos de Georgescu-Roegen (2012) fundamentalmente objetivam destacar as falhas/omissões da economia neoclássica baseada no dogma mecanicista, que a pensa como um ciclo fechado e perfeito, em que não são produzidos resíduos. Ao resgatar a Lei da Entropia – “a lei suprema da evolução de toda a realidade” (GEORGESCU-ROEGEN, 2012, p. 162) – para explicar os processos de produção industrial, G-R consegue inquietar-nos, fazendo-nos pensar sobre qual sustentabilidade ambiental acreditamos e buscamos, além de demonstrar que ela se torna impossível na dimensão biofísica.

O autor romeno nos mostra que para que os termos desenvolvimento sustentável e sustentabilidade não representem simplesmente uma inovação retórica, é preciso se atentar ao duplo aspecto da relação entre processo econômico e natureza, isto é, o esgotamento dos recursos naturais e a saída inevitável de resíduos que dele deriva. Por isso, acreditamos que o conceito de sustentabilidade ambiental deve ser analisado como uma hipótese em uma dimensão intertemporal e, portanto, discutida na escala do tempo histórico (MARQUES; MACHADO, 2014). A sustentabilidade deve, então, ser “resultado de um processo histórico por meio do qual adquire materialidade” (LOUREIRO, 2012, p. 71), sendo, portanto, a busca pelo prolongamento da espécie. Ou apenas escolheremos a sobrevivência individual, breve, mas excitante?! – como reflete Georgescu-Roegen (2012).

Para alguns estudiosos da problemática ambiental, como os situados na corrente da economia ecológica e da bioeconomia – esse último citado por G-R em um programa bioeconômico mínimo<sup>5</sup> –, este nosso pequeno ensaio pode não trazer grandes novidades quando faz o resgate da Segunda Lei da Termodinâmica em associação com o processo de sustentabilidade ambiental. Todavia, avivar este postulado físico no campo da Educação Ambiental, que ainda nos parece ser pouco explorado, tem o fito de fortalecer uma aproximação ainda maior entre esse campo e o das ciências da natureza.

Nossa reflexão quer dar outro sentido às indagações recorrentes daqueles que, como nós, se interrogam sobre as dificuldades de se pensar criticamente – para além dos modismos – a possibilidade/necessidade em se alcançar a sustentabilidade ambiental. Nesse sentido, se aceitarmos a Lei da Entropia como um processo irreversível que modifica a quantidade e qualidade de matéria e da energia utilizável, portanto a irreversibilidade da degradação entrópica, estaremos seguramente contribuindo com a crítica aos diferentes modismos ambientalistas, oportunismos econômicos e os discursos de apelo puramente ético. Mas, teremos que se perguntar: que dificuldades/implicações isto traz ao modo de entender o conceito de sustentabilidade ambiental? Que implicações trazem à crença no poder da ciência e da tecnologia para resolver o problema da sustentabilidade ambiental? O que podemos nós fazer, enquanto sociedade, na construção de uma relação saudável e duradoura entre seres humanos e ambiente?

---

<sup>5</sup> Georgescu-Roegen (2012), em suas obras escritas nas décadas de 1970-1980, já apontava que o caminho para combater a crise energética e ambiental encontrava-se na conservação dos recursos naturais, especialmente os exauríveis. Para tanto, elaborou um Programa Bioeconômico Mínimo, constituído basicamente por: 1) Proibir a produção de instrumentos bélicos; 2) Ajudar as nações subdesenvolvidas a alcançar uma existência digna de ser vivida; 3) Reduzir progressivamente a população ao nível que a agricultura orgânica bastasse para alimentá-la; 4) Evitar o luxo excessivo e o supérfluo (engenhocas extravagantes); 5) Tornar mais duráveis as mercadorias já duráveis. Para Cechin (2008), o programa bioeconômico de G-R revela sua visão institucional do problema ambiental, pois o matemático romeno não acreditava que o progresso tecnológico ou o mecanismo de preços poderia resolver todos os problemas, mas sim a ética e os valores existentes da sociedade.

Este trabalho, ainda que breve, representa um esforço de reflexão inicial sobre a articulação da Lei da Entropia e o conceito de sustentabilidade ambiental no âmbito da educação científica. Reconhecemos que a complexidade do tema também não nos permite almejar qualquer resposta definitiva ou mesmo concisa. Todavia, chamamos a atenção para a necessidade de embasar nossos discursos não exclusivamente em fundamentos das ciências sociais (aplicadas), que defendem justamente uma nova concepção de sociedade, economia e ética, mas também nos embasarmos em fundamentos das ciências da natureza, para entendermos os limites físicos ao alcance da sustentabilidade ambiental. Também isto nos ajudará a não mais se deixar levar por uma visão romântica e ingênua de meio ambiente ou pelo imaginário alcance da sustentabilidade ambiental fundado na ideia de um equilíbrio entre razões econômica e ambiente.

Assim, nos aliamos a outros pesquisadores, como Loureiro (2012), que defendem uma educação ambiental problematizadora da realidade e que trate dos componentes sociais e ecológicos do ambiente – uma educação com fins emancipatórios.

## Agradecimentos

Ao Fundo de Apoio à Manutenção e ao Desenvolvimento da Educação Superior de Santa Catarina (FUMDES/SC) pela concessão de bolsa de estudos em nível de doutorado.

## Referências

- AULER, D.; DELIZOICOV, D. Alfabetização científico-tecnológica para quê? *Revista Ensaio: pesquisa em educação e ciências*, v. 03, n. 03, p. 01-13, jun. 2001. Disponível em: <<http://www.portal.fae.ufmg.br/seer/index.php/ensaio/article/viewFile/44/203>>. Acesso em: 12 jan. 2013.
- CECHIN, A. D. Georgescu-roegen e o desenvolvimento sustentável: diálogo ou anátema? In: LÉNA, P.; NASCIMENTO, E. P. do (orgs). *Enfrentando os limites do crescimento: sustentabilidade, decrescimento e prosperidade*. Rio de Janeiro: Garamond, 2012, p. 349-370.
- CECHIN, A. D. *Georgescu-Roegen e o desenvolvimento sustentável: diálogo ou anátema?* São Paulo: USP, 2008. 208 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental, Universidade de São Paulo, 2008.
- GEORGESCU-ROEGEN, N. *O decrescimento: entropia, ecologia, economia*. São Paulo: Senac São Paulo, 2012.
- GRINEVALD, J.; RENS, I. Prefácio à segunda edição. In: GEORGESCU-ROEGEN, N. *O decrescimento: entropia, ecologia, economia*. São Paulo: Senac São Paulo, 2012, p. 17-46.
- LAYRARGUES, P. P. O cinismo da reciclagem: o significado ideológico da reciclagem da lata de alumínio e suas implicações para a educação ambiental. In: LOUREIRO, C.F.B.; LAYRARGUES, P. P. & CASTRO, R. de S. (Orgs.) *Educação ambiental: repensando o espaço da cidadania*. São Paulo: Cortez, 2002, p. 179-219.
- LAYRARGUES, P. P.; LIMA, G. F. C. Mapeando as macro-tendências político-pedagógicas da educação ambiental contemporânea no Brasil. In: ENCONTRO PESQUISA EM EDUCAÇÃO AMBIENTAL, 7, 2011, Ribeirão Preto, *Anais...* Ribeirão Preto: USP, 2011. 1 CD-ROM.
- LÉNA, P. Os limites do crescimento econômico e a busca pela sustentabilidade: uma introdução ao debate. In: LÉNA, P.; NASCIMENTO, E. P. do (orgs). *Enfrentando os limites do crescimento: sustentabilidade, decrescimento e prosperidade*. Rio de Janeiro: Garamond, 2012, p. 23-44.
- LOUREIRO, C. F. B. *Sustentabilidade e educação: um olhar da ecologia política*. São Paulo: Cortez, 2012.



- MARQUES, C. A.; MACHADO, A. S. C. Environmental sustainability: implications and limitations to green chemistry. *Foundations of Chemistry*, v. 16, n. 2, p. 125-147, jul. 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs10698-013-9189-x.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2013.
- MEIRA, P.; SATO, M. Só os peixes mortos não conseguem nadar contra a correnteza. *Revista de Educação Pública*, v.14, n.25, p. 17-31, 2005. Disponível em: <[http://www.cpd1.ufmt.br/gpea/pub/meira&sato\\_2005.pdf](http://www.cpd1.ufmt.br/gpea/pub/meira&sato_2005.pdf)>. Acesso em: 14 out. 2009.
- MONTIBELLER-FILHO, G. *O mito do desenvolvimento sustentável: meio ambiente e custos sociais no moderno sistema produtor de mercadorias*. 3. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2008.
- MUNCK, L.; CELLA-DE-OLIVEIRA, F. A.; BANSI, A. C. Ecoeficiência: uma análise das metodologias de mensuração e seus respectivos indicadores. *Revista de Gestão Social e Ambiental - RGSA*, São Paulo, v. 5, n. 3, p. 183-199, set./dez. 2011. Disponível em: <[http://www.revistargsa.org/rgsa/article/view/183-199/pdf\\_35](http://www.revistargsa.org/rgsa/article/view/183-199/pdf_35)>. Acesso em: 20 dez. 2012.
- STAHEL, A. W. Capitalismo e entropia: os aspectos ideológicos de uma contradição e uma busca de alternativas sustentáveis. In: CAVALCANTI, C. (Org.) *Desenvolvimento e natureza: estudos para uma sociedade sustentável*. São Paulo: Cortez, 1995, p. 104-127.
- VEIGA, J. E. da. A condição biofísica do desenvolvimento. In: GEORGESCU-ROEGEN, N. *O decrescimento: entropia, ecologia, economia*. São Paulo: Senac São Paulo, 2012, p. 09-14.
- WCED - World Commission on Environment and Development. *Our common future*. Oxford: Oxford University Press, 1987.