

# Bases para a aplicação da teoria da informação em ecossistemas, com ênfase na ascendência

Ronaldo Angelini

Unidade de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual de Goiás, Av. Juscelino Kubitschek, 146, Bairro Jundiá, 75110-390, Anápolis, Goiás, Brasil. e-mail: ronangelini@yahoo.com.br

**RESUMO.** Os ecossistemas crescem e desenvolvem-se dentro das restrições termodinâmicas. Uma das formas de se medir o estágio de amadurecimento de um ecossistema é avaliar suas propriedades emergentes, que apesar de não realizarem trabalho no sentido físico, influenciam seu desenvolvimento. Essas propriedades podem ser quantificadas em funções-meta que servem como indicadoras da qualidade do ecossistema. Neste trabalho, são detalhadas, em vários aspectos, duas funções-meta: ascendência e “overhead”. Ambas são baseadas na Teoria de Informação, sendo que a primeira delas reflete o grau de ordem do sistema e a segunda o de desordem. Apesar dos sistemas tenderem à maior organização, um nível de desordem é imprescindível para manter essa mesma ordem. As funções são descritas matematicamente e, através de um exemplo hipotético, os seus cálculos são realizados de forma que possam ser refeitos por interessados no assunto.

**Palavras chave:** ascendência, ecologia, teoria de ecossistemas, overhead.

**ABSTRACT. Information theory in ecosystems: the use of ascendancy and overhead.** Ecosystems grow and develop subjected to thermodynamic constraints. Emergent properties can measure the ecosystem maturity. These properties do not do causal work but they influence the system development and they can be shown as goal functions that indicate the health of ecosystems. In this paper, two goal functions are detailed: ascendancy and overhead. The origin of them is the Information Theory. Ascendancy shows the degree of system order while overhead quantifies the disorder component. Although, systems tend to order increasing ascendancy, a certain disorder degree is indispensable to sustain the order. Ascendancy and overhead are described mathematically and the calculations are exemplified through a hypothetical ecosystem.

**Key words:** ascendancy, ecology, ecosystem theory, overhead.

## Introdução

Todos os seres vivos crescem, desenvolvem-se e morrem. Isso é verdadeiro para organismos e para entidades tomadas em macro-escala como estruturas sociais: empresas, movimentos culturais, comunidades econômicas e ecossistemas. Essas entidades são abstrações criadas para descrever os diversos fenômenos e, se elaboradas de forma quantitativa, permitem o cálculo de taxas e a previsão do comportamento do sistema, auxiliando na solução de problemas de interesse.

Assim, por exemplo, sabe-se que o grau de desenvolvimento de um país pode ser expresso pelo seu Produto Interno Bruto, pela taxa de mortalidade infantil, pelo saldo da balança comercial e pela renda *per capita*. É importante lembrar que, não raramente, essas características, isoladamente, podem mostrar

resultados incongruentes com a vida das populações (aumento de renda *per capita*, por exemplo, não implica a distribuição equitativa dessa renda).

Para os ecossistemas, Odum (1969) descreveu 24 atributos (Tabela 1) ligados aos fluxos internos, ao controle de retro-alimentação (“feedback”) e ao crescimento da diversidade (Christensen, 1994a, 1995). Essa avaliação termodinâmica permite medir o estágio de amadurecimento dos ecossistemas, além de verificar o desempenho de cada componente, alicerçando o manejo de populações naturais.

Infelizmente, os resultados dúbios encontrados nas taxas das estruturas econômicas também ocorrem em ecossistemas. Felizmente, outras interpretações surgiram (Ulanowicz, 1980, 1986; Wulff *et al.* 1989; Higashi e Burns, 1991; Jørgensen, 1992), aperfeiçoando as análises de redes e suas interpretações. Assim, o estado e o amadurecimento

de um sistema podem ser avaliados através das propriedades emergentes. Essas apenas aparecem (“emergem”) quando os objetos estão interligados.

**Tabela 1.** Atributos da sucessão ecológica: tendências esperadas no desenvolvimento de ecossistemas (Odum, 1969)

Atributos dos Ecossistemas	Em desenvolvimento	Maduros
<i>Energia da comunidade</i>		
1 - Produção 1 <sup>ma</sup> Total / Respiração	< 1 >	= 1
2 - Produção 1 <sup>ma</sup> Total / Biomassa	Alta	Baixa
3 - Biomassa / Total de Fluxos	Baixa	Alta
4 - Produção Líquida (rendimento)	Alta	Baixa
5 - Cadeia Trófica	Linear (grazing)	Teia (detritos)
<i>Estrutura da comunidade</i>		
6 - Matéria Orgânica Total	Pequena	Grande
7 - Nutrientes Inorgânicos	Extra-biótico	Intra-biótico
8 - Diversidade (riqueza)	Baixo	Alto
9 - Diversidade (equitabilidade)	Baixo	Alto
10 - Diversidade Bioquímica	Baixo	Alto
11 - Estratificação	Pouco organizado	Bem organizado
<i>História de Vida</i>		
12 - Especialização de nicho	Ampla	Pouca
13 - Tamanho Indivíduo	Pequeno	Grande
14 - Ciclos de vida	Curto, simples	Longo, complexo
<i>Ciclagem de nutrientes</i>		
15 - Ciclos de Minerais	Aberto	Fechado
16 - Troca de nutrientes (org - amb.)	Rápida	Lenta
17 - Regeneração de nutrientes	Sem importância	Importante
<i>Pressão de seleção</i>		
18 - Forma crescimento	"r" - rápido	"k"
19 - Produção	Quantidade	Qualidade
<i>Homeostase total</i>		
20 - Simbiose interna	Não desenvolvida	Desenvolvida
21 - Conservação de nutrientes	Pobre	Boa
22 - Estabilidade (resist. perturb. ext.)	Pobre	Boa
23 - Entropia	Alta	Baixa
24 - Informação	Baixa	Alta

A propriedade emergente é conseqüência dos processos auto-reguladores sendo, portanto, dependente das inter-relações nos sistemas. Se a frase “o todo é maior que a soma das partes” está correta, então a “emergência” constitui-se no “maior” (Müller, 1997). Isso é a essência da filosofia holística e se o ecossistema somente pode ser entendido como um “todo”, ele tem de ser caracterizado por propriedades macroscópicas (emergentes).

Humphreys (1997) apresenta os dois argumentos principais contra as propriedades emergentes: 1. *argumento de exclusão*: propriedades mentais (emergentes) não realizam trabalho e por isso não influenciam o mundo físico (Yablo, 1992); 2. *argumento da causação decrescente*: a única maneira de originar uma propriedade emergente, é originando sua base emergente em um nível inferior e assim sucessivamente (Kim, 1992).

Realmente não se espera que as propriedades mentais realizem trabalho, mas, no que diz respeito ao primeiro argumento, elas são retidas em nossa mente porque acreditamos que afetam o curso do mundo, isto é, o raciocínio, o medo e a esperança

não realizam trabalho no sentido físico do termo, mas certamente influenciam o desenvolvimento do mundo.

O segundo argumento impede a origem da propriedade emergente em mesmo nível, devido a necessidade de estabelecer sua base em nível inferior, podendo levar todas as discussões para um fiscalismo estrito. Assim, se os eventos biológicos ocupam níveis maiores que os físicos, nenhum evento biológico influenciaria o físico. Humphreys (1997) demonstra que no momento de uma fusão entre duas entidades de mesmo nível ou não, uma propriedade emergente se origina. Essa fusão deve ser entendida como uma operação física real, não como mera operação matemática.

Humphreys (1997:2) cita o emaranhado quântico de Schrödinger: “(...) o estado de um componente não pode ser completamente especificado sem referência ao estado de outro componente. Além disso o estado do sistema, determina o estado dos constituintes, mas não vice-versa.” Isso é exatamente o contrário dos dois argumentos colocados.

As relações entre os constituintes existem, pois eles têm as características requeridas para a fusão, originando, nesses fenômenos macroscópicos, as propriedades emergentes. Aos ainda descrentes nesse fato, Humphreys (1997) encerra afirmando que “*certas questões metafísicas não podem ser respondidas (ainda) porque não conhecemos o suficiente*”.

Sistemas ecológicos podem ser analisados como gráficos e rede tróficas e, então, são tratados com técnicas como as de Odum (1969). Complementar a essa maneira, os ecossistemas são vistos como estruturas dissipativas que, à custa de gasto de energia, constroem-se através dos fluxos que, por sua vez, são conseqüência da função termodinâmica do sistema e vice-versa (Nielsen e Ulanowicz, 2000). Nesse caso, as eficiências termodinâmicas podem ser examinadas usando métodos que otimizem o funcionamento do sistema, já que este reage de acordo com um objetivo geral de desenvolvimento (Straskraba, 1980) e dentro das restrições estabelecidas.

Para simular o ecossistema como um todo é suficiente conhecer os intervalos de um conjunto escolhido de parâmetros, representando o “pool gênico” do sistema, e ter um algoritmo operando sobre esses parâmetros, para encontrar os de maior ajuste com a *meta* do sistema. Tal algoritmo é também chamado de *goalfunction* (Straskraba, 1980; Salomonsen, 1992). Aqui, o termo *goalfunction* será traduzido para função-meta.

Neste trabalho, serão abordadas, sob diversos aspectos, a ascendência e duas outras funções-meta a

ela ligadas: “overhead” e capacidade de desenvolvimento. Todas são baseadas na Teoria da Informação.

### Função-meta

As funções-meta agem como indicadores de qualidade do ecossistema, constituindo as propriedades emergentes resultantes dos processos de auto-organização e determinando a direção do desenvolvimento.

Wilhelm e Brüggemann (2000) sugerem dois significados para as funções-meta: a) elas somente demonstram o comportamento do sistema, como no caso dos princípios extremos: todo sistema mecânico comporta-se de um modo que a ação dos componentes é minimizada (princípio hamiltoniano); b) referem-se a sistemas dissipativos possuidores de conjuntos de limites, que são chamados atratores se as trajetórias do sistema aproximam-se deles por longos períodos de tempo. Desse modo, esses conjuntos restringem, termodinamicamente, o desenvolvimento do sistema, coordenados pela função-meta.

Devido ao fato de que as funções-meta identificam um conjunto de parâmetros que para cada intervalo de tempo otimizam o sistema (representado por um modelo), Angelini e Petrere (2000) propuseram o uso de uma delas (“overhead”) como critério de calibração e validação dos modelos.

Muitas funções-meta estão sendo usadas para avaliar os ecossistemas, destacando-se a ascendência (Ulanowicz, 1986, 1997); a exergia (Jørgensen, 1992, 1994); e, a eMergia (Odum, 1986; Brown e McClanahan, 1992). De modo geral, alguns autores estão avaliando os comportamentos dessas funções em diferentes ecossistemas (Christensen, 1994a, 1995), ou em diferentes estados do mesmo ecossistema (Salomonsen, 1992; Ulanowicz, 1996; Marques, *et al.*, 1997). Outro campo de discussão é como as funções-meta podem se relacionar (Christensen, 1994b; Jørgensen, *et al.*, 1995; Nielsen, 1995; Bendoricchio e Jørgensen, 1997). Embora distintas, Patten (1995) mostra que todas elas têm uma base comum na estrutura e dinâmica microscópicas dos estoques de matéria-energia e nos fluxos das redes de ecossistemas.

### Teoria da Informação

As transferências entre componentes (transformações biológicas ou fusões) são imprevisíveis e ocorrem em séries discretas de tempo, podendo então ser trabalhadas pela teoria de probabilidades. Assim, as alterações nas probabilidades das transferências em micro-escala

influenciam e são influenciadas pelo desenvolvimento dos sistemas. O entendimento das alterações nessas probabilidades define o campo da Teoria da Informação (Ulanowicz, 1997).

É corrente a idéia que as probabilidades medem nossa ignorância sobre uma situação determinística. Tendo em vista que Informação é um estado que promove mudanças nas probabilidades assumidas (Tribus e McIrvine, 1971) e que a Teoria da Informação as quantifica, “Informação”, nesse sentido, refere-se aos efeitos que conferem ordem e padrão ao sistema.

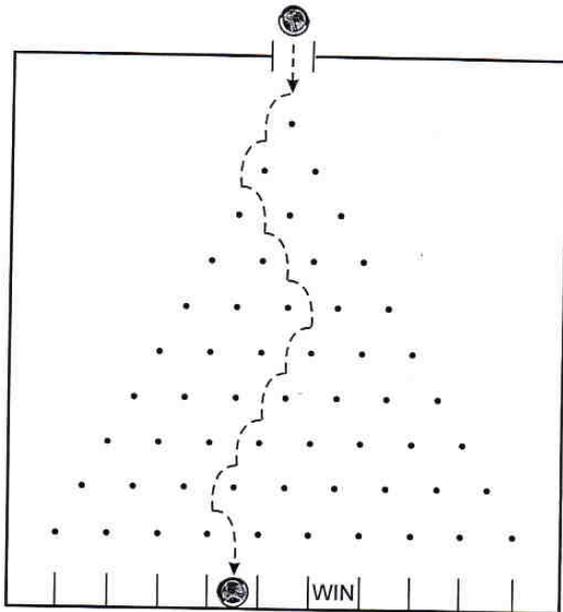
Dessa forma, Informação é uma medida de incerteza, ou melhor, é a diminuição da incerteza resultante da observação de fatos passados, em eventos similares. Assim, toda mudança em estado implica mudança no conteúdo de energia, que implica alteração do conteúdo de informação, podendo, dessa maneira, ser também entendida como a diferença na incerteza do recipiente, antes e depois da recepção da energia, e, conseqüentemente, da informação (Perkins, 1978).

Perkins (1978) e Ulanowicz (1986) afirmam haver grande confusão em Ecologia na definição de Informação. Assim, o índice de diversidade de comunidades de Shannon-Wiener -  $H'$  (Magurram, 1988; Krebs, 1989) é, na verdade, a quantia de incerteza de uma distribuição. Dessa forma, se uma espécie é encontrada, qual a probabilidade que o próximo indivíduo seja da mesma espécie? A resposta mais simples a essa questão é dada pelo índice de Simpson:  $\sum [n_i \star (n_i - 1) / N \star (N - 1)]$ , em que  $n_i$  é o número de indivíduos da  $i$ -ésima espécie e  $N$  é a soma total do número de indivíduos. Já o índice de Shannon é dado por  $-\sum p_i \log p_i$ , em que  $p_i$  é a proporção de indivíduos da espécie  $i$  ( $N_i / N$ ). Portanto, quanto maior o número de espécies, maior a incerteza associada ao arranjo, ou seja, é mais difícil prever a qual espécie pertence o próximo indivíduo amostrado.

As medidas de Informação, invariavelmente, fazem uso de logaritmos, pois: *i*) é conveniente que a medida não seja negativa; *ii*) a medida de incerteza deve ser conclusiva, não havendo, portanto, incerteza residual ( $\log 1 = 0$ ); *iii*) a incerteza da co-ocorrência de dois resultados não relacionados é igual à soma das incertezas dos resultados individuais. De fato, a forma funcional logarítmica de Shannon-Wiener satisfaz essas três propriedades (Aczel e Daroczy, 1975) e essa é uma das razões de seu sucesso na Teoria da Informação.

Essa última propriedade, chamada de aditividade, garante que a complexidade do sistema seja gerada pelo número de combinações de eventos (espécies,

fluxos, encontros) possíveis. Essas combinações aumentam em proporção geométrica e a função logarítmica é justamente a inversa da geométrica ou exponencial (Ulanowicz, 1997). Para demonstrar isso, considere-se a Figura 1.



**Figura 1.** Um jogo simples de escolha no qual uma moeda, inserida no topo da tábua, cai através de uma matriz de pregos e termina em uma das 11 caixas abaixo (somente uma designa o vencedor (WIN) (retirada de Ulanowicz, 1997)

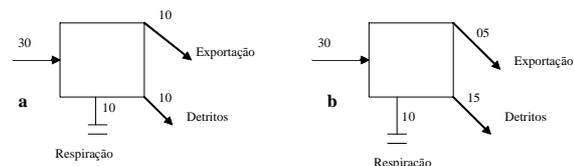
Na Figura 1, a moeda que cai e encontra um prego tem duas opções, seguir à esquerda ou à direita. Visto que haverá 10 encontros com os pregos (10 linhas de pregos) serão possíveis  $2^{10}$  ou 1024 caminhos (trajetórias) que a moeda poderá percorrer e que diferirão umas das outras pelo menos em um dos encontros. Assim, a complexidade do sistema é gerada pelo número de combinações de possíveis encontros, as quais aumentam em proporção geométrica. Para estimar o número de fatores que geram essas combinações, deve-se trabalhar retrocedendo, isto é, ao invés da exponenciação, emprega-se sua função inversa, o logaritmo. Assim,  $\log_2 1024 = 10$ .

Boltzmann e, independentemente, Shannon perceberam a generalidade da operação logarítmica, aplicando-a à frequência de probabilidades. Boltzman postulou que cada configuração tem um potencial de contribuição para a complexidade total, definido como  $s = -k \log p$ , em que  $k$  é uma constante de proporcionalidade e  $p$  é a probabilidade que a configuração ocorrerá (Ulanowicz, 1997).

MacArthur (1955) invocou o índice de Shannon-Wiener para caracterizar a multiplicidade de fluxos entre as populações e assumiu  $p_i$  como sendo a

proporção de energia alimentar da comunidade passando pelo  $i$ -ésimo caminho ("pathway"), na teia trófica. Em termos de fluxos, Informação é definida como alteração nas probabilidades de transferência. Logo é necessário quantificar os fatores que auxiliem na restrição dos fluxos que o compartimento possui.

Para a Figura 2 (a e b) foi calculado o índice de Shannon-Wiener, considerando  $p_i$  como a proporção de cada fluxo sobre o fluxo total. Na Figura 2a, os fluxos de saída são assumidos como tendo o mesmo valor, resultando em  $H' = 1,585$  bits (base logarítmica = 2). Por sua vez, na Figura 2b o resultado é  $H' = 1,458$  bits. Nessa configuração, há menor incerteza devido à restrição imposta em "Exportação" e "Detritos", cujos valores são conhecidos. Dessa forma, a maior informação, na Figura 2b, contribui para a descrição de um padrão mais ordenado (menor incerteza ou menor  $H'$ ) ao invés de aleatório como na Figura 2a. Esse é o conceito fundamental da Teoria de Informação, e, nos modelos de compartimentos, será necessário calcular a Informação média (quantia média de restrição) do sistema. A sessão seguinte mostra como isso é realizado.



**Figura 2.** 2a: fluxos de saída igualmente distribuídos, isto é, sem nenhuma restrição ou informação ( $H' = 1,585$ ); 2b: fluxos de saída do compartimento naturalmente restritos, maior informação ( $H' = 1,458$ )

## Material e métodos

### Demonstração matemática

Com a Informação sobre os fluxos, pode-se calcular as mudanças nas probabilidades de deslocamento de energia ou matéria entre os compartimentos. Em um sistema, todo compartimento transfere fluxo(s) a outro(s). Assim, o fluxo de um componente  $i$  para qualquer outro componente  $j$  será designado como  $T_{ij}$ . Os fluxos originados fora do sistema ("entradas") serão denotados como  $Toj$ . Considerando  $n$  compartimentos, os fluxos destinados para fora do sistema ("saída") irão para o componente  $n+1$  e as dissipações dos compartimentos (por exemplo, respiração) para  $n+2$  (Ulanowicz, 1996). O total dos fluxos do sistema é indicado na Equação 1:

$$T = \sum_i^{n+1} \sum_j^{n+2} T_{ij} \quad (1)$$

em que:  $T$  é o Total de Fluxos do Sistema (em inglês: "total system throughput").

Em um sistema desenvolvido, um fluxo não se propaga aleatoriamente de um componente para todos os outros. Dessa forma, a ambigüidade dos efeitos de um componente é menor, ou seja, há diminuição da incerteza ou aumento de Informação.

Como mencionado anteriormente, a Informação causa mudanças nas probabilidades de um evento. Estima-se a probabilidade dos eventos (fluxos) de um sistema através da Equação 2:

$$f_{ij} = \frac{T_{ij}}{\sum_{k=0}^{n+2} T_{kj}} \quad (2)$$

em que:

$f_{ij}$  - é a probabilidade condicional que um *quantum* (ou partícula de energia/matéria) chegue em  $j$  dado que deixou  $i$ ;

$T_{ij}$  - fluxo que sai de  $i$  e entra em  $j$ ;

$\sum T_{kj}$  - soma de todos os fluxos que saem de  $j$  com  $k$  variando de 0 a  $n+2$ .

Em um sistema altamente articulado tanto a origem quanto o destino dos *quantums* são conhecidos, pois são restritos a poucos componentes. Para determinar a restrição das origens dos fluxos usa-se o vetor  $Q_i$ , calculado pela Equação 3:

$$Q_i = \frac{T_i}{T} \quad (3)$$

em que:

$T_i$  - total de fluxos que saem de  $i$ .

Enquanto que para determinar a restrição de destino dos fluxos tem-se o vetor  $Q_j$  calculado pela Equação 4:

$$Q_j = \frac{T_j}{T} \quad (4)$$

em que:  $T_j$  - total dos fluxos que chegam em  $j$ .

A medida da teoria da informação que melhor expressa a quantia das restrições inerentes ao sistema é a Informação Média Mútua, que é escrita como na Equação 5:

$$I = \sum_i^{n+2} \sum_j^{n+2} f_{ij} * Q_i * \log_2 \left( \frac{f_{ij}}{Q_j} \right) \quad (5)$$

Dessa forma,  $I$  mede a quantia média de restrições aplicadas a um *quantum arbitrário* de unidade, que passa de um compartimento para outro (Ulanowicz, 1997).

A ascendência é dada pelo produto da Informação Média Mútua ( $I$ ) pelo Total de Fluxos do Sistema ( $T$ ). Assim, tem-se a Equação 6:

$$A = I * T \quad (6)$$

que, então, quantifica a parte ordenada da informação do sistema.

Na ausência de grandes distúrbios externos, os sistemas vivos tendem a organizar-se, exibindo uma propensão natural para aumentar em ascendência (aumentar a ordem), que então caracteriza-se como uma função-meta capaz de unificar quase todos os 24 atributos de Odum (1969).

Como todo processo de crescimento, a ascendência tem um limite, denominado Capacidade de Desenvolvimento ( $C$ ). Da Teoria da Informação sabe-se que o limite superior de  $I$  é dado pela união das incertezas ( $H$ ) (Equação 7):

$$H = - \sum_{i=0}^n (Q_i * \log_2 Q_i) \quad (7)$$

E, assim como calculado para a ascendência, a Capacidade de Desenvolvimento do sistema é dada pelo produto do Total de Fluxos do Sistema ( $T$ ) e  $H$  (Equação 8):

$$C = T * H \quad (8)$$

Isso mostra, que os dois fatores que limitam  $C$  são  $T$  (total de fluxos) e  $n$  (número de compartimentos), pois este influencia diretamente  $H$ .

A diferença  $O = C - A$  é conhecida como "overhead". E, em contraste com  $A$ , que mede a porção ordenada da informação,  $O$  é a medida de informação desordenada, que funciona como a energia de reserva, grandemente enriquecida quando a redundância do sistema aumenta (pois o grau de desordem também cresce). Schrödinger (1935), demonstrou que sistemas biológicos devem continuamente bombear desordem para manter a ordem interna. Assim, um sistema não pode nunca

privar-se de todo  $O$ , pois ele é necessário para manter e criar ordem em todos os níveis.

O cálculo de “overhead” também pode ser realizado diretamente através da Equação 9:

$$O = -T \sum_{i=0}^{n+2} \sum_{j=0}^{n+2} f_{ij} * Q_j * \log_2(f_{ij} * Q_j / Q_i) \quad (9)$$

Para auxiliar na análise dessa medida de redundância, a Equação 9 pode ser dividida dentro das quatro categorias de fluxos:

a) Fluxos de Entradas (Equação 10):

$$O_{EN} = -T \sum_{i=0}^n f_{0i} * Q_0 * \log_2(f_{0i} * Q_0 / Q_i) \quad (10)$$

b) Fluxos Intra-compartimentos (Equação 11):

$$O_{IC} = -T \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ij} * Q_j * \log_2(f_{ji} * Q_j / Q_i) \quad (11)$$

c) Fluxos de Saída (Equação 12):

$$O_{SA} = -T \sum_{j=1}^n f_{j,n+1} * Q_j * \log_2(f_{j,n+1} * Q_j / Q_{n+1}) \quad (12)$$

d) Fluxos de Dissipação ou respiração (Equação 13):

$$O_{DS} = -T \sum_{j=1}^n f_{j,n+2} * Q_j * \log_2(f_{j,n+2} * Q_j / Q_{n+2}) \quad (13)$$

$O_{EN}$  depende do número de “entradas” no sistema, bem como de suas magnitudes. Com apenas uma “entrada”,  $O_{EN}$  será muito baixo e influenciará todo o sistema, que para aumentar sua ascendência deverá internalizar sua atividade, em especial a reciclagem, a fim de diminuir sua dependência com os componentes externos (Ulanowicz, 1997).

$O_{IC}$  pode ser considerado uma medida do grau de redundância dos fluxos, cujo custo, ao sistema, é uma taxa de eficiência de conversão menor, já que ligações indiretas dissipam mais energia, pois são intermediadas por outros componentes. Christensen (1995), citando uma comunicação pessoal de Ulanowicz, afirma que  $O_{IC}$  é a medida mais apropriada para estimar a estabilidade do sistema, mas seus resultados são dúbios e apontam entre a escolha do “overhead” total e  $O_{IC}$ , como boas medidas de estabilidade.

$O_{SA}$  e  $O_{DS}$  referem-se às perdas do sistema: o primeiro funciona como um imposto pago pelo sistema e que pode afetar positivamente suas próprias entradas, numa perspectiva de metas

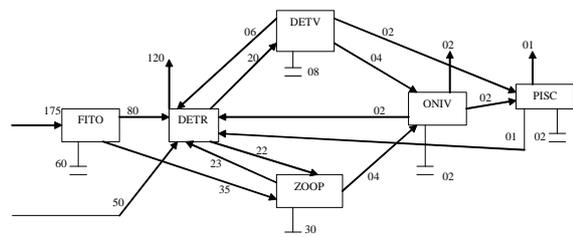
sistemas; enquanto  $O_{DS}$  funciona não apenas como uma imposição da segunda lei, mas como um encargo necessário para manter organização em escalas menores.

As unidades usadas nas medidas de fluxos podem ser várias: gramas de peso úmido\* $m^{-2}$ \*ano $^{-1}$ ; mgCarbono\* $m^{-3}$ \*ano $^{-1}$ ; kcal\* $m^{-2}$ \*dia $^{-1}$ , além de outras. Para a ascendência a unidade é “bits”, pois a base logarítmica usada é 2, se fosse 10 ou  $e$  seria “decis” ou “napiers”, respectivamente.

**Resultados**

**Cálculos**

O diagrama de fluxos da Figura 3 representa um ecossistema aquático hipotético. Apesar de hipotéticos, os valores são baseados em estimativas de ecossistemas reais (como os de Christensen e Pauly, 1993).



**Figura 3.** Ecossistema hipotético. Componentes: FITO: fitoplâncton; DETR: detritos; ZOOP: zooplâncton; DETV: detritívoros; ONIV: onívoros; PISC: piscívoros

O sistema da Figura 3, pode ser visualizado na Matriz Hipotética 1:

	ENTR	FITO	DETR	ZOOP	DETV	ONIV	PISC	SAID	DISS	soma
ENTR	175	50								225
FITO		80	35						60	175
DETR			22	20				120		162
ZOOP			23		4				30	57
DETV			6		4	2			8	20
ONIV			2			2	2		2	8
PISC			1				1	2	4	4
SAID										0
DISS										0
Soma	0	175	162	57	20	8	4	123	102	<b>651</b>

O Total de Fluxos do Sistema ( $T$  - equação 1) é 651 (canto inferior direito) e, sendo o ecossistema balanceado, a soma das linhas (o que entra nos compartimentos) é igual à soma das colunas (o que sai dos compartimentos).

As probabilidades condicionais ( $f_{ij}$ ) são calculadas dividindo cada entrada pela soma da linha correspondente de cada componente (Equação 2), resultando na Matriz 1.1:

	ENTR	FITO	DETR	ZOOP	DETV	ONIV	PISC	SAID	DISS
ENTR	0,778	0,222							
FITO		0,457	0,200						0,343
DETR			0,136	0,123				0,741	
ZOOP		0,404			0,070				0,526
DETV		0,300			0,200	0,100			0,400
ONIV		0,250				0,250	0,250		0,250
PISC		0,250					0,250	0,500	
SAID									
DISS									

Usando a Matriz 1, os vetores  $Q_i$  (Equação 3) e  $Q_j$  (Equação 4) são calculados como a soma das colunas e linhas, respectivamente, e normalizados por  $T$ :

$Q_i$	$Q_j$
0,346	0
0,269	0,269
0,249	0,249
0,088	0,088
0,031	0,031
0,012	0,012
0,006	0,006
0	0,189
0	0,157

Agora todos os elementos para o cálculo da ascendência foram gerados. Usando a Equação 5 tem-se Informação Média Mútua a partir da matriz de informação (Matriz 1.2):

	ENTR	FITO	DETR	ZOOP	DETV	ONIV	PISC	SAID	DISS	Soma
ENTR	0,412	0,013								0,399
FITO		0,108	0,064							0,104 0,276
DETR			0,021	0,062				0,363		0,446
ZOOP		0,025			0,015				0,081	0,121
DETV		0,002			0,025	0,012			0,017	0,056
ONIV		0,00..				0,016	0,001	0,002	0,02	
PISC		0,00..					0,00..	0,005	0,006	
SAID										0
DISS										0
soma	0	0,412	0,122	0,085	0,062	0,04	0,029	0,365	0,209	1,324

A ascendência (Equação 6) é calculada pelo produto dessa medida de informação ( $I = 1,324$ ) com o total dos fluxos ( $T = 651$ ). O valor da ascendência é, portanto,  $A = 862,1$ .

O limite superior da informação é dado pela Equação 7, que utiliza-se do vetor  $Q_i$ , resultando em  $H = 2,124$ . O produto de  $H$  e  $T$  (Equação 8) resulta na Capacidade de Desenvolvimento do Sistema ( $C = 1383$ ). A energia de reserva do sistema ou "overhead" é calculado pela diferença entre  $C$  e  $A$  ou pela Equação 9, resultando em  $O = 520$  ou 37,65% de  $C$ .

Subdividindo  $O$  (Equações 10, 11, 12 e 13) tem-se para as diferentes categorias de fluxos os seguintes resultados: Entradas -  $O_{EN}$ : 84,7 (6,13% de  $C$ ); Intra-compartimentos -  $O_{IC}$ : 261,6 (18,9% de  $C$ ); Exportação  $O_{EX}$ : 23,1 (1,7% de  $C$ );  $O_{DS}$  Dissipação: 150,9 (10,9% de  $C$ ).

Os resultados mostram que o ecossistema possui uma energia de reserva ainda considerada alta (37,65%), tornando-o capaz de absorver mudanças em seus fluxos (resiliência) ou hábil para retornar ao estado anterior depois de um distúrbio temporário (estabilidade). Essa energia de reserva é concentrada principalmente nos fluxos entre os compartimentos ( $O_{IC} = 18,9\%$  de  $C$ ), evidenciando, nesse caso, a importância da redundância dentro do sistema.

### Simulações

Algumas simulações realizadas na Matriz 1, não demonstradas aqui por motivo de brevidade (para uma descrição completa veja Angelini, 2002), permitem-nos inferir que o sistema é mais afetado por alterações nos componentes com maior número de ligações (ZOOP e DETR). A alteração de componentes como DETV, ONIV e PISC atingem pouco os valores originais. Apesar disso, não apenas o número de fluxos modifica a estabilidade do sistema, mas também a origem, destino e intensidade destes. A alteração dos fluxos ligados à DETR causa mudanças positivamente relacionadas com  $O_{IC}$ , mostrando a importância da ciclagem interna para o sistema. O agrupamento de compartimentos, praticamente não causa modificações na ascendência ou no "overhead". Isso confirma a idéia de Hirata e Ulanowicz (1984) ao revelarem que é impossível aumentar a ascendência agrupando os componentes, principalmente os de níveis tróficos altos (Christensen, 1994a).

### Discussão

Como se pôde notar, em nenhum momento, a biomassa do sistema e/ou de seus compartimentos foi usada para os cálculos aqui descritos. Sendo uma medida de organização, a ascendência depende apenas indiretamente do tamanho e, num sistema, qualquer componente é sempre refletido em seus fluxos. Como já citado da física quântica "...um componente não pode ser especificado sem referência ao outro..." (Humphreys, 1997).

Crescer e desenvolver-se são os objetivos de quaisquer entidades em macroescala. O crescimento é refletido nos fluxos, e o desenvolvimento é representado pelo aumento de informação. Esses dois atributos combinados geram a organização que, por sua vez, é medida pela ascendência. Ulanowicz (1986) postulou que os sistemas tendem a aumentar em ascendência, garantindo estabilidade. Apesar disso, alguns estudos apontam para o fato de que o "overhead" é a medida mais positivamente relacionada com a estabilidade e, ainda, supõe maturidade.

A Teoria da Informação permite a dissecação do comportamento dos ecossistemas de acordo com sua parte ordenada (ascendência) e desordenada (“overhead”). Apesar de fundamentalmente incompatíveis, elas são aspectos complementares e essenciais para a operação e persistência dos sistemas.

Assim, ascendência e “overhead” podem ser usados como índices de saúde e integridade dos ecossistemas, pois podem quantificar os efeitos de perturbações, validando propostas de manejo que minimizem efeitos negativos sobre os ambientes.

A hipótese central “ulanowiquiana” é a de um movimento natural em direção ao aumento da ordem. É certo, porém, que algum grau de desordem deve existir necessariamente. A determinação da quantia de “overhead” ainda é uma incógnita e, provavelmente, varia entre os ecossistemas e seus diferentes estágios de amadurecimento. Em parte, esse desconhecimento é devido ao fato de que o comportamento do sistema não é inteiramente ditado por seus constituintes, mas autônomo em relação a eles.

A Teoria da Ascendência pode, também, ser usada em outros campos. Ulanowicz (1997), por exemplo, prova que, na Economia Ecológica, ela pode medir um recurso particular no contexto do funcionamento do sistema, mesmo que tal recurso não tenha tradicionalmente valor de mercado. Também em redes neurais, a ascendência mede a habilidade da rede em interpretar padrões de estímulos (Bosworth e Ulanowicz, 1991).

O estudo do desenvolvimento dos ecossistemas já foi descrito pejorativamente como “odumania” e seus críticos ressaltam falhas teóricas de sua base energética (Mansson e McGlade, 1993) e no modo heurístico e/ou empírico de tratar as questões pertinentes, isto é, os 24 atributos de Odum (1969) (Wilhelm e Brüggeman, 2000).

Patten (1993) argumenta que, na realidade, a teoria de Odum tem como base não a ecologia energética, mas a organização ecológica (teoria de sistemas). Quanto à teoria ser puramente heurística, foi demonstrado neste trabalho que Ulanowicz encapsulou os atributos de Odum (1969) nos conceitos da Teoria da Ascendência, permitindo a descrição do sistema como um todo.

Por fim, não há dúvida de que o formato do método da ciência de falseamento de hipóteses, às vezes, desencoraja estudos fenomenológicos como o aqui mencionado. Mas, muitas respostas frente aos problemas ambientais da sociedade requerem a busca de outros métodos e o aqui apresentado parece ser muito promissor.

## Agradecimentos

Este trabalho é parte da tese de doutorado do autor na Universidade Estadual de Maringá (Programa: Ecossistemas Aquáticos Continentais), orientado pelo Prof. Dr. Miguel Petreire Jr. Os professores Drs. A.A. Agostinho e L.C. Gomes também colaboraram com valiosas críticas.

## Referências

- ACZEL, J.; DAROCZY, Z. *On measures of information and their characterizations*. New York: Academic Press, 1975.
- ANGELINI, R. *Desenvolvimento de Ecossistemas: a planície de inundação do alto rio Paraná e o reservatório de Itaipu*. 2002. Tese (Doutorado em Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2002.
- ANGELINI, R.; PETRERE, M. A model for the plankton system of the Broa reservoir, São Carlos - Brazil. *Ecol. Model.*, Amsterdam, v. 126, n. 2-3, p.131-137, 2000.
- BENDORICCHIO, G.; JØRGENSEN, S.E.. Exergy as goal function of ecosystems dynamic. *Ecol. Model.*, Amsterdam, v. 102, n.1, p.5-15, 1997.
- BOSWORTH, K.W.; ULANOWICZ, R.E. The possible role of ascendancy in neural networks. In: AMERICAN MATHEMATICAL SOCIETY, SOUTHEASTERN SECTIONAL MEETING, 1., 1991, Tampa. *Anais...*, Tampa, FL., 1991. p. 122-123.
- BROWN, M.T.; MCCLANAHAN, T.R. Emergy analysis perspectives of Thailand and Mekong river dam proposals. *Report to the Cousteau Society*. Paris, v.1, n.1, p. 1-60, 1992.
- CHRISTENSEN, V. On the behavior of some proposed goal functions for ecosystem development. *Ecol. Model.*, Amsterdam, v. 75/76, n.1, p.37-49, 1994a.
- CHRISTENSEN, V. Emergy-based ascendancy. *Ecol. Model.*, Amsterdam, v. 72, n.1, p.129-144, 1994b.
- CHRISTENSEN, V. Ecosystem maturity - towards quantification. *Ecol. Model.*, Amsterdam, v. 77, n.1, p.3-32, 1995.
- CHRISTENSEN, V.; PAULY, D (Ed.). *Trophic models of aquatic ecosystems*. Manila, Filipinas: ICLARM Press, 1993.
- HIGASHI, M.; BURNS, T. P. *Theoretical studies of ecosystems. The network perspective*. Cambridge: Cambridge University Press., 1991.
- HIRATA, H.; ULANOWICZ, R.E. Information theoretical analysis of ecological networks. *International J. Syst. Sci.*, New York, v.15, n.1, p.261-270, 1984.
- HUMPHREYS, P. How properties emerge. *Philos. Sci.*, New York, v. 64, n.1, p.1-17, 1997.
- JØRGENSEN, S.E. Parameters, ecological constraints and exergy. *Ecol. Model.*, Amsterdam, v. 62, n.1, p.163-170, 1992.
- JØRGENSEN, S.E. *Fundamentals of ecological modelling*. 2.ed. Amsterdã: Elsevier, 1994.

- JØRGENSEN, S.E. *et al.* Emergy, environ, exergy and ecological modelling. *Ecol. Model.*, Amsterdam, v.77, n.1, p.99-109, 1995.
- KIM, J. Downward Causation in emergentism and nonreductive physicalism. In: BECKERMANN, A. *et al.* (Ed.). *Emergence or reduction: essays on the prospects of nonreductive physicalism*. New York: Walter de Gruyter, 1992. cap.4, p.119-138.
- KREBS, C.J. *Ecological Methodology*. New York: Harper and Row, 1989.
- MACARTHUR, R.H. Fluctuations of animal populations and a measure of community stability. *Ecology*, v. 36, n.1, p.533-536, 1955.
- MAGURRAN, A.E. *Ecological diversity and its measurement*. Cambridge: Cambridge University Press, 1988.
- MANSSON, B.A.; MCGLADE, J.M. Ecology, thermodynamics and H. T. Odum's conjectures. *Oecologia*, New York, v. 93, n.1, p.582-596, 1993.
- MARQUES, J.C. *et al.* Analysis of the properties of exergy and biodiversity along an estuarine gradient of eutrophication. *Ecol. Model.*, Amsterdam, v. 102, n.1, p.155-167, 1997.
- MÜLLER, F. State-of-the-art in ecosystem theory. *Ecol. Model.*, Amsterdam, v.100, n.1, p. 135-161, 1997.
- NIELSEN, S.N. Optimization of exergy in a structural dynamic model. *Ecol. Model.*, Amsterdam, v. 77, n.1, p.111-122, 1995.
- NIELSEN, S. N.; ULANOWICZ, R.E. On the consistency between thermodynamical and network approaches to ecosystems. *Ecol. Model.*, Amsterdam, v.132, n.1, p. 23- 31, 2000.
- ODUM, E.P. The Strategy of Ecosystem Development. *Science*, v. 104, n.1, p. 262-270, 1969.
- ODUM, H.T. Emergy in ecosystems. In: POLUNIN, N. (Ed.). *Environmental monographs and symposia*. New York: John Willey, 1986. cap.8, p. 337-369.
- PATTEN, B.C. Toward a more holistic ecology, and science: the contribution of H. T. Odum. *Oecologia*, New York, v. 93, n. 1, p. 597-602, 1993.
- PATTEN, B.C. Network integration of ecological extremal principles: exergy, emergy, power, ascendancy, and indirect effects. *Ecol. Model.*, Amsterdam, v.79, n.1, p.75-84, 1995.
- PERKINS, R.J. Information Theory and Ecology. *Int. J. Ecol. Environ. Sci.* Cambridge, v.4, n.1, p.61-73, 1978.
- SALOMONSEN, J. Examination of properties of exergy, power and ascendancy along a eutrophication gradient. *Ecol. Model.*, Amsterdam, v.62, n.1, p.171-181, 1992.
- SCHRÖDINGER, E. Discussion of probability relations between separated systems. In: PROCEEDINGS OF THE CAMBRIDGE PHIL. SOC. XXXI, 1935, Berlim. *Anais...* Berlim, 1935. p.555-563.
- STRASKRABA, M. Cybernetic categories of ecosystem dynamics. *ISEM J.*, Varsóvia, v.2, n.1, p.81-96, 1980.
- TRIBUS, M.; MCIRVINE, E.C. Energy and information. *Sci. Am*, California, v. 225, n.1, p. 179-188, 1971.
- ULANOWICZ, R.E. An hypothesis on the development of natural communities. *J. Theor. Biol.*, Los Angeles, v. 85, n.1, p. 223-245, 1980.
- ULANOWICZ, R.E. *Growth and development: ecosystem phenomenology*. New York: Springer Verlag, 1986.
- ULANOWICZ, R.E. Trophic flow networks as indicators of ecosystem stress. In: POLYS, A.G.; WINEMILLER, K.O. (Ed.). *Food webs. Integration of patterns and dynamics*. New Jersey: Chapman & Hall, 1996, cap. 15, p. 358-368.
- ULANOWICZ, R.E. *Ecology, the ascendent perspective*. New York: Columbia University Press, 1997.
- WILHELM, T.; BRÜGGEMANN, R. Goal functions for the development of natural systems. *Ecol. Model.*, Amsterdam, v.132, n.1, p.231-246, 2000.
- WULFF, F. *et al.* *Coastal and estuarine studies. Network analysis in marine ecology - methods and applications*. New York: Springer-Verlag, 1989.
- YABLO, S. Mental causation. *Philos. Rev.*, London, v.101, n.1, p.245-280, 1992.

Received on January 28, 2002.

Accepted on March 02, 2002.