

Em busca do Graal do indicador ambiental sintético único: contribuições da Termodinâmica e da Teoria da Informação

In search of the Holy Grail of the single synthetic environmental indicator: contributions from thermodynamics and information theory

RESUMO

A construção de qualquer indicador, especialmente os ambientais sintéticos, envolve um compromisso entre a complexidade da realidade a ser descrita e a necessária simplicidade na sua concepção. Além disso, os indicadores embutem aspectos éticos relacionados ao estado da realidade que se pretende alcançar. Apresentam-se aqui contribuições da Termodinâmica e da Teoria da Informação ao desafio de elaboração de regras de agregação voltadas à construção de indicadores ambientais sintéticos. Para tanto, conceituam-se entropia e exergia de forma a descrever e avaliar três indicadores sintéticos, um relacionado a entropia informacional (Zhang *et al.*), outro, que relaciona poluição a alta exergia (Huang *et al.*), e o último, que usa o conceito de exergia informacional para descrever o estado termodinâmico de um ecossistema (Jørgensen). São sugeridos aqui dois indicadores de avaliação de áreas verdes urbanas. Ao final conclui-se que o lastro teórico de tais indicadores permite-lhes superar algumas dificuldades relacionadas à agregação de indicadores ambientais, como a arbitrariedade embutida nas funções de agregação, a perda de informação no processo de agregação e o caráter compensatório de muitos indicadores ambientais sintéticos. Porém, tal se faz à custa da simplicidade e da facilidade de compreensão.

PALAVRAS-CHAVE: entropia, exergia, indicadores sintéticos, agregação

Paulo Mantey Domingues
Caetano

Engenheiro civil,
doutorando do Programa
de Pós-Graduação da
Faculdade de Saúde
Pública da Universidade
de São Paulo
São Paulo, SP, Brasil
paulo.mantey@gmail.com

ABSTRACT

The design of any indicator, especially the synthetic and environmental indicators, involves a compromise between the complexity of the reality to be described and the needs for simplicity in its design. In addition, indicators embody ethical issues related to the state of reality to be achieved. Some contributions from Thermodynamics and Information Theory to the challenge of developing aggregation rules focused on the design of synthetic environmental indicators are here presented in order to describe and evaluate three synthetic indicators, one related to informational entropy (Zhang *et al.*), other relating pollution to high exergy (Huang *et al.*), and the last one, which uses the concept of informational exergy to describe the thermodynamic state of an ecosystem (Jørgensen). Two indicators destined to evaluate urban green areas are here suggested. At the end, it is concluded that the theoretical basement of such indicators allows them to overcome some of the difficulties related to the aggregation of environmental indicators, namely, the arbitrary aspects embedded in aggregate functions, the loss of information in the aggregation process, and the compensatory aspect of most synthetic indicators. However, this comes at the expense of simplicity and ease of understanding.

KEYWORDS: entropy, exergy, synthetic indicators, aggregation

INTRODUÇÃO

A questão dos indicadores ambientais pode ser tratada em dois níveis de volição: descrever a realidade e alterá-la. Assim, há no esforço de construir e atualizar indicadores duas intenções: a) descrever; b) constatar até que ponto o descrito se submeteu aos desígnios do responsável pelos indicadores¹. Ou seja, há uma questão epistemológica e uma questão ética. Ou, ainda, usando o jargão filosófico do final do século XVIII, uma questão no âmbito da razão pura e outra questão no âmbito da razão prática.

No tocante à *razão pura*, atribui-se ao indicador ambiental uma tarefa ingrata: ele tem que descrever uma realidade, complexa como todas as realidades, e ao mesmo tempo ser simples, de fácil manuseio e de fácil entendimento. Ele encerra, então, um conflito entre a simplicidade e a complexidade. Situa-se em uma superfície de *tradeoff*, sendo a proposição de qualquer indicador uma solução de compromisso (um quadro com dificuldades relacionadas a indicadores é apresentado por MALHEIROS e PHILIPPI JR., 2007).

Tarefa impossível a de propor indicadores ambientais considerados satisfatórios? Talvez não, porque muito do avanço da ciência e da técnica deveu-se à capacidade de enxergar a simplicidade na complexidade. Na ciência, esse avanço em grande parte correspondeu a identificar leis para a simplicidade (análise) e recompô-las para descrever a complexidade (síntese); trata-se de um método extremamente bem

sucedido nas ciências ditas físicas, e que ainda é considerado um paradigma. Na técnica, em grande parte correspondeu à tentativa de aplicar o ainda frequentemente insatisfatório arsenal disponível de conhecimento científico descritivo na tentativa de intervir na realidade.

Tarefa difícil? Sim, bastante, sendo que tal dificuldade não precisa ser ainda mais exacerbada ao atribuir aos indicadores uma tarefa a que eles não se prestam bem: tentar construir *teorias* descritivas a partir do próprio sistema de indicadores, inserindo-se, inclusive, causalidades. Tais tentativas, exceto em alguns casos muito triviais, parecem fadadas ao fracasso porque a realidade frequentemente se mostra complexa demais e rebelde à tentativa de trivializá-la através de modelos excessivamente simples, como necessariamente tem que ser um conjunto de indicadores. Daí decorre que um sistema de informações deveria incluir não apenas indicadores como também estudos mais aprofundados, a serem realizados periodicamente, que poderiam responder de maneira satisfatória a algumas questões específicas. No caso de sistemas de informações de desenvolvimento sustentável, uma excelente classificação de diferentes estudos nesse sentido disponíveis na literatura é apresentada por NESS *et al.* (2007).

No tocante à *razão prática*, temos que qualquer desejo e tentativa de intervir na realidade fazem-se embasados não só por técnicas e tecnologias (incapazes de fundamentar valores e deveres, necessariamente exógenos a elas, embora obrigatórios em suas avaliações e decisões) como também pela ética, ou seja, por valores (axiologia) e deveres (deontologia). Ora, valores e deveres são conceitos metacientíficos, e não deveriam, em princípio, ser objeto da ciência. Assim, por exemplo, o embasamento de sistemas de indicadores deveria se reportar aos

objetivos últimos das sociedades humanas, como ocorre explicitamente, por exemplo, no triângulo de Daly, base de discussão por parte de MEADOWS (1998) da moldura conceitual de indicadores de sustentabilidade ambiental. Porém, FLUSSER (1998), ao tratar do conceito de miséria, mostra ser muito distante da trivialidade a tarefa de explicitar objetivos últimos humanos. Ele vê a miséria como essencialmente ligada à alienação, e que se dá por carência e também por excesso. Ele visualiza três ordens de atitudes da humanidade frente à miséria: carregando muito nas costas, corresponderiam a atitudes ditas “primitiva”, “ocidental” e “oriental”. De cada uma delas decorreriam objetivos últimos das sociedades humanas bastante distintos.

MYRDAL (1962) não se cansa de alertar que comparações interpessoais de utilidade são essencialmente sem sentido, do que decorreria a impossibilidade de embasar funções de bem-estar social e, portanto, embasar cientificamente decisões. BRAYROOKE e LINDBLOM (1972) dissertam sobre a impossibilidade de embasar, a partir de princípios gerais, critérios para avaliar políticas sociais e a tomada de decisão. O teorema da impossibilidade de Arrow é frequentemente interpretado como uma demonstração da impossibilidade de encontrar preferências sociais a partir de preferências individuais (a formalização e a demonstração do teorema podem ser encontradas, por exemplo, em FISHBURN, 1970, e WIEDIJK, 2007; discussões sobre consequências do teorema são apresentadas, por exemplo, por MASKIN, 2009, e ULEN, 2004; uma contestação das interpretações usuais do teorema é feita por TULLOCK, 1967).

Sistemas de indicadores ambientais, pela própria definição bastante ampla de meio ambiente, usualmente envolvem uma quantidade grande de indicadores.

1 É óbvio que de tal classificação não se estaria autorizando derivar uma independência entre descrição e decisão. A descrição nunca é neutra e necessariamente embute em si uma visão de mundo e um viés de decisão. Isso é particularmente evidente no embasamento e na escolha de indicadores.

Isso torna difícil uma apreciação da situação e a tomada de decisões, sendo interessante, portanto, reduzir o número de indicadores, de forma a chegar, idealmente, a um indicador sintético único². PINTÉR *et al.* (2005) observaram uma tendência de desenvolvimento de índices agregados de desenvolvimento sustentável. A redução do número de indicadores usualmente implica perda de informação, o que se constitui em enorme problema.

PELE (2009) informa haver dois métodos principais para reduzir o número de indicadores: seleção e agregação. A *seleção* reduz o número de indicadores usando métodos e técnicas estatísticas que eliminam informação redundante³. A seleção pode ser feita ainda por elementos da teoria da classificação. A agregação implica a construção de um indicador agregado que se constitui em uma função dos indicadores iniciais.

Pele informa ainda a respeito do teorema de impossibilidade de Paun. Tal teorema assevera que um indicador agregado sensível (ou seja, um aumento no valor de um indicador inicial não implica a diminuição do valor do indicador agregado) e não explosivo (ou seja, um pequeno aumento no valor de um indicador inicial não implica em um aumento grande no valor do indicador agregado) é necessariamente

compensatório (ou seja, para que o valor do indicador agregado permaneça constante com a variação do valor de um indicador inicial, é necessário que o valor de outro indicador inicial se altere, do que resulta que valores iguais do indicador agregado possam se referir a situações distintas).

O caráter compensatório de um indicador agregado corresponde a uma deficiência sua em descrever uma realidade. Coloca-se então a pergunta: haveria a possibilidade de desenvolver funções para a criação de indicadores agregados que minimizassem o seu caráter compensatório? Tais funções seriam aplicáveis apenas à descrição (razão pura) ou também se aplicariam à decisão (razão prática)?

O objetivo do presente é apresentar e discutir a aplicação de algumas funções de agregação de indicadores lastreadas em elementos da Termodinâmica e da Teoria da Informação. Para tanto, são apresentados resumidamente os conceitos termodinâmicos de entropia e exergia, ressaltando suas aplicações em outras teorias, em especial a Teoria da Informação e a Ecologia. São apresentados e discutidos três indicadores sintéticos ambientais: a) método de agregação de Zhang *et al.*, baseado na Teoria da Informação; b) indicador sintético de qualidade da água de Huang *et al.*, baseado em considerações de exergia das emissões; c) indicador ecológico de Jørgensen, destinado a descrever a saúde de um ecossistema com base em teoria segundo a qual o conteúdo de exergia de um componente de ecossistema corresponde à probabilidade de produzir o componente considerado em equilíbrio termodinâmico; assim, para os componentes biológicos de um ecossistema, a exergia consiste na probabilidade de produzir a matéria orgânica (termo clássico da exergia) e na probabilidade de encontrar o código genético dos seres vivos do ecossistema (termo da exergia informacional), sendo

obtida uma expressão relacionando ambos os termos; o referido indicador postula que a saúde do ecossistema é adequadamente descrita através de sua exergia e de sua exergia específica. São também sugeridos aqui dois indicadores ecológicos para áreas verdes urbanas. Finalmente, são apresentadas conclusões.

Entropia

A entropia presta-se aos mais diversos usos, conceituações e aplicações. No âmbito da *Termodinâmica Clássica*, ela se relaciona à irreversibilidade, sendo descrita através da desigualdade de Clausius (v., p.ex., VAN WYLEN e SONNTAG, 1976, p.145-182). No âmbito da Mecânica Estatística, ela se relaciona à desordem (v., p.ex., EISBERG e LERNER, 1982, p.472-83, e CASTELLAN, 1983, p.205-17). A entropia presta-se, no âmbito da Teoria da Informação, à medida da quantidade média de informação por mensagem (SHANNON, 1948)⁴. No âmbito da modelagem urbana, regional e de transportes, WILSON (1970) utilizou as conceituações de entropia de JAYNES (1957) e LINDLEY (1965 apud WILSON, 1970, p.9-10). A estrutura de modelos entrópicos voltados à modelagem urbana e de transportes é apresentada por WILSON (1970) e por NOVAES (1981). Em um exemplo bastante didático da aplicação do princípio da maximização da entropia aplicado à modelagem de transportes (MASSER, 1972 apud ESMER, 2005, p.77-87), obtiveram-

4 MUGUR-SCHÄCHTER (2007) se insurge contra o uso do termo informação no âmbito da teoria de Shannon argumentando que, na realidade, a informação transmitida está na consciência do emissor de uma mensagem, e a informação recebida constitui-se na consciência do receptor da mensagem. Assim, o que circula é sempre uma mensagem, nunca uma informação. A fonte emite apenas sinais. Sendo desprovida de consciência, não pode conter nenhuma informação.

2 A rigor, um indicador sintético corresponderia a um índice. Prefere-se aqui não utilizar essa terminologia, que poderia dar margem a confusões desnecessárias. Um excelente apanhado de terminologias, definições, conceituações e classificações de indicadores de desenvolvimento sustentável é apresentado por GALLOPÍN (1997).

3 Uma técnica estatística para a diminuição do número de variáveis corresponde à análise fatorial. No entanto, nem sempre é possível que a redução de variáveis se faça de forma a manter a perda da quantidade de informação em um nível satisfatório.

se equivalentes soluções numéricas partir da aplicação da equação da Mecânica Estatística, da máxima entropia de Shannon e da maximização condicionada da entropia através de lagrangianos. No âmbito da Ecologia, diversas teorias trataram da termodinâmica da vida e dos ecossistemas, sendo a entropia um conceito fundamental nessa tarefa. Por exemplo, JØRGENSEN (1992, p.149), comentando uma hipótese de Kay segundo a qual os ecossistemas se desenvolvem de forma a degradar o trabalho disponível da maneira mais efetiva (v., p.ex., KAY, 2000), entendeu que essa hipótese implica que os ecossistemas sempre se auto-organizam de forma a que não só a soma da variação de entropia do sistema e do meio seja maior do que zero como também a que ocorra a maximização dessa variação. Alguns outros campos do uso do conceito de entropia são as teorias sociais, em especial a economia, as avaliações de impacto ambiental e a análise do ciclo de vida, sem falar, é claro, de suas aplicações em engenharia, em especial a mecânica e a química, aplicações essas voltadas, em especial, à otimização de energia. Verifica-se, portanto, que o conceito de entropia, pela variedade de suas aplicações em tão distintos ramos do saber e da técnica, mostra-se particularmente fértil e apto à interdisciplinaridade.

Uma prova adicional da fertilidade do conceito de entropia é o fato de ele se prestar como conceito articulador na demonstração da equivalência entre diversas teorias, modelos e métodos utilizados tradicionalmente na modelagem urbana e de transportes. Tais teorias, modelos e métodos são: método de maximização de utilidade condicionada por restrições orçamentárias; modelo de oportunidades intervenientes, desenvolvido por Stouffler e descrito, por exemplo, em NOVAES (1981, p.143-64) e BRUTON (1979,

p.99-102); modelo gravitacional aplicado a geração, atração e distribuição de viagens; e método da maximização condicionada de entropia. A equivalência entre essas teorias, modelos e métodos foi formalmente demonstrada por WILSON (1970, p.100-5, 151-5, 19). Além disso, é notável a similaridade formal entre o método da maximização condicionada de entropia e o modelo logit multinomial (descrito em NOVAES, 1986).

Indicador sintético de Zhang *et al.*

Como visto, a diminuição do número de indicadores usualmente implica a perda de informação. Seria interessante um processo de agregação de indicadores derivado da teoria da informação. ZHANG *et al.* (2006) propuseram que a agregação de indicadores em vista da obtenção de um indicador único se faça segundo a formulação seguinte, lastreada no conceito de entropia informacional.

O indicador referente a um determinado período baseado em entropia informacional pode ser expresso como:

$$\Delta S = -(1/\ln m) \sum_{i=1,n} (q_{ij}/q_i) \ln (q_{ij}/q_i)$$

sendo *i*: índice referente a um indicador de qualidade ambiental; *j*: índice referente a um período; *n*: número de indicadores; *m*: número de períodos; x_{ij} : valor do indicador *i* no evento *j*; q_{ij} : valor normalizado. É feita uma normalização de cada indicador de maneira a eliminar os efeitos dimensionais, transformando, dessa forma, os dados brutos em dados normalizados entre 0 e 1. Para indicadores de melhoria, o valor bruto é dividido pelo máximo valor para gerar o valor normalizado; para indicadores de piora, a menor perda é dividida pelo valor bruto para gerar o valor normalizado:

$$q_{ij} = x_{ij}/x_i^* \text{ sendo } x_i^* = \max(x_{ij})$$

$$q_{ij} = x_i^*/x_{ij} \text{ sendo } x_i^* = \max(x_{ij})$$

sendo x_{ij} o valor do indicador *i* para o evento *j*, e q_{ij} o valor normalizado, calculado a partir dos dados brutos

$$q_j = \sum_{i=1,n} q_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)^5$$

O peso de cada indicador é assim determinado:

$$Q_i = (1 - E_i)/(n - e_e) \quad (\sum_{i=1,n} Q_i = 1, 0 \leq Q_i \leq 1)$$

sendo:

$$E_i = -(1/\ln m) \sum_{j=1,m} (q_{ij}/q_i) \ln (q_{ij}/q_i)$$

sendo, por sua vez:

$$q_i = \sum_{j=1,m} q_{ij}$$

$$e_e = -\sum_{i=1,n} \sum_{j=1,m} (q_{ij}/q_i) \ln (q_{ij}/q_i) \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$$

Na opinião de FILCHAKOVA *et al.* (2007), esse indicador é calculável, mas não sucinto nem útil do ponto de vista de diagnóstico.

Exergia

A exergia é definida como “o máximo trabalho teórico útil obtido quando um sistema *S* é trazido ao equilíbrio termodinâmico com o ambiente por meio de processos nos quais *S* interage somente com seu ambiente” (SCIUBBA e WALL, 2007, p.3). Um sinônimo de exergia é a disponibilidade. O conceito de exergia ou disponibilidade encontra-se formalizado, por exemplo, em VAN WYLLEN e SONNTAG (1976), WALL e GONG (2001) e WALL (2009). DE WULF *et al.* (2008a e 2008b) apresentam uma síntese do conceito. A exergia *E* de um sistema pode ser assim expressa (WALL e GONG, 2001):

$$E = U + P_0V - T_0S - \sum_i \mu_{i0}n_i$$

5 Provavelmente há um erro no trabalho original, que apresenta $q_{ij} = \sum_{i=1,n} 1_{ij}$.

sendo U a energia interna do sistema; V o volume do sistema; S a entropia do sistema; n_i o número de moles das diferentes substâncias i no sistema; P_0 a pressão do ambiente; T_0 a temperatura absoluta do ambiente; μ_{i0} o potencial químico generalizado da substância i no ambiente. Da expressão acima podem ser derivados, como casos especiais da exergia, todos os outros potenciais termodinâmicos, como a energia livre de Gibbs, a energia livre de Helmholtz e a entalpia (WALL e GONG, 2001).

WALL (2009, p.70-8) relaciona a exergia à teoria de informação, sendo obtida a seguinte expressão:

$$E = k \ln 2 T_0 I$$

sendo k a constante de Boltzmann ($1,38054 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$); T_0 a temperatura absoluta do ambiente; I a informação ou capacidade de informação, expressa em *binary units* (bits). Assim, à temperatura ambiente, a quantidade de exergia relacionada a 1bit de informação é aproximadamente $2,9 \cdot 10^{-21} \text{ J}$.

LEDUC e VAN KANN (2010) e VAN KANN e DE ROO (2009) apresentaram propostas de aplicação do conceito de exergia ao planejamento regional para obter locações espaciais de atividades de forma tal a otimizar o fluxo exergético.

FILCHAKOVA *et al.* (2007) e PHDUNGSILP (2007) são um pouco pessimistas em relação à possibilidade de avaliação de sistemas urbanos através do conceito de exergia. Mesmo assim, BALOCCO *et al.* (2004) utilizaram o método denominado *Extended Exergy Accounting* (EEA) para avaliar a sustentabilidade de uma área urbana através do estudo do ciclo de vida de edificações. Para tanto, foram definidos dois índices termodinâmicos, η_I e η_{II} , que mostram a eficiência das edificações em relação à primeira e à segunda leis da Termodinâmica. Essa metodologia proporcionou um critério ambiental de ordem termodinâmica para a seleção de

alternativas, estratégias e projetos tecnológicos que produzam impactos ambientais menores correlacionados aos maiores índices η_{II} de exergia.

Indicador sintético de Huang et al.

HUANG *et al.* (2007) oferecem um interessante exemplo de uso do conceito de exergia para a definição de um indicador sintético de poluição da água. Eles asseveram que qualquer indicador sintético proposto seria arbitrário e não descreveria de forma adequada o nível de poluição do corpo d'água. Por outro lado, eles observam que, no caso de emissões, a exergia poderia ser considerada como o potencial de dano ao meio ambiente por conduzir a reações indesejáveis e incontroláveis com componentes do meio ambiente. Assim, a exergia incorporada nas emissões é uma medida efetiva do potencial de impacto no meio ambiente. Quanto mais exergia uma emissão carrega, mais ela se desvia do meio ambiente. Uma emissão de substâncias que são comuns no meio ambiente, como, por exemplo, vapor ou água, carrega menos exergia que emissões de substâncias que são menos comuns, como, por exemplo, metais pesados ou resíduos radioativos. Dessa forma, a quantidade de exergia contida na emissão constituir-se-ia em um excelente indicador sintético. GONG e WALL (2001) apresentam uma discussão mais aprofundada do uso do conceito de exergia na construção de indicadores de sustentabilidade, tendo concluído que a exergia é um indicador adequado e tendo recomendado mais pesquisa nessa área.

O cálculo da exergia de um curso d'água pode ser realizado segundo formulação apresentada por VALERO *et al.* (2010), GALLEGOS-MUÑOZ *et al.* (2003) e MARTINEZ *et al.* (2012). Assim, tem-se para uma seção do curso d'água:

$$B = q \cdot \rho_w \cdot b = m' \cdot b$$

sendo B : exergia absoluta (kW); q : vazão (l.s^{-1}); ρ_w : densidade da

solução (kg.l^{-1}); b : exergia específica (kJ.kg^{-1}); m' : fluxo de massa (kg.s^{-1}).

A exergia específica b tem componentes térmico, mecânico, químico, de concentração, cinético e potencial. Aqui interessam apenas o componente químico q_{ch} e o componente de concentração q_c :

a) componente químico

$$q_{ch} = [\sum_i y_i (\Delta G_f + \sum_e n_e b_{che})]_p - [\sum_i y_i (\Delta G_f + \sum_e n_e b_{che})]_0$$

sendo y_i : molalidade relativa do parâmetro i (kmol.kg^{-1}); ΔG_f : energia de formação de Gibbs (kJ.kmol^{-1}); n_e : quantidade em kmol de cada elemento e contido em um kmol da substância (kmol); b_{che} : exergia química padrão do elemento e (kJ.mol^{-1}). O índice 0 refere-se às propriedades da água no ambiente de referência, enquanto o índice p refere-se ao corpo d'água em consideração. Sendo a exergia o máximo trabalho que um sistema é capaz de realizar quando trazido ao equilíbrio com o ambiente, torna-se necessário definir o ambiente de referência (v. SZARGUT *et al.* 2005). Um ambiente adequado a ser tomado como referência seria, por exemplo, a água do mar situada no estuário do corpo d'água. Assim, a água de um corpo d'água tem máxima exergia quando aparece como precipitação, e exergia nula no estuário. Considerando a importância dos nutrientes transportados pelo curso d'água para a manutenção da vida no estuário, o valor nulo da exergia química é atingido a alguns quilômetros da costa, quando o equilíbrio com a água do mar é atingido;

b) componente de concentração

$$q_c = RT_0 \sum_i x_i \ln (a_i/a_0)$$

sendo R : constante universal dos gases ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$); x_i : concentração molar em 1kg de solvente ($\text{kmol.kmol}^{-1}.\text{kg}^{-1}$); a_i : atividade da substância i .

A atividade deve ser calculada para: a) a água pura; b) substâncias inorgânicas dissolvidas; c) substâncias orgânicas dissolvidas.

No caso da água pura, a atividade pode ser estimada a partir de estimativa da pressão osmótica, realizada esta a partir de medidas da condutividade elétrica, o que se faz assumindo que a pressão osmótica é uma função da concentração de sais presentes na solução.

No caso de substâncias inorgânicas dissolvidas, a atividade é avaliada a partir de medidas diretas em amostras da concentração de cada eletrólito. A atividade de cada um deles pode ser obtida pela equação $a_i = \gamma_i \cdot m_i$, sendo γ_i o coeficiente de atividade e m_i a molalidade da substância i . O coeficiente de atividade pode ser estimado pela aplicação da equação de Debye-Hückel.

No caso de substâncias orgânicas dissolvidas, tem-se que quando medidas da DQO (demanda química de oxigênio) estiverem disponíveis, uma reação de combustão é suposta assumindo que a matéria orgânica é completamente biodegradável, sendo representada por uma fórmula genérica CH_2O . No entanto, o uso da DQO não é adequado quando a concentração orgânica é muito baixa, como no caso de rios, sendo nesse caso usualmente adotado o TOC (carbono orgânico total) para a obtenção de uma fórmula genérica.

Exergia no âmbito da Ecologia

Jørgensen postulou uma lei para ecossistemas: “Se um sistema tiver um fluxo de exergia por suas fronteiras, ele procurará utilizar tal fluxo de forma a aumentar sua exergia, isto é, mover-se para uma posição distante do equilíbrio termodinâmico; se mais combinações e processos forem oferecidos para utilizar o fluxo de exergia, a organização que for capaz de dar ao sistema a mais alta exergia, sob as condições e perturbações prevalecentes, será a selecionada” (JØRGENSEN, 1992, p. 186). O que essa lei informa é que os ecossistemas se mantêm fora do equilíbrio termodinâmico com o

meio, com um alto grau de organização e de informação em relação a esse meio, e que o fazem de tal forma que sua exergia seja máxima.

BENDORICCHIO e JØRGENSEN (1997 apud DEWULF *et al.*, 2008, p.2223-4) propuseram calcular o conteúdo de exergia de um componente de ecossistema como a probabilidade de produzir o componente considerado no equilíbrio termodinâmico. Para os componentes biológicos de um ecossistema, ela consiste na probabilidade de produzir a matéria orgânica (termo clássico da exergia) e na probabilidade de encontrar o código genético, isto é, a sequência correta de nucleotídeos do DNA (termo da exergia informacional), sendo obtida uma expressão relacionando ambos os termos⁶. DE WIT (2005) e SILOW *et al.* (2011) fornecem uma síntese do caminho para chegar a essa expressão. SVIREZHEV (2000) observou uma analogia entre essa expressão e a medida de Kullback; tal medida, situada no âmbito da Teoria da Informação, corresponde à medida da informação adicional a uma distribuição previamente conhecida. JØRGENSEN *et al.* (2005) aprimoraram os cálculos do conteúdo ecoexergético de seres vivos, apresentando tabelas com os resultados. JØRGENSEN (1992) relatou resultados promissores para a modelagem de ecossistemas utilizando essa lei. SCIUBBA e WALL (2004) e DE WIT (2005) apresentaram críticas a essa abordagem.

Indicador ecológico de Jørgensen

O conteúdo ecoexergético de um ecossistema pode ser utilizado como critério para avaliar a “qualidade”, ou “saúde”, de um ecossistema. Um exemplo pode ser encontrado em JØRGENSEN (2000). CONSTANZA e MAGEAU (1999) conceituam saúde de um

6 Para a exergia assim conceituada, utiliza-se aqui o termo ecoexergia.

ecossistema como uma medida abrangente, multiescalar, dinâmica e hierárquica da resiliência, organização e vigor desse ecossistema. KAY (1991) usa a expressão “integridade ecossistêmica” para se referir à habilidade de um ecossistema em manter sua organização, devendo as medidas dessa integridade refletir os dois aspectos do estado organizacional de um ecossistema: funcional e estrutural. A *função* refere-se às interconexões entre os componentes do sistema; JØRGENSEN (2000) propõe que ela possa ser medida através da quantidade de ecoexergia. A *estrutura* indica o caminho pelo qual a energia se move no sistema; JØRGENSEN (2000) propõe que a ecoexergia armazenada no ecossistema poderia ser um indicador razoável da estrutura. SILOW *et al.* (2011) informam que a ecoexergia, especialmente a ecoexergia estrutural (ecoexergia específica), demonstraram ser bons indicadores da saúde de ecossistemas em muitos estudos de caso de modelagem, experimentais e de campo. Assim, a ecoexergia informaria sobre: a) a distância do equilíbrio termodinâmico, o que se constituiria em uma medida geral da complexidade total do ecossistema; b) estrutura (biomassa e tamanho da rede) e funções (informação disponível) do ecossistema; c) habilidade do ecossistema em sobreviver (expressa através da biomassa e da informação do sistema). A ecoexergia estrutural, ou ecoexergia específica, por seu lado, informaria sobre: a) eficiência no uso de energia pelos organismos; b) conteúdo relativo de informação do ecossistema; c) conseqüentemente, a habilidade do ecossistema em regular interações entre organismos ou grupos de organismos.

JØRGENSEN (2000) avaliou a ecoexergia e a ecoexergia específica de doze ecossistemas costeiros, juntamente com nove outros atributos ecológicos, sendo feitas correlações entre todos esses

atributos. Ele concluiu que os dois conceitos cobrem uma grande gama de importantes propriedades dos ecossistemas, mas que outros indicadores são necessários também para proporcionar uma avaliação suficientemente abrangente da saúde ecossistêmica.

SALAS *et al.* (2005) testaram a capacidade de a exergia (tanto a ecoexergia como a ecoexergia específica) bem como de índices de diversidade (índices de Shannon e Mergalef) distinguir áreas enriquecidas organicamente em uma dada área costeira mediterrânea (El Mar Menor, Espanha). Os resultados mostraram que os índices de ecoexergia e de ecoexergia específica foram capazes de fornecer informação útil a respeito da estrutura da comunidade, mas não foram capazes de distinguir áreas alta e baixamente enriquecidas organicamente, ou afetadas por qualquer outro tipo de poluição, mostrando-se os índices de biodiversidade mais sensíveis à poluição orgânica. Os autores concluíram que a ecoexergia e a ecoexergia específica não são ainda aplicáveis como os únicos indicadores ecológicos de um modo generalizado no campo da gestão ambiental. Portanto, eles ainda requerem aplicações adicionais em diferentes locais e em diferentes condições de forma a estudar mais acuradamente as propriedades da exergia como um indicador ecológico. Eles informaram ainda que os índices de diversidade e o índice de exergia mostraram uma correlação positiva significativa na descrição do estado nas comunidades do fundo. No entanto, os índices de diversidade pareceram ser mais sensíveis à influência do conteúdo de matéria orgânica nos sedimentos do que o índice de exergia. Por outro lado, nenhum dos índices de diversidade respondeu à concentração de metais pesados, embora ambos pareçam ter sido influenciados pela granulometria e pelo intervalo de salinidade.

MUYS e QUIJANO (2002) estruturaram um sistema de indicadores ecológicos destinados à avaliação de impactos do uso da terra em bases teóricas absolutamente análogas. A partir de considerações de maximização de ecoexergia, os autores lançaram a hipótese segundo a qual, para qualquer local, a vegetação potencial natural, isto é, o clímax, constitui-se no ecossistema com o mais alto controle energético possível para o local, sendo por isso considerada no método proposto pelos autores como referencial. Dessa forma, eles definiram 19 indicadores, agrupados em 4 temas (solo, água, vegetação e biodiversidade).

Com base em todas as considerações acima, são sugeridos aqui dois indicadores para a qualidade ecológica de uma determinada área verde urbana. O primeiro corresponde à relação entre o conteúdo ecoenergético da biomassa dessa área e o conteúdo ecoenergético da biomassa relativo à maturidade (clímax, conforme ODUM, 1983, p.469-73) do local em que a área em questão se localiza. O segundo indicador corresponde à relação entre a ecoexergia específica da biomassa dessa área e a ecoexergia relativa à maturidade do local em que a área em questão se localiza. Tal proposta supõe ser desprezível a informação contida na rede de relações ecológicas entre os organismos perante a informação contida na biomassa dos organismos e em seus genes.

Para o cálculo desses indicadores aqui propostos, tem-se que a ecoexergia e a ecoexergia específica podem ser estimadas segundo formulação e parâmetros apresentados, p.ex., em SILOW *et al.* (2011). Quando tais cálculos se referirem a áreas verdes, são necessários ainda alguns parâmetros adicionais, que podem ser estimados, por exemplo, a partir de dados apresentados nas seguintes fontes: a) biomassa de gramíneas e leguminosas (PEREIRA, 2008); b)

biomassa aérea de árvores (SILVEIRA *et al.*, 2008, e LIMA, 2010); c) relação entre biomassa total e biomassa aérea (FORSTER e MELLO, 2007). Para o cálculo da ecoexergia da maturidade, os parâmetros seguintes podem ser adaptados de dados constantes, por exemplo, das seguintes fontes: a) exergia da maturidade armazenada em diversos ecossistemas (FATH *et al.*, 2004); b) biomassa da maturidade em diversos ecossistemas (LIMA, 2010).

CONCLUSÕES

Com frequência a agregação de indicadores ambientais se mostra necessária e útil. Porém, usualmente apresenta algumas dificuldades:

- a) ocorre perda de informação na agregação;
- b) a função de agregação é arbitrária;
- c) a função de agregação é compensatória, com isso atribuindo um mesmo valor numérico a situações distintas.

No presente foram apresentadas algumas funções de agregação lastreadas na Termodinâmica e na Teoria da Informação, apresentando elas, portanto, algum respaldo teórico. Desse respaldo teórico decorre que as dificuldades elencadas acima como usualmente associadas à agregação desaparecem.

Isso se faz, porém, ao custo de sacrificar a simplicidade e a facilidade de compreensão necessárias a indicadores ambientais.

Na introdução, destacou-se o caráter duplo dos indicadores ambientais, associados à descrição e à decisão. O lastro teórico das funções de agregação aqui apresentadas trabalha a favor da descrição. Ele o faz também a favor da decisão?

Uma vez que a decisão se faz respaldada não apenas em conhecimentos científicos e técnicos, mas também em aspectos

éticos, não se pode pretender que alguma teoria científica garanta a qualidade das decisões. Tal é traduzido em termos econômicos por Myrdal ao asseverar não ter sentido a construção de funções de utilidade interpessoais.

Isso poderia ser contornado apelando a aspirações da humanidade tão consensuais que poderiam ser tomadas por proposições necessárias? Flusser nos mostra que elencar tais aspirações universais não se constitui em tarefa trivial; na realidade, nenhuma dessas aspirações seria universal. Porém, mesmo que tais proposições sejam elencadas, Braybrooke e Lindblom mostram que não se pode extrair dedutivamente, a partir de tal elenco de proposições, um caminho seguro para a avaliação de decisões.

Poder-se-ia contornar todas essas dificuldades apelando às pessoas que votassem em suas preferências? O teorema da impossibilidade de Arrow opõe a tais dificuldades sérias. Porém, mesmo essas dificuldades poderiam ser superadas se relaxassem algumas condições presentes no enunciado desse teorema. No entanto, isso esvaziaria a sua interpretação.

Diante de todas essas negações, há algum vislumbre de esperança do ponto de vista teórico? Poder-se-ia parafrasear o filósofo afirmando que o escândalo teórico não está em não se encontrar uma solução a essas dificuldades, mas persistir em procurá-las?

A resposta é pessimista, o que não quer dizer que nada se possa fazer. MUNDA (2012), por exemplo, aplicou à teoria de agregação alguns elementos da teoria da votação e da análise de decisão multicritério, obtendo resultados que poderiam servir de ponto de partida a algumas reflexões pertinentes à questão.

REFERÊNCIAS

- BALOCCO, C. et al. Using exergy to analyze the sustainability of an urban area. **Ecological Economics**, n.48, p.231-44, 2004.
- BRAYBROOKE, D.; LINDBLOM, C.E. **Uma estratégia de decisão social: escolha de políticas alternativas como processo social**. Rio de Janeiro: Zahar, 1972. (Biblioteca de Ciências Sociais).
- BRUTON, M.J. **Introdução ao planejamento dos transportes**. Rio de Janeiro: Interciência; São Paulo: Edusp, 1979.
- CASTELAN, G.W. **Físico-Química**. Rio de Janeiro: LTC, 1983. v.1.
- CONSTANZA, R.; MAGEAU, M. What is healthy ecosystem? **Aquatic Ecology**, n.33, p.105-15, 1999.
- DE WIT, R. Do all ecosystems maximize their distance with respect to thermodynamic equilibrium? A comment on the "Ecological Law of Thermodynamics" (ELT) proposed by Sven Erik Jørgensen. **Scientia Marina**, v.69, n.3, p.427-34, 2005.
- DEWULF, J. et al. Exergy: its potential and limitations in environmental science and technology. **Environmental Science Techn.**, v.42, n.7, p. 2221-32, Feb. 2008a.
- _____. **Illustration of the confusion on the informational exergy concept and on the difference between informational storage and information entropy**, 2008b. Disponível em: <pubs.acs.org>. Acesso em: 11 abr. 2011.
- EISBERG, R.M.; LERNER, L.S. **Física: fundamentos e aplicações**. São Paulo: McGraw-Hill, 1982. v.2.
- ESMER, Ö. **Information theory, entropy and urban spatial structure**. 2005. 248p. Thesis (Doctorate) – The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Middle-East Technical University, Ankara.
- FATH, B.D. et al. Ecosystem growth and development. **BioSystems**, n.77, p.213-28, 2004.
- FILCHAKOVA, N. et al. Quo vadis thermodynamics and the city: a critical review of applications of thermodynamics methods to urban systems. **International Journal of Ecodynamics**, v.2, n.4, p.222-30, 2007.
- FISHBURN, P.C. Arrow's impossibility theorem: concise proof and infinite voters. **Journal of Economic Theory**, n.2, p.103-6, 1970.
- FLUSSER, W. **Fenomenologia do brasileiro: em busca de um novo homem**. Rio de Janeiro: Eduerj, 1998.
- FORSTER, H.W.; MELO, A.C.G. Biomassa aérea e de raízes em árvores de reflorestamentos heterogêneos no vale do Paranapanema. **IF Sér. Reg.**, n.31, p.153-7, jul. 2007.
- GALLEGOS-MUÑOZ, A. et al. On an exergy efficiency definition of a wastewater treatment plant. **Int. J. Thermodynamics**, v.6, n.4, p.169-76, Dec. 2003.
- GALLOPÍN, G.C. Indicators and their use: information for decision-making. In: MOLDAN, B.; BILHARZ, S. (eds.). **Sustainability indicators: a report on the project on indicators of sustainable development**. Chichester: Wiley, 1997. (Scientific Committee on Problems of the Environment, SCOPE, 58). p.13-27.
- GONG, M.; WALL, G. On exergy and sustainable development: indicators and methods. **Exergy Int. J.**, v.1, n.4, pt.2, p.217-33, 2001.
- HUANG, L.Q. et al. Exergy as a unified measure of water quality.

Nonlinear Science and Numerical Simulation, n.12, p.663-72, 2007.

JAYNES, E.T. Information Theory and Statistical Mechanics. **The Physical Review**, v.106, n.4, pt.1, p.620-30, May 1957.

JØRGENSEN, S.E. **Integration of ecosystem theories: a pattern**. Dordrecht: Kluwer, 1992. (Ecology & Environment Volume 1).

_____. Application of exergy and specific exergy as ecological indicators of coastal areas. **Aquatic Ecosystem Health and Management**, n.3, p.419-30, 2000.

_____. et al. Calculations of exergy for organisms. **Ecological Modelling**, n.185, p.165-75, 2005.

KAY, J.J. A nonequilibrium thermodynamic framework for discussing ecosystem integrity. **Environmental Management**, v.15, n.4, p.483-95, 1991.

_____. Ecosystems as self-organizing holarchic open systems: narratives and the Second Law of Thermodynamics. In: JØRGENSEN, S.E.; MÜLLER, F. (eds.). **Handbook of ecosystems theories and management**. [S.I.]: CRC, 2000. p.135-60.

LEDUC, W.R.W.A.; VAN KANN, F.M.G. **Urban Harvesting as planning approach towards productive urban regions**. [Delft]: SREX, 2010.

LIMA, J.A.S. **Estimativas da biomassa acima do solo de florestas secundárias da área de proteção ambiental rio Macacu (RJ)**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010.

MALHEIROS, T.F.; PHILIPPI JR., A. Resultados e perspectivas do I Workshop Internacional de Pesquisa em Indicadores de Sustentabilidade. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, São Paulo, n.11, p.7-15, dez. 2007.

MARTINEZ, A. et al. The hidden value of water flows: the chemical exergy of rivers. **International Journal of Thermodynamics**, v.15, n.1, p.17-25, 2012.

MASKIN, E. The Arrow impossibility theorem: where do we go from here? In: ARROW LECTURES, 2., 2009, New York. **Proceedings...forthcoming**.

MEADOWS, D. **Indicators and information systems for sustainable development: a report to the Balaton Group**. Hartland: The Sustainability Institute, 1998.

MUGUR-SCHÄCHTER, M. Representação e medidas das complexidades sem amputação do sentido. In: MORIN, E.; LE MOIGNE, J.-L. (org.). **Inteligência da complexidade: epistemologia e pragmática**. Lisboa: Instituto Piaget, 2007. (Coleção Epistemologia e Sociedade). p.102-55.

MUNDA, G. Choosing aggregation rules for composite indicators. **Soc. Indic. Res.**, n.109, p.337-54, 2012.

MUYS, B.; QUIJANO, J.G. **A new method for Land Use Impact Assessment in LCA based on the ecosystem exergy concept: internal report**. [Leuven]: Laboratory for Forest, Nature and Landscape Research – KULeuven, 2002.

MYRDAL, G. **Aspectos políticos da teoria econômica**. Rio de Janeiro: Zahar, 1962.

NESS, B. et al. Categorizing tools for sustainability assessment. **Ecological Economics**, n.60, p.498-508, 2007.

NOVAES, A.G. **Modelos em planejamento urbano, regional e de transportes**. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.

_____. **Sistemas de transportes: análise da demanda**. São Paulo: Edgard Blücher, 1986. v.1.

ODUM, E.P. **Basic Ecology**. Philadelphia: Holt-Saunders, 1983.

PELE, D.T. About the impossibility theorem for indicators aggregation. **Journal of Applied Quantitative Methods**, v.4, n.1, Spring 2009.

PEREIRA, A.R. **Como selecionar plantas para áreas degradadas e controle de erosão**. 2.ed. Belo Horizonte: FAPI, 2008.

PHDUNGSILP, A. A thermodynamic framework for urban energetic metabolism. CONFERENCE ON ENERGY NETWORK OF THAILAND, 3., 2007, Bangkok.

PINTÉR, L. et al. **Sustainable development indicators: Proposals for a way forward: Prepared for the United Nations Division for Sustainable Development**. [S.I.]: IISD, 2005.

SALAS, F. et al. Application of the exergy index as ecological indicator of organically enrichment areas in the Mar Menor lagoon (south-eastern Spain). **Energy**, n.30, p.2505-22, 2005.

SCIUBBA, E.; WALL, G. A brief commented history of exergy from the beginnings to 2004. **International Journal of Thermodynamics**, v.10, n.1, p.1-26, Mar. 2007.

SHANNON, C.E. A mathematical theory of communication. **The Bell System Technical Journal**, v.27, n.3, p.379-423, Jul. 1948.

SILOW, E.A. et al. Eco-exergy use for ecosystem health assessment. In: INTERNATIONAL JOURNEY OF EXERGY, 2011, Paris.

SILVEIRA, P. et al. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, Curitiba, v.38, n.1, jan./mar. 2008.

SVIREZHEV, Y.M. Thermodynamics and ecology. **Ecological Modelling**, n.132, p.11-22, 2000.

SZARGUT, J. et al.. **Towards an international Reference Environment of chemical exergy**. [S.l.]: [s.n.], 2005.

TULLOCK, G. The general irrelevance of the general impossibility theorem. **The Quarterly Journal of Economics**, v.81, n.2, p.256-70, May 1967.

ULEN, T.S. The Arrow impossibility theorem. **Law and Economics**, Fall 2004.

VALERO, A. et al. Physical Hydromonics: application of the exergy analysis to the assessment of environmental costs of water bodies: the case of the Inland Basins of Catalonia. **Energy**, v.34, n.12, p.2101-7, Dec. 2009.

VAN KANN, F.M.G.; DE ROO, G. Scaling of multi-functional structures as a spatial argument for low exergy planning. INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART AND SUSTAINABLE BUILT ENVIRONMENTS, 3., 2009, [S.I.].

VAN WYLEN, G.J.; SONNTAG, R.E. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1976.

WALL, G. **Exergetics**. Bucaramanga: [s.n.], 2009. Disponível em: <<http://www.exergy.se/ftp/exergetics.pdf>>. Acesso em: 11 abr. 2011.

WALL, G.; GONG, M. On exergy and sustainable development: conditions and concepts. **Exergy Int. J.**, v.1, n.3, pt.1, p.128-45, 2001.

WIEDIJK, F. Arrow's impossibility theorem. **Formalized Mathematics**, v.15, n.4, p.171-74, 2007.

WILSON, A.G. **Entropy in urban and regional modelling**. London: Pion, 1970.

ZHANG, Y. et al. Analyses of urban ecosystem based on information entropy. **Ecological Modelling**, n.197, p.1-12, 2006.

Recebido em: nov/2011

Aprovado em: out/2013