



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE BIOCÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
MESTRADO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

MICHELLE CRISTINA VARELA DOS SANTOS

MODELO ENERGÉTICO AUTO-ORGANIZADO PARA A ATIVIDADE COLETIVA
EM TECIDOS DE ANIMAIS SIMPLES

NATAL/RN

2017

MICHELLE CRISTINA VARELA DOS SANTOS

**MODELO ENERGÉTICO AUTO-ORGANIZADO PARA A ATIVIDADE COLETIVA
EM TECIDOS DE ANIMAIS SIMPLES**

Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas na Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Biológicas.

Área de concentração: Biologia Estrutural e funcional.

Orientador: Gilberto Corso

Co-orientador: Gustavo Zampier

NATAL/RN

2017

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

Sistema de Bibliotecas - SISBI

Catálogo de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Setorial Prof. Leopoldo Nelson - Centro de

Biociências – CB

Santos, Michelle Cristina Varela Dos.

Modelo energético auto-organizado para a atividade coletiva em tecidos de animais simples / Michelle Cristina Varela Dos Santos. - Natal, 2017.

68 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Biociências. Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Corso.

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Zampier dos Santos Lima.

1. Sistemas Complexos - Dissertação. 2. Criticalidade Auto-Organizada - Dissertação. 3. Animais simples - Dissertação. I. Corso, Gilberto. II. Lima, Gustavo Zampier dos Santos. III. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. IV. Título.

RN/UF/BSE-CB

CDU 573



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE BIOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
MESTRADO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

**MODELO ENERGÉTICO AUTO-ORGANIZADO PARA A ATIVIDADE COLETIVA
EM TECIDOS DE ANIMAIS SIMPLES**

Professor Dr. Gilberto Corso (Orientador)
Departamento de Biofísica e Farmacologia - UFRN

Professor Dr. Gustavo Zampier (Co-orientador)
Departamento de Departamento de Ciência e Tecnologia - UFRN

Professor Dr. Umberto Laino Fulco (Examinador interno)
Departamento de Biofísica e Farmacologia - UFRN

Professor Dr. José Garcia Vivas Miranda (Examinador externo)
Departamento de Física - UFBA

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por todo empenho em garantir minha educação. Aos meus familiares e amigos por trilharem comigo essa jornada.

Agradeço a minha filha por ela simplesmente existir e ser meu comburente para vida.

Agradeço ao meu orientador, Professor Gilberto Corso por todos os ensinamentos passados e por acreditar em minha capacidade, confiar no meu trabalho e ser tão generoso, compreensivo e companheiro durante todo esse período de estudos.

Agradeço ao meu co-orientador Professor Gustavo Zampier por me orientar e ajudar tantas vezes durante a realização deste trabalho, sempre de forma assertiva, atenciosa e paciente.

Agradeço ao Professor Umberto Laino Fulco pelos conselhos e sugestões ao longo da confecção deste trabalho.

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Ciências Biológicas da UFRN pela oportunidade e trabalho realizado.

Agradeço ao professor Dr. José Garcia Vivas Miranda pelas contribuições para com o meu trabalho.

Agradeço aos meus queridos colegas de mestrado pelo suporte e ajuda desde o início até o dia de apresentação da minha dissertação, em especial: Fagner, Thanyria, Felipe, Cris, Genilsa, Marcel, Carol, Gabriel, Maíse, Milena...

Por fim agradeço a todos que de forma direta ou indireta me ajudaram na realização deste trabalho.

“Assim como casas são feitas de pedras, a ciência é feita de fatos. Mas uma pilha de pedras não é uma casa e uma coleção de fatos não é, necessariamente, ciência”.

Jules Henri Poincare

“Na vida, não existe nada a temer, mas a entender”.

Marie Curie

RESUMO

Entre o final do século XX e início do século XXI, muitos cientistas passaram a se interessar na dinâmica de sistemas complexos e os fenômenos envolvidos, tais como, os sistemas críticos. Esses sistemas não-lineares apresentam propriedades descritas por leis de potência. Fenômenos críticos constituem sistemas complexos, que não possuem propriedades bem descritas pelas leis da termodinâmica. O presente trabalho apresenta um modelo energético crítico auto-organizado, ou seja, que possui Criticalidade Auto-Organizada (SOC), criado para explicar a atividade coletiva espontânea em um tecido animal sem a necessidade de um controle muscular ou de sistema nervoso central. O modelo protótipo descreve um tecido epitelial cuboide formado por uma única camada de células, como a cavidade digestiva interna de alguns animais simples ou primitivos. O tecido é composto por células que absorvem nutrientes e armazenam energia, com probabilidade p , para participar de atividade do tecido. Cada célula pode estar em dois estados: o de alta energia capaz de se tornar ativa ou de baixo consumo metabólico e em repouso. Qualquer célula pode ser ativada espontaneamente, com uma probabilidade muito baixa, e então propagar uma atividade coletiva entre seus vizinhos que compartilham energia suficiente. As células do tecido que participam da atividade consomem toda a sua energia. Foi observada uma relação tipo lei de potência, $P(s) \propto s^{-\gamma}$, para a probabilidade de ter um movimento coletivo de tamanho s . A construção deste modelo é análogo ao modelo *Forest Fire Model*. Essa abordagem produz naturalmente um estado crítico para a atividade do tecido animal, além de explicar a auto sustentação das atividades em um tecido animal vivo sem controle de feedback.

Palavras-chave: Sistemas Complexos, Criticalidade Auto-Organizada, modelo de ondas peristálticas, *Forest Fire*, animais simples.

ABSTRACT

Since the end of the twentieth century and the beginning of the twenty-first century, many scientists have become interested in the study of the dynamics of complex systems and in critical systems. This class of non-linear systems has properties described by power laws. Critical phenomena is characteristics of complex systems that has properties not well described by the laws of thermodynamics. The present work presents a self-organized critical (SOC) energy model, created to explain spontaneous collective activity in a given animal tissue without the necessity of a muscular control or central nervous system. This prototype model introduces a cuboid epithelial tissue formed by a single layer of cells, such as the internal digestive cavity of some primitive animals. The tissue is composed of cells that absorb nutrients and store energy, with probability p , to participate in a collective tissue motion. Each cell can be in two states: the high-energy state able to become active or low-metabolic and at rest. Any cell can be activated spontaneously, with a very low probability, and starts a collective activity with its neighbors that share enough energy. The tissue cells that participate in the oscillation consume all their energy. It is observed a power law relation, $P(s) \propto s^{-\gamma}$, for the probability of having a collective motion with s cells. The construction of this model is analogous to the Forest Fire SOC model. This approach naturally produces a critical condition for the oscillation of the animal tissue, in addition, it explains self-sustaining activities in a living animal tissue without feedback control.

Keywords: Complex systems, Self-Organized Criticality, peristaltic wave model, *Forest Fire*, simple animals.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- **Figura 1** – Representação da dinâmica de auto-organização de um sistema complexo adaptativo.....17
- **Figura 2** – Modelos de vizinhança em autômatos celulares.....19
- **Figura 3** - Representação de um arranjo de neurônios do tecido cerebral, moléculas de um gás, átomos de um cristal e estrutura tridimensional de caixas negras.....20
- **Figura 4** - Representação dos principais fractais.....22
- **Figura 5** - Curva de Koch e a curva do floco de neve.....22
- **Figura 6** - Conjuntos de Sierpinski.....22
- **Figura 7** - Modelo da pilha de areia (*sand pile*) baseada na teoria SOC de Per Bak.....24
- **Figura 8** - Representação de dados distribuídos em gaussianas.....26
- **Figura 9** - Representação gráfica da equação matemática da Lei de Potência, $L \times L$ ou $\text{Log} \times \text{log}$28
- **Figura 10** - Ilustração representativa do modelo autômato do *Forest Fire*.....29
- **Figura 11** - Cladograma representando a divisão evolutiva do filo porífera de acordo com suas estruturas e sua proximidades com demais filos.....32
- **Figura 12** - Representação generalizada dos tecidos e células presentes em representantes do filo porífera.....33
- **Figura 13** - Representação da classificação do filo porífera quanto a sua morfologia.....35
- **Figura 14** - A resposta de *E. muelleri* (um porífero) à agitação mecânica.....37
- **Figura 15** – Representação da estrutura celular de um cnidário (hydra) ilustrando a diversificação celular e morfologia tecidual geral em cnidários.....38
- **Figura 16** - Estrutura corpórea generalizada dos representantes do filo Ctenófora.....41

- **Figura 17** - Ilustração do modelo generalizado dos filos porífera, cnidária e ctenófora usando como base o corpo de um porífero.....47
- **Figura 18** - Ilustração do modelo generalizado dos filos porífera, cnidária e ctenófora usando como base o corpo de um porífero, com suas células ilustradas em uma malha cúbica e matriz.....48
- **Figura 19** - Esquema básico do modelo de SOC.....51
- **Figura 20** – Representação de uma escala de Lei de Potência relacionada aos diferentes estágios da matriz, descrevendo os eventos ocorridos e sua frequência.....52
- **Figura 21** - Um gráfico que representa a frequência do tamanho do conjunto $P(s)$ em relação à s . Na figura usamos $L = 1000$ e vários θ indicado na legenda.....53
- **Figura 22** – Gráfico que demonstra a lei potência em escalas de $L=50$, $L=100$, $L= 200$ e $L=1000$. Baseadas nos dados dispostos nas matrizes desse trabalho.....55
- **Figura 23** – Gráfico com demonstração da relação entre probabilidade de um evento atingir um estado crítico em uma escala espacial.....55
- **Figura 24** - Gráfico que demonstra a probabilidade $= \theta$ dos eventos alcançarem um estado crítico.....56
- **Figura 25** - Representação de um ECAO em um esquema celular, demonstrando as transições de fase entre os estados crítico, subcrítico e supercrítico em uma dinâmica celular.....57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre o Modelo de incêndio florestal (<i>Foreste Fire</i>) e o Modelo SOC energético.....	42
Tabela 2 - Comparação entre algumas características morfofisiológicas evolutivas de poríferos, cnidários e ctenóforos.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS

AC - Autômato Celular

ACs - Autômatos Celulares

BTW - Bak, Tang e Wiesenfeld

ECAO - Estado Crítico Auto-Organizado

SNC – Sistema Nervoso Central

SOC - do inglês - Self Organized Criticality (Criticalidade auto-organizada)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 SISTEMAS COMPLEXOS	16
2.1.1 Autômatos Celulares	18
2.1.2 Estruturas Fractais	20
2.2 CRITICALIDADE AUTO-ORGANIZADA	23
2.2.1 Leis de Potência	26
2.2.2 Modelo <i>Forest Fire</i>	28
2.3 CRITICALIDADE AUTO-ORGANIZADA EM ANIMAIS SIMPLES	30
2.3.1 Poríferos	31
2.3.2 Cnidários	37
2.3.3 Ctenóforos	39
2.4 PERISTALTISMO	42
2.5 HOMEOSTASE	43
2.5.1 Mecanismos homeostáticos básicos	45
3 METODOLOGIA	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
5.1 PERSPECTIVAS	59
REFERÊNCIAS	60
APÊNDICES	67

1 INTRODUÇÃO

Entre as últimas décadas do século XX e início do século XXI, muitos físicos passaram a se interessar e estudar a dinâmica de sistemas ditos complexos e os fenômenos neles envolvidos. Esses sistemas muitas vezes apresentam propriedades descritas por leis de potência e, geralmente, suas partes interagem de forma não-linear (MIRANDA, 2012). Fenômenos críticos constituem sistemas complexos, que não possuem propriedades completamente descritas na termodinâmica. Já que o ponto crítico é determinado por flutuações, que requerem uma descrição microscópica. Graças ao avanço de estudos baseados na Física Estática foi possível compreender de forma mais clara as transições de fase que envolve os fenômenos críticos (BAK *et al*, 1987).

Desde o trabalho pioneiro de Bak (*How Nature Works: Como a Natureza Funciona*, 1996), sobre a Criticalidade Auto-organizada (SOC) foi desencadeada uma influente trajetória na ciência dos fenômenos complexos. Considerando a contribuição da SOC para a modelagem de fenômenos naturais da Física, Geologia e Neurociência. Apesar da controvérsia teórica que envolve os princípios e criação da SOC, essa teoria tem se tornado uma poderosa fonte de inspiração para modelagem de sistemas complexos naturais. Neste trabalho foi desenvolvido um modelo de SOC para descrever a energia, funcionamento e movimento dinâmico de tecido animal.

Nesse sentido a tentativa de se construir um esquema teórico geral que englobe todos esses fenômenos deu origem a novos ramos da física, como a teoria do caos e a física dos sistemas complexos. Conceitos como criticalidade auto-organizada, auto-similaridade, fractais e leis de potência passaram a fazer parte da física contemporânea (GLERIA, MATSUSHITA & SILVA, 2005; NUSSENZVEIG, 2008).

Uma questão central para regulação do equilíbrio na fisiologia animal é o conceito de homeostase. De acordo com Claude Bernard (1927), há quase dois séculos, a manutenção do ambiente interno e o controle das atividades celulares são essenciais para a vida do organismo. Complementando o conceito de homeostase a ideia de *feedback* surgiu como um mecanismo prático para manter o sistema em equilíbrio fisiológico. Nesse sentido a realimentação a partir do desvio de equilíbrio produz uma força que restaura o sistema para o estado anterior. A “força de

restauração” pode ser compreendida como um mecanismo que produz oscilações saudáveis ao redor do equilíbrio corporal fisiológico.

Nos vertebrados o princípio homeostático e o mecanismo de *feedback* são dependentes de um sistema nervoso central associado ao sistema endócrino. Entretanto, estipula-se que o mecanismo para atingir o equilíbrio ou homeostase em animais primitivos seja simples e mais econômico do que em organismos mais complexos (POUGH; HEISER; JANIS, 2008).

Animais invertebrados inferiores sempre englobaram um grupo subjugado como não possuidor de estímulos elétricos complexos, tais como os poríferos, ctenóforos, cnidários. Estudos recentes, como os de Sally Leys (2006, 2007, 2008, 2010), sobre a dinâmica e fisiologia de alguns poríferos, dentre outros autores citados no presente trabalho, apontam para um novo conceito empregado a existência de estímulos nervosos, mesmo que primitivos associados a esses organismos. Nesse contexto o estudo de criticalidade auto-organizada sugere a existência de aspectos semelhantes aos da pilha de areia as estruturas celulares desses animais.

Neste trabalho, foi elaborado um mecanismo de equilíbrio que não precisa de um sistema de regulamentação como um sistema nervoso ou controle de *feedback*. Além disso, o modelo apresentado produz uma resposta crítica, que significa à estrutura de flutuação de saída similar a lei de potência. A vantagem é uma resposta crítica, em oposição a um sinal padrão como oscilação em torno do ponto de equilíbrio.

O objetivo deste trabalho consiste em construir um modelo bioenergético de alimentação, baseado na oscilação e atividade digestiva de animais primitivos, associando seu funcionamento ao Estado Crítico Auto-organizado (ECAO). Esse modelo é concebido para animais simples, sem qualquer controle *feedback* de um sistema nervoso central (SNC), ou mesmo um sistema muscular. Desta forma, o modelo pode incorporar dois ingredientes arquetípicas da vida animal: nutrição e movimento espasmódico.

O presente trabalho está organizado em uma parte bibliográfica, onde foi levantado o referencial teórico relacionado aos conceitos históricos, físicos e biológicos, uma parte metodológica onde foram produzidos os modelos ilustrados e matemáticos realizados de acordo com a biologia e o algoritmo computacional e por

fim os resultados e discussão, concentrando-se nas características auto-organizadas do modelo.

De acordo com Chialvo (2006), estudos demonstram que, a sensibilidade e dinâmica dos neurônios é maximizada por um ponto crítico, ou seja, uma transição de fase. Desse modo, levanta-se a hipótese de um estado crítico nortear as ações fisiológicas em sistema complexo como o nervoso. Kinouchi & Copelli (2006), afirmam que uma rede de elementos excitáveis é transmitida na borda de uma transição de fase de forma crítica, podendo ser extremamente sensível a pequenas perturbações e capaz de reagir a grandes entradas de energia. Apoiando-se nesses aspectos sugere-se que a evolução, através de uma pressão evolutiva levou os organismos vivos, inclusive os animais a um funcionamento crítico.

Nesse contexto pesquisas atuais sugerem a existência de um estado crítico na fisiologia de alguns animais simples, como poríferos. Corroborando com a hipótese de uma pressão evolutiva beneficiada pela SOC. A importância do presente trabalho dar-se pela necessidade de conhecimento a respeito do funcionamento natural e fisiológico dos elementos vivos. Tornando o estudo dos mecanismos físicos que promovem as atividades vitais de estruturas vivas, tais como, células, tecidos e sistemas de grande relevância. A fim de promover o entendimento e associação desses, com aspectos físicos como a SOC, além de abrir um debate sobre uma possível transmissão dessa característica SOC de forma evolutiva para os metazoários mais desenvolvidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SISTEMAS COMPLEXOS

Para compreender a dinâmica dos sistemas complexos é importante partir da ideia central que engloba o significado desses dois termos. Porém o conceito de sistema apesar de simples pode ser bastante abrangente e de difícil compreensão. De acordo com Ferreira (2010), em resumo, sistema é um conjunto de elementos relacionados, dispostos em partes que compõe o todo de forma coordenada entre si e formando uma estrutura organizada. Já o conceito de “complexidade” é mais específico. Para Melotti (2009), “complexidade define uma coleção de agentes individuais com liberdade para agir de forma nem sempre previsível, e cujas ações estão interligadas de tal maneira que a ação de um agente mude o contexto de outros agentes”.

Muitos fenômenos da natureza são modelados por meio de equações matemáticas. No entanto, existem vários fenômenos na natureza que são difíceis de serem modelados matematicamente. Esses fenômenos podem ser estudados e descritos a partir dos conceitos de sistemas complexos (BAR-YAM, 1997; JESUS & KAWANO, 2002; PEARCE & MERLETTI, 2006). Estes sistemas incluem populações de seres vivos, o cérebro, o sistema imunológico, propagações de doenças, os mercados financeiros, os ecossistemas, etc. Os sistemas são considerados complexos, devido à existência de um grande número de agentes, que aparentemente interagem entre si de forma independente, permitindo que a diversidade dessas interações evolua para um sistema auto-organizado (BAR-YAM, 1997; PEARCE & MERLETTI, 2006).

A descoberta de leis universais em sistemas físicos levantou a hipótese da existência de leis universais em sistemas biológicos, sociais e econômicos e deu origem à Física dos Sistemas Complexos. Nesse contexto os estudos sobre esses sistemas são recentes, entretanto, há atualmente várias associações interligando esses sistemas ao funcionamento da natureza e ao nosso planeta. Algumas propriedades que fundamentam esses sistemas podem ser encontradas na economia, epidemias, incêndios florestais, terremotos e pilhas de areia (MIRANDA, 2012).

Um comportamento complexo pode ser encontrado em diferentes corpos, sejam eles orgânicos ou inorgânicos. Para Nóbrega (2014), de forma abrangente a “complexidade pode ser utilizada para caracterizar sistemas com interação de muitas partes”. Ainda de acordo com a autora, é possível distinguir os sistemas complexos dos sistemas simples, pela quantidade de variáveis apresentadas, já que os sistemas complexos apresentam muitas variáveis interligadas e intrincadas. Além da capacidade de processar informações recebidas, permitindo a adaptação.

De acordo com Nussenzveig (2008); Mitchell (2009) & Oliveira (2010), algumas propriedades podem ser comuns aos diversos tipos de sistemas complexos, como:

- Ser um sistema aberto, permitindo entrada e saída de energia e/ou matéria;
- Dinamicidade e evolução constante de forma não linear;
- Ser um sistema não-ergódico;
- Constituir-se como um sistema adaptativo, possuindo capacidade de “aprendizagem”;
- Ser um sistema auto-organizado, organizando-se de forma espontânea a partir de uma desordem;
- Apresentar Criticalidade Auto-organizada (SOC);
- Apresentar um comportamento emergente não trivial.

Com base em Olson & Eoyang (2001), um sistema dito aberto pode gerar novas estruturas e padrões baseado em sua própria dinâmica interna, emergindo para uma auto-organização. Esse processo pode ocorrer de forma interativa em muitas partes e dimensões ao mesmo tempo.



Figura 1 – Representação da dinâmica de auto-organização de um sistema complexo adaptativo (adaptado). Fonte: BOGO; GRAMANI; KAVISKI (2015).

Mitchell (2009) define sistemas complexos como grandes redes de componentes coletivos, que funcionam interligados, de forma simples, sem uma central de controle e possuem a capacidade de se adaptar, em outros termos, um sistema emergente que apresenta comportamento não trivial ou crítico auto-organizado.

De acordo com os resultados obtidos através de estudos que analisam as relações entre os agentes de um sistema complexo, esses geram efeitos coletivos (WOLFRAM, 1994). Outro fator importante sobre os sistemas complexos é a análise diferenciada dos conceitos e fenômenos que envolvem esse estudo, se estendendo além do que rege a matemática clássica, devido ao fato de muitos pesquisadores da complexidade ser físicos, programadores, biólogos ou psicólogos (BAR-YAM, 1997; JESUS & KAWANO, 2002; TELLES *et al.*, 2006, 2007).

Desse modo, fenômenos críticos constituem sistemas complexos, que não possuem propriedades descritas na termodinâmica. Já que o ponto crítico é determinado por flutuações, que requerem uma descrição microscópica. Graças ao avanço de estudos baseados na Física Estática foi possível compreender de forma mais clara as transições de fase que envolve os fenômenos críticos, discutidos no presente trabalho (STANLEY, 1967).

2.1.1 Autômatos Celulares

No final da década de 1940 dois matemáticos, John Von Neumann e Stanislaw Ulam desenvolveram novas técnicas que poderiam ser utilizadas na modelagem matemática de sistemas complexos. Ulam trabalhava com o crescimento de cristais usando uma matriz simples como seu modelo no Laboratório Nacional de Los Alamos (Los Alamos, Novo México), enquanto Neumann trabalhava com autorreprodução. A ideia inicial era projetar um modelo onde às cópias se autorreproduzisse. O resultado foi um copiador e construtor universal trabalhando dentro de um autômato celular (AC) com uma pequena vizinhança somente entre as células ortogonais e com inúmeros valores que cada célula da matriz pode assumir (PASCOAL, 2005; MELOTTI 2009).

Então no final dos anos 1960, o também matemático Conway aperfeiçoou a técnica dos autômatos celulares (ACs) desenvolvendo um sistema de representação de vida e morte de organismos, denominado de Jogo da Vida (PASCOAL, 2005;

MELOTTI 2009). Muitos trabalhos científicos sobre os ACs foram realizados, contribuindo assim de forma notável para o estudo desses fenômenos e desenvolvimento dessa área da ciência (MELOTTI 2009).

Autômatos celulares (ACs) são sistemas complexos distribuídos de forma espacial em um espaço limitado, formado por número significativo de componentes simples e semelhantes com uma conexão entre eles. Por apresentarem essa simplicidade estrutural de fácil utilização representam uma importante ferramenta para o estudo da dinâmica que envolve sistemas semelhantes, ou que podem ser simplificados dessa forma (BOGO; GRAMANI; KAVISKI, 2015).

De acordo com Nussenzveig (2008) e Bogo *et al* (2015), um AC é um conjunto dimensional formado por células dispostas em uma grade regular, cujos dados são elementos ou conjuntos finitos. Nesse sistema a dinâmica ocorre de acordo com a vizinhança que são as células mais próximas. Essa vizinhança simples e comum pode ser baseada nos ACs de von Neumann e de Moore, como também de forma aleatória. No presente trabalho, o modelo utilizado para representar a dinâmica coletiva de um tecido animal, pode ser comparada a um AC com vizinhança aleatória, apesar de ser um modelo analógico ao *Forest Fire*.

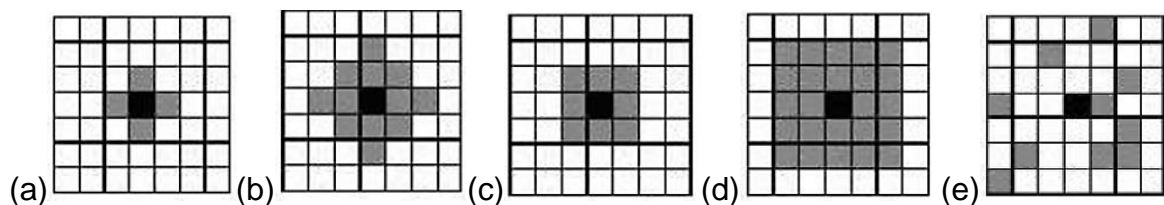


Figura 2 – Modelos de vizinhança em autômatos celulares. Figuras (a) e (b) representam as vizinhanças de Neumann; a figura (c) representam as vizinhanças de Moore; a figura (d) a vizinhança de Moore estendida; a figura (e) representa as vizinhanças aleatórias (adaptado). Fonte: BOGO; GRAMANI; KAVISKI (2015).

Nas Figuras 2 (a) e (b) descritas como vizinhanças de von Neumann, considera-se apenas quatro células como vizinhas da célula que serão afetadas. A Figura 2 (c) conhecida como vizinhança de Moore considera oito células vizinhas da célula que serão afetadas. Nas Figuras 2 (a), (b) e (c) o raio de vizinhança abrange somente uma camada de linha e coluna seguinte. Porém, a Figura 2 (d) conhecida como Vizinhança de Moore Estendida considera um raio de vizinhança igual a dois, ou seja, duas camadas de linhas e colunas são consideradas, assim a vizinhança da célula que será atualizada será igual a vinte cinco células. Outros tipos de vizinhanças podem ser considerados, como aumentar a faixa de vizinhos ou

escolher vizinhos aleatórios, como notável na figura 2 (e) (BOGO; GRAMANI; KAVISKI, 2015).

Desse modo, os ACs tornaram-se importantes ferramentas para o estudo e modelagem de sistemas complexos reais nas mais diversas áreas de conhecimento e estudo (WOLFRAM, 1983; WOLFRAM, 1988; LI, 1989; GUTOWITZ, 1995; BARYAM, 1997). Neste trabalho, a junção de tecidos de animais simples será modelada como um sistema complexo, semelhante aos ACs aleatórios, no entanto seguindo sempre uma direção vizinha (paralela), nunca vertical.

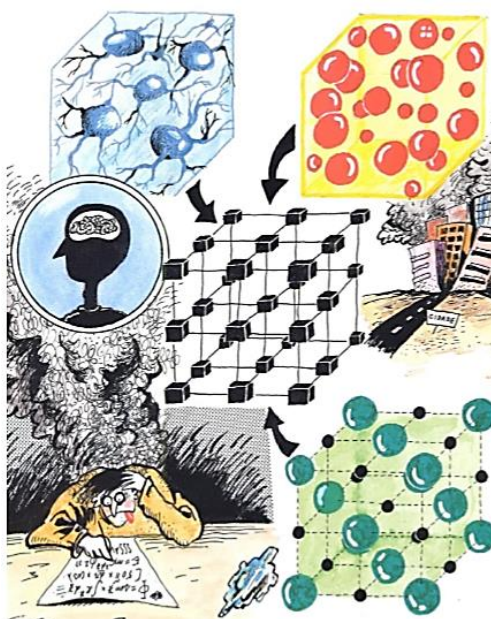


Figura 3 - Representação de um arranjo de neurônios do tecido cerebral, moléculas de um gás, átomos de um cristal e estrutura tridimensional de caixas negras. Fonte (DILÃO, 1993).

A Figura 3 ilustra a ideia de que os sistemas complexos estão relacionados aos efeitos coletivos, que são os resultados encontrados por meio do comportamento global do sistema. Esses sistemas podem ser biológicos ou físicos, de forma a fornecer resultados que são analisados macroscopicamente. Por exemplo, podem ser citados os comportamentos dos neurônios cerebrais, das células epiteliais de um tecido vivo, das partículas dos gases e da estrutura tridimensional do crescimento de um cristal (DILÃO, 1993).

2.1.2 Estruturas Fractais

Fractais são figuras geométricas complexas e peculiares caracterizadas por seguirem padrões de repetição infinita (HAYASHI, 2002). De acordo com Bak e

colegas (1987), os fractais assim como a SOC podem surgir na natureza sem a necessidade de intervenções externas. O ruído $1/f$ constitui-se como um ruído oscilante que segue leis de potência inversamente relacionadas à sua potência. Bak, Tang e Wiesenfeld (BTW), concluíram através de estudos que o ruído $1/f$, como os fractais, constituem estados minimamente estáveis que se originam de processos dinâmicos que se estabilizam precisamente no ponto crítico. Para Andrade & Silva (2014), “os fractais, diferentemente dos objetos da geometria euclidiana, apresentam-se como figuras irregulares em todas as escalas e possuem sempre algum tipo de auto-similaridade”.

Ao longo da história muitos matemáticos dedicaram sua vida de estudos aos fenômenos naturais e seus comportamentos, como o estudo do universo. Com o objetivo de tornar a natureza simples e compreensível, foram surgindo novas teorias que formavam bases matemáticas sólidas e que descreviam e formalizavam os fenômenos. Entre o final do século XIX e início do século XX alguns matemáticos como, Cantor, Koch, Sierpinski, Peano e Hilbert investigavam alguns objetos relacionados às bases matemáticas de análise, álgebra e geometria. Estes objetos foram considerados “casos patológicos” ou “monstros matemáticos”. Os conjuntos de Cantor e de Sierpinski são gerados através de um processo de remoção de alguma parte da figura inicial, já os conjuntos de Koch, Peano e de Hilbert são gerados através de um processo de alteração da figura inicial (NUNES, 2006; ANDRADE & SILVA, 2014).

De acordo com os estudos de Benoit Mandelbrot (1982, 1997), alguns dados não se ajustam em uma distribuição normal, no entanto mesmo nesses casos há certa ordem simétrica em pequenas e grandes escalas. Essas variações podem ocorrer em uma escala de tempo irregular, seguindo uma sequência independente de escala, indicando a presença de leis de potência. Desse modo, Mandelbrot encontrou padrão onde se pensava existir apenas aleatoriedade. Além da presença de ruídos. Esses fenômenos podem ser identificados em fractais (fig. 4).

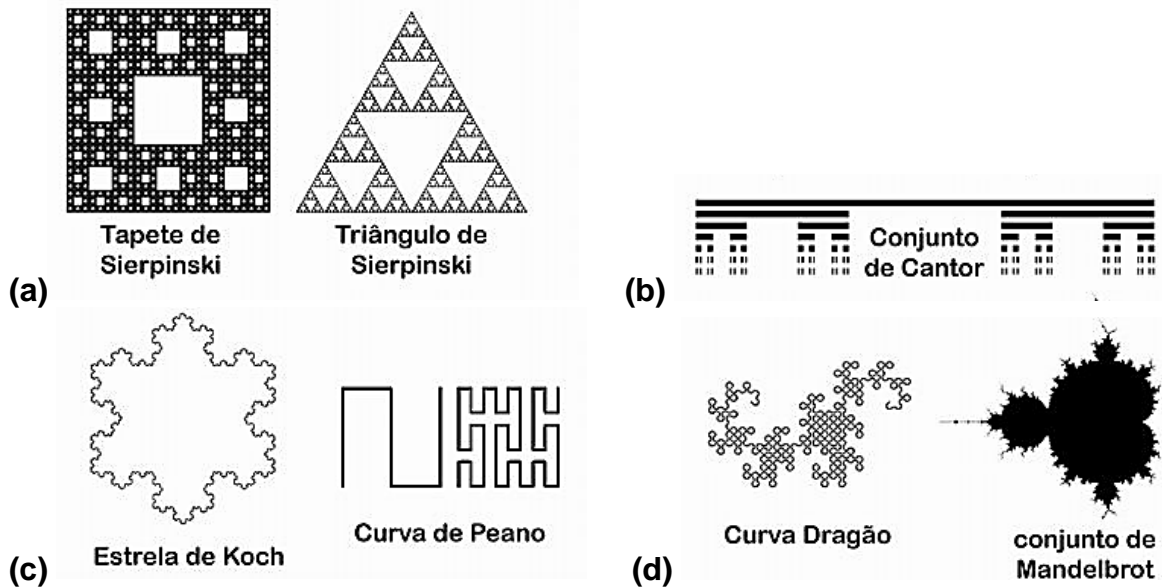


Figura 4 - Representação de alguns fractais matemáticos. a) representação do conjunto de Sierpinski; b) representação do conjunto de Cantor; c) representação dos conjuntos de Koch e Peano; d) representação dos conjuntos de Mandelbrot. (NUNES, 2006; ANDRADE & SILVA, 2014).

Estruturas matemáticas, os fractais apresentam propriedades específicas, tais como: auto-semelhança ou similaridade de escala, em outros termos, quando ampliadas as partes demonstram-se idênticas ao sistema como um todo; matematicamente, sua dimensão assume valores menores que as dimensões topológicas; os fractais possuem dimensões diferentes e próprias de cada fenômeno; outros fractais são apenas estatisticamente auto-similares, ou seja, quando ampliadas suas partes pequenas, não demonstram igualdade ao sistema como um todo, mas equivalência, com o mesmo tipo geral de aparência (MIRANDA, 2012).

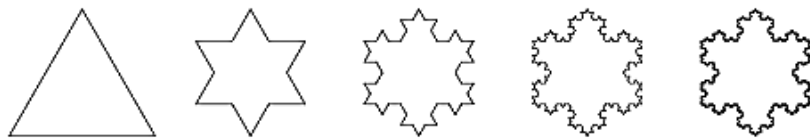


Figura 5 - Curva do floco de neve de Koch (PRISMA, 2016).

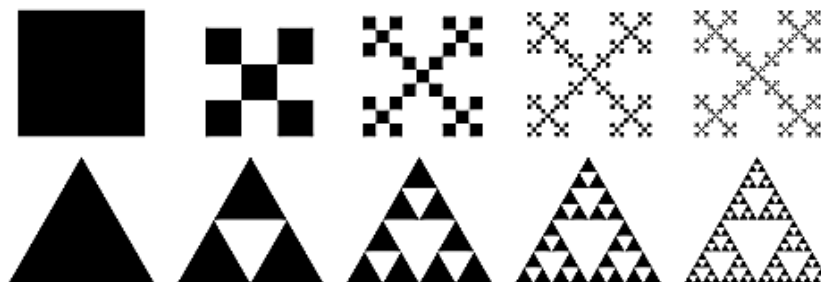


Figura 6 - Conjuntos de Sierpinski. Resultantes da remoção sucessiva do triângulo equilátero ou de um quadrado do centro (NUNES, 2006; ANDRADE & SILVA, 2014).

Para Miranda (2012), há uma forte associação entre os conceitos de fractalidade, teoria do caos e complexibilidade de sistemas. Sistemas dinâmicos não-lineares, geram fractalidade e o fenômeno da auto-similaridade é um importante aspecto da teoria do caos. Sendo assim, os fenômenos do caos e da complexibilidade são interligados e complementares, apesar de serem distintos (GLEISER, 2002; HAYASHI, 2002).

De acordo com Gleria, Matsushita & Silva:

A regularidade de qualquer lei de potência implica ausência de escala típica, cuja geometria é então fractal. Fractais podem aparecer por diversas razões. Por dinâmicas caóticas, processos de crescimento ou evolução, e assim por diante (2005, p. 5).

Nunes (2006) descreve a geometria fractal como uma ferramenta que permite a integração aos diversos temas da matemática e de outras áreas, desde as ciências naturais às econômico-sociais e a tecnologia. De forma a entender a geometria de objetos não tradicionais e de estabelecer modelos matemáticos para auxiliar os estudos dos fenômenos naturais. Desse modo, os fractais apresentam estados diminutamente estáveis originados de processos dinâmicos que se estabilizam especificamente no ponto crítico.

2.2 CRITICALIDADE AUTO-ORGANIZADA

O conceito de criticalidade foi descrito e apresentado inicialmente por Per Bak, Chao Tang e Kurt Wiesenfeld (BTW), em um trabalho pioneiro de 1987 publicado na revista *Physical Review Letters*. Nesse trabalho Bak e colaboradores, descrevem como sistemas naturais se organizam em um estado crítico, que é considerado um dos principais mecanismos para o surgimento dos fractais, das leis de potência e da complexidade na Natureza.

A ideia central de BTW era mostrar para comunidade científica e geral que sistemas compostos por muitas partículas podem evoluir para um estado denominado por eles de estado crítico auto-organizado (ECAO) (NUSSENZVEIG, 2008).

Em 1996 o dinamarquês Per Bak (1922-1999) publicou o livro *How Nature Works: Como a Natureza Funciona*, reforçando para toda comunidade científica o conceito de Criticalidade Auto-organizada (SOC). Este conceito baseia-se no modelo

da pilha de areia, onde de forma simples, regular e imprevisível as avalanches laterais mantem a estabilidade e o formato cônico da pilha de areia (fig.7). Esse modelo consiste em uma equação $\text{Log} \times \text{Log}$, (fig. 9), onde cada variável z_i representa a altura da pilha, seguindo duas regras básicas: adição de areia e avalanches.

De acordo com Nussenzveig (2008), Bak e colaboradores, descreviam o ECAO como um fenômeno caracterizado por leis espaciais e temporais e ausência de sintonização, onde o estado crítico poderia ser automaticamente alcançado, evoluindo espontaneamente para um novo estado. No presente trabalho, a confecção de um modelo SOC baseia-se nos princípios da auto-organização de sistemas vivos, basicamente dos tecidos, agregando os conceitos da criticalidade auto-organizada a conceitos como a autopoiese das células.

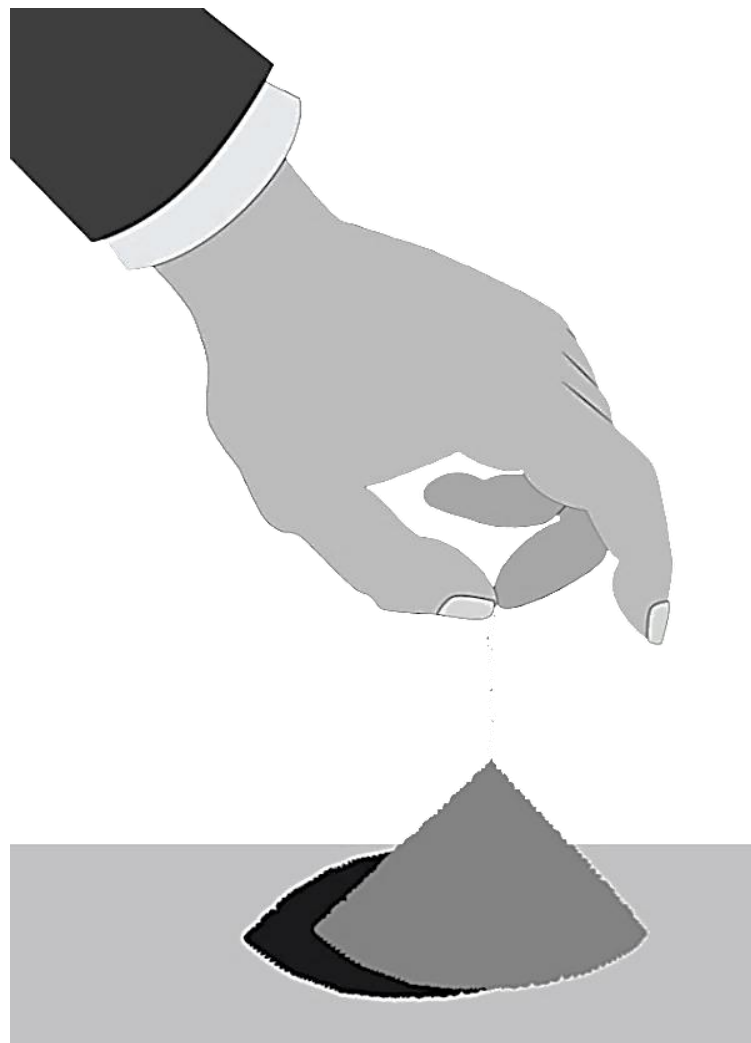


Figura 7 - Modelo da pilha de areia (*sand pilhe*) baseada na teoria SOC de Per Bak (adaptado de PER BAK, 1996).

De acordo com Bak (1996), a SOC é mantida por uma série de distúrbios menores que podem levar a eventos de todos os tamanhos, chamados de avalanches. Os eventos catastróficos são responsáveis pela maioria das mudanças, não ocorrendo de forma gradual, esses eventos resultam na evolução dos sistemas, através de interações dinâmicas entre elementos individuais.

Sendo a SOC uma nova maneira de encarar a complexidade da natureza e como essa pode se manter em um estado crítico e possuir a capacidade de se auto-organizar, gerando padrões naturais e mudanças de fase ou evolução do sistema. Entretanto, é incorreto dizer que o sistema atinge um estado de equilíbrio quando chega ao estado crítico. Pois de acordo com Bak, sistemas em equilíbrio não são complexos.

Desse modo, um sistema SOC:

- É aberto e dissipativo, com seus componentes metaestáveis (podendo perder a estabilidade através de pequenas perturbações);
- Organiza-se em um estado crítico com avalanches regulares e não periódicas de diversos tamanhos;
- Está incorporado em um único espaço temporal fractal;
- Pode se tornar catastróficamente instável, caso manipulado ou forçado para adquirir padrões não críticos.

Fenômenos críticos ocorrem geralmente em sistemas que se encontram longe do estado de equilíbrio, diversas grandezas podem apresentar esse comportamento caracterizado por possuir um expoente com valores críticos. Quando foi possível o desenvolvimento de técnicas e análises mais aprimoradas para o estudo desses eventos localizados numa região crítica, os resultados apontaram para a existência de uma nova classe de expoentes diferentes dos expoentes clássicos (SALINAS, 1999; GLERIA, MATSUSHITA & SILVA, 2005).

A SOC é um fenômeno presente em sistemas que apresentam a capacidade de evoluir naturalmente para um estado crítico ao longo de sua própria evolução dinâmica. No entanto os sistemas em estado crítico tendem a apresentar pequenas ou grandes mudanças ou ruídos, que podem provocar reações totalmente imprevisíveis (BTW). A partir desse conceito Bak e companheiros criaram uma teoria geral para o ruído fluido = 1, presente na formação de fractais e SOC.

De acordo com essa teoria proposta por Bak e colaboradores (1987; 1988), os ruídos e os fractais podem surgir com ou sem intervenção externa ao sistema,

seguindo uma lei de potencia oscilante que se relaciona inversamente com o ruído. Dessa maneira, os sistemas críticos auto-organizados são regidos por leis de potência.

2.2.1 Leis de Potência

Fora da criticalidade, em sistema que apresenta expoentes clássicos, um sistema com muitos componentes apresenta correlações de curto alcance, com decaimento exponencial, como é possível observar da figura 8, que representa gaussianas clássicas. Já na criticalidade, as correlações decaem lentamente, sem escala característica, temporal ou espacial (fig. 9), que representa a disposição de uma Lei de Potência (Power law) (GLERIA, MATSUSHITA & SILVA, 2005).

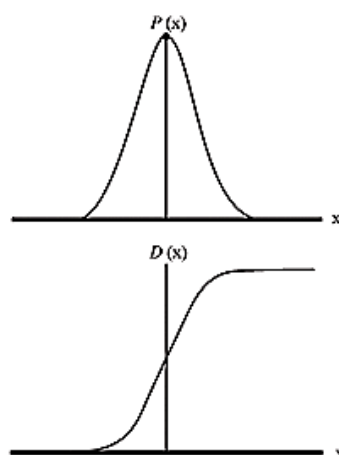


Figura 8 - Representação de dados distribuídos em gaussianas (GLERIA, MATSUSHITA E SILVA, 2005).

Estudos estatísticos são realizados com a utilização de uma ferramenta indispensável, um gráfico em forma de sino que representa a distribuição gaussiana ou normal dos dados (fig. 8). Nesse tipo de gráfico a maioria dos eventos situa-se na parte central da curva, que significa a média, nos lados da curva esses dados caem rapidamente como uma exponencial. Isto corresponde ao fato de que grandes flutuações são estatisticamente pouco prováveis e, depois de certo ponto, impossíveis (GLERIA, MATSUSHITA & SILVA, 2005).

Distribuições gaussianas são definidas a partir de uma função de densidade e probabilidades, baseadas em uma norma da natureza, cuja aplicabilidade deriva de um resultado, onde o teorema gira em torno de um limite central. Desse modo em

qualquer situação com um grande número de eventos aleatórios independentes haverá a tendência para um determinado resultado, seguindo uma distribuição normal (GLERIA, MATSUSHITA & SILVA, 2005; RIBEIRO Jr. *et al*, 2012).

Contudo, de acordo com Gleria *et al* (2005), “nem tudo na natureza segue uma curva normal”. Esses eventos não-gaussianos apesar de não possuírem uma escala característica e serem incompatíveis com a noção de uma média, podem apresentar uma certa regularidade, disposta em escalas de Lei de Potência. Além do mais, esses podem descrever alguns sistemas existentes na natureza, inclusive aqueles considerados desordenados (GLERIA, MATSUSHITA & SILVA, 2005).

Fenômenos críticos, regidos por leis de potência são conhecidos por escala ou homogeneidade (GLERIA, MATSUSHITA & SILVA, 2005). Dessa forma a energia do sistema é constante e se acumula nos vizinhos de um ponto crítico, até sua liberação e conseqüente ocorrência de eventos maiores e raros, enquanto isso o que ocorre são eventos simples de todas as magnitudes. Nesse sentido, eventos raros não precisam ter causa específica e podem aparecer a qualquer momento. O que causa um pequeno efeito em uma ocasião pode iniciar uma mudança devastadora em outra situação (figuras 9 e 20) (SALINAS, 1999; BAK, 2000; GLERIA, MATSUSHITA & SILVA, 2005).

Contudo, nenhuma análise das condições iniciais será suficiente para prever o evento. Leis de potência surgem em casos como a distribuição de terremotos, extinção de espécies, funcionamento do cérebro e sistemas biológicos, entre outros eventos naturais, além de econômicos. O sentido do termo universalidade, para os fenômenos críticos, ganha dimensões inesperadas em qualquer área (SALINAS, 1999; BAK, 2000; GLERIA, MATSUSHITA & SILVA, 2005).

Para estudar e entender os estados críticos de um sistema, utiliza-se modelos simples que podem ser analisados e simulados em computadores. O estudo desses fenômenos leva a compreensão dos outros sistemas pertencentes a esta classe. De modo geral os conceitos que envolvem a criticalidade apresentam-se de forma mais metafórica que outras áreas da física teórica. Com base nesses princípios universais e ubíquos, os modelos matemáticos utilizados devem ser mais simples e abrangentes, já que, fenômenos em estado crítico não apresentam uma escala típica de espaço e tempo, e sim, sob leis de escala e potência (BUCHANAN, 2002; GLERIA, MATSUSHITA & SILVA, 2005).

“Estas leis revelam ordem e simplicidade por trás da complexidade, e também significam que nenhuma diferença qualitativa existe entre pequenas e grandes flutuações” (GLERIA, MATSUSHITA & SILVA, 2005).

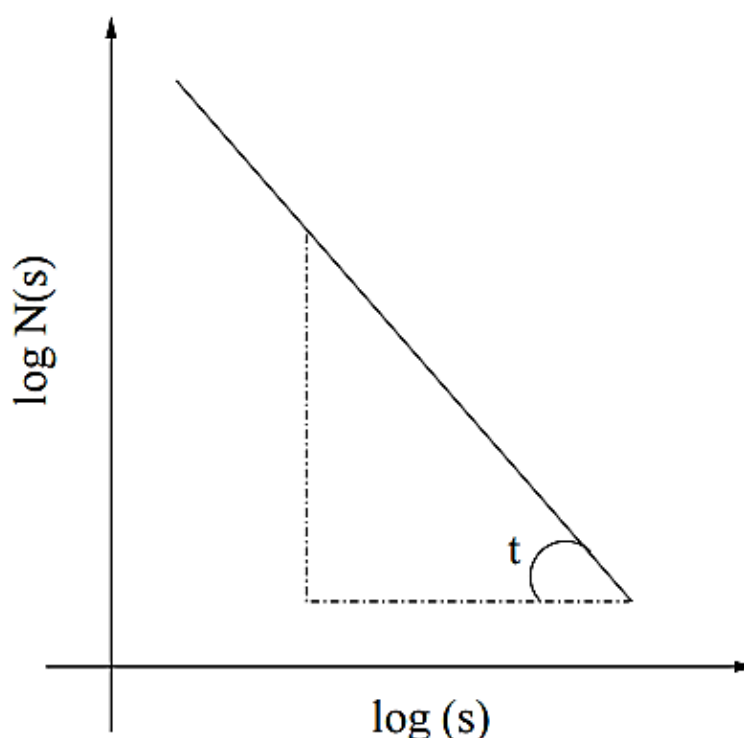


Figura 9 - Representação gráfica da equação matemática da Lei de Potência – *Log x Log* (CARNEIRO; CHARRET, 2005).

2.2.2 Modelo *Forest Fire*

O *Forest Fire* é um modelo matemático baseado em incêndios pontuais em uma floresta, assumindo uma sistematicidade dinâmica e SOC. Esse modelo pode ser definido como um autômato celular bidimensional, onde cada célula pode estar vazia, conter uma árvore ou estar em chamas (HENLEY, 1989; DROSSEL & SCHWABL, 1992).

Os autores Drossel e Schwabl (1992), definem quatro regras que são executadas de forma simultânea para seu modelo: Uma célula queima transforma em uma célula vazia, uma árvore vai queimar se pelo menos um vizinho está a arder, uma árvore inflama com probabilidade f mesmo que nenhum vizinho esteja em chamas, um espaço vazio se enche de uma árvore com probabilidade p .

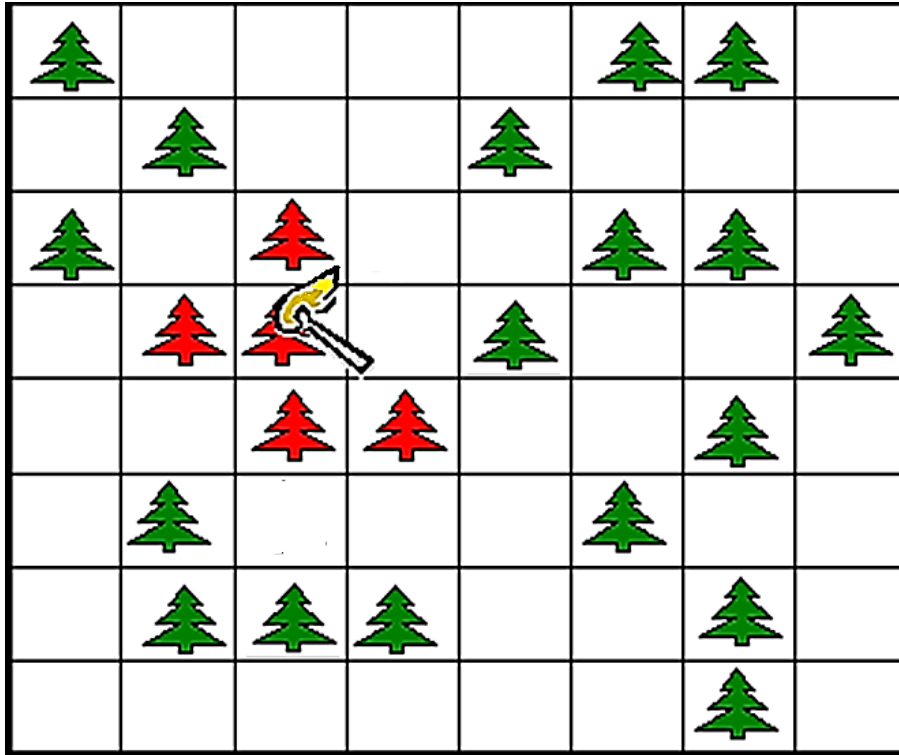


Figura 10 - Ilustração representativa do modelo autômato do *Forest Fire* (adaptado de CODEMANSHIP, 2007).

Quando os estudos de BTW sobre o modelo da *pilha de areia* trouxeram explicações através da SOC e Leis de Potência para a origem dos fractais e $1 = f$ (modelos para terremotos), dentre outros fenômenos naturais, despertaram bastante interesse da comunidade científica. Para tanto, havia discordâncias sobre o fato de fenômenos como fractais ou sistemas sem leis de conservação serem críticos. Até que um modelo de *Forest Fire* mostrou-se crítico (DROSSEL & SCHWABL, 1994).

Em sua conclusão Drossel e Schwabl (1992, 1994), afirmaram que os modelos de *Forest Fire* dependem de alguns aspectos para serem considerados críticos, tais como: O tempo em que um cluster de floresta queima é muito mais curto do que o tempo em que uma árvore cresce, é muito mais curto do que o tempo entre dois relâmpagos. A separação de escalas de tempo é frequente na natureza, enquanto o ajuste de parâmetros de determinado valor ocorre somente acidentalmente. Assim, o modelo florestal é crítico em uma ampla gama de valores.

Depois da excitação de um sítio refratário é necessário algum tempo para recuperar seu estado de repouso. Em muitos destes sistemas podem ser observadas ondas espirais, sendo possível encontrar um estado SOC, se a gama adequada de valores de parâmetros é investigado, ou seja, se a excitação

espontânea ocorre raramente e se essa excitação espalha-se muito mais rápido do que o sistema recupera a partir do estado refratário (DROSSEL E SCHWABL, 1992; 1994).

Para Malamud, Morein e Turcotte (1998), apesar de toda a complexidade que envolve o início e a propagação de um incêndio florestal (*Forest Fire*), os incêndios estatisticamente apresentam uma frequência de *Power Law* em diversas e diferentes magnitudes. Desse modo, um simples modelo de *Forest Fire* pode ser um exemplo de SOC, já que exibe comportamento semelhante. Uma aplicação prática desse estudo está na quantificação desses focos médios para quantificar o risco de grandes incêndios ou até mesmo terremotos.

2.3 CRITICALIDADE AUTO-ORGANIZADA EM ANIMAIS SIMPLES

Em um organismo vivo a maioria das células está em constante movimento interno e/ou externo. As estruturas presentes no interior das células modificam-se constantemente para realização das mais diversas atividades, esse movimento e atividade constantes, por muitas vezes pode aparentar desorganização. No entanto há ordem e harmonia no funcionamento celular (HICKMAN; ROBERTS; LARSON, 2004).

Nesse contexto, os metazoários ou organismos animais pluricelulares evoluíram e desenvolveram uma maior complexidade celular, onde essas se agrupam de acordo com suas características, para realização coordenada de determinada função (HICKMAN; ROBERTS; LARSON, 2004; RUPPERT; FOX; BARNES, 2005).

Os poríferos organismos animais mais primitivos existentes atualmente, não apresentam uma exclusividade ou similaridade de estruturas e características entre suas espécies, já que há uma enorme variedade e divergência evolutiva dentre os componentes desse grupo (Fig. 11). Desse modo, algumas espécies de esponjas mais evoluídas apresentam características bem marcantes quanto a atividades peristálticas (BORCHIELLINI *et al*, 2001; MEDINA *et al*, 2001; NICKEL, 2006; LEYS, 2007).

De acordo com Michael Nickel (2002, 2004, 2006), uma nova espécie *T. wilhelma* apresenta contrações corporais endógenas regulares, com velocidades de até $2 \cdot \text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$. Levantando assim a questão sobre o peristaltismo ou ondas

contrácteis desempenhando um papel importante no movimento desta esponja (fig. 14). No presente trabalho o modelo criado especula a relação de ondas contrácteis de poríferos e outros animais simples como cnidários e ctenóforos de uma forma generalizada, não só para a locomoção, mas para atividades digestórias.

2.3.1 Poríferos

As esponjas são animais muito antigos, conhecidas e utilizadas desde a antiguidade pelos povos antigos. Porém suas características morfológicas sugerem uma simplicidade fisiológica, que nem sempre condiz com a complexidade desse sistema (JUNIOR GODOY, 2006). Exclusivamente aquáticas, podem habitar todos os ambientes aquáticos, desde rios, lagos, até regiões polares e abissais, sendo especialmente marinhas, são mais abundantes em regiões costeiras, são fortes agentes bioindicadores, já que não toleram ambientes poluídos (ALCOLADO, 1987; MURICY, 1989; MURICY et al., 1991; PEREZ, 2000; WULFF, 2001).

Animais bentônicos, as esponjas podem se desenvolver em diversos substratos, de natureza dura ou móvel, podendo apresentar diferentes padrões de crescimento (MURICY *et al*, 2007). Estima-se atualmente que existam cerca 10.000 espécies descritas e em torno de 7.800 espécies válidas (MURICY *et al*, 2007).

Os poríferos são tradicionalmente caracterizados como “animais filtradores e sedentários, que utilizam uma única camada de células flageladas para bombear água através de seu corpo” (BERGQUIST, 1980). “As esponjas desenvolveram um sistema de correntes de água único, do qual elas dependem para conseguir alimento e oxigênio. Apesar de não apresentarem sistema nervoso com órgãos dos sentidos desenvolvidos tem um simples sistema de elementos contrácteis” (VOGEL, 1994; HICKMAN; ROBERTS; LARSON, 2004).

Devido às peculiaridades das esponjas e suas características morfológicas especificamente distintas dos demais metazoários, os estudiosos sempre divergiram quanto à classificação taxonômica desses organismos. Nos primeiros tratados de classificação taxonômica as esponjas foram incluídas no reino das plantas, posteriormente com a descoberta do movimento de correntes aquíferas em seu corpo foram classificadas como Zoophyta (animais-plantas) ou pólipos. Somente após a compreensão da anatomia e fisiologia das esponjas, surgiu o termo Porífera

que vem do latim “portador de poros” e sua elevação a filo (MÜLLER *et al*, 2004; JUNIOR GODOY, 2006).

O Filo Porífera é atualmente dividido em quatro classes: Calcarea, Hexactinellida, Demospongiae (todas com representantes recentes) e Archaeocyatha (inteiramente fóssil) (MURICY *et al*, 2007). No entanto as esponjas não podem ser consideradas um filo monofilético e sim parafilético, já que algumas espécies mais evoluídas de poríferos apresentam características mais próximas evolutivamente de cnidários, que de outros poríferos (fig. 11) (BORCHIELLINI *et al*, 2001; MEDINA *et al*, 2001; LEYS, 2007).

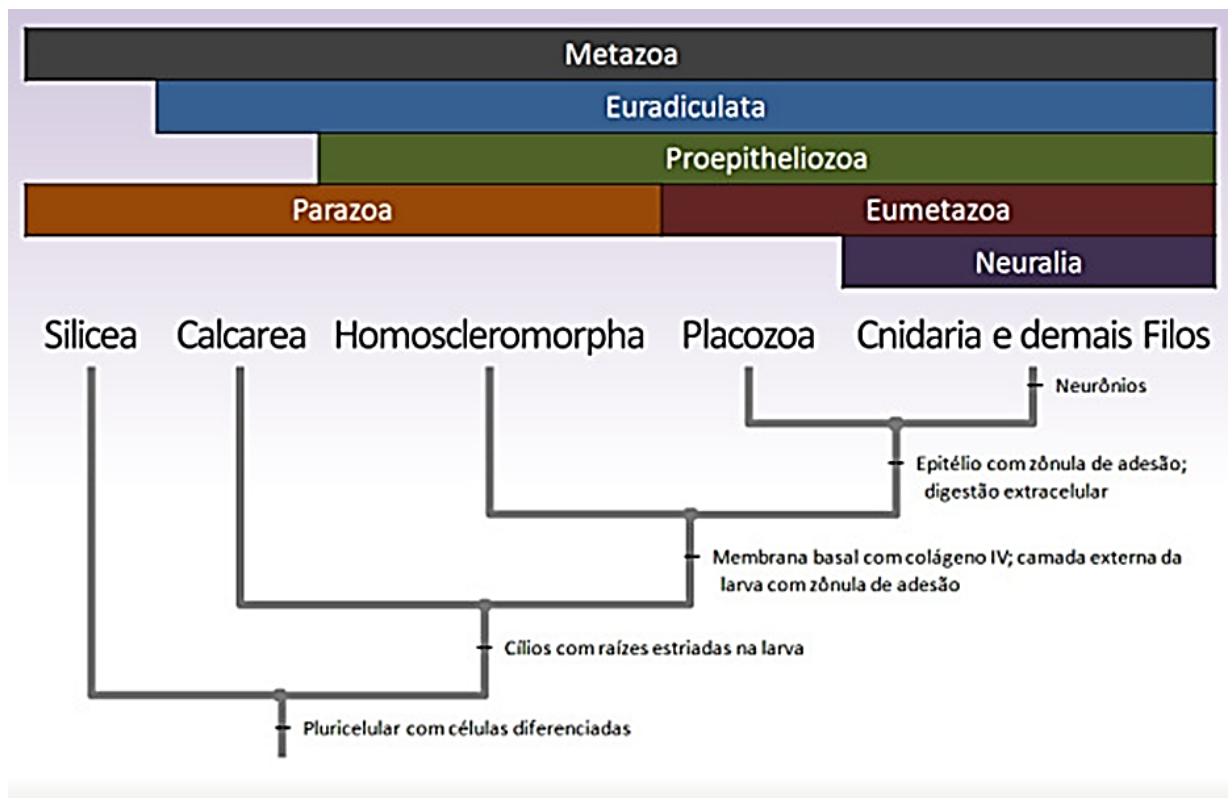


Figura 11 - Cladograma representando a divisão evolutiva do filo porífera de acordo com suas estruturas e sua proximidades com demais filis (Gerardo Furtado, 2013).

Essa simplicidade morfológica e baixo grau de diferenciação tecidual titula o Filo Porífera representado pelas esponjas, como o mais primitivo entre os metazoários. Pois, apesar de multicelulares, suas células apresentam uma organização bem simples e distinta dos demais animais. As esponjas possuem um tecido conjuntivo com matriz altamente gelatinosa e proteica, com algumas células e espículas ricas em sílica e carbonato de cálcio, embebidas nesse complexo gelatinoso. Quanto ao tecido epitelial podem apresentar vários tipos de células

diferenciadas para as mais diversas funções, no entanto essas possuem um baixo nível de integração entre elas (EDWARD; RUPPERT, 1993; BRUSCA & BRUSCA, 2007).

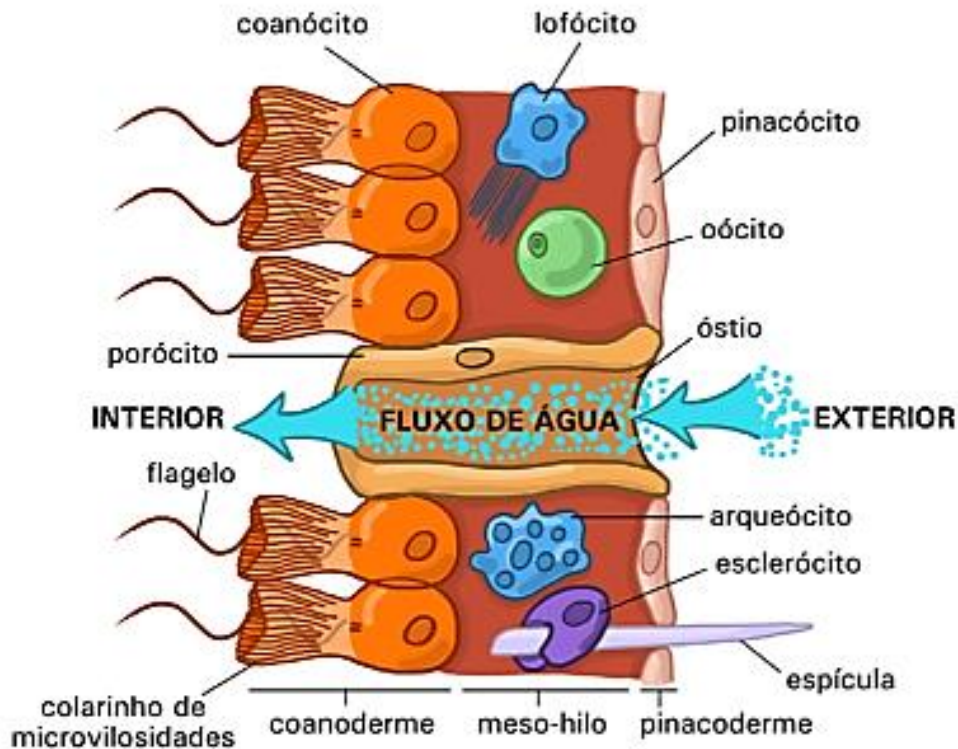


Figura 12 - Representação generalizada dos tecidos e células presentes em representantes do filo porífero. (adaptado de RUPPERT; FOX; BARNES, 2005).

Apesar da simplicidade tecidual (fig. 12), as esponjas apresentam diferenciação celular, sendo as mais claras quanto a sua funcionalidade: os pinacócitos, células em forma de T que se sobrepõe e revestem superficialmente a parte exterior e interior do corpo das esponjas, formando a pinacoderme, esse é o que mais se assemelha a um tecido epitelial nesses metazoários (RUPPERT; FOX; BARNES, 2005).

Essas células podem se diferenciar em outras de acordo com o local onde estão situadas, como endopinacócitos (lofócito, oócito e esclerócito), exopinacócitos e basopinacócitos (fig. 12). Essas últimas secretam um muco polissacarídico e colágeno fibroso que ajudam na aderência e fixação celular. Os pinacócitos também podem se diferenciar em miócitos, células móveis e arqueócitos, células digestivas na maioria das esponjas. Por fim, existem os coanócitos, células com formato ovoide e presença de um flagelo rodeado por um colarinho (HICKMAN; ROBERTS; LARSON, 2004). De acordo com um estudo minucioso de diversas espécies de

poríferos realizado por Bonde e Harris, (1998), as esponjas apresentam um movimento plástico organizacional decorrente principalmente dos movimentos locais dos ameboides.

Essas células encontram-se com uma extremidade embebida no mesohilo e a outra voltada para as câmaras, formando a espongiocele. Os coanócitos estão associados a todas as atividades desses organismos, já que o fluxo contínuo de água que percorre os poros da esponja depende dos batimentos dos flagelos (fig. 12) (HICKMAN; ROBERTS; LARSON, 2004). Este fluxo de água criado é o responsável pelo funcionamento das atividades das esponjas, estando o coanócito intimamente associado à nutrição (BRUSCA & BRUSCA, 2007).

A alimentação das esponjas é composta por organismos microscópicos do zooplâncton e do fitoplâncton, além de partículas orgânicas que se encontram na água. Os nutrientes que entram com a água são filtrados pelos colarinhos dos coanócitos e posteriormente digeridos nos vacúolos. Destas células, passam para os amebócitos, tendo sofrido ou não digestão, que os distribuirão para as outras células do animal. A inexistência de um sistema respiratório faz com que o oxigênio dissolvido na água seja aproveitado pelas células por um sistema de difusão através das membranas celulares. Os resíduos metabólicos e o gás carbônico são eliminados das células diretamente na cavidade central (átrio), chegando ao exterior pelo ósculo (BELARBI, 2003).

Com toda essa simplicidade estrutural das esponjas, questiona-se como esses organismos obtiverem sucesso evolutivo, ao ponto de habitarem praticamente todos os habitats marinhos durante tantos anos na escala geológica, e ainda estarem presentes nos dias de hoje.

Para Muricy (2006), esse sucesso deve-se ao desenvolvimento de características singulares, como totipotência de suas células e desenvolvimento de estruturas que possibilitam o fluxo contínuo de água em seu corpo, denominado de canal aquífero. Este organismo de estrutura simples, aqui descrito pode sofrer graus variáveis de modificação podendo ser dividido em três tipos básicos, baseado em seus sistemas de canais: os tipos asconóide, siconóide e leuconóide (fig. 13).

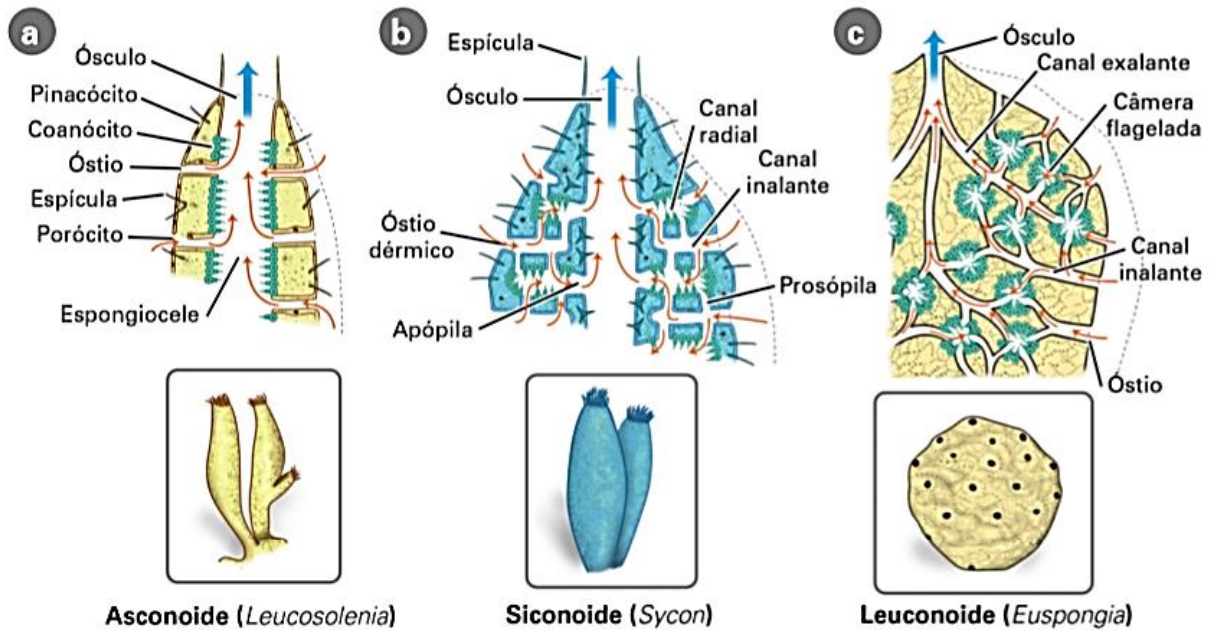


Figura 13 - Representação da classificação do filo porífera quanto a sua morfologia. a) poríferos asconóides, b) poríferos siconóides e c) poríferos leuconóides (adaptado de HICKMAN *et al*, 2004).

Alguns pesquisadores como Simpson em livro de (1984), defendia que as esponjas nada mais eram, que agregados coloniais de algumas células que se organizavam e desempenhavam funções em conjunto, em torno de um sistema aquífero. No entanto, trabalhos realizados recentemente demonstram que as esponjas podem apresentar epitélios selados por substâncias proteicas secretadas pelo próprio organismo (ERESKOVSKY; GONOBLEVA, 2000).

Outro aspecto contraditório sobre atividades fisiológicas das esponjas é a presença de sinalização e sistema neural. Mas, de acordo com (LEYS; MACKIE, 1997; NICKEL, 2004; LEYS, 2007), esses metazoários primitivos apresentam tecidos excitáveis e propagação elétrica, através de estímulos externos que disparam em forma de ondas e controlam as correntes de alimentação, semelhantes ao peristaltismo existente em outros animais mais evoluídos.

Para Leys (2007), o peristaltismo é um importante mecanismo evolutivo, desenvolvido para controlar de forma involuntária o movimento de fluidos corpóreos e o corpo das esponjas representam uma elaboração primitiva desse sistema peristáltico contrátil entre os metazoários. Ainda de acordo com a autora, essas contrações peristálticas coordenadas evidenciam a presença e atuação de tecidos, mesmo que primitivos.

Não se sabe ao certo como ocorre, cogita-se a hipótese de sinalizações associadas a neurotransmissores químicos do tipo Glu/GABA (PEROVIC et al., 1999). Mas as esponjas realizam contrações e resposta a estímulos mecânicos envolvendo uma onda de dilatação e contração, semelhante ao peristaltismo (LEYS, 2007). Em trabalhos mais antigos como realizado por Jones (1962), sugeria-se que a excitação ocorria de célula a célula através de simples movimentos mecânicos, mas trabalhos mais recentes demonstram que essa excitação depende de substâncias químicas secretadas (ELLWANGER *et al*, 2004; ELLIOTT & LEYS, 2007).

De acordo com estudos de Leys e colaboradores (2007, 2009) e Leys; Meech (2006) é mais provável que ocorra uma interação conjunta entre esses mecanismos e uma possível mudança de pressão, que desencadeia as ondas de dilatação e contração em ambos os lados do corpo das esponjas. Há a evidencia que as células ameboides participam desse processo de sinalização, apesar dessas ondas oscilatórias serem mais lentas, com relação aos cnidários, por exemplo, elas percorrem todo o canal aquífero das esponjas (ELLWANGER *et al*, 2004; ELLIOTT & LEYS, 2007).

Desse modo algumas espécies de poríferos realizam uma serie de movimentos análogos ao peristaltismo, contrações eficazes na excreção de resíduos através do sistema aquífero. Esses movimentos envolvem o ósculo e pode se propagar na forma de espasmos (fig. 14). Esses movimentos podem ser repetitivos e coordenados temporariamente e espacialmente, devido a um único estímulo. Esse sistema coordenado e altamente repetitivo demonstra que as células de esponjas são capazes de respostas comportamentais, sem a necessidade de um sistema nervoso central ou células nervosas, como os neurônios ou mesmo na ausência de células musculares (ELLWANGER *et al*, 2004; NICKEL, 2006; ELLIOTT & LEYS, 2007).

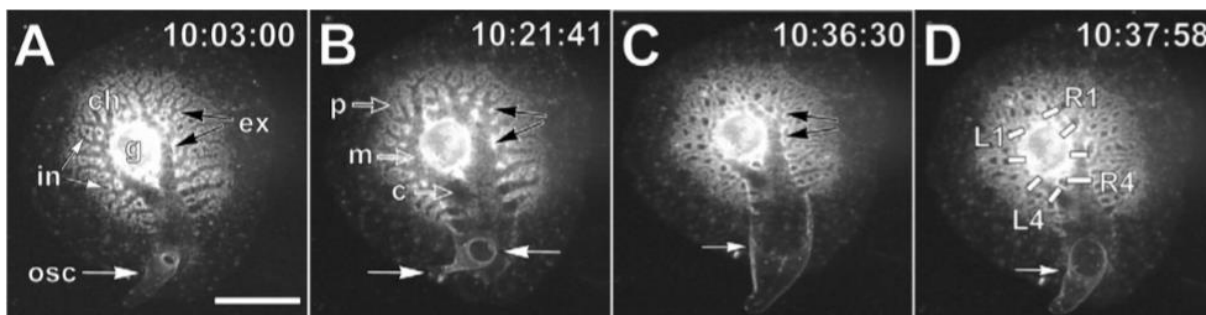


Figura 14 - A resposta de *E. muelleri* (um porífero) à agitação mecânica. (A-D) Micrografias leves ilustrando as mudanças no sistema aquífero excurrente (setas pretas) durante um ciclo de contração-inflação. Choanosoma (ch), canais excurrentes (ex), gemmule (g), canais incurrentes (in) e osculum (osc). Barra de escala, 1 mm. (A) Contração inicial do osculo. (B) Fase de inflação: canais excurrentes dilatam-se (setas pretas); A base do osculum começa a dilatar, mas a ponta permanece constritiva (setas brancas); As setas ocas indicam a localização dos canais periféricos (p), médio (m) e central (c). (C) Fase de contração: contrato de canais excurrentes (setas pretas) e a base do osculo dilata (seta branca). (D) Contração do osculo (seta) e retorno dos canais ao seu diâmetro original (ELLIOTT e LEYS, 2007).

2.3.2 Cnidários

Os cnidários, quanto à sua simetria são representantes dos animais radiais, esses possuem simetria radial primária ou birradial. Os cnidários constituem um filo bem diversificado com mais de 9 000 espécies. O termo cnidário é devido aos cnidócitos, células multifuncionais que podem conter organelas urticantes (nematocistos) (HICKMAN; ROBERTS; LARSON, 2004; MADER, 2012).

Os cnidários são um grupo de animais muito antigo e apesar de sua simplicidade estrutural e funcional são mais evoluídos que os poríferos, por apresentarem folhetos germinativos bem definidos, cavidade gastrovascular responsável pela circulação, digestão e distribuição de alimento (os poríferos apresentam apenas uma cavidade central), são os animais mais simples a apresentar células nervosas (apesar dos nervos não possuírem um sistema nervoso central) e contrações musculares simples, permitindo assim o movimento da maioria de seus representantes (HICKMAN; ROBERTS; LARSON, 2004; BRUSCA & BRUSCA; MADER, 2012).

Esses animais possuem um dimorfismo próprio, apresentando uma alternância de gerações, desse modo, podem apresentar a forma de pólipó ou hidroide, sendo sedentários ou sésseis e uma forma de medusa, medusoide ou água-viva, sendo adaptado para existência flutuante ou livre-natante (HICKMAN; ROBERTS; LARSON, 2004; MADER, 2012).

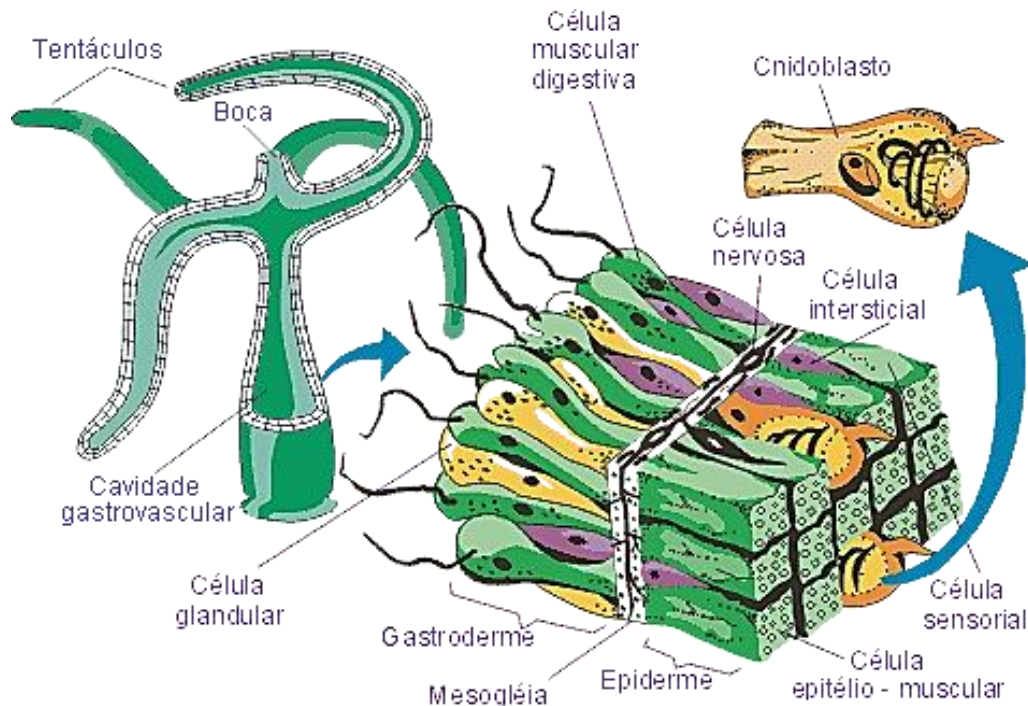


Figura 15 – Representação da estrutura celular de um cnidário (hydra) ilustrando a diversificação celular e morfologia tecidual geral em cnidários (SÓ BIOLOGIA). Disponível em: <<http://www.sobiologia.com.br/figuras/Reinos2/cnidarios4.gif>> Acesso em: jun./2016.

Essa característica de ciclo de vida metagenético, no qual as formas pólipo e medusa se alternam, ocupando os ambientes bentônico e planctônico, respectivamente, confere destaque desse filo com relação aos outros metazoários. O subfilo Anthozozoa é formado pela classe Anthozoa, com espécies exclusivamente polipóides, enquanto o subfilo Medusozoa inclui as classes Hydrozoa, Scyphozoa, Cubozoa e Staurozoa, nas quais a forma medusóide, reduzida ou livre natante é sexuada do ciclo de vida e a polipóide, geralmente colonial, é a fase assexuada. (CORNELIUS, 1992; MARQUES *et al*, 2003).

Em comparação aos poríferos, representantes do filo cnidária apresentam características evolutivas mais desenvolvidas. Como a presença de células musculares e nervosas. Sendo considerados inclusive, os primeiros metazoários a apresentar células nervosas. Nesse contexto, sua estrutura celular é mais complexa (TYLER, 2003).

Para Brusca & Brusca (2007), depois dos poríferos os cnidários são os metazoários com a menor diferenciação celular. Dentre as células que compõem esses organismos estão: As células mioepiteliais, que compõem o epitélio e a gastroderme desses animais, consideradas por muitos especialistas as primeiras células musculares em Metazoa; Células epiteliomusculares, localizadas na

epiderme; células nutritivomusculares localizadas na gastroderme; células intersticiais capazes de se diferenciar em qualquer outra e as células nervosas epidérmicas e sensoriais formando uma rede. Excetuando os representantes Hydrozoa, os tecidos cnidários também podem apresentar cnidócitos, células especializadas equipadas com cnida que auxiliam na proteção e captura de alimentos.

De acordo com estudos de Magie & Martindale (2008), a adesão entre células e a matriz extracelular (Extracellular Matrix - ECM) que as rodeia é vital para a morfologia e fisiologia desses animais, portanto, a evolução dos componentes estruturais é necessária para a adesão e está intimamente ligada a forma. Componentes proteicos responsáveis pela adesão celular entre a célula e o ECM podem estar presentes em qualquer ou em todas as superfícies celulares, ou até em nenhuma. A conversão entre células epiteliais e mesenquimais está envolvida no desenvolvimento de muitas estruturas. No organismo. Além de proporcionar uma integridade estrutural dos tecidos, a organização de células em divisões de epitélios organismo em compartimentos discretos, permite assim estabelecer um ambiente interno especializado, que é necessário para a formação de sistemas e de órgãos complexos.

A evolução da adesão celular está intimamente ligada com a evolução da multicelularidade. A capacidade de células para aderirem umas às outras é de óbvia importância no desenvolvimento de formas multicelulares. Desse modo, o epitélio pode ser visto como uma inovação fundamental em Metazoa. A evolução precoce de metazoários e, em seguida seu grande diferenciamento, é essencialmente a evolução da capacidade de células de se organizar em epitélios, algo que exige os contatos célula-célula discutido anteriormente (CEREIJIDO *et al.*, 2004; MAGIE & MARTINDALE, 2008). Essas características permitem inclusive uma melhor explicação para o modelo de atividade coletiva descrito nesse trabalho.

2.3.3 Ctenóforos

O filo Ctenófora é formado por organismos planctônicos que vivem em grandes profundidades. Os ctenóforos eram agrupados juntamente com os cnidários, em um filo com denominação “Coelenterata”, pois apresentam semelhantes diversas, como: A simetria corporal, mesênquima gelatinoso, ausência

de cavidade corpórea entre o tubo digestivo e a parede corpórea (apresentado uma única cavidade corpórea), sistema nervoso em forma de redes simples ou plexos de atuando de modo descentralizado. Mas, embora não apresente um avanço em nível tissular, possuem alguns órgãos e são mais complexos que os cnidários, seu sistema digestivo é mais organizado, o sistema nervoso apesar de semelhante apresenta células mais especializadas, são monomórficos, ou seja, não apresentam alternância de gerações e nem um tipo de forma de vida larval ou sésil (BRUSCA & BRUSCA, 2007).

Atualmente os representantes dos ctenóforos estão em um filo separado, Filo Ctenophora, sendo ainda subdividido em duas classes de acordo com a presença de tentáculos, em classe Tentaculata e Nuda. Monofilético, seus representantes, todos marinhos, planctônicas, bioluminescentes, predadoras do zooplâncton e de ovos e larvas de peixes. O corpo é muito transparente, frágil, de difícil coleta e preservação. Apesar de sua importância ecológica, são pouco estudados. Possuindo atualmente, cerca de 180 espécies descritas. Todas marinhas especialmente de águas quentes. Com exceção de poucas espécies rastejantes ou sésseis os ctenóforos são livres natantes. O nome Ctenophora deriva do grego e significa "portador de pentes" (HICKMAN; ROBERTS; LARSON, 2004; MADER, 2012).

Os representantes desse filo apresentam cinco caracteres diagnósticos:

- Oito fileiras verticais com cílios fusionados;
- Os pentes (ctenos = pentes) usados na locomoção;
- Simetria birradial, evidenciada pelo sistema de canais pares partindo de um estômago central;
- Células especiais, os colócitos, secretoras de substância mucoide que cobrem os tentáculos dos ctenóforos que os possuem;
- Estatocisto, órgão situado no polo aboral que contém um estatólito, o qual auxilia o batimento dos cílios nos pentes.

Similares aos cnidários apresentam estrutura corporal simples, com simetria birradial e triploblásticos (três camadas de células no corpo) ectoderme a mais externa, endoderme mais interna e mesoderme bem primitiva. Ainda assim apresentam tecidos verdadeiros, formados por uma epiderme e gastroderme (BRUSCA & BRUSCA, 2007).

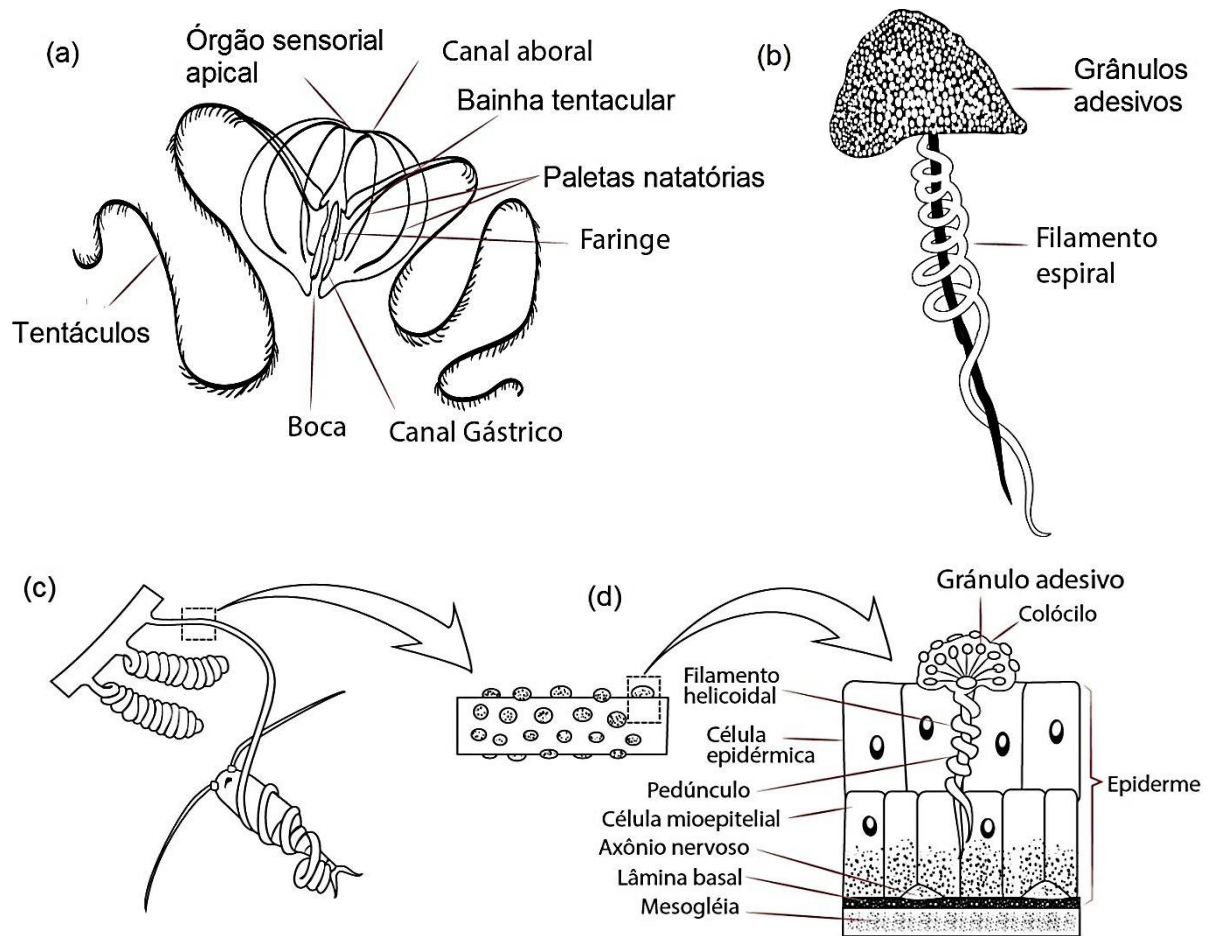


Figura 16 - Estrutura corpórea generalizada dos representantes do filo Ctenófora. (a) representa a estrutura de um ctenóforo; (b) estrutura de grânulos nervosos de um ctenóforo; (c) grânulos espiralados; (d) grânulos espiralados entre as células epiteliais de ctenóforos. Essa estrutura mostra o funcionamento nervoso dos ctenóforos sem a coordenação de um SNC (HICKMAN; ROBERTS; LARSON, 2004; RUPPERT; FOX; BARNES, 2005; BRUSCA & BRUSCA, 2007; MADER, 2012).

Os representantes desse filo variam bastante de tamanho, podendo chegar a mais de um metro. Seu corpo é formado por placas transversais com cílios fundidos, às placas de pente. Possuem tentáculos articulados que auxiliam na alimentação e podem ser retráteis. Apresentam um sistema gastrovascular mais desenvolvido que o dos cnidários, com boca, faringe, estômago e um sistema de canais que se ramificam pela mesogleia e desembocam em canais anais, as secreções ocorrem pela superfície do corpo (HICKMAN; ROBERTS; LARSON, 2004; RUPPERT; FOX; BARNES, 2005; MADER, 2012).

Esses organismos possuem um sistema nervoso semelhante ao dos cnidários, apesar de também não apresentarem um sistema nervoso central,

possuem um plexo de ramificações nervosas formado por uma rede, por onde são transportados os impulsos elétricos (HICKMAN; ROBERTS; LARSON, 2004).

	Poríferos	Cnidários	Ctenóforos
Células	Simples e onipotentes	Maior complexidade	Maior complexidade
Células exclusivas	Coanócitos	Cnidócitos	Coloblastos
Tecidos	Não considerados verdadeiros, com pouca ou nenhuma aderência orgânica.	Verdadeiros com indícios de presença de colágeno.	Verdadeiros com indícios de presença de colágeno.
Células musculares	Ausentes	Presentes	Presentes
Células nervosas	Ausentes	Presentes	Presentes
Sistema nervoso central - SNC	Ausente	Ausente	Ausente
Locomoção	Sésseis	Musculatura	Cílios
Simetria	Radial	Radial	Birradial

Tabela 1 - Comparação entre algumas características morfofisiológicas evolutivas dos filos poríferos, cnidários e ctenóforos.

Fonte: (HICKMAN; ROBERTS; LARSON, 2004; RUPPERT; FOX; BARNES, 2005; MADER, 2012).

2.4 PERISTALTISMO

O peristaltismo é o conjunto de movimentos involuntários, longitudinais ou circulares, realizados pela musculatura lisa e coordenados pelo sistema nervoso autônomo. Ocasionalmente em órgãos ocos do corpo, essas contrações ocorrem em “*wavelike*” ondas progressivas, que podem ter reflexos longos ou curtos através de contrações contínuas que percorrem todo o órgão. (MARIEB & HOEHN, 2010; SEELEY; STEPHENS; TATE, 2011).

A atividade do músculo é modulada por um movimento ondulatório intrínseco que estabelece o ritmo para contração, com um potencial elétrico de 5 mV, podem

haver duas formas de despolarização: Ondas lentas que são despolarizações espontâneas, lentas e transitórias do potencial de membrana podendo ser conduzidas por várias distâncias ao longo do trato (ritmo elétrico basal), ou potenciais em picos ou espículas, despolarizações transitórias mais rápidas que podem ocorrer em ondas agudas e repetitivas e potenciais picos (ASCOLI, 2015). Essas contrações *wavelike* são necessárias para realização e ação de várias atividades corpóreas, estando presentes até nos mais primitivos animais (MARIEB & HOEHN, 2010; SEELEY; STEPHENS; TATE, 2011).

Para Sally Leys:

Peristaltismo é um eficiente mecanismo para controlar o movimento de fluido através de um tubo, e normalmente consiste de uma série de padrões motores que controlam relaxamento na frente e atrás de contração do ser objeto movido pelo fluido (2007, p).

As esponjas apresentam ondas de disparo, podendo apresentar movimentos peristálticos semelhantes aos encontrados em animais com sistema nervoso desenvolvido (LEYS, 2007).

Alguns animais como os anelídeos utilizam a ação dos movimentos peristálticos para se locomover (QUILLIN, 1998). Em uma grande variedade de animais os movimentos peristálticos, controlados pelos nervos, desempenham funções variadas, dentre elas a locomoção (HELDER & TRUEMAN, 1985).

Desse modo, podemos associar os movimentos peristálticos não só a sistemas como o digestório e reprodutor, por exemplo, mas a atividades fisiológicas diversas exercidas pelo organismo. Principalmente em funções reguladoras da homeostase. No presente trabalho, o modelo construído baseia-se na capacidade de certos organismos realizarem funções fisiológicas através de ondas peristálticas que se propagam por todo sistema, emergindo para um ECAO, o que resulta uma determinada ação vital ao organismo.

2.5 HOMEOSTASE

No dicionário Aurélio, temos a definição de homeostase como o processo de regulação do equilíbrio em um organismo vivo ou a “capacidade do organismo de se manter constante, para que suas funções e reações químicas essenciais não sejam

influenciadas e permaneçam dentro dos limites aceitáveis à manutenção da vida” (FERREIRA, 2010).

Claude Bernard (1813-1878), considerado o fundador da medicina experimental moderna, criou a expressão “meio interno” quando observou que, mesmo sob fortes variações do meio externo, um organismo vivo sempre tende a manter uma constância ou equilíbrio interno. Posteriormente O fisiologista norte-americano Walter Canon, com base no conceito estático do meio interno de Claude, propôs o conceito de homeostasia como a propriedade auto-reguladora de um sistema vivo ou organismo, que permite manter o estado de equilíbrio de suas variáveis físico-químicas essenciais ou ambientais.

Em termos celulares, o conceito de homeostasia aplica-se às atividades fisiológicas diversas, como na produção proteica e suas funções catalíticas e enzimáticas, que dependem das condições internas e ambientais, como: pH, osmolaridade, temperatura, composição química, além de outros fatores diversos, considerados ideais para o funcionamento fisiológico adequado, viabilizando assim a sobrevivência das células e dos sistemas formados por elas. Deste modo, quando a constância do sistema é comprometida de alguma forma, podem ocorrer às neoplasias, decorrente de uma ruptura no controle de divisão e morte celular, fazendo com essa afaste-se daquilo que é considerado normal (MATURANA & VARELA, 1997, 2001; CLÁUDIA, 2012).

Os biólogos chilenos Humberto Maturana e Francisco Varela criaram nos anos 1970, a teoria da autopoiese, conceito que explica os processos de funcionamento de sistemas vivos como auto-organizáveis. De acordo com estes autores a auto-organização apresenta-se como uma característica diferencial dos seres vivos. Em seu questionamento sobre: “O que é vida?”. Para Maturana e Varela a resposta para esta incógnita estava mutualmente ligada a outro questionamento: “Qual é a organização do ser vivo?”. Para eles era simples identificar um ser vivo mediante suas principais características, tais como reprodução, hereditariedade, crescimento, irritabilidade, adaptação e evolução, desenvolvimento e diferenciação, seleção natural, dentre outras. No entanto, estabelecer a composição e fisiologia primordial de um organismo vivo torna-se uma tarefa o tanto complexa, nesse trabalho, por exemplo, são descritos seres vivos do tipo metazoários pouco conhecidos em alguns aspectos.

Já foi apresentado neste trabalho que um sistema pode ser definido como o conjunto de relações existentes entre os seus componentes, independentemente destes componentes, de forma organizada. Já o conjunto de relações efetivas entre os componentes do sistema em um determinado espaço forma sua estrutura. Levando em consideração a organização e os limites de um sistema. Assim, Maturana e Varela (1997), associavam os seres vivos à máquinas.

Ainda de acordo com os autores, os seres vivos constituem máquinas homeostáticas, denominadas estruturas autopoieticas. Capazes de uma leve flexibilidade, em intervalos e valores determinados. Mas que tendem a manter um estado de equilíbrio de forma coerente com suas necessidades fisiológicas. Nesse contexto, alguns desses sistemas vivos possuem a capacidade de manter a estabilidade através de mecanismos internos, pela sua própria organização, sendo chamadas assim de homeostáticas. Desse modo, a ideia de autopoiese formulada e defendida por Maturana e Varela, pode ser considerada uma expansão da ideia de homeostase em duas direções importantes: A referência da homeostase ao ambiente interno do sistema e a produção de identidade do sistema.

Com bases nesses conceitos é possível compreender e embasar de forma assertiva a dinâmica do modelo energético SOC para atividade coletiva em tecido animal desenvolvido neste trabalho.

2.5.1 Mecanismos homeostáticos básicos

O termo homeostasia é utilizado pelos fisiologistas e estudiosos da área para caracterizar a constância do meio interno, determinando assim um ponto de equilíbrio em organismos vivos. No corpo humano, todos os órgãos e tecidos contribuem para a manutenção desta constância. Em síntese, os grandes sistemas contribuem de maneira particular, para a constância homeostática de todo o organismo. Os sistemas funcionais básicos, e suas contribuições para a homeostase do organismo, guardam relações fundamentais com os seguintes conceitos: o sistema de transporte do líquido extracelular, origem dos nutrientes do líquido extracelular, a remoção das escórias metabólicas, a regulação das funções corporais e a reprodução (MATURANA & VARELA, 1997, 2001; CLÁUDIA, 2012).

3 METODOLOGIA

Uma característica comum de animais multicelulares primitivos é a presença de uma cavidade central, em alguns mais desenvolvidos e complexos evolutivamente apresentam uma cavidade digestiva. Este aspecto pode ser generalizado em poríferos, cnidários e ctenóforos. Normalmente, a cavidade digestiva é formada por um tecido epitelial, que no modelo produzido neste trabalho apresenta-se como um tecido cúbico simples descrito na figura 17 (c).

A forma exata do tecido epitelial não é importante, mas um tecido cuboide faz uma analogia geométrica com a rede quadrada que é uma construção padrão utilizada na modelagem computacional (fig. 18). Animais vertebrados superiores apresentam um sistema digestório completo ou canal para entrada de nutrientes e eliminação de digestos, já em alguns invertebrados (cnidários e ctenóforos) a cavidade central ou digestiva tem uma única entrada de nutrientes e saída para excretar o material não utilizado. Cavidades digestivas alternativas com várias entradas e saídas (inputs / outputs) podem ser encontradas em porífera (RUPPERT; FOX; BARNES, 2005; BRUSCA & BRUSCA, 2007). No presente trabalho esses três filos animais são contemplados pelo modelo.

Além disso, a cavidade central ou digestiva deve produzir algum tipo de movimento de tecido para ajudar o fluxo de nutrientes ao longo do corpo. Em animais primitivos esse movimento tecidual ou oscilação, não necessita seguir um padrão periódico, mas, pode apresentar eventos espasmódicos. Nas figuras (18 e 19) está demonstrado o esquema do modelo, que aqui ilustram o sistema digestivo de uma esponja.

O objetivo do modelo é conectar nutrição ao movimento que o tecido realiza desconsiderando a saída e entrada simulando através de um modelo computacional quadrado as condições de contorno periódico. Supondo nesse modelo que o nutriente diluído em água, principalmente no caso das esponjas, cada célula da cavidade central ou digestiva, está em contato com o meio que transporta nutrientes. Além disso, está associado a uma probabilidade p para cada célula absorver a quantidade de nutriente suficiente para ser capaz de participar de um movimento coletivo do tecido. As células que não têm absorvido uma quantidade mínima de energia não se movem enquanto as células com energia suficiente, ou células energéticas, devem participar do movimento coletivo.

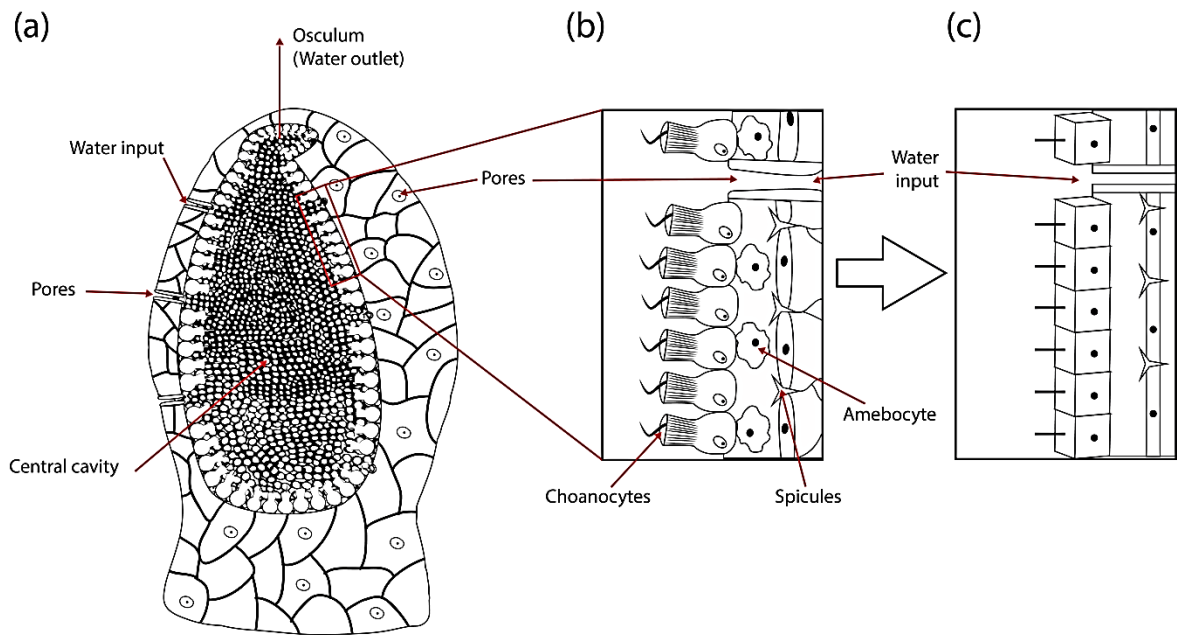


Figura 17- Ilustração do modelo generalizado dos filos porífera, cnidária e ctenófora usando como base o corpo de um porífero. A partir de (a) a (c) que mostram o esquema do modelo; em (a), que ilustram a esponja com uma seção da cavidade interna digestivo. A Figura (b) mostra a parte do tecido com suas principais células funcional. Em (c) temos uma analogia dos sistemas, com uma representação cuboide. Base da estrutura 17 (a) adaptado de (RUPPERT; FOX; BARNES, 2005; BRUSCA & BRUSCA, 2007).

Esse movimento coletivo pode ser considerado como uma onda de despolarização de células que se propaga ao longo das células energéticas vizinhas. Além disso, assumimos que espontaneamente cada célula energética, atua com uma probabilidade muito baixa f , com $f \ll p$, podendo iniciar uma onda de despolarização. Uma vez que a onda de despolarização começa ao longo das células energéticas próximas. Como veremos, este modelo produz ondas de movimento críticos no tecido digestivo ou similar. A seguir, uma síntese do algoritmo do modelo numa notação mais matemática. Com uma estrutura quadrada de tamanho L :

- Com probabilidade p qualquer célula pode ter energia suficiente e se tornou um energizado celular.
- As células energéticas podem iniciar ou participar, de uma atividade coletiva.
- Com probabilidade $f \ll p$ cada célula energética com uma capacidade mínima de energia pode iniciar uma onda coletiva de atividade.
- O movimento coletivo se propaga ao longo células energéticas vizinhas.
- O movimento coletivo para quando todos s células vizinhas são atingidos.

A probabilidade f de iniciar uma atividade coletiva como uma oscilação de tecido mesmo sem qualquer entrada externa. A probabilidade de ter células com energia suficiente para iniciar um movimento coletivo. O tempo de queima do agrupamento maior = t . Para que o sistema mostre SOC, é necessário que $f \ll p \ll t$. Começamos com uma malha quadrada de tamanho $L=10$.

Em cada passo, com probabilidade p cada célula pode atingir energia suficiente para iniciar uma atividade coletiva. Com probabilidade $f \ll p$ cada célula pode por si só iniciar uma atividade coletiva que se propaga para as células que têm energia suficiente. O tamanho do cluster que participa da atividade coletiva mostra uma relação crítica.

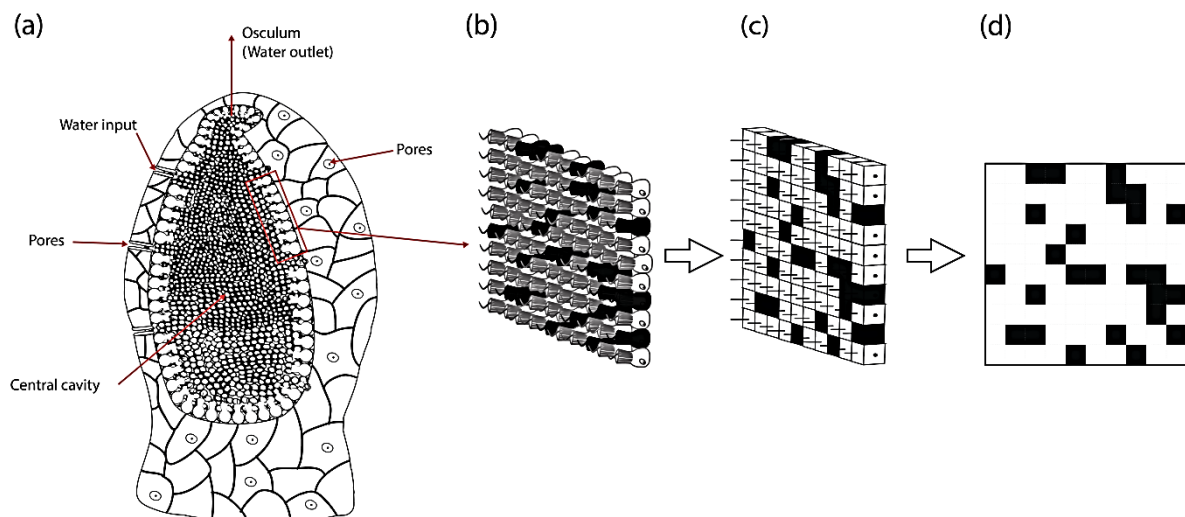


Figura 18- Ilustração do modelo generalizado dos filos porífera, cnidária e ctenófora usando como base o corpo de um porífero, com suas células ilustradas em uma malha cúbica e matriz. A partir de (a) a (c) que mostram o esquema do modelo; em (a), que ilustram a esponja com uma seção da cavidade interna digestivo. A Figura (b) mostra a parte do tecido cuboide interna do tecido digestivo. Em (c) mostrar a topologia do sistema, finalmente, em (d), chegamos ao quadrado que representam a estrutura matemática celular do modelo. Base da estrutura 18 (a) adaptado de (RUPPERT; FOX; BARNES, 2005; BRUSCA & BRUSCA, 2007).

O modelo SOC apresentado neste trabalho foi elaborado para animais simples ou primitivos. O modelo baseia-se num sistema de tecido animal formado por um conjunto de células epiteliais ou análogas, como nas figuras (17 e 18). As principais características desse modelo são as seguintes:

- (i) é um modelo mecânico de curto alcance no sentido de que cada célula única interage com células vizinhas;
- (ii) é um modelo fisiológico que trabalha com células que absorvem nutrientes do meio ambiente e armazenar energia;
- (iii) a produção do modelo é uma resposta a atividade crítica correspondente ao movimento de animais mais simples desprovidos de um sistema muscular ou nervoso, ou portadores desses sistemas de forma de forma bem rudimentar.

O resultado do modelo é uma intensa atividade que segue uma distribuição de lei de potência, a entrada de energia no modelo é aleatório e a lei de potência emerge como uma resposta. Deste modo, o modelo construído neste trabalho enredada três princípios básicos: nutrição do meio ambiente, estoque de energia e de movimento de tecidos.

Para confecção das ilustrações representantes do modelo (fig. 17 e 18) além de outras figuras adaptadas para esse trabalho, foi utilizado o programa computacional Adobe Illustator Artwork 16.0. Para confecção da imagem 19, onde há a representação analógica do *Forest Fire* como o modelo da SOC, foi utilizado o programa R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing (2008). O programa computacional utilizado para confecção dos gráficos apresentados neste trabalho foi o Programa software XmGrace Development Team (2007). Para realização do modelo foi utilizado o Programa C - IDE (2011).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados do presente trabalho começam com uma representação pictórica do modelo. Na figura 19 há a ilustração da evolução temporal do modelo em uma rede quadrada $L=10 \times 10$; nesta simulação é utilizado $\theta = p$ e $f = 4$. (a) demonstra uma ocupação aleatória; a partir de (b) a (e) é adicionada uma célula energética a cada passo; as células ativadas são introduzidas de forma aleatória representada pela cor cinza. Em (f), a célula (4, 2) é provocada aleatoriamente e ativa a célula em conjunto (3, 2). Mais uma vez a partir de (g) a (j) uma célula energética é adicionado em cada etapa, em (k) uma única célula, sem vizinhos (9, 1) é provocada. Além disso, a partir de (l) a (o) novas células energéticas são adicionadas. Em (p) da célula (8, 9) faíscas e cinco outros que participam do mesmo cluster são ativados em conjunto. Esta figura foi produzida dentro do R Programa de Meio Ambiente (R DEVELOPMENT, 2008).

A analogia deste algoritmo modelo de percolação e algoritmos de incêndios florestais (*Forest Fire*) é evidente. Uma comparação entre o modelo de incêndios florestais e a célula energética Modelo de SOC pode ser usado para melhorar a nossa compreensão da fenomenologia por trás dos modelos (tab. 2). Em ambos os casos, temos uma rede quadrada subjacente com sítios vazios e ocupada.

Duas probabilidades estão presentes, a primeira é associada para a transição de vazios para preencher espaços. A segunda refere-se à probabilidade de um conjunto de locais ocupados, conectados e apagá-las. Na tabela 2, é possível explorar essas analogias com mais detalhes.

	Modelo <i>Forest Fire</i>	Modelo Energético SOC
Célula ocupada	Árvore	Célula energética
Célula vazia	Posição vaga	Célula não energética
Probabilidade de rede do elemento	Crescer uma árvore	Célula tornando-se energética
Evento de ativação	Árvore inflamada	Célula que faísca espasmos
Dinâmica SOC	Fogo na floresta	Movimento espasmódico
Quantidade de lei de potência	Tamanho do fogo na floresta	Tamanho da oscilação do tecido

Tabela 2 - Comparação entre o Modelo de incêndio florestal (*Forest Fire*) e o Modelo SOC energético.

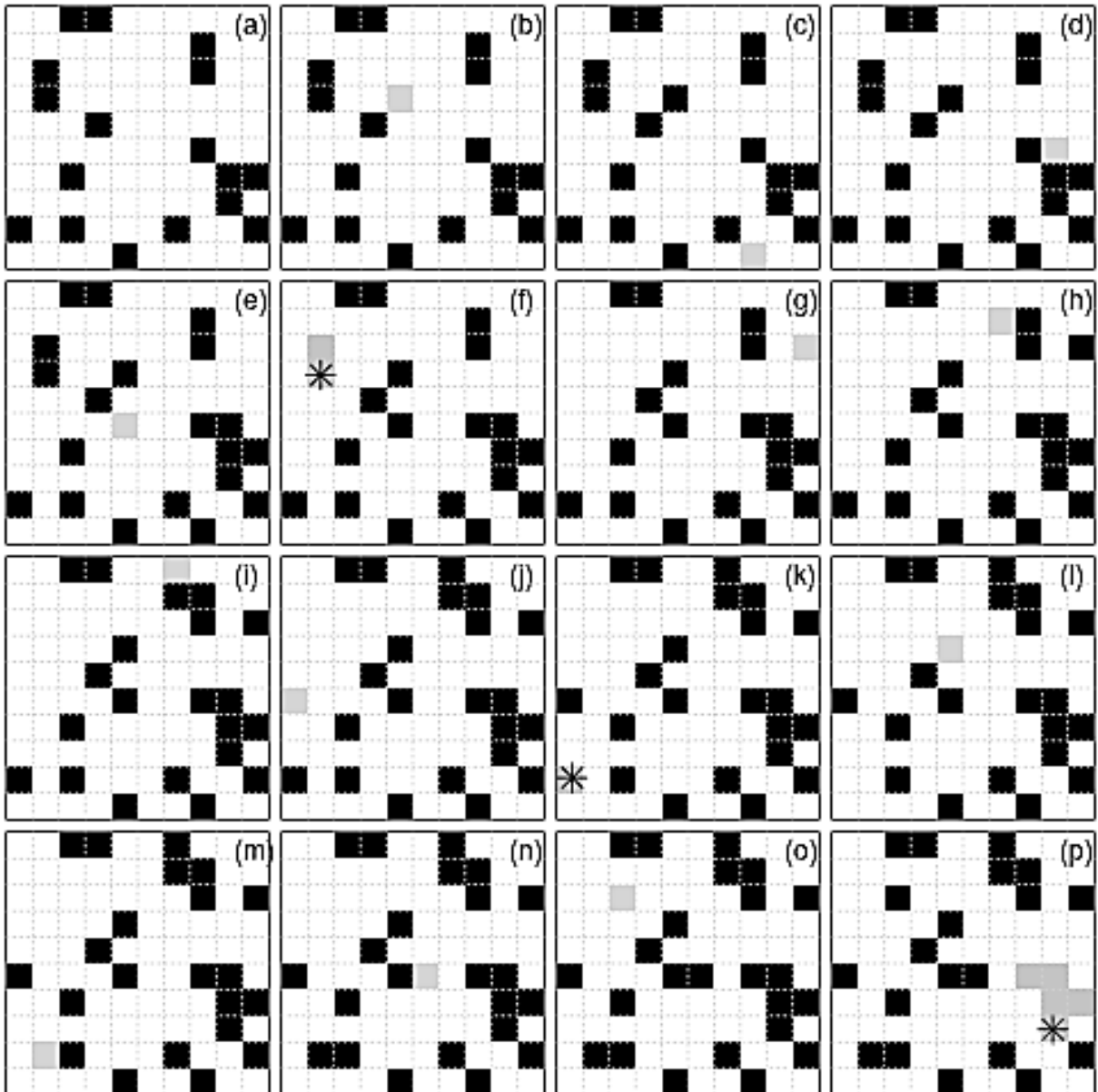


Figura 19- Esquema básico do modelo de SOC. Em (a) que iniciar o processo com uma ocupação aleatória; (f), (g) e as células preenchidas (p). Utilizando $\theta = 5$, o que significa para cada cinco eventos de adição de locais aleatórios que ativam uma célula com todo o seu conjunto vizinho.

O processo de SOC elaborado neste trabalho é aberto. De forma abstrata as condições para ter um ECAO em um processo são:

- (a) interações de curto alcance entre as células;
- (b) as células podem participar aleatoriamente de certos processos;
- (c) uma vez que uma célula é ativada espontaneamente excitará todo o seu conjunto de vizinhos.

Esses aspectos podem visualizados no esquema básico do modelo de SOC (fig. 19).

O modelo energético auto-organizado descrito neste trabalho, compartilha as mesmas escalas de tempo características do Modelo de SOC padrão (TURCOTTE, 1999; DICKMAN *et al*, 2000). Para t o tamanho do tempo de combustão da maior cluster é $f \ll p \ll t$. De acordo com (DICKMAN *et al*, 2000) essa condição é necessária para garantir uma lei de potência $P(s) \propto s^{-\tau}$. Esquema básico do modelo de SOC (fig. 20). A frequência de grupos de células que participam no movimento espasmódico do tecido é ilustrada na figura 19, já o ECAO descrito em lei de potência pode ser observado da figura 21, onde um gráfico com diferentes tamanhos de L ilustra a curvatura em *Power Law*, partindo de $L=0$ até $L=1000$.

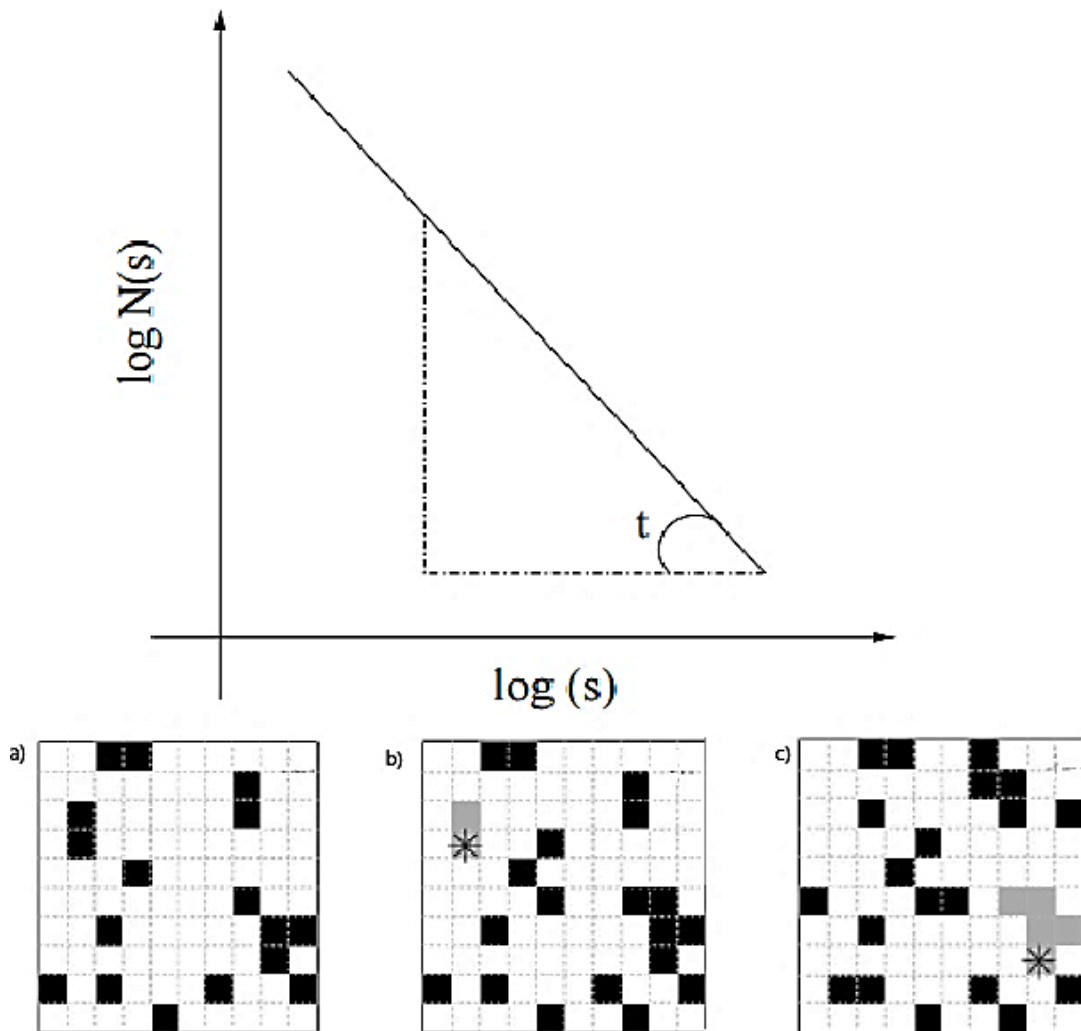


Figura 20 – Representação de uma escala de Lei de Potência (BAK, 1996; MITCHELL, 2009), relacionada aos diferentes estágios da matriz, descrevendo os eventos ocorridos e sua frequência. a) mostra os eventos mais frequentes, simples e comuns, na matriz a não ocorrência de excitação. b) Eventos que ocorrem de forma menos constante, na matriz a excitação de células aleatórias. c) Demonstra os eventos mais raros e fortes ocorridos na matriz que não ocorrem de forma frequente, com uma excitação que se propaga de forma coletiva.

O comportamento geral desta curva aponta para um grande número de pequenos eventos e alguns grandes eventos. A alta frequência de excitação do tecido com poucas células pode ser interpretada como pequenas oscilações locais do tecido. Em oposição, os poucos eventos com grande número de células que participam correspondem a grandes movimentos espasmódicos em amplitude. Esses estão em conformidade com os conceitos de SOC descritos por BTW (1987).

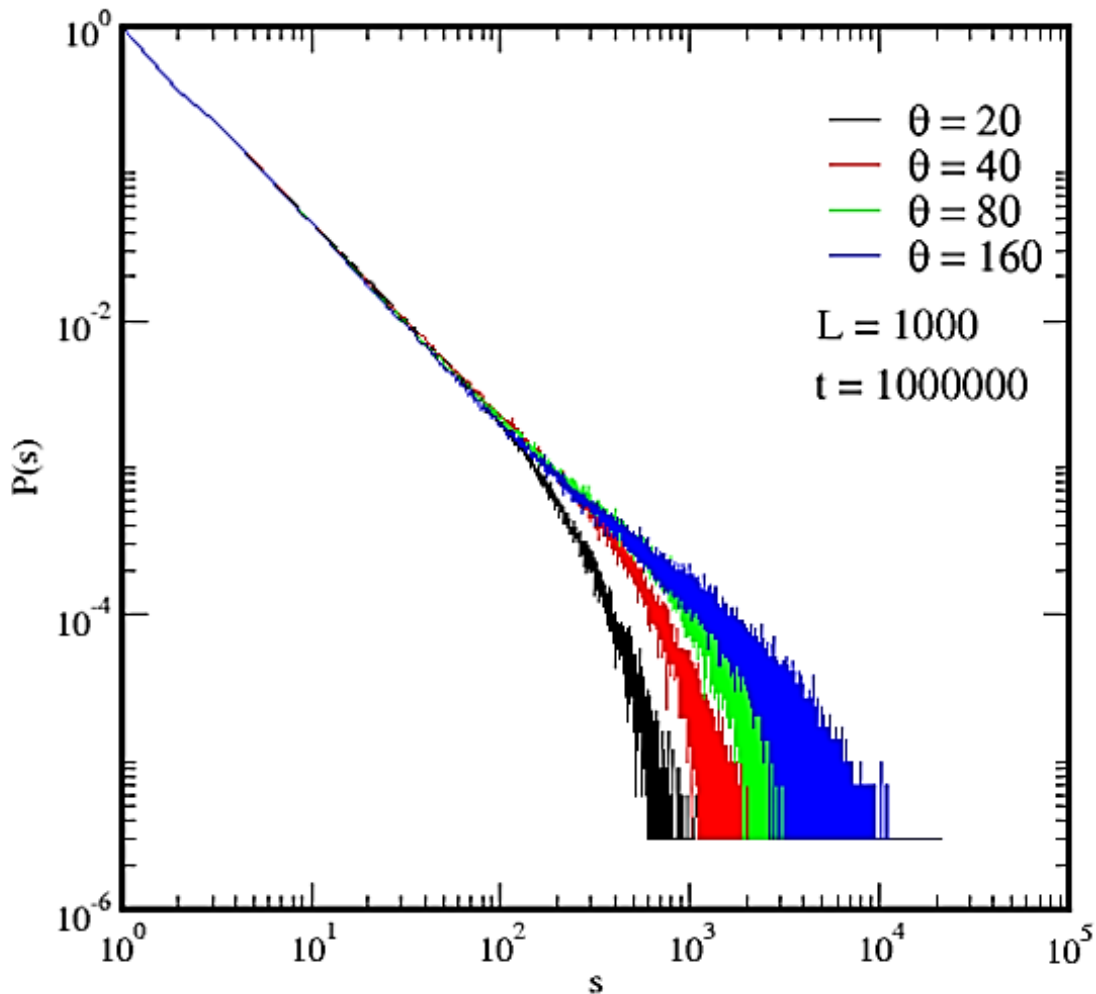


Figura 21 - Um gráfico que representa a frequência do tamanho do conjunto $P(s)$ em relação à s . Na figura usamos $L = 1000$ e vários θ indicados na legenda.

O aspecto geral da figura 21 é uma lei de potência com um Exponencial Cutoff. O melhor ajuste da lei de potência é $\gamma = 1,23 \pm 0,007$; na estimativa do presente trabalho, foi utilizado o primeiro da segunda ordem inicial de magnitude para executar o ajuste dos dados. Desse modo, chama-se a atenção que o γ estimado esteja de acordo com resultados similares da literatura (DROSSEL; SCHWABL, 1992; GRASSBERGER, 2002).

O efeito da relação $\theta \equiv p / f$ também é analisado na figura 19. Observa-se que, quando o θ aumenta, mais células são recolhidas aleatoriamente e tornam-se ocupadas. Este fenômeno faz com que ocorra um aumento no tamanho do aglomerado. De fato, observa-se que θ maiores atingem valores de s mais altos no gráfico (fig.21). Nesta figura em particular empregam-se o mesmo tamanho da estrutura $L = 1000$ e algoritmo de tempo de execução $t = 1000000$.

A Lei de Potência está presente em uma gama de eventos naturais, sendo algo bastante discutido e estudado por estudiosos atualmente (BAR-YAM, 1997; JESUS & KAWANO, 2002; TELLES *et al.*, 2006, 2007). Ao analisar os dados dispostos na matriz modelo (fig. 19) baseados na atividade coletiva de um tecido animal, temos uma curvatura em *Power Law* como descrita na (fig. 21), apesar do modelo produzido constituir-se de uma matriz pequena com $L = 10 \times 10$. Já que, independente do tamanho do L de uma matriz ou modelo, a curvatura de Lei de potência de um sistema complexo SOC será notável. Como é possível verificar nas figuras (22, 23 e 24). Estas apresentam L e θ com uma variação de tamanho partindo de $L=50$ e aumentando gradativamente para $L= 100$, $L=200$, até $L=1000$. Esse aspecto corrobora com as possíveis variações de tamanho dos tecidos vivos trabalhados (poríferos, cnidários e ctenóforos).

No presente trabalho os modelos baseados em atividades fisiológicas de animais simples são dispostos com base em leis de potência. Para construção dos gráficos apresentados nesse estudo foram feitas analogias entre tecidos animais e matrizes *Forest Fire Model*, apesar de constituírem modelos distintos, podemos citar também a semelhança com os autômatos celulares (ACs). Desse modo, Estão ilustrados a seguir alguns exemplos de gráficos com diferentes tamanhos de L , que se referem à analogia disposta no modelo de tecido cúbico formado por células epiteliais de um animal fisiologicamente simples que pode ser: porífero, cnidário ou ctenóforo.

A confecção de um modelo análogo ao *Forest Fire* representa a dinâmica das células de um tecido vivo, no caso em especial de animais simples. Esse modelo pode ser aplicado de forma abrangente entre os filos porífera, cnidário e ctenófora. Levando em consideração os conceitos que norteiam os sistemas complexos, uma curva de Lei de Potência é verificada quando relacionada aos dados referentes ao modelo. De acordo com o modelo proposto é possível inferir que as atividades celulares e teciduais dos referidos metazoários apresentam um padrão SOC.

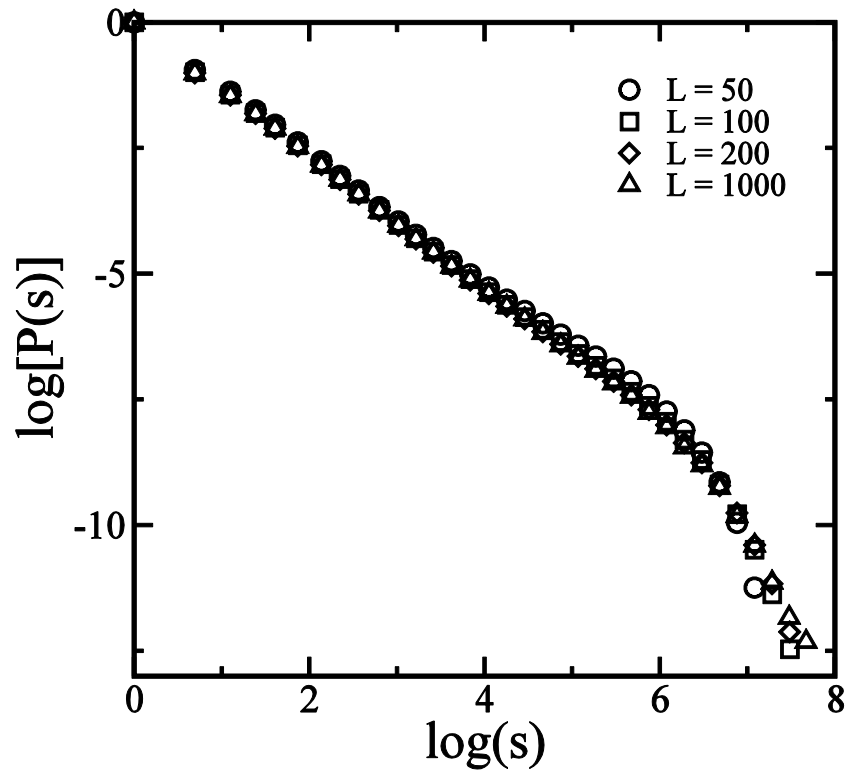


Figura 22– Gráfico que demonstra a lei potência em escalas de $L=50$, $L=100$, $L=200$ e $L=1000$. Baseadas nos dados dispostos nas matrizes desse trabalho.

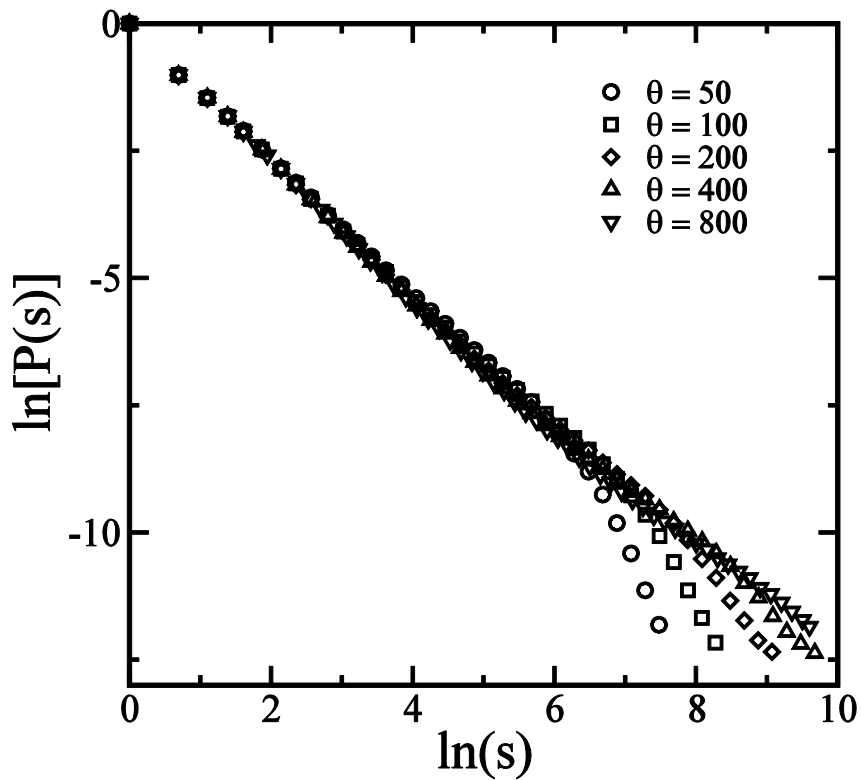


Figura 23 – Gráfico com demonstração da relação entre probabilidade de um evento atingir um estado crítico em uma escala espacial. Em escalas de $\theta = 50$, $\theta = 100$, $\theta = 200$, $\theta = 400$ e $\theta = 800$.

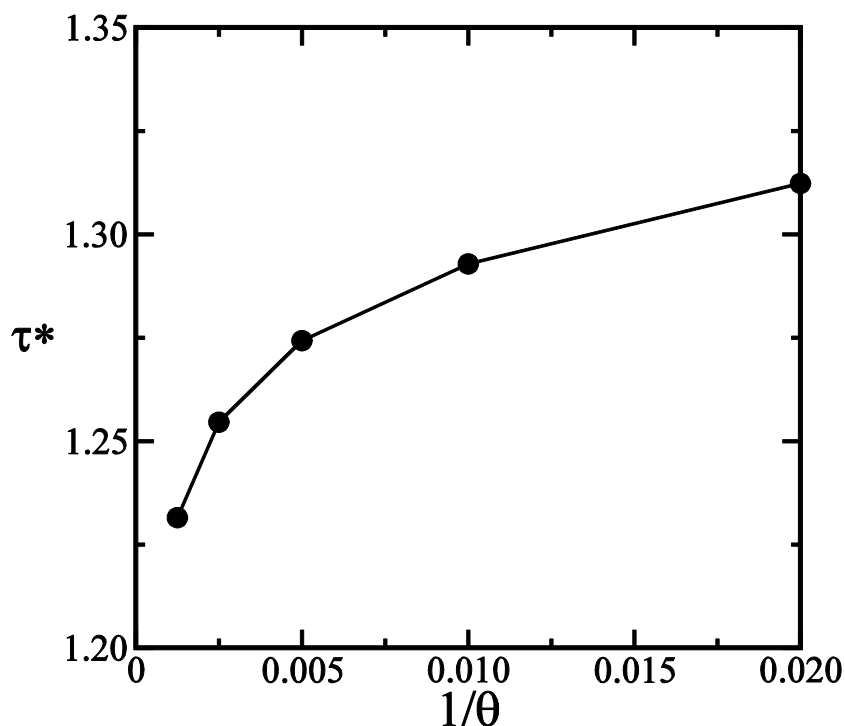


Figura 24- Gráfico que demonstra a probabilidade = θ dos eventos alcançarem um estado crítico.

Com base na teoria de Darwin sobre a evolução das espécies, a existência e ocorrência de mutações aleatórias e ao acaso podem ser transmitidas aos seus descendentes conferindo a esses organismos características vantajosas que permite a sobrevivência dos mais aptos, através do processo de Seleção Natural. Lembrando que esse processo pode ser considerado inclusive um sistema complexo com SOC (NUSSENZVEIG, 2008).

Ainda de acordo com Nussenzveig (2008), o cérebro apresenta várias características de um sistema complexo SOC. Desse modo, essas propriedades de um sistema crítico auto-organizado teriam surgido nos primeiros metazoários e permanecido até os mais desenvolvidos animais atualmente.

Em um importante trabalho Chialvo (2006), discute sobre a possibilidade do sistema sensorial e nervoso humano apresentar SOC. Já que, esse ECAO pode ser benéfico em um mundo onde a natureza se organiza em ECAO. Neste trabalho o autor utiliza um modelo de autômato celular simples para demonstrar a existência de SOC no funcionamento celular (fig. 25), descrevendo uma explicação física simples para a capacidade que nossos sentidos possuem de responder facilmente a mudanças do ambiente, através de informações transmitidas pelas células.

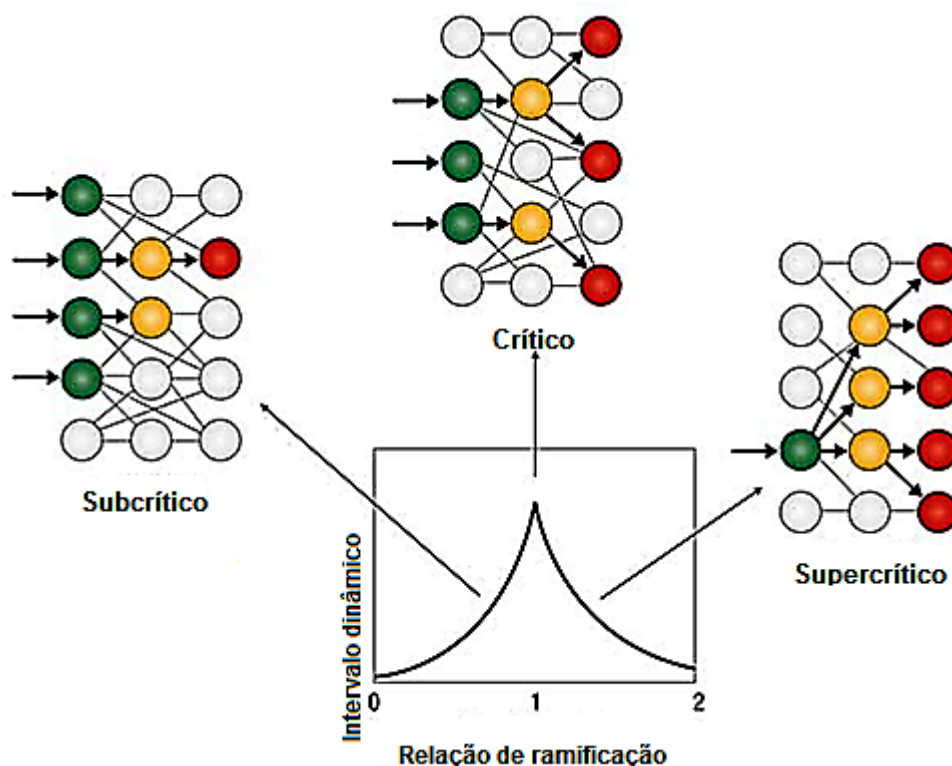


Figura 25 – Representação de um ECAO em um esquema celular, demonstrando as transições de fase entre os estados crítico, subcrítico e supercrítico em uma dinâmica celular. (Adaptado de CHIALVO, 2006).

Nesse modelo o autor (CHIALVO, 2006), apresenta a transição de fase do estado crítico. Demonstrando a dinâmica existente entre as células, onde o crítico é mantido, no subcrítico ocorre a incapacidade de sustentar um padrão de entrada e no supercrítico ocorre a explosão de atividades, semelhante aos conceitos discutidos anteriormente sobre SOC. KINOUCI & COPELLI (2006), definem como ramificações a dinâmicas existente entre as células. Para eles essa dinâmica emerge da interação excitável entre células agrupadas e resulta em um ECAO, podendo ser extremamente sensível a pequenas perturbações, independente da simplicidade ou complexidade das células envolvidas, apresentando criticalidade na borda de uma transição de fase.

Esses trabalhos corroboram com os aspectos que norteiam o modelo energético auto-organizado desenvolvido para atividade coletiva em tecidos de animais simples, desenvolvido no presente trabalho. Além de abrir uma discussão importante sobre a existência de SOC entre os metazoários, desde os mais primitivos. Sendo passada de forma evolutiva até os mais desenvolvidos, como o ser humano.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foi desenvolvido um modelo analógico ao *Forest Fire* para produzir SOC em tecido de vida animal, com ênfase em tecidos de animais considerados simples do ponto de vista estrutural e fisiológico. O modelo está embasado nos seguintes conceitos: nutrição, energia armazenada e atividade coletiva. Compondo um modelo muito geral, este consegue direcionar de forma mais clara (em termos evolutivos) aspectos de criticalidade na vida. De acordo com os aspectos do modelo produzido, esse processo de SOC é possível em um organismo vivo se um conjunto aleatório de células é ativado espontaneamente. Apesar de estar embasado em um modelo já existente, a aplicação do mesmo em tecidos de animais simples pode ser considerada pioneira, uma vez que não há registros na literatura um trabalho semelhante.

Os resultados obtidos sugerem a existência de SOC na dinâmica dos tecidos, especialmente nesse caso, na dinâmica das células presentes em alguns animais ditos primitivos, por apresentarem características simples quando comparados aos demais metazoários. A dinâmica do modelo realizado, baseia-se na capacidade de absorção, armazenamento e dispersão de energia pelas células de forma aleatória e atemporal sem a atuação de uma central de controle ou ação de um controle de *feedback*, justificando a importância de se trabalhar com animais desprovidos de SNC no presente estudo.

Levando em consideração os principais autores discutidos nesse trabalho, como Bak e colaboradores com a teoria da criticalidade auto-organizada, Claude sobre a homeostase, Maturana e Varela com sua teoria de autopoiese, além de zoologistas como Sally Leys e seus estudos sobre o desenvolvimento de animais simples, dentre outros autores, é possível criar uma ligação entre esses conceitos, associando a necessidade de equilíbrio homeostático de um organismo a sua capacidade de autorregulação e auto-organização para alcançar esse equilíbrio, sendo essa característica benéfica passada de forma evolutiva para seus descendentes.

Contudo, este trabalho trata-se de um estudo bibliográfico com criação de modelos computacionais, onde abrimos a especulação para explicações mais convictas e abrangentes de algumas características evolutivas importantes. Principalmente no que se refere à SOC presente e atuante em atividades fisiológicas

de organismos vivos. Carecendo de estudos mais aprofundados principalmente na área fisiológica de metazoários simples, buscando através desses estudos, responder questões relevantes em áreas de estudos mais avançadas como a neurociência por exemplo.

5.1 PERSPECTIVAS

Os resultados obtidos nesse estudo podem ser considerados um caminho para novos estudos baseados em uma visão nas áreas de biologia, zoologia, evolução, sistemática, dentre outras. Já que, a suposição de uma característica evolutiva e benéfica aos seres vivos (especialmente metazoários) pode explicar lacunas evolutivas. Esse fato deve-se a possível existência de SOC em tecidos de poríferos, cnidários e ctenóforos, animais desprovidos de um SNC, ou seja, sem um sistema de controle de *feedback* que determine de forma temporal, espacial ou intensidade das atividades fisiológicas, ainda assim esses organismos são capazes de uma complexa e eficiente dinâmica orgânica.

Estudos atuais demonstram de forma cada vez mais clara a existência da SOC em diferentes aspectos naturais, inclusive em atividades fisiológicas como as desempenhadas pelo SNC e em órgãos humanos como o cérebro (Chialvo, 2006, KINOUCI & COPELLI, 2006). Dessa forma, essa capacidade que os sistemas vivos possuem de se auto-organizar podem ser explicadas de forma evolutiva. Tornando-se de suma relevância estudos e trabalhos mais aprimorados e atuais sobre os aspectos norteados neste referido trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALCOLADO P. H. A. **Effectos de la contaminacion sobre las comunidades de esponjas en el literal de la Habana**, Cuba. Rep Inv Inst Oceanol, 68: 1-17. 1987.
- ANDRADE, C. C. **A fenomenologia da percepção a partir da autopoiesis de Humberto Maturana e Francisco Varela**. Griot – Revista de Filosofia, Amargosa, v. 6, n.2, ISSN 2178-1036. Bahia, 2012.
- ANDRADE, E. R; SILVA, T.T. **Geometria Fractal e Outros Tópicos Relacionados: novos conteúdos e atividades a serem explorados na Educação Básica**. PROFMAT Universidade Federal de São João Del. Rei - UFSJ - Campus Alto Paraopeba Sociedade Brasileira de Matemática – SBM, 2014.
- ASCOLI, F. O. **Digestão geral dos animais**. Disponível em: <<http://biologia.ifsc.usp.br/bio2/apostila/apost-fisiol-parte4.pdf>> Acesso em: abril de 2016.
- BAK, P. **'The end of history'**, New Scientist, 11 November, 56-7. 1987.
- BAK, P.; TANG, C.; WIESENFELD, K. **Self-organized criticality: an explanation of 1/f noise**. Physical Review Letters, v. 59, n. 4, p. 381-384. julho, 1987.
- BAK, P.; TANG, C.; WIESENFELD, K. **Self-organized criticality**. Physical Review A, v. 38, n. 1, p. 364-374. Julho, 1988.
- BAK, P. **How nature works: the science of self-organized criticality**. New York: Springer, 1996.
- BAK, P.; TANG, C.; WIESENFELD, K. **A forest-fire model and some thoughts on turbulence**. Physics letters A. p. 297-300. North-Holland: 1990.
- BAR-YAM, Y. **Dynamics of Complex Systems**. Addison-Wesley. 1a edition. 1997.
- BERNARD, C. **An Introduction to the study of Experimental Medicine**, Dover Publications, New York, 1927.
- BOGO, R. L; GRAMANI, L. M; KAVISKI, E. **Modelagem computacional do tráfego de veículos pela teoria microscópica**. Rev. Bras. Ensino Fís., São Paulo, v. 37, n. 1, 1301, Mar. 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S180611172015000101301&lng=en&nrm=iso>. Acesso em janeiro de 2017.
- BORCHIPELLINI, C.; MANUEL, M.; ALIVON, E.; Boury-Esnault, N.; VACELET, J. & Le PARCO, Y. **Sponge parafilia e o origem dos Metazoa**. Journal of Evolutionary Biology, p.171-179. 2001.
- BUCHANAN, M. **Ubiquity: the Science of History or why the World is Simpler than we Think**, London: Weidenfeld & Nicolson, 2000.

MALAMUD, B. D; MOREIN, G; TURCOTTE, D. L. **Forest fires: An example of self-organized critical behavior**. Science. Sep 18; 281 (5384):1840-2. 1998.

BRUSCA, R; BRUSCA, G. J. **Invertebrados**. 2ª ed. Editora Guanabara Koogan S.A., Rio de Janeiro: 2007.

CARNEIRO, M.V; CHARRET, I.C. **A criticalidade auto-organizada na pilha de areia (Self organized criticality in a sandpile model)**. Departamento de Ciências Exatas, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brasil. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 27, n. 4, p. 571 - 576, 2005. Disponível em: <www.sbfisica.org.br> Acesso em junho 2016.

CEREIJIDO, M.; CONTRERAS, R. G.; SHOSHANI, L. **Cell adhesion, polarity, and epithelia in the dawn of metazoans**. Physiol. Rev. 84: 1229–1262. 2004.

CHIALVO, D. R. **Are our senses critical**. Nature Physics. Department of Physiology, Northwestern, Chicago, Illinois 60611, USA. 1992.

CLAR, S; DROSSEL, B; SCHWABL, F. **Institut für Theoretische Physik, Physik** Department der Technischen Universität München, James Franck. Str., D (85747 Garching, Alemanha. 1994

CORNELIUS, P. F. S. **Medusa loss in leptolid Hydrozoa (Cnidaria), hydroid rafting, and abbreviated life-cycles among their remote-island faunae: an interim review** Scientia Marina. 56(2/3): 245-261. 1992.

DICKMAN, R.; MUÑOZ, M. A; VESPIGNANI, A; ZAPPERI, S. **Paths to SelfOrganized Criticality**, Brazilian Journal of Physics 30 27. 2000.

DILÃO, R. Autômatos celulares, máquinas de Turing ou a natureza como máquina de cálculo. In Colóquio Ciências, volume 12, páginas 3–20. 1993.

DROSSEL, B. E; SCHWABL, F. **"modelo de incêndios florestais crítica auto-organizada"**. Phys. Rev. Lett. 69, 1629-1632. 1992.

ELDER, H.Y. **Peristaltic mechanisms**. In: H.Y. Elder, E.R. Trueman (eds.) Aspects of Animal Movement, vol. 5, pp. 71–92. Society for Experimental Biology: Seminar Series, Cambridge University Press, Cambridge, UK. 1985.

ELLIOTT, G. R. D; LEYS, S. P. **Coordinated contractions effectively expel water from the aquiferous system of a freshwater sponge**. J Exp Biol (in press). 2007.

ELLWANGER, K.; BRÜMMER, F.; NICKEL, M. **Glutamate, GABA and serotonin induce contractions in the sponge Tethya wilhelma (Porifera: Demospongiae)**. In: Kinzelbach R (ed). Jahrestagung der Deutschen Zoologischen Gesellschaft, Abstractband, Rostock. pp. 157. 2004.

ERESKOVSKY, A. V.; GONOBABLEVA, E. L. **New data on embryonic development of Halisarca dujardini Johnston, 1842 (Demospongiae: Halisarcida)**. Zoosystema, 22: 355-368. 2000.

GLEISER, I. **Caos e Complexidade: A Evolução do Pensamento Econômico**. Rio de Janeiro, Campus, 2002.

GRASSBERGER, P. **Critical Behavior of the Drossel-Schawbl Forest Fire Model**. *New Journal of Physics*, 4 17.1. 2002.

HAYASHI, A. D. **Aplicação dos fractais ao mercado de capitais utilizando-se as elliott waves**. Technical report, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Universidade Federal de Santa Catarina. 2002.

HENLEY, C.L. **"Estática de um modelo de percolação auto-organizada"**. *Phys. Rev. Lett.* 71, 2741-2744. 1993.

HICKMAN, C. P; ROBERTS, L. S; LARSON, A. **Princípios Integrados de Zoologia**. Editora Guanabara Koogan S.A., Rio de Janeiro. 846 p. 2004.

FERREIRA, A. B. H. **Míni Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa - 8ª Ed.** São Paulo: Nova Ortografia, Positivo Editora, 2010.

JESUS, R. A. E KAWANO, A. **Aplicação de Autômatos Celulares na Propagação de Ondas**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. 2002.

JUNIOR GODOY, L. A. F. **Síntese da 5-monobromocavernicolina e do 3-bromoverongiaquinol : reações de adição de nucleófilos de carbono a íons oxônios cíclicos em sistemas sem solvente**. Instituto de Química. UNICAMP: Programa de Pós-Graduação em Química. 2006.

KINOUCHI, O; COPELLI, M. **Optimal dynamical range of excitable networks at criticality**. *Nature Phys.* 2, 348–352. 2006.

LEYS, S. P. **Sponge coordination, tissues, and the evolution of gastrulation. Porifera Research: Biodiversity, Innovation and Sustainability**. Proceedings of the 7th International Porifera Congress, Buzios, Brazil. [NSERC] 2007.

LEYS, S. P; MACKIE, G. O. 1997. **Electrical recording from a glass sponge**. *Nature* 387:29-30. MARIEB, E. N. & HOEHN, K. "Anatomia Humana e Fisiologia" 8ª Ed., Benjamin Cummings / Pearson, 2010.

LEYS, S. P.; MEECH, R. W. **Physiology of coordination in sponges**. *Can J Zool* 84: 288-306. 2006.

MAGIE, C. R; MARTINDALE, M. Q. **Cell-Cell Adhesion in the Cnidaria: Insights Into the Evolution of Tissue Morphogenesis**. Kewalo Marine Laboratory, Pacific Biomedical Research Center, University of Hawai'i Honolulu, Hawaii 96813. *Biol. Bull.* 214: 218–232. 2008.

MANDELBROT, B. B. **The Fractal Geometry of Nature**, New York: W. H. Freeman and Co. 1982.

MANDELBROT, B. B. **Fractals and Scaling in Finance**, New York: Springer-Verlag, 1997.

MARQUES, A. C; MORANDINI, A. C; MIGOTTO, A. E. **Synopsis of knowledge on Cnidaria Medusozoa from Brazil**. Biota Neotropica. 3(2): 1-18. 2003.

MATURANA, H; VARELA, F. **De máquinas e seres vivos. Autopoiese, a Organização do Vivo**. Porto Alegre: Artes Médicas, 1997.

MATURANA, H.R; VARELA, F.J. **A Árvore do Conhecimento: as bases biológicas da compreensão humana**. Tradução; Humberto Mariotti e Lia Diskin. São Paulo, Pala Athenas, 2001.

MEDINA, M; COLLINS, A. G; SILBERMAN, J. D; SOGIN, M. L. **Avaliação de hipóteses da filogenia de animais basal utilizando sequências completas de grandes e pequenos rRNA da subunidade**. Proceedings da Academia Nacional de Ciências dos Estados Unidos da América, 98, 9707-9712. 2001.

MELOTTI, G. **Aplicação de Autômatos Celulares em Sistemas Complexos: Um Estudo de Caso em Espalhamento de Epidemias. Laboratório de Modelagem, Análise e Controle de Sistemas Não-Lineares**. Departamento de Engenharia Eletrônica. Universidade Federal de Minas Gerais. 2009.

MIRANDA, L. L. B. **Avalanches e Criticalidade Auto-organizada em Pilhas de Areia Estocásticas**. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional) - CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS - MG. 2011. Disponível em: <http://www.files.scire.net.br/atricio/cefet-mg-ppgmmc_upl/THESIS/168/lucienelopesborgesmiranda.pdf> . Acesso em: Outubro de 2016.

MITCHELL, M. **Complexity: a guided tour**. New York: Oxford University Press, 2009.

MURICY, G. **Sponges as pollution-biomonitorers at Arraial do Cabo**, Southeastern Brazil. Rev Bras Biol 49(2): 347-354. 1989.

MURICY, G. **Structure of sponge communities around the sewage outfall at Cortiou (Marseille, France)**. Vie Milieu 41: 205- 221. 1991.

MURICY, G. et al. **Sponge distribution at Arraial do Cabo, SE Brazil**. In: Magoon OT, Converse H, Tipple V, Tobin LT, Clark D (eds). Coastal Zone '91. Proc VII Symp Coast Ocean Manag. ASCE Publ., Long Beach. 2: 1183-1196. 1991.

MURICY, G et al. Filo Porífera, p. 23-57. In: H.P. LAVRADO & M.S. VIANA (Eds). **Atlas de invertebrados marinhos da região central da Zona Econômica Exclusiva brasileira**. Rio de Janeiro, Museu Nacional, Série Livros 25, 258p. 2007.

NÓBREGA, M. L. **Complexidade: um olhar para o final do século XX. Ciências na transição dos séculos : conceitos, práticas e historicidade** / Olival Freire;

Júnior, Ileana M. Greca, Charbel Niño El-Hani (Org.). p. 209. Salvador: EDUFBA, 2014.

NÍQUEL, M. **Biologia celular e biotecnologia de invertebrados marinhos: esponjas (Porifera) como organismos modelo**. Arb. Mitt. Biol. Inst. Univ. Stuttgart 32 , 1-157. 2001.

NÍQUEL, M. **Cinética e ritmo das contrações do corpo na esponja Tethya wilhelma (Porifera: Demospongiae)**. J. Exp. Biol. 207 , 4515-4524. 2004.

NUSSENZVEIG, H. M. (Org). **Complexidade e caos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora UFRJ / Copea, 2008.

OLIVEIRA, P. M. C.; OLIVEIRA, S. M. M. **Física em computadores. São Paulo: Editora Livraria da Física**. Peristaltismo, Fisiologia, Título alternativo: a contração peristáltica. 2010. Disponível em: <<http://www.britannica.com/science/peristalsis>> Acesso em abril de 2016.

OLSON, E. E.; EOYANG, G. H. **Facilitating Organization Change: lessons from complexity**. science . 1. ed. California: Jossey-Bass/Pfeiffer, p.191. 2001.

PASCOAL, F. S. A. **Sociedade artificial fight4life: Autômato celular modelando vida artificial**. Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica-PIBIC/CNPq/INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2005.

PEREZ, T. **Évaluation De La Qualité Des Milieux Côtiers Par Les Spongiaires: ÉTAT DE L'ART**. BULLETIN DE LA SOCIÉTÉ ZOOLOGIQUE DE FRANCE, 125 (1): 17-25. 2000.

PEROVIC, S; KRASKO, A; PROKIC, I. MÜLLER, I.M; MÜLLER, W. E. G. **Origin of neuronal-like receptors in Metazoa: cloning of a metabotropic glutamate/GABA-like receptor from the marine sponge *Geodia cydonium***. Cell Tissue Res 296: 395-404. 1999.

PEARCE, N; MERLETTI, F. **Complexity, simplicity, and epidemiology**. International Journal of Epidemiology, 35:515–519. 2006.

POUGH, F. H; HEISER, J. B; JANIS, C. M. **A vida dos vertebrados**. 4. ed. São Paulo: Atheneu, 2008.

Programa C - Dev-C++, IDE - Integrated Development Environment (2011).

Programa software XmGrace Development Team (2007).

QUILLIN K. J. **"Scaling Ontogenético de esqueletos hidrostática: estresse geométrica, estático e dimensionamento tensão dinâmica do terrestres minhoca lumbricus"** . O Journal of Experimental Biology 201 (12). 1871-1883 PMID 9600869. 1998.

R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>. 2008.

NUNES, R. S. R. **Geometria Fractal e Aplicações**. Tese submetida à Faculdade de Ciências da Universidade do Porto para obtenção do grau de Mestre em Ensino da Matemática Departamento de Matemática Pura Faculdade de Ciências da Universidade do Porto Janeiro / 2006.

RIBEIRO Jr. P. J. **Métodos Computacionais em Inferência Estatística** - 20ª SINAPE Simpósio Nacional de Probabilidade e Estatística

RUPPERT, E.E; FOX, R. S; BARNES, R. D. **Zoologia dos Invertebrados**. 7ª ed., Ed. Roca, São Paulo: 2005.

SALINAS, S.R.A. **Introdução a Física Estatística**. Edusp, São Paulo: 1999.

SEELEY, R. R; STEPHENS, T. D; TATE, P. **Anatomia e Fisiologia**. (8.ª Ed.). Loures: Lusociência, 2011.

SILVA, P. L. **Mecanismos celulares e teciduais da regeneração em holotúrias (Echinodermata: Holothuroidea)**. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Geral) - Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/41135/tde-20012012-090245/>> Acesso em: outubro de 2016.

SIMPSON, T. L. **The Cell Biology of Sponges**. Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, Tokyo, 662 pp. 1984.

STANLEY, H. E. **Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena**, Oxford University Press, 1971; L. P. Kadanoff, W. Götze, D. Hamblen, R. Hecht, E. A. S. LEWIS, V. V. PALCIAUSKAS, M. RAYL, J. SWIFT, D. ASPNES, J. KANE, Rev. Mod. Phys. 39, 395. 1967.

TELLES, F; QUEIROZ, MELO, M. F. A., E NEPOMUCENO, E. G. **Pulgões e joaninhas: Possíveis diálogos interdisciplinares**. In Primeiro Congresso Internacional de Dinâmica de Negócios SBDS, páginas 1–16. 2006.

TELLES, F., QUEIROZ; MELO, M. F. A; NEPOMUCENO, E. G. **Interdisciplinarity in focus: Possibilities in a prey-predator dynamics. Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems, B, Applications and Algorithms**, 14:598–602. 2007.

TURCOTTE, D. L. **Self-organized criticality**, Report on Progress in Physics, 62 1377. 1999.

TYLER, S. **Epithelium—the primary building block for metazoan complexity**. Integr. Comp. Biol. 43: 55–63. 2003.

VOGEL, S. **Life in Moving Fluids**. Princeton: Princeton University Press; 1994.

WOLFRAM, S. **Cellular Automata and Complexity**. Collected Papers. MA Reading: Addison-Wesley. 1a edition. 1994.

WULFF, J. L. **Assessing and monitoring coral reef sponges: why and how?** Bull Mar Science 69: 831-846. 2001.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Anotações e dados utilizados para confecção da matriz (figura: 19)

Trabalhar em figuras.

```
L<-10;
ma<-matrix(1,ncol=L,nrow<-L)
ma[1,2]<-0;ma[3,4]<-0;ma[7,2]<-0;ma[2,7]<-0;ma[2,8]<-0;ma[8,5]<-0;ma[9,3]<-
0;ma[3,10]<-0;
ma[3,2]<-0;ma[8,8]<-0;ma[7,2]<-0;ma[5,1]<-0;ma[10,4]<-0;ma[9,4]<-0;ma[4,6]<-0;
ma[4,10]<-0;ma[10,2]<-0;ma[8,9]<-0;ma[5,1]<-0;ma[10,4]<-0;
for(i1 in 1:L){for(i2 in 1:L){if(ma[i1,i2]==0){ma[i1,i2]<-0.7} }};
lab<-c("a","b","c","d","e","f","g","h","i","j","k","l","m","n","o","p")
x<-c(1,5,8,9,5,2,10,7,7,1,1,5,2,6,3,9);
y<-c(1,7,1,5,5,7,8,9,10,5,2,7,2,5,8,3);
#pdf("fig2.pdf")
tiff("fig2.tif")
par(mfrow=c(4,4))
par(mar=c(0.3,0.3,0.3,0.3))
for(i in 1:16){
if(i!=1&&i!=6&&i!=11&&i!=16){ma[x[i],y[i]]<-0.95}
if(i==7){ma[2,7]<-1;ma[2,8]<-1;points(0.11,0.66,pch=8,cex=2.5)}
if(i==12){ma[1,2]<-1 ;points(0.01,0.12,pch=8,cex=2.5)}
if(i==6){ ma[x[i],y[i]]<-0.93;ma[2,8]<-0.93}else{print(i)};
if(i==11){ ma[x[i],y[i]] <-0.93}else{print(c(i,11))};
if(i==16){ ma[x[i],y[i]]<-0.93;ma[9,4]<-0.93;ma[9,4]<-0.93;ma[9,5]<-0.93;ma[8,5]<-
0.93;ma[10,4]<-0.93; }else{print(i)};
#if(i==16){points(1.2,0.26,pch=8,cex=2.5)}
image(ma,col= grey(seq(0, 1, length = 256)),xaxt='n',yaxt='n');
if(i==16){points(0.88,0.22,pch=8,cex=2.5)}
for(i1 in 1:L){for(i2 in 1:L){if(ma[i1,i2]==0.95){ma[i1,i2]<-0.7} }};
legend(0.70,1.12,paste(lab[i]),cex=1.5 ,bty = "n");
grid(L,L)}
dev.off()
```

APÊNDICE B – Anotações e dados utilizados para confecção dos gráficos

```

PROGRAM LOGDAT
  PARAMETER (itmx=2201)
c   convert time series to series blocked in lnt
  open (unit=1, file='hr1000t1Mt50.txt', STATUS='old')
  open (unit=2, file='cr1000t1Mt50.txt', status='new')
c   statistics block
c   stp is stopping value for log(t)
c   PSU is running avg of data
c   aalt is running average of log(t)
c   ano = # of points accumulated in current average
  stp = 0.
  psu = 0.
  ano = 0.
  aalt = 0.
  do 177 i = 1, itmx
    read (1,*) ai,p
    alt = LOG10(ai)
    psu = psu + p
    aalt = aalt + alt
    ano = ano + 1.
    if (alt.GE.stp.or.i.eq.itmx) then
      if (psu.GT.0.) then
        alp = LOG10(psu/ano)
        aalt = aalt/ano
        !WRITE (*,*) aalt, ALP
        WRITE (2,37) aalt, alp
        stp = alt + .2
        aalt = 0.
        psu = 0.
        ano = 0.
      end if
    end if
  177 continue

37  FORMAT (5(F11.5,1X))
  STOP
  END

```

APÊNDICE C – Histograma

```

#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <string.h>
int *Alocar_Memoria (int t_max);
int *Alocar_Memoria_contador (int t_max);
int *Liberar_Memoria (int *mat, int t_max);
int *Liberar_Memoria_contador (int *contador, int t_max);
int main(int argc, char *argv[])
{int *m; // criando ponteiro de ponteiro (matriz bidimensional).
int *contador;
int teta,tam_rede,tempo_max;
double prob_p,prob_f;
FILE *ifp,*ofp;
char arq1[80],arq2[80];
//.....
if(argc != 5)
{printf ( "\n** ERRO: Parametros invalidos! **" );
printf ( "\n** Dicas de uso:\n %s <tam da rede> <tempo max> <prob p> <prob f> **",
argv[0] );
printf ( "\n** Exemplo:\n %s 100 1000 0.5 0.002 **\n\n", argv[0] );exit (1);}
tam_rede = atoi(argv[1]);
tempo_max = atoi(argv[2]);
prob_p = atof (argv[3]); // A função atof transforma uma string em um real
equivalente. prob_f = atof (argv[4]);
if ( tam_rede < 2 ) // O tamanho da rede nao pode ser menor que 2 (dois).
{printf ( "\n** ERRO! Parametro tamanho da rede invalido. **" );
printf ( "\n** ATENCAO! O tamanho da rede nao pode ser menor que 2 (dois).
**\n\n"); exit (1);}
else if ( ( prob_p < 0 ) || ( prob_p > 1 ) ) // A probabilidade p não pode ser menor que
0 (zero) ou maior que 1 (um).
{printf ( "\n** ERRO! Parametro probabilidade p invalido. **" );
printf ( "\n** ATENCAO! A probabilidade p nao pode ser menor que 0 (zero) ou maior
que 1 (um). **\n\n" ); exit (1);}
else if ( ( prob_f < 0 ) || ( prob_f > 1 ) ) // A probabilidade f não pode ser menor que 0
(zero) ou maior que 1 (um).
{printf ( "\n** ERRO! Parametro probabilidade f invalido. **" );
printf ( "\n** ATENCAO! A probabilidade f nao pode ser menor que 0 (zero) ou maior
que 1 (um). **\n\n" );exit (1);}
else if ( tempo_max < 1 ) // A probabilidade f não pode ser menor que 0 (zero) ou
maior que 1 (um).
{printf ( "\n** ERRO! Parametro probabilidade f invalido. **" );
printf ( "\n** ATENCAO! A probabilidade f nao pode ser menor que 0 (zero) ou maior
que 1 (um). **\n\n" );exit (1);}
//.....
//parametro teta
teta = int(prob_p/prob_f);
//.....

```

```

m = Alocar_Memoria (tempo_max);
if ( m == NULL )
{printf ( "\n** ERRO! Matriz nula. **\n\n" ); exit (1);} contador =
Alocar_Memoria_contador (tempo_max); if ( m == NULL )
{printf ( "\n** ERRO! Matriz nula. **\n\n" );exit (1);}
sprintf(arq1,"rede_%d_tempo_%d_teta_%d.txt",tam_rede,tempo_max,teta); ifp =
fopen(arq1,"r");if(!ifp)
{printf("\n### Nao foi possivel abrir o arquivo ###\n");exit(-1);}
for (int col = 1; col <= tempo_max; col++)
{fscanf(ifp,"%d",&m[col]);}
fclose(ifp);
int maior_cluster = m[1];
for (int i = 1; i <= tempo_max; ++i)
if(m[i] > maior_cluster)maior_cluster = m[i]; int temp = maior_cluster;
for(int i = 1; i <= tempo_max; i++)
{contador[m[i]]++;}
int maior_frequencia = contador[1];
for (int i = 1; i <= tempo_max; ++i)
if(contador[i] > maior_frequencia)
maior_frequencia = contador[i];
int aux = maior_frequencia;
//aqui guarda abre arquivo de saida e grava os tamanho dos clusters
sprintf(arq2,"histograma_rede_%d_tempo_%d_teta_%d.txt",tam_rede,tempo_max,te
ta);
ofp = fopen(arq2,"a+");
if(!ofp)
{printf("### nao foi possivel abrir o arquivo para gravacao ###\n");exit(1);}
for(int i=1; i<=tempo_max; i++)
{if(contador[i] > 0) fprintf(ofp,"%d\t%1.8f\n",i,(1.0*contador[i])/(1.0*aux));
//if(contador[i] > 0) fprintf(ofp,"%d\t%d\n",i,contador[i]);}
fclose(ofp);
//.....
m = Liberar_Memoria (m, tempo_max); contador = Liberar_Memoria_contador
(contador, tempo_max);return(0);}
//-----FUNÇÃO ALOCAR MATRIZ-----
int *Alocar_Memoria (int t_max)
{int *mat; // criando ponteiro de ponteiro (matriz bidimensional).int col; // criando
variavel de auxilio do laço for. mat = (int *) calloc (t_max, sizeof(int *)); // alocação
dinamica das linhas da matriz. if ( mat == NULL )
{printf ( "\n** ERRO! Memoria insuficiente para alocar as linhas. **" ); return (NULL);
// retorna um ponteiro nulo.}
return (mat); //retorna o ponteiro para a matriz bidimensional}
int *Alocar_Memoria_contador (int t_max)
{int *contador; // criando ponteiro de ponteiro (matriz bidimensional). int col; // criando
variavel de auxilio do laço for. contador = (int *) calloc (t_max, sizeof(int *)); //
alocação dinamica das linhas da matriz. if ( contador == NULL )
{printf ( "\n** ERRO! Memoria insuficiente para alocar as linhas. **" );return (NULL); //
retorna um ponteiro nulo.} return (contador); //retorna o ponteiro para a matriz
bidimensional}
//-----FIM DA FUNÇÃO ALOCAR MATRIZ-----

```

```
//-----FUNÇÃO LIBERAR MATRIZ-----
int *Liberar_Memoria (int *mat, int t_max)
{int col; // criando variavel de auxilio do laço for. if ( mat == NULL )
{printf ( "\n** Este campo de memoria ja esta vazio **\n" ); return (NULL); // retorna
um ponteiro nulo.}else
{free (mat); // libera memoria ocupada pelas linhas da matriz.}
return (NULL); // retorna um ponteiro nulo.}
//-----FUNÇÃO LIBERAR MATRIZ-----
int *Liberar_Memoria_contador (int *contador, int t_max) {int col; // criando variavel
de auxilio do laço for.if ( contador == NULL )
{printf ( "\n** Este campo de memoria ja esta vazio **\n" ); return (NULL); // retorna
um ponteiro nulo.}else
{free (contador); // libera memoria ocupada pelas linhas da matriz.}
return (NULL); // retorna um ponteiro nulo.}
//-----FIM DAFUNÇÃO LIBERAR MATRIZ-----
```