Vitor Hugo Rodrigues

Aspectos da transmissão e processamento de
informação em canto de anuros

São Paulo

2009

Vitor Hugo Rodrigues

Aspectos da transmissão e processamento de informação em canto de anuros

Dissertação apresentada ao
Instituto de Biociências da
Universidade de São Paulo,
para a obtenção de Título de
Mestre em Ciências, na Área
de Fisiologia.

Orientador(a): José Guilherme
Chauí Berlinck

São Paulo

2009

Rodrigues, Vitor H.

Aspectos da transmissão e processamento
de informação em canto de anuros.

81 paginas

Dissertação (Mestrado) - Instituto de
Biociências da Universidade de São Paulo.
Departamento de Fisiologia.

1. Comunicação
2. Séries temporais
3. Geração de Entropia

I. Universidade de São Paulo. Instituto de
Biociências. Departamento de Fisiologia.

Comissão Julgadora:

Prof(a). Dr(a).

Prof(a). Dr(a).

Prof(a). Dr(a).

Prof(a). Dr(a).

Prof(a). Dr.(a).

Orientador(a)

A todos que, mesmo sem saber, me acompanharam
nesta jornada

“All four winds together
Can't bring the world to me
Shadows hide the play of light
So much I want to see
Chase the light around the world
I want to look at life
In the available light.”

Neil Peart

Agradecimentos

Cito aqui as pessoas que me ajudaram não só nesta fase, mas ao longo da minha vida. Algumas delas se enquadram em mais de uma categoria.

A Nilton e Maria da Conceição Rodrigues, meus pilares, exemplos e referencias, Camila e Pedro Henrique Rodrigues, meus amores e desafetos. Se posso dizer que sou algo hoje, devo muito a vocês. Muito obrigado, minha amada família.

A José Guilherme Chauí Berlinck, pelo apoio, conversas, broncas e fanfarronices com as quais você se divertiu às minhas custas ao longo do tempo que trabalhamos juntos. Dei a sorte de ter ao longo do mestrado não um orientador, mas um amigo.

A Breno Teixeira Santos, pela “hospedagem” das parasitadas, pela imensa ajuda e pelo que me ensinou.

A José Eduardo Soubhia Natali, por toda a ajuda, convivência ao longo destes anos desde a graduação, por termos a oportunidade de trabalharmos em projetos que puderam dialogar muito. Mas não pelo World of Warcraft.

A Fernando Silveira Marques, Ricardo Martins e Talita de Cássia Glingani Sebrían, do laboratório de Fisiologia Teórica, pelo companheirismo e inestimável ajuda, ao longo do mestrado.

A Gustavo Kanedo, pelo empréstimo de equipamentos, ajuda na coleta e por me apresentar a Boracéia. Sem dúvida uma grande contribuição para que este processo pudesse se concluir.

Ao pessoal do Laboratório de Herpetologia do Departamento de Fisiologia da Universidade de São Paulo, por toda a ajuda, empréstimo de equipamentos, pitacos, conversas, seminários e pela excelente companhia no departamento.

Aos professores Luis Henrique Alves Monteiro, Carlos Navas, Silvia Cristina Ribeiro de Souza, pelos indispensáveis comentários a respeito do projeto na qualificação, seminários, e conversas no corredor do departamento.

A Daniel Daminelli e Rafael Nora Tannus, por tantas discussões, elocubrações, exposições de ideias, confusões, iluminações tortuosas, mas devo um agradecimento especial para uma certa conversa num barzinho da Vila Madalena.

A Daniel Schor, jogador de Winning Eleven, imitador de John Secada, Axl Rose e Silvio Santos, grande amigo e “Personal Psychologist” nas horas vagas.

A André Kanamura, Arthur Neri, Ana Carolina Almeida, Alex Hubbe, Bruno Lima, Caroline Fernandes, Dayan Sansone, Flavio Yamamoto, Giuliano Alouca-sseli, Gledsley Muller, Marcelo Trovó (parasita), Mauro Teixeira Jr., Miguel Mitne (= Foca), Natassia Vieira, Paulo Ricardo, Raphael Pigozzo, Renato Recoder, Rogério Lauria, Leila Shirai, Sabrina Jorge, Thaís Arten, por alguns dos melhores anos da minha vida. 2001 N rulez.

A Laura Cardeal, Juliana Rocito, Vlad Coroama, Tiago Hermenegildo, Fábio Yamazoe e Cintia Yamashita. Vocês não são 2001 N, mas mesmo assim são legais. São pessoas incríveis que graças (ou não) às pessoas citadas acima, eu tive o prazer de conhecer.

A Eli Leite da Costa, Gustavo Schor, Eduardo Meneghetti, Renato Bon, Fernanda Zoraya Ribeiro. Muitas vezes penso o que seria de mim sem vocês. Vocês tiveram uma grande influencia no que me tornei. Muito obrigado por tudo.

A Rodrigo Curvo Candido, Marcelo Andraus Lane, Bruno Cossermeli Vellutini, do Aygan. Por tudo o que foi citado no parágrafo acima, mas principalmente por compartilharem e manterem vivo um sonho, mesmo que distante e pelo espaço em que posso me expressar, mas não por palavras.

E por último, mas não menos importante, à Simone Cristina dos Santos Sacco. Você entrou na minha vida na parte final deste processo, mas teve um papel fundamental. Me apoiou quando cambaleei, me enxergou quando eu precisei ser visto, me compreendeu quando eu mesmo já não me entendia, e me fez acreditar no que eu já não acreditava mais. “You walk beside me.” Amo você.

Resumo

Os sistemas biológicos interagem com o ambiente em que vivem de muitas formas, e uma das principais formas na qual essa interação se dá é pela transmissão de mensagens, de diversas maneiras. A transmissão de mensagens por vias sonoras, em animais, é uma questão muito abordada em muitos estudos por ser uma importante via de comunicação utilizada por diversos tipos de sistemas biológicos. Este trabalho tem como objetivo verificar, pelo viés da Teoria da Informação de Shannon, se através da organização das séries temporais referentes à comunicação é possível observar a diminuição de geração de entropia no sistema nervoso referente ao processamento dos sinais sonoros de comunicação. Para tanto, utilizou-se, como sistemas-modelo, três espécies de anuros, *Scinax perpusillus* e *Hypsiboas faber* e *Hypsiboas pardalis*. Ferramentas de análise não-lineares, como a Entropia Aproximada Volumétrica, Análise de Potência Espectral e Plot de Poincaré, foram utilizados para caracterizar a variabilidade tanto do sinal emitido por um único animal quanto dos sinais trocados entre indivíduos da mesma espécie. Foi verificado que as séries temporais analisadas são altamente variáveis, com os intervalos entre vocalizações sendo descritos por distribuições de Lévy. As séries temporais relativas à interação entre indivíduos da mesma espécie apresentam uma alta variabilidade, porém menor que as individuais. Devido ao controle neural exercido na vocalização em anuros, é possível que a variabilidade apresentada pelas séries otimize o processo de emissão sonora, diminuindo a sobreposição de vocalizações entre indivíduos. A diminuição da variabilidade da interação entre indivíduos pode ser um indicativo da diminuição da geração de entropia no processo de comunicação destes animais.

Abstract

Biological systems interact with their environment in many forms. The way these interactions occur can be assigned, ultimately, as the transmission of messages. Transmission of messages by sound waves, in animals, is a well studied subject because they are an important way of communication used by many groups. The objective of the present work is to verify whether the central nervous system presents entropy generation minimization in processing communicating sound signals. The approach employed is derived from Shannon's Information Theory. The temporal organization of the time intervals between successive vocalizations was the subject of analysis. Recordings of three anuran species, *Scinax perpusillus*, *Hypsiboas faber* and *Hypsiboas pardalis* were used. Non-linear analyses were performed by tools as Volumetric Approximated Entropy, Power Spectrum Analysis and Poincaré Plot in order to address the variability of the signals emitted by a single animal, as well as the signals exchanged among individuals of the same species. The time-series data analyzed present highly variability and can be adequately described by Lévy's distributions. The time-series data of the interactions among individuals also present high variability, however such a variability is not as high as the variability of single individuals. The results suggest that the neural system works in a way that reduces the probability of vocalizations overlapping. The reduction in variability of the interactions among individuals is, perhaps, linked to a minimization of entropy generation in the communication process of these animals.

1. Introdução	17
1.a. Comunicação	17
1.b. Comunicação e Informação	18
1.c. Geração de Entropia	21
1.d. Comunicação em anuros	23
1.e. Descrição dos sistemas de interesse	25
1.f. Hipótese de trabalho	26
2. Objetivos	27
3. Materiais e Métodos	27
3.a. Coleta de dados	27
3.b. Caracterização das vocalizações das espécies coletadas	28
3.c. Obtenção dos tempos de vocalização	29
3.d. Intervalo de tempo entre vocalizações	31
3.e. Teste de estacionariedade	32
3.f. Ferramentas não lineares de medida de variabilidade	33
3.f.1. Entropia Aproximada Volumétrica	33
3.f.2. Análise de Potência Espectral	35
3.f.3. Plot de Poincaré	35
3.f.4. Identificando a distribuição de Lévy	37
4. Resultados	38
4.a. Caracterização das vocalizações das espécies analisadas	38
4.b. Séries temporais de indivíduos e da interação entre os mesmos	40
4.b.1. Intervalos de tempo entre	

vocalizações	41	
4.b.2. Teste de estacionariedade	41	
4.b.3. Entropia Aproximada		
Volumétrica	46	
4.b.4. Análise de Potência Espectral	53	
4.b.5. Plots de Poincaré	54	
4.b.6. Parâmetro μ de distribuições de		
probabilidades das séries		
temporais dos indivíduos e da		
interação entre os mesmos	61	
4.c. Das transições entre indivíduos		66
4.c.1. Entropia Aproximada		
Volumétrica	66	
4.c.2. Análise de Potência Espectral	72	
4.c.3. Plots de Poincaré	74	
4.c.4. Parâmetro μ de distribuições de		
probabilidades das séries		
temporais dos indivíduos e da		
interação entre os mesmos	82	
5.Discussão		84
5.a. Das características das vocalizações	84	
5.b. Do surgimento da distribuição de Lévy		
nos dados obtidos	85	
5.c. - Dos intervalos curtos entre as		
Vocalizações	89	
5.d. Dos intervalos longos entre as		
vocalizações	91	
5.e. – Entropia dos sinais analisados	92	
6. Bibliografia		95

1. Introdução

1.a. – Comunicação

Os seres vivos estabelecem diversas formas de relação com o ambiente em que vivem. Esse ambiente inclui fatores abióticos, como tipo e composição do solo, quantidade de água disponível, temperatura, luminosidade, etc., e fatores bióticos, i.e, outros seres vivos, quer da mesma espécie quer de espécies distintas.

Uma das formas que os sistemas biológicos desenvolveram para lidar com o ambiente foi a comunicação, a qual pode se dar em diversos níveis. Seres unicelulares se comunicam, basicamente, por vias químicas. Em seres pluricelulares, algumas dessas vias se mantiveram e outras vias novas, e potencialmente mais elaboradas, se desenvolveram, permitindo manter a coesão entre os tecidos e sistemas que os compõem. Entretanto, tais seres também precisam se comunicar com outros de suas espécies, e, eventualmente, com seres de outras espécies. Assim, diversos mecanismos acabaram evoluindo para este fim.

A comunicação sonora é um dos mecanismos primordiais para comunicação, tanto em meio terrestre quanto em meio aquático (Denny,1993). Pautada na propagação de ondas de pressão no meio, tal tipo de comunicação permite troca de informação (a ser definida mais abaixo) em distâncias longas de maneira rápida; sendo que a limitação de tal distância é dada pela atenuação (dissipação) das ondas no meio (Denny,1993; Wiley & Richards, 1978). Assim, para uma população num dado perímetro, tem-se uma interação entre os indivíduos que decorre, em parte, devido aos sinais emitidos por uns e recebidos por outros. Em tal situação de troca de informação,

o comportamento observável em um indivíduo deverá ser o resultado de seu estado interno e da sua interação com a população e o meio-ambiente no entorno (e.g., Simmons, 2004).

Indivíduos de uma dada espécie tendem a ter uma sensibilidade ajustada a sinais sonoros emitidos por indivíduos da mesma espécie (e.g., frequência sonora) e baixa sensibilidade aos oriundos de outras espécies (Gerhardt & Schwartz, 2001). Assim, apesar da potencial superexposição a estímulos do ambiente, os seres tendem a ter uma pré-seleção daqueles no nível da recepção (ver abaixo). Ao mesmo tempo, a população pode passar a se comportar de uma maneira identificável devido a uma interação de caráter mais estereotipado entre os indivíduos. Um bom exemplo disso é a sincronização da bioluminescência em populações de vaga-lumes (e.g., Strogatz & Stewart, 1993).

1.b. - Comunicação e Informação

A partir do instante em que um neurônio sensor dispara um trem de potenciais-de-ação, tem-se, virtualmente, a transmissão de “informação” a centros de processamento. A partir de um conjunto de “informações” num dado intervalo Δt , dá-se o processamento, com algum tipo de resposta ocorrendo na forma de estímulos nervosos a efetores periféricos, como músculos esqueléticos, glândulas endócrinas ou exócrinas, musculatura lisa visceral, etc. (da Silva, 1996).

Entretanto, dada a miríade de virtuais “informações” que adentram os centros de processamento a cada intervalo Δt , supõe-se que haja uma seleção dos estímulos a

serem efetivamente processados. Caso contrário, um potencial retardo ou interrupção no processamento poderia ocorrer, diminuindo a possibilidade de respostas adequadas (Desimone & Duncan, 1995). O eventual nível no qual se dá essa seleção é assunto de debate e pesquisa (Gazzaniga et al., 1998). Apesar do interesse grande que isso desperta, o objeto pode ser tratado em um sentido mais amplo, isto é, em sua concepção básica de que o sistema nervoso opera na tentativa de liberar vias para processamento diminuindo alguma variável no conjunto de potenciais-de-ação que percorrem as vias. Mais adiante, formularemos essa hipótese de maneira explícita.

Temos, assim, que “informação” não é “tudo” do ambiente ou “tudo” o que os sensores periféricos sentem (disparo de potenciais-de-ação); há sinais que não serão “informativos”. Essas idéias não são novas e são bastante bem expressas na Teoria da Informação de Shannon (Shannon, 1948): “informação” é associada a “surpresa”, ou seja, “informação” é aquilo que tem capacidade para efetuar mudanças de estado em um receptor. Se quem vai receber a mensagem já conhece seu conteúdo de antemão, então esta não é uma mensagem “informativa”.

A partir da Teoria da Informação, temos meios de quantificar o processo da transmissão de mensagens (no entanto, faremos algumas considerações a esse respeito mais abaixo). Se tivermos várias mensagens alternativas, cada uma com probabilidade de ocorrência p_i , a quantidade de informação H é dada por (Shannon, 1948):

$$H = \sum -p_i \log_2(p_i)$$

H é chamada de Entropia Informacional, e quanto maior H maior a quantidade de informação presente em um sinal (Monteiro e Piqueira, 2000)¹. A entropia termodinâmica de Boltzmann está muito relacionada com a teoria de Shannon pois ambas fazem relações entre entropia e probabilidade, apesar da entropia de Boltzmann se referir a sistemas termodinâmicos associados a fluxos de calor e trabalho (Monteiro e Piqueira, 2000). Termodinamicamente, um sistema isolado, deixado para evoluir livremente, tende ao maior grau de entropia interna. Nesse estado de equilíbrio termodinâmico, tem-se que todos os estados possíveis são igualmente alcançáveis pelos componentes do sistema. A Entropia Informacional termina por estabelecer uma relação entre as probabilidades de o receptor encontrar um determinado estado numa mensagem e a probabilidade do emissor realizar tal estado.

Se, por um lado, a semelhança entre entropia informacional e entropia termodinâmica parece simples, a interpretação deve ser cuidadosa (Monteiro e Piqueira, 2000). Por exemplo, paradoxalmente, ruído branco é a série temporal de mais alta entropia informacional, e, ao mesmo tempo, é a que parece ser a menos informativa. Isso implica que não basta sabermos a mudança de estado do receptor, é necessário que se tenha o modelo pelo qual o sensor muda de estado em função da mensagem.

Observando o que foi dito acima, percebe-se que a informação não reside só no sinal em si, mas também na capacidade que o sistema tem em reconhecer o sinal recebido. Se não há maquinaria ou interpretação especializada em retirar informação do sinal recebido, não haverá transmissão de informação. Ou seja, a Entropia de Shannon está relacionada com a quantidade de informação necessária para “construir

¹ Note que tiramos as aspas da palavra informação pois temo-la precisada, agora.

uma mensagem”, baseada na probabilidade condicional dos símbolos envolvidos. Entretanto, isso pouco tem a ver com “informação de conteúdo” da mensagem, que para ser acessada são necessárias regras de interpretação (gramática) e um receptor capaz de decodificar ou utilizar a informação contida na mensagem (Wicken, 1988). Para o caso dos sistemas biológicos, é plausível concluir que mensagens que possuem certa redundância podem ser informativas, pois essa redundância pode facilitar a “compactação” da informação em um algoritmo, e assim o processamento é facilitado no caso de um algoritmo muito simples poder descrever o sinal a ser processado (Chaitin, 2006).

Para alguns, existem três maneiras de medir a efetividade na comunicação: **(1)** se a transmissão dos símbolos que codificam a mensagem é acurada; **(2)** se os símbolos “carregam” efetivamente o significado desejado; e **(3)** se a mensagem é eficaz na mudança de conduta ou estado do receptor. O trabalho de Shannon lida apenas com a transmissão dos símbolos (Weinberger, 2002), sendo que as outras duas maneiras são igualmente importantes em sistemas biológicos.

1.c. - Geração de entropia

Vários pesquisadores vêm introduzindo as funções termodinâmicas em problemas biológicos, principalmente após os trabalhos em termodinâmica de sistemas abertos (e.g. Prigogine, 1977) que visam conhecer outros aspectos destes sistemas, entre eles a auto-organização.

Em sistemas fechados, a variação de entropia é dada por: $dS \geq \frac{\delta Q}{T}$ sendo dS a variação de entropia, δQ a variação de calor e T a temperatura do sistema. No entanto isso só é válido para este tipo de sistema, que não realiza troca de matéria e energia com o ambiente. Em sistemas abertos, a variação de entropia é dada por: $dS = d_e S + d_i S$, sendo $d_i S$ a produção interna de entropia do sistema por processos irreversíveis (como processos difusivos e condução de calor), e $d_e S$ a troca de entropia entre o sistema e o meio (Prigogine, 1980).

Sistemas organizados resistem a caminhar para o equilíbrio termodinâmico (ou seja, $dS > 0$). Para contrabalancear a produção de entropia por processos internos ao sistema, a troca de entropia entre o sistema e o meio deve ser: $d_i S = -d_e S$, surgindo, portanto, um influxo de “entropia negativa” do meio. Em termos práticos, o sistema em questão degrada matéria e/ou energia captadas do meio externo. A entropia da matéria que entra no sistema é menor que a da matéria que deixa o sistema, criando-se um estado estacionário² de entropia (Monteiro e Piqueira, 2000).

Esta produção interna de entropia, ou geração de entropia, é muitas vezes denominada “trabalho perdido”. Contudo, este não é um trabalho real ou quantidade de energia perdida, mas uma oportunidade perdida de realizar trabalho (Sonntag, 2003). Quanto maior é a geração de entropia, menor é a capacidade máxima de realização de trabalho, ou seja, a eficiência do sistema é menor que a eficiência de Carnot (Bejan, 2002).

² Esta forma foi a escolhida em detrimento do termo em inglês “Steady state”.

A abordagem da minimização de geração de entropia vem sendo utilizada atualmente em diversos tipos de estudo que vão desde reações químicas (e.g. Nicolis, 1977) até ecossistemas (Kay, 2000; Ludovisi, et.al, 2004), passando por consumo de nutrientes com transferência de energia (Sabater, 2006) e funcionamento celular (Toussaint & Schneider, 1998).

1.d. - Comunicação em anuros

Nos anuros, a comunicação sonora é bastante utilizada, seja para atrair fêmeas para a cópula, seja para espantar machos de seu território ou das proximidades da fêmea pretendida (Bee, 2004). Este grupo tem um sistema de recepção de sinais sonoros bem aprimorados. Algumas espécies possuem membranas timpânicas, similares às dos amniotas, mas acredita-se que, nos anuros, esta tenha evoluído independentemente. A membrana timpânica se encontra na orelha média e está conectada a um osso, a columela. Há, ainda, ligada à columela, a janela oval da cápsula ótica. Como nos amniota, vibrações aéreas captadas por essa membrana são transmitidas ao líquido da orelha interna (Wilczynski, 1992).

Estes animais possuem dois órgãos de recepção auditiva, a papila anfíbia e a papila basilar, e são essas papilas que cobrem o espectro de frequências aos quais os anfíbios respondem. A papila anfíbia é a maior papila e é sensível a sons de frequência mais baixa (de 100 a 1200hz). Ela contém um banco de células receptoras conectadas a nervos cranianos e estão arranjadas ao longo do órgão de maneira tonotópica (ou seja, as células que percebem as frequências mais baixas estão na extremidade distal

e, ao longo do órgão, a frequência excitatória vai aumentando) como em amniotas. Por não possuírem membrana basilar, os cílios são responsáveis pela transformação de ondas sonoras em impulsos elétricos, e estão presos a uma protuberância cartilaginosa (Wilczynski, 1992). Já a papila basilar se encontra em sua própria cavidade cartilaginosa, contém menos células receptoras, mas estas respondem a um espectro de frequências mais limitado e de frequências mais altas do que a papila anfíbia. As frequências às quais este órgão responde é espécie específica, e varia inversamente com o tamanho da espécie, parecendo ter uma grande correspondência com as frequências presentes no canto (Wilczynski, 1992). A faixa de frequência melhor percebida pelos indivíduos está muito relacionada com a faixa de frequências presentes no canto dos indivíduos da mesma espécie. Sendo assim, o sistema auditivo dos anuros funcionaria como um filtro em “hardware”, que aprimoraria a detecção de sinais de conspecíficos contra ruídos ambientais, inclusive cantos de outras espécies (Gehardt & Schwartz, 2001).

A vocalização está intimamente atrelada ao sistema auditivo. Ela se caracteriza por ser um comportamento dimórfico no qual os machos vocalizam mais do que as fêmeas. Isto está correlacionado com o fato de que a laringe, centros de controle dos músculos deste órgão (Kelley, 1988) e outras estruturas relacionadas à vocalização, são mais desenvolvidos nos machos que nas fêmeas (Wilczynski, 1992, Kelley, 1988).

Um centro neuronal importante no controle da vocalização é o núcleo pré-trigeminal, que se localiza atrás do cerebelo. Em conjunção com outras zonas reticulares envolvidas na respiração, controla os neurônios motores que inervam os músculos da laringe e agem como um gerador central de padrões na produção da

vocalização. Estímulos do sistema auditivo e andrógenos presentes na circulação exercem modulação nos sistemas de controle relacionados à vocalização, sendo que a detecção de vocalizações de indivíduos da mesma espécie é a maior influência no comportamento vocal dos anuros (Wilczynski, 1992).

Em *Bombina bombina*, foram descritas duas formas de influência auditiva em seu sistema de vocalização. Um sistema eficiente de reconhecimento da vocalização de conspecíficos estimula o canto, enquanto uma gama de entradas não específicas aumenta a duração do período refratário pela inibição dos controladores de vocalização. Estes controles permitem que o indivíduo responda à vocalização de indivíduos da mesma espécie. Entretanto, isso se dá com um atraso que reduz interferências acústicas de outros indivíduos e do meio (Wilczynski, 1992).

1.e. - Descrição dos sistemas de interesse

Hypsiboas faber são animais de comprimento ao redor de 10 cm, vivem próximos a córregos e poças permanentes na Mata Atlântica, da Argentina ao nordeste do Brasil.

Os machos constroem ninhos nas proximidades destes corpos d'água, de onde cantam, e os protegem com um comportamento agressivo, chegando a ferir possíveis competidores em disputas (Martins, et. al. 1998). Quando uma fêmea se aproxima, o macho deixa o ninho, se aproxima da fêmea, e vocaliza, guiando a fêmea até o ninho. A fêmea, ao entrar no ninho, o inspeciona, às vezes mergulhando e tocando-o com o nariz.

Hypsiboas pardalis são animais de comprimento médio ao redor de 65 cm. Machos foram observados vocalizando em moitas (Heyer, et.al. 1990), regos de água e até mesmo em marcas no chão deixadas por animais (Bokermann, 1968). Contudo, há observações de indivíduos cantando e ovos depositados em ninhos similares aos ninhos de *Hypsiboas faber* (Lutz, 1960). A espécie ocorre em regiões de mata atlântica nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo e Minas Gerais (Caramachi & Napoli, 2004).

Scinax perpusillus são pequenos anuros que medem cerca de 1,8 cm. Os machos se associam a bromélias localizadas no chão, de onde vocalizam para atrair fêmeas. Podem cantar a qualquer hora do dia, mas a atividade de vocalização aumenta muito das 18:30 horas até às 02:00 horas (Oliveira & Navas, 2004). No parque Estadual da Boracéia, foi observado que os indivíduos desta espécie ocupavam preferencialmente as bromélias da espécie *Nidularium innocentii*, que é a espécie predominante de bromélias nesta região. Esta é a maior espécie de bromélia de chão encontrada na região e geralmente contém grandes reservatórios de água. Suas inflorescências quando presentes, também são capazes de armazenar água (Oliveira & Navas, 2004).

1.f. - Hipóteses de trabalho

Existem estudos bastante profundos no que tange às características sonoras presentes em emissões de indivíduos (e.g. Wells, 1977). Alguns trabalhos fazem estudos dessas características sonoras pela óptica da teoria da informação, como, por exemplo, Suggs & Simmons (2005). Contudo, a caracterização da interação da

população quanto à dinâmica de comunicação não parece ter sido objeto de estudos mais elaborados. Como se pode perceber, a relação entre os indivíduos de uma população se comunicando através de um conjunto de sinais, indivíduos estes que funcionam simultaneamente tanto como emissores quanto como receptores, forma um sistema relevante para o estudo da hipótese de que as unidades de processamento trabalham procurando diminuir a produção de entropia, mantendo liberados recursos de processamento. De uma maneira explícita, as hipóteses são:

1. O sistema nervoso opera para diminuir a geração de entropia local no processamento, onde uma previsibilidade de resposta pode ser esperada num conjunto de emissores-receptores;
2. Essa liberação de recursos de processamento estará refletida na série temporal de um sinal obtido numa população que interage.

2. Objetivo

O presente estudo tem por objetivo testar as hipóteses acima a partir da análise de séries temporais da comunicação sonora em anuros, tanto dos indivíduos quanto do conjunto.

3. Materiais e Métodos

3.a. - Coleta de dados

Cantos de três espécies de anuros, a saber, *Scinax perpusillus*, *Hypsiboas pardalis* e *Hypsiboas faber* (Faivovich, 2005), foram gravados no Parque Estadual da Boracéia a 23°38'S, 45°52'W (Bertoluci & Rodrigues, 2002), no Estado de São Paulo, entre os dias 10 e 12 de novembro de 2007, e os dias 02 a 04 de março de 2008, entre 18:30 e 00:00. Dois ou três indivíduos de cada espécie que estivessem vocalizando próximos uns aos outros (raio de aproximadamente 10 metros) foram gravados simultaneamente em cada noite.

Para as gravações, foram utilizados três microfones Sennheizer ME 66, e dois gravadores Marantz PMD 670. Cada microfone foi colocado próximo ao indivíduo a ser gravado (cerca de 1 metro). Um canal de áudio exclusivo para cada indivíduo foi utilizado, permitindo identificá-los na análise.

3.b. - Caracterização das vocalizações das espécies coletadas

Foram obtidas, das vocalizações gravadas, as seguintes características da emissão sonora: (1) quantidade de notas por canto; (2) quantidade de pulsos por nota; (3) frequência das vocalizações; (4) frequências dominantes das vocalizações; (5) maior e menor duração das vocalizações; (6) duração média das vocalizações. Os dados foram obtidos a partir de 50 eventos de canto de cada espécie e estão sumarizados na Tabela 1.

Vocalização é definido como um conjunto de sons produzidos numa certa sequência, constituído por uma nota ou por um conjunto de notas. Notas são

elementos temporalmente ininterruptos que compõem uma vocalização e são constituídos de pulsos. Pulsos são sons de duração extremamente curta produzidos a partir de um único pulso de energia (Martins & Jim, 2003). Uma tabela com dados encontrados na literatura foi construída para possibilitar a comparação (Tabela 2).

3.c. - Obtenção dos tempos de vocalização

As gravações foram analisadas em Matlab 7.4 (The Mathworks Inc., Natick). O primeiro passo foi selecionar um evento de vocalização para ser utilizado como padrão para detecção de eventos semelhantes na faixa de áudio (Figura 1). Em seguida, Transformadas Rápidas de Fourier (TRF) obtidas dos padrões foram comparadas com TRFs obtidas da faixa de áudio. A métrica utilizada para esta comparação foi a distância euclidiana: $\sum_1^n \sqrt{(p_n - s_n)^2}$ sendo p_n um valor do vetor de freqüências da TRF do padrão, e s_n um valor do vetor de freqüências da TRF da faixa de áudio.

Figura 1 – Algumas faixas de áudio características das três espécies analisadas (coluna esquerda) e exemplos de eventos de vocalização selecionados como padrão de detecção (coluna direita). A) *Scinax perpusillus*, B) *Hypsiboas faber*, C) *Hypsiboas pardalis*.

Obtém-se, então, um vetor de Distâncias, no qual valores próximos de zero são os eventos que apresentaram TRFs mais próximas do padrão escolhido. Um limiar foi estabelecido para que fossem selecionadas, apenas, as menores distâncias. Dessa maneira, os tempos de vocalização foram determinados (Figura 2).

Figura 2 - Gráfico de um vetor de distâncias euclidianas ao longo do tempo de gravação. A linha representa o limiar superior de detecção.

3.d. - Intervalo de tempo entre vocalizações

Os intervalos de tempo entre as vocalizações de cada indivíduo foram determinados diretamente através da diferença $t_{n+1} - t_n$, sendo t_n um dos tempos presentes no vetor de tempos de vocalização e t_{n+1} o tempo seguinte. Os intervalos entre as vocalizações do grupo ou conjunto de animais gravados foram obtidos da mesma forma, porém utilizava-se um vetor com os tempos, colocados de maneira ordenada, de todos os indivíduos do conjunto de dados de uma certa noite de

gravação. Estas foram, então, as séries temporais submetidas às ferramentas de análise descritas mais abaixo.

Determinou-se, também, como se efetuavam as transições das vocalizações entre indivíduos, os tempos em que ocorriam estas transições e os intervalos de tempo entre as mesmas. Os vetores de transições foram construídos agrupando os números correspondentes à sequência dos indivíduos que vocalizavam. Por exemplo, transição do indivíduo 1 para o indivíduo 2 é uma transição do tipo 1 - 2, do indivíduo 3 para ele mesmo forma uma transição 3 - 3, e assim por diante.

3.e. - Teste de estacionariedade

Para garantir maior confiabilidade das ferramentas que medem a variabilidade das séries temporais, é necessário estacionariedade (fraca), ou seja, que média e variância não se alterem ao longo do tempo devido à presença de tendências estocásticas presentes (Brennan, et. al, 2001; Santos et. al, 2009)

Por isso, a estacionariedade das séries temporais obtidas foi analisada utilizando o teste de Dickey-Fuller (Dickey & Fuller, 1979). Considere o modelo autoregressivo de ordem 1, $X_t = b_1 X_{t-1} + \varepsilon_t, t = 1, 2 \dots, n,$ (1)

onde ε_t é um ruído com distribuição normal, média 0 e desvio padrão 1.

Substituindo $X_{t-1} = b_1 X_{t-2} + \varepsilon_t - 1$ em (1)

temos:

$$X_t = b_1^2 X_{t-2} + \varepsilon_t + b_1 \varepsilon_{t-1} = \dots = X_t = b_1^t X_0 + \varepsilon_t + b_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + b_1^{t-1} \varepsilon_0 \quad A$$

variância pode ser descrita por $Var [X_t] = \sigma^2 (1 + b_1^2 + \dots + b_1^{2t-2})$. Caso $|b_1| < 1$, o modelo acima será estacionário, pois a variância será finita. Caso $|b_1| = 1$, a variância será infinita e o modelo não estacionário (Metes, 2005).

O teste verifica, a partir de uma aproximação da série temporal pelo modelo descrito acima, se $|b_1|$ é menor ou igual a 1, indicando se a série temporal é ou não estacionária (Metes, 2005).

3.f. - Ferramentas não lineares de medida de variabilidade

3.f.1. – Entropia Aproximada Volumétrica (vApEn)

A entropia aproximada (ApEn) é um algoritmo que permite uma medida de variabilidade do sinal. É uma ferramenta que tem sido bastante utilizada em diversos trabalhos que visam a análise de padrões. Por exemplo, padrões respiratórios na síndrome do pânico (Cadirola; et, al., 2004); de regularidade em secreção episódica de hormônios (Pincus et, al., 1999); frequência cardíaca de fetos (Pincus & Viscarello, 1992); dinâmica de circulação de seiva em plantas com estresse hídrico (Souza, et, al. 2004), entre outras aplicações.

Para o cálculo da ApEn, dois parâmetros são estipulados: “m” e “r”. Considerando um vetor de tamanho N, o parâmetro m é o tamanho da janela de comparação, ou seja, o algoritmo divide o vetor a ser analisado em N-m+1 caixas de tamanho m. Estas caixas são comparadas através de uma métrica, considerando um

par como igual se sua distância é menor ou igual r . O número de caixas consideradas iguais são computadas, determinando uma contagem $C(r)$. Então um valor $\varphi m(r) = (N - m + 1)^{-1} \sum_{i=1}^{n-m+1} \ln C(r)$ é calculado. O valor de ApEn é dado por: $\varphi m(r) - \varphi m + 1(r)$ (Pincus, 1991,1995).

A ApEn é um estimador sem consistência (Pincus, 1991; Pincus, 1995; Richman e Moorman, 2000; Santos et al., 2009). Assim, duas séries podem ser classificadas como uma delas sendo menos organizada que a outra para certo par de parâmetros (m_1, r_1) e classificadas inversamente para um outro par (m_2, r_2) (e.g. Goldberger et. al. (2002)). Uma nova técnica, com consistência, denominada por entropia aproximada volumétrica (vApEn, Santos et al., 2009) foi utilizada. A entropia aproximada volumétrica é dada por $vApEn = \int_{\epsilon}^{\infty} \sum_0^{N-1} ApEn(m, r, N) d\epsilon$. Para detalhes, ver Santos et al., 2009.

Devido a demanda computacional envolvida, as séries temporais não foram analisadas por inteiro. Trechos de 50 ou 100 pontos ao longo das séries temporais foram utilizadas, e para as séries de tamanho intermediário (entre 500 e 1500 pontos) foram utilizadas sobreposições de 50 pontos nas extremidades com outras janelas. Para as séries maiores (acima de 2000 pontos) não foram utilizadas sobreposições. Os trechos de 50 pontos foram utilizados para as séries temporais pequenas (entre 80 e 300 pontos).

Os valores de vApEn obtidos para as séries foram comparados com valores obtidos para séries temporais padrão: senóide, ruído branco e distribuição de Lévy, e as diferenças entre os valores de vApEn foram testadas através de ANOVA com intervalo de confiança de 95%.

3.f.2. - Análise de Potência Espectral (*Power Spectrum Analysis* - PSA)

A partir das Transformadas Rápidas de Fourier das séries temporais, as relações log-log entre frequência e potência foram obtidas. As relações foram ajustadas através de regressão linear por mínimos quadrados. O coeficiente angular, denominado por β , fornece um indicativo do padrão de correlação temporal: valores próximos de zero (i.e., $\beta \cong 0$) indicam que a série se comporta como ruído branco, ou seja, sem correlação temporal; $-0.5 \geq \beta \geq -2$ sugere ruído $1/f$ (Hausdorff, 1995). $1/f$ é um comportamento intermediário entre ruído branco e movimento browniano, muito comum em diversos sistemas físicos, como por exemplo o padrão temporal de cheias do Nilo, ou de fluxo de automóveis em rodovias (Voss, 1988). A maior correlação temporal surge para $\beta \leq -2$, cujo o padrão é de movimento browniano, havendo um predomínio de flutuações de baixas frequência sobre as de alta frequências. Os valores de β são dados com um intervalo de confiança de 95% na regressão linear.

3.f.3. - Plot de Poincaré

Consiste em um gráfico de dispersão construído de forma que a abscissa contenha valores de posição n e a ordenada valores de posição $n+1$, como representado na Figura 3. Este é um método utilizado em estudos de variabilidade cardíaca (Korpelainen, 1999; Carrasco, 2001; Mourot, 2004), e costuma exibir formatos mais circulares quando a variabilidade é alta, próxima a ruído branco e mais próximo de uma elipse, quando a série apresenta regularidade (Figura 3).

Ajusta-se uma elipse aos pontos do gráfico (Figura 3). Novos eixos x_1 e x_2 são determinados a partir de uma rotação de $\pi/4$ radianos com relação aos eixos x e y. A dispersão (desvio padrão) dos pontos em torno do eixo x_1 , determina SD1 e é obtida da seguinte maneira

$$SD1^2 = Var(x_1) = Var\left(\frac{1}{\sqrt{2}}t_n - \frac{1}{\sqrt{2}}t_{n+1}\right) = \frac{1}{2} Var(t_n - t_{n+1}) = \frac{1}{2}SDSD^2,$$

sendo esta medida equivalente ao desvio dos intervalos sucessivos escalados por $\frac{1}{\sqrt{2}}$

sendo a variabilidade de curto termo.

A dispersão no eixo x_2 é SD2 é a medida de variabilidade de longo termo e é dado por $SD2^2 = 2SD(t)^2 - \frac{1}{2}SDSD^2$, onde $SD(t)^2$ é o desvio padrão dos intervalos entre vocalização (Brennan et. al., 2001). Estas foram as medidas utilizadas para a caracterização dos gráficos obtidos, assim como a relação SD1/SD2 (Huikuri, 1996) e a visualização dos formatos dos pontos que compõem o gráfico.

Figura 3 – Representação de um plot de Poincaré, onde no eixo x temos um tempo da série temporal plotado e em y o tempo seguinte.

3.f.4 - Identificando a distribuição de Lévy

A distribuição de Lévy consiste em um processo estocástico no qual trechos de curtos “passos”, ou “intervalos de vôo”, são intercalados por grandes “passos” ou distâncias (Sims, 2007). A distribuição da densidade de probabilidades de um passeio de Lévy obedece à seguinte lei de potência: $P(l) = l^{-\mu}$ com $1 \leq \mu \leq 3$, onde l é o tamanho do passo. Para valores de $\mu \geq 3$ a soma da distribuição converge para uma gaussiana, e menores que 1 a distribuições não normalizáveis (Schlesinger, 1995 apud Viswanathan, 1999; Bartumeus, 2005).

Com a intenção de obter o valor de μ das séries temporais em análise, foi utilizada a fórmula $\hat{\mu} = 1 + n \left[\sum_{i=1}^n \ln \frac{t_i}{t_{min}} \right]$, onde $\hat{\mu}$ é o valor de μ estimado a partir dos dados, e t_{min} é o menor intervalo presente na série temporal (Newman, 2005; Clauset, et. al. 2007).

$\hat{\mu}$ é um estimador de μ . Portanto, os valores obtidos da série temporal possuem um erro associado. Para verificar se o erro é grande a ponto de invalidar a utilização da ferramenta, séries temporais com diferentes quantidades de dados e geradas por diferentes μ s ($0,25 \leq \mu \leq 4$ em intervalos de 0,25) conhecidos foram construídas sendo μ . As séries possuíam tamanhos de 100, 200, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 10000, 12500 e 15000 pontos. As médias de $\hat{\mu}$ foram obtidas a partir da construção de 100 séries que obedecem a distribuição de Lévy, para cada combinação (por exemplo, 100 séries de 500 pontos com $\mu=2,0$).

4 - Resultados

4.a. - Caracterização das vocalizações das espécies analisadas

Os dados obtidos a partir da caracterização do canto das espécies analisadas mostra que há discrepâncias entre os dados encontrados e os presentes na literatura. As frequências mínimas e máximas e quantidade de vocalizações encontradas nas três espécies são diferentes das apresentadas na literatura. Além disso, a quantidade de

pulsos por nota de *Scinax perpusillus* e *Hypsiboas pardalis* são muito maiores do que as descritas. Contudo as faixas de frequência predominantes encontradas estão dentro ou muito próximas das frequências descritas na literatura, assim como as médias das durações das vocalizações.

Tabela 1 – Sumário descritivo das características sonoras dos cantos das três espécies analisadas.

	<i>Scinax perpusillus</i>	<i>Hypsiboas faber</i>	<i>Hypsiboas pardalis</i>
Frequências de canto(Hz)	2492 - 7912	128 - 3749	138 - 3684
Frequências predominantes (Hz)	4096 - 4998	302 a 367; 1039 a 1386	337 - 1928
Notas por canto	2 - 6	1	1
Pulsos por notas	4 - 21	1	9 - 18
Duração da vocalizações (s)	0,141 – 0,624	0,089 – 0,147	0,133 – 0,250
Média das durações (s)	0,3651	0,1018	0,171
Vocalizações por tempo	0, 1893	0,5570	0,396

Não foram encontradas, na literatura, no entanto, todas as características analisadas para todas as espécies, principalmente devido aos poucos trabalhos feitos com *Hypsiboas pardalis*. Os trabalhos com *Scinax perpusillus* (Pombal Jr. & Bastos, 2003;) que fazem este tipo de análise com as vocalizações utilizaram 10 vocalizações de anúncio e 3 territoriais para as análises, e o trabalho de Bokermann (Bokermann, 1968) com *Hypsiboas pardalis* possui o sonograma de apenas uma vocalização.

Tabela 2 - Sumário descritivo das características sonoras dos cantos das três espécies analisadas obtido a partir de dados da literatura. (1) Bokermann (1968); (2) Martins & Haddad (1988); (3) Heyer, et. al (1990); (4) Pombal Jr. & Bastos (2003).

	<i>Scinax perpusillus</i> ^(3,4)	<i>Hypsiboas faber</i> ^(2,3)	<i>Hypsiboas pardalis</i> ^(1,3)
Tipos de canto	Anuncio e territorial	Anuncio, territorial de pulo, territorial de luta.	Anuncio
Frequencias de canto (Hz)	3500 a 5900	Anuncio: 300 - 4000 pulo: 200 - 3700 luta: 100 - 2100.	400 a 2000
Frequencias predominantes (Hz)	-	-	-
Notas por canto	4 a 5	1	1 - 2
Pulsos por notas	4 a 11	1	9 - 18
Duração da vocalizações (s)	0,25 a 0,4	-	0,15 – 0,35
Média das durações (s)	-	Anúncio: 0,8 Pulo: 1,1 Luta: 0,16	-
Vocalizações por tempo	Séries de 10 a 20, com taxa de 0.3 a 0.4 por segundo.	de 1.7 a 2 por segundo.	-

As discrepâncias encontradas entre os dados obtidos e a literatura não são, no entanto, significativas a ponto de comprometer as análises subsequentes às quais os sinais foram submetidos.

4.b. - Séries temporais de indivíduos e da interação entre os mesmos

4.b.1 - Intervalos de tempo entre vocalizações

Como pode ser observado nas Figuras 4 a 6, as séries temporais dos intervalos de tempo entre vocalizações dos indivíduos e da interação entre indivíduos da mesma espécie apresentam uma grande variação, com curtos intervalos de tempo sendo intercalados por intervalos muito longos. Note, no entanto, que não foram observadas sobreposições, i.e., momentos nos quais o intervalo entre vocalizações vale zero.

As mesmas condições foram observadas para os intervalos de tempo entre indivíduos apresentados na Figura 7, porém os grandes intervalos apresentam valores menores quando comparados com as séries temporais de cada indivíduo separadamente, a não ser por poucas exceções. As séries de *Scinax perpusillus*, dia 1 e *Hypsiboas pardalis* dia 1, apresentam grandes picos com valores similares aos dos conjuntos. Isto se deve possivelmente ao fato de que, nestes dias, apenas dois indivíduos foram gravados.

4.b.2 - Teste de estacionariedade

Os testes feitos com o intuito de verificar a estacionariedade das séries temporais analisadas indicam que as séries são estacionárias ($H = 1$), ou seja, não há tendências estocásticas embutidas nos dados analisados. Tal verificação viabiliza a utilização das ferramentas de análise propostas.

Figura 4: Séries temporais dos intervalos de tempo entre vocalizações dos indivíduos de *Scinax perpusillus*. As abscissas representam o intervalo de tempo observado, e as ordenadas o tempo de silêncio ou o intervalo entre vocalizações. Note os que os curtos intervalos entre vocalizações são intercalados por longos intervalos de silêncio. As letras representam os dias em que os indivíduos foram gravados e os números ao indivíduo correspondente. A-) Dia 1; B-) Dia 2.

Figura 6: Séries temporais dos intervalos de tempo entre vocalizações dos indivíduos de *Hypsiboas pardalis*. As abscissas representam o intervalo de tempo e as ordenadas o tempo de silêncio ou o intervalo entre vocalizações. Note os que os curtos intervalos entre vocalizações são intercalados por longos intervalos de silêncio. As letras representam os dias em que os indivíduos foram gravados e os números o indivíduo ao qual a série temporal em questão pertence. A-) Dia 1; B-) Dia 2.

Figura 7: Séries temporais dos intervalos de tempo entre vocalizações da interação entre indivíduos que foram gravados. Estas foram obtidas a partir dos indivíduos gravados, onde os tempos de vocalização dos indivíduos foram intercalados e seus intervalos determinados. As letras equivalem às espécies e os números ao dia em que foram gravados. A-)Dia 1; B-) Dia 2; S.p.-) *Scinax perpusillus*; H.f.-) *Hypsiboas faber*; H.p.-) *Hypsiboas pardalis*. Note que os picos presentes nestas séries são menores que os picos presentes nas séries dos indivíduos que o compõem, exceto por S.p.A e H.p.A , que têm as mesmas amplitudes máximas de alguma das séries individuais.

4.b.3 - Entropia Aproximada Volumétrica

Os valores de vApEn obtidos para as séries temporais analisadas são altos, maiores que os de ruído branco, e próximos a valores obtidos para passeios de Lévy. Isso indica alta variabilidade dos dados, ou seja, ausência de regularidade entre os tempos de vocalização (Tabela 3, 4, 5. Para valores de referência, Tabela 6). Os testes estatísticos indicam que há diferenças entre as médias das vApEns dos indivíduos e a das séries dos conjuntos de indivíduos onde três indivíduos foram gravados e analisados. Como pode ser visto nas Tabelas de 3 a 5, os dados destes dias apresentam significância maior que 95% em relação às médias dos indivíduos quando comparado ao grupo de indivíduos. Contudo, o mesmo não pôde ser observado para os dias nos quais apenas dois indivíduos foram gravados.

Tabela 3 – vApEn – *Scinax perpusillus* - Quantidade (n), valores mínimos, máximos, médias e desvios obtidos para os intervalos de tempo de vocalização dos indivíduos e do conjunto de indivíduos.

A quantidade de pontos utilizado em cada trecho das análises está indicado na primeira coluna. A última coluna contém valores de P obtidos por análise de variância com significância de 0,05.

Indivíduo/ Dia	n	Mínimo	Máximo	Média vApEn	Desvio vApEn	P ANOVA
1 (50 pts) / 1	4	1250	2063	1590	360,3	0,4069
2 (50 pts) /1	4	676,7	2182	1549	635,6	
todos (50 pts) /1	8	765,6	1742	1271	342,2	
1 (100 pts) /2	11	2001	3766	2771	540,3	0,0006
2 (100 pts) /2	16	1083	3758	2813	888	
3 (100 pts) /2	10	2161	3496	2734	380,2	
todos (100 pts) /2	37	983,3	3711	1960	887,1	

Tabela 4 – vApEn –*Hypsiboas faber* - Quantidade (n), valores mínimos, máximos, médias e desvios obtidos para os intervalos de tempo de vocalização dos indivíduos e do conjunto de indivíduos. A quantidade de pontos utilizado em cada trecho das análises está indicado na primeira coluna. A última coluna contém valores de P obtidos por análise de variância com significância de 0,05.

Espécie/Indivíduo	n	Mínimo	Máximo	Média vApEn	Desvio vApEn	P ANOVA (0.05)
1 (100 pts) / 1	68	1130	3160	1948	498,4	<0,0001
2 (100 pts) / 1	42	1012	3319	1791	514,3	
3 (100 pts) / 1	13	1225	3175	1861	623,6	
todos (100 pts) /1	118	585,9	2812	1143	472,4	
1 (100 pts) / 2	39	1315	3818	2026	620	<0,0001
2 (100 pts) / 2	68	1310	3799	2203	526	
3 (100 pts) / 2	43	1076	3798	1991	570,6	
todos (100 pts) / 2	152	717,7	3843	1303	576,8	

Tabela 5 – vApEn – *Hypsiboas pardalis* - Quantidade (n), valores mínimos, máximos, médias e desvios obtidos para os intervalos de tempo de vocalização dos indivíduos e do conjunto de indivíduos. A quantidade de pontos utilizado em cada trecho das análises está indicado na primeira coluna. A última coluna contém valores de P obtidos por análise de variância com significância de 0,05.

Indivíduo/ Dia	n	Mínimo	Máximo	Média vApEn	Desvio vApEn	P ANOVA (0.05)
1 (50 pts) /1	4	1095	1353	1217	106,1	0,9012
2 (50 pts) /1	7	690,2	1740	1164	415	
todos (50 pts) /1	9	714,1	1929	1114	424	
1 (100 pts)/ 2	38	966,8	3640	1696	473,8	<0,0001
2 (100 pts)/ 2	45	1155	3654	1680	435,1	
3 (100 pts)/ 2	15	1240	2622	1949	419,4	
todos (100 pts)/ 2	50	1053	2558	1351	320,3	

Tabela 6 – vApEn – Séries temporais de referencia- Quantidade (n), valores mínimos, máximos, médias e desvios obtidos para as séries construídas como referência. A quantidade de pontos utilizado em cada trecho das análises está indicado na primeira coluna.

Série temporal	n	Mínimo	Máximo	Média vApEn	Desvio vApEn
Seno (50 pts)	20	97,54	97,87	97,60	0,10
Ruído branco (50 pts)	20	742,88	1001,2	853,77	79,28
Lévy (50 pts)	20	1101,8	2186,3	1604,5	301,0153
Seno (100 pts)	11	109	110,8	109,3	0,5333
Ruído branco (100 pts)	11	1075	1241	1143	58,28
Lévy (100 pts)	11	940,1	3432	2270	745

Nas Figuras de 8 a 10 e nas Tabelas de 3 a 6, pode-se constatar que as médias de vApEn dos indivíduos são estatisticamente iguais entre si e diferentes dos conjuntos

para os dias nos quais três indivíduos foram gravados e analisados. Isto indica menor variabilidade das séries dos conjuntos com relação às séries dos indivíduos. Nos outros dias, contudo, as médias entre indivíduos e conjuntos são estatisticamente iguais ($p > 0,05$).

Em algumas séries (*Scinax perpusillus* dia 1, *Hypsiboas pardalis* dia 1), foram usados trechos de 50 pontos devido ao número reduzido de dados. Porém, ainda assim, é possível verificar altos desvios (Tabela 3 e 5, Figuras 8 e 10) e valores de vApEn próximos aos valores de distribuição de Lévy das séries temporais de referência indicado pelo espalhamento dos dados. Os valores de Seno e de Ruído Branco possuem desvios menores (Tabela 6, Figuras 8 a 10).

Figura 8 – Gráfico dos conjuntos de vApEn obtidos para as séries temporais dos indivíduos e do conjunto de indivíduos de *Scinax perpusillus*. A-) Dia 1 B-) Dia 2 C-) Séries temporais de referência. Nas abscissas estão as séries temporais e nas ordenadas, estão os valores de vApEn obtidos.

Figura 9 – Gráfico dos conjuntos de vApEn obtidos para as séries temporais dos indivíduos e do conjunto de indivíduos de *Hypsiboas faber*. A-) Dia 1 B-) Dia 2 C-) Séries temporais de referência. Nas abscissas estão as séries temporais e nas ordenadas, estão os valores de vApEn obtidos.

Figura 10 – Gráfico dos conjuntos de vApEn obtidos para as séries temporais dos indivíduos e do conjunto de indivíduos de *Hypsiboas pardalis*. A-) Dia 1 B-) Dia 2 C-) Séries temporais de referência. Nas abscissas estão as séries temporais e nas ordenadas, estão os valores de vApEn obtidos.

4.b.4 - Análise de Potência Espectral

Os valores de PSA dos intervalos de vocalização dos indivíduos e do conjunto de indivíduos de *Scinax perpusillus* e *Hypsiboas faber* não são estatisticamente diferentes de 0, ou seja, condizem com padrão de ruído branco (Tabela 7 a 9). Isto indica que há uma muito baixa correlação temporal entre os eventos de vocalização individual e inter-individual

Tabela 7 – Quantidade de intervalos de vocalização que compõem a série temporal de *Scinax perpusillus*, valor de β com intervalo de confiança e de r^2 das retas de regressão obtidas a partir da PSA das séries analisadas.

Indivíduo/ Dia	Quantidade de intervalos	β	r^2
1 / 1	220	0,0578 a 0,2500	0,011
2 / 1	195	-0,3594 a -0,0326	0,01492
Conjunto/ 1	416	-0,3605 a -0,1825	0,043
1 / 2	577	-0,2592 a 0,03017	0,008344
2 / 2	839	-0,1708 a 0,06163	0,002027
3 / 2	526	-0,1893 a 0,1325	0,0004581
Conjunto/ 2	1944	-0,1451 a -0,003316	0,004321

Tabela 8 – Quantidade de intervalos de vocalização que compõem a série temporal de *Hypsiboas faber*, valor de β com intervalo de confiança e de r^2 das retas de regressão obtidas a partir do PSA das séries analisadas.

Indivíduo/ Dia	Quantidade de intervalos	β	r^2
1 / 1	4002	-0,06719 a 0,04079	0,0001148
2 / 1	6906	-0,04276 a 0,03480	0,00001171
3 / 1	4461	-0,03005 a 0,02106	0,0000534
Conjuto / 1	15371	-0,03780 a 0,01623	0,0000797
1 / 2	6882	-0,3986 a -0,3562	0,08433

2 / 2	4269	-0,0255 a -0,0211	0,05088
3 / 2	668	-0,3001 a -0,2135	0,09581
Conjunto / 2	11821	0,0309 a 0,0683	0,001187

Tabela 9 – Quantidade de intervalos de vocalização que compõem a série temporal de *Hypsiboas pardalis*, valor de β com intervalo de confiança e de r^2 das retas de regressão obtidas a partir do PSA das séries analisadas.

Indivíduo/ Dia	Quantidade de intervalos	β	r^2
2 / 1	393	0,0211 a 0,2061	0,007723
Conjunto / 1	474	-0,2399 a -0,0989	0,02394
1 / 2	1952	-0,7868 a -0,6195	0,218
2 / 2	2332	-0,8469 a -0,7114	0,3036
3 / 2	842	-0,8723 a -0,6164	0,2368
Conjunto / 2	5128	-0,4976 a -0,3958	0,1034

Para os indivíduos e conjunto de indivíduos de *Hypsiboas pardalis* dia 2, os valores obtidos condizem com o ruído 1/f (Tabela 9), sendo, portanto, bem diferente de todas as outras séries temporais analisadas. Isso significa que, apesar dos tempos entre vocalizações apresentarem alta variabilidade, há uma preferência por intervalos mais curtos em detrimento dos mais longos.

4.b.5. - Plot de Poincaré

Assim como observado pelas outras ferramentas de análise, os plots de Poincaré mostram que as séries são altamente variáveis, com baixa correlação temporal entre os eventos de vocalização (Figuras 11, 12, 13). No entanto, os formatos

exibidos aqui, devido à alta variabilidade e aos grandes intervalos presentes, são diferentes dos comumente observados nos estudos de variabilidade cardíaca.

Os maiores intervalos aparecem como pontos isolados próximos aos eixos. Isto representa que os grandes intervalos são precedidos e sucedidos por intervalos curtos. Devido a isso, alguns pontos se afastam da nuvem onde se concentra a maior parte dos dados, fazendo com que os eixos x_1 e x_2 invertam seus sentidos e SD1 e SD2 acabem por apresentar valores negativos, como pode ser observado nas Tabelas de 10 a 12, e pode ser comparados com as séries temporais de referência da Tabela 13.

Tabela 10 – Valores de SD1, SD2 e a relação SD1/SD2 obtidos na análise dos plots de Poincaré dos indivíduos de *Scinax perpusillus* analisados.

Indivíduo/Dia	SD1	SD2	SD1/SD2
1/1	592,9374	-542,286	-1,0934037
2/1	258,9635	-220,068	-1,176742
Conjunto/1	112,403	-89,229	-1,2597138
1/2	234,1692	-203,533	-1,15052
2/2	124,7636	-102,218	-1,22057
3/2	291,9688	-257,767	-1,13269
Conjunto/2	40,0922	-27,2652	-1,47045

Tabela 11 – Valores de SD1, SD2 e a relação SD1/SD2 obtidos na análise dos plots de Poincaré dos indivíduos de *Hypsiboas faber* analisados.

Indivíduo / dia	SD1	SD2	SD1/SD2
1 / 1	1718,3	-1635,4	-1,05069
2 / 1	842,101	-784,05	-1,07404
3 / 1	4738,5	4600,8	1,02993
Conjunto / 1	184,2477	-157,052	-1,17316

1 / 2	0,0317	0,4163	0,07614701
2 / 2	21,1564	-11,9225	-1,7744936
3 / 2	0,1256	0,617	0,20356564
Conjunto / 2	0,0712	0,494	0,14412955

Tabela 12 – Valores de SD1, SD2 e a relação SD1/SD2 obtidos na análise dos plots de Poincaré dos indivíduos de *Hypsiboas pardalis* analisados.

Indivíduo/ dia	SD1	SD2	SD1/SD2
1 / 1	460,9258	-410,655	-1,1224153
2 / 1	210,1989	-178,75	-1,1759353
Conjunto / 1	193,96	-165,035	-1,1752666
1 / 2	12,5158	-2,1235	-5,89395
2 / 2	5,3292	1,4622	3,644645
3 / 2	59,1042	-35,8048	-1,65073
Conjunto / 2	2,3585	1,58	1,492722

Tabela 13 – Valores de SD1, SD2 e a relação SD1/SD2 obtidos na análise dos plots de Poincaré de séries temporais de referencia.

Série temporal	SD1	SD2	SD1/SD2
Seno	$2,46 \times 10^{-4}$	1,415383	$1,74 \times 10^{-4}$
Ruído Branco	1,007624	0,880157	0,873498
Lévy	1519,8	-1441,9	-1,0540

Com relação à análise quantitativa, os valores obtidos para as séries empíricas são muito similares aos passeios de Lévy construídos. Com isso, é possível observar que estes resultados, mais uma vez, mostram a grande variabilidade das séries temporais nas quais alguns dos valores apresentados por *Scinax perpusillus*, e *Hypsiboas faber* são muito superiores aos valores de SD1, SD2 e SD1/SD2 observados para ruído branco. Há, também, na maioria das séries temporais, inversão

de x_2 (aparecimento de valores negativos) o que indica comportamento similar aos passeios de Lévy.

Em *Hypsiboas faber* dia 2, as razões de SD1/SD2 não apresentam valores similares aos encontrados em nenhuma das outras séries temporais nem à distribuição de Lévy utilizada como parâmetro, com excessão do indivíduo 2.

Figura 11 - Plots de Poincaré dos intervalos de tempo entre vocalizações dos indivíduos e dos conjuntos dos dois dias de gravação de *Scinax perpusillus*. No eixo x temos os intervalos de tempo entre vocalizações e no eixo y temos os intervalos seguintes aos do eixo x. As letras correspondem ao dia e os números correspondem ao indivíduo. A1-) Indivíduo 1, dia 1; A2-) Indivíduo 2, dia 1; A3-) Conjunto de indivíduos, dia 1; B1-) Indivíduo 1, dia 2; B2-) Indivíduo 2, dia 2; B3-) Indivíduo 3, dia 2; B4-) Conjunto de indivíduos, dia 2. O formato dos plóts do dia 1 apresenta intervalos longos próximos a intervalos longos e curtos. Isso pode ser melhor identificado se compararmos a forma presente na Figura 3 ou com as séries temporais de referencia na Figura 14.

Figura 12 - Plots de Poincaré dos intervalos de tempo entre vocalizações dos indivíduos e dos conjuntos dos três dias de gravação de *Hypsiboas faber*. No eixo x temos os intervalos de tempo entre vocalizações e no eixo y temos os intervalos seguintes aos do eixo x. As letras correspondem ao dia e os números correspondem ao indivíduo. A1-) Indivíduo 1, dia 1; A2-) Indivíduo 2, dia 1; A3-) Indivíduo 3, dia 1 A4-) Conjunto de indivíduos, dia 1; B1-) Indivíduo 1, dia 2; B2-) Indivíduo 2, dia 2; B3-) Indivíduo 3, dia 2; B4-) Conjunto de indivíduos, dia 2. Note que não há presença de correlação entre os intervalos curtos e os intervalos longos, apesar dos intervalos longos precederem intervalos curtos. Isso pode ser melhor identificado se compararmos a forma presente na Figura 3 ou com as séries temporais de referencia na Figura 14.

Figura 13 - Plots de Poincaré dos intervalos de tempo entre vocalizações dos indivíduos e dos conjuntos dos dois dias de gravação de *Hypsiboas pardalis*. No eixo x temos os intervalos de tempo

entre vocalizações e no eixo y temos os intervalos seguintes aos do eixo x. As letras correspondem ao dia e os números correspondem ao indivíduo. A1-) Indivíduo 1, dia 1; A2-) Indivíduo 2, dia 1; A3-) Conjunto de indivíduos, dia 1; B1-) Indivíduo 1, dia 2; B2-) Indivíduo 2, dia 2; B3-) Indivíduo 3, dia 2; B4-) Conjunto de indivíduos, dia 2. Note que não há presença de correlação entre os intervalos curtos e os intervalos longos, apesar dos intervalos longos precederem intervalos curtos. Isso pode ser melhor identificado se compararmos a forma presente na Figura 3 ou com as séries temporais de referencia na Figura 14.

Figura 14 – Plots de séries temporais de referência. No eixo x temos os valores da série temporal e no eixo y temos os próximos valores da mesma série. Em A-) Seno; B-) Soma de senos de diferentes frequências; C-) Ruído branco; D-) Passeio de Lévy. Os pontos nos plots A e B se dispõem

como uma elipse, indicando que séries temporais mais organizadas tendem a esta forma. Os plots das séries temporais dos anuros tem formato próximo a D.

4.b.6 - Parâmetro μ de distribuições de probabilidades das séries temporais dos indivíduos e da interação entre os mesmos.

A Figura 15 mostra um gráfico tridimensional contendo μ , $\hat{\mu}$ e tamanho do vetor N das séries temporais construídas para o teste da ferramenta utilizada para estimativa de μ de Lévy. Como pode ser observado, há uma forte correspondência entre μ e $\hat{\mu}$ (Figura 15) independentemente do tamanho do vetor (Figura 15 e 16), o que mostra que a ferramenta é confiável para $\mu > 1$. A Figura 16 mostra um gráfico do μ contra $\hat{\mu}$, com um tamanho de vetor escolhido arbitrariamente (15000 pontos). A Figura 17 mostra um gráfico do tamanho da série temporal (N) contra $\hat{\mu}$, onde foi escolhido um valor de μ arbitrário

($\mu=2,25$).

Figura 15 – Gráfico de μ contra $\hat{\mu}$ onde nas ordenadas tem-se o valor de μ e nas abscissas o valor de $\hat{\mu}$. As cores representam diferentes tamanhos de vetores (ou diferentes N). Azul = 100 pontos, vermelho = 500 pontos, Verde = 5000 pontos e Preto = 12500. É possível observar através da ocorrência de sobreposição entre os pontos, e da pequena distância entre pontos não sobrepostos, que a diferença entre os valores de $\hat{\mu}$ para os diferentes N não é grande. Também não há valores discrepantes entre μ e $\hat{\mu}$. Os valores de $\mu < 1$, não são bem estimados por esta ferramenta, e medidas para $\mu=1$ não foram plotadas.

Figura 16 – Gráfico de μ contra $\hat{\mu}$ onde nas ordenadas tem-se o valor de μ e nas abscissas o valor de $\hat{\mu}$ ($N = 15000$). Note que há uma grande correspondência entre os valores estimados e os valores reais. Quando $\mu < 1$, a ferramenta não faz estimativas precisas, medidas para $\mu=1$ não foram plotadas.

A ferramenta apresentou baixa precisão na estimativa de valores de $\mu < 1$, e para as séries que possuíam $\mu=1$, o cálculo resultava em infinito, e por isso não foram inclusas nas análises e em nenhuma das figuras. Isto não é visível na Figura 15.

Figura 17 – Grafico do tamanho da série temporal contra $\hat{\mu}$, para um μ escolhido arbitrariamente ($\mu=2,25$). O tamanho não mostra influência no estimador como pode ser observado também na Figura 15.

As Tabelas de 14 a 16, mostram que a maior parte dos valores de μ das séries estão no intervalo entre 1 e 3, o que caracteriza distribuições de Lévy. O indivíduo 3 (dias 1 e 2) *Hypsiboas faber* apresenta μ maiores que 3, indicando que estas séries temporais têm comportamento que se aproxima de movimento browniano.

Os valores de extremos apresentados nas Tabelas 14 a 16 mostram a existencia de altos valores de máximo para quase todas as séries. Contudo, existem séries que têm intervalos máximos não tão grandes, com máximos ao redor de 10 segundos. Assim, é possível a série temporal pertencer a uma distribuição de Lévy sem possuir

grandes intervalos. A importância desta constatação será apresentada na Discussão, mais adiante.

Tabela 14 – Valores de μ , tamanho das séries e máximos e mínimos obtidos para as séries temporais de *Scinax perpusillus*.

Indivíduo/Dia	μ	Tamanho da série	Extremos (s)
1/1	1,6810	220	0,5118 - 275,6483
2/1	1,5459	195	0,5316 - 109,2444
Conjunto/1	1,2148	416	0,014 - 109,1832
1/2	1,2690	577	0,0801 - 224,8985
2/2	1,3546	839	0,1693 - 217,0587
3/2	1,6792	526	0,9099 - 241,6532
Conjunto/2	1,1253	1944	0,0018 - 216,5457

Tabela 15 – Valores de μ , tamanho das séries e máximos e mínimos obtidos para as séries temporais de *Hypsiboas faber*.

Indivíduo/ Dia	μ	Tamanho da série	Extremos (s)
1/1	1,7080	4002	0,1827 - 1694,1
2/1	1,6613	6906	0,1548 - 1530,8
3/1	3,0146	4461	0,3839 - 4245,7
Conjunto/1	1,1050	15371	0 - 1119,8
1/2	2,9991	6882	0,3897 - 10,9738
2/2	2,5777	4269	0,3999 - 301,5560
3/2	4,1197	668	0,4285 - 9,2016
Conjunto/2	1,1291	11819	0 - 10,9738

Tabela 16 – Valores de μ , tamanho das séries e máximos e mínimos obtidos para as séries temporais de *Hypsiboas pardalis*.

Espécie/ Indivíduo/Dia	μ	Tamanho da série	Extremos (s)
------------------------	-------	------------------	--------------

1/1	1,4621	80	1,8617 - 136,5234
2/1	1,6173	474	1,2058 - 254,9177
Conjunto/1	1,1952	393	0,0257 - 254,4561
1/2	1,2592	1952	0,0506 - 131,5905
2/2	1,8571	2332	0,6849 - 102,7012
3/2	1,7636	842	0,8868 - 180,4157
Conjunto/2	1,1141	5128	0,0018 - 76,9282

4.c Das transições entre indivíduos

4.c.1 - Entropia Aproximada Volumétrica

Como pode ser observado nas Tabelas 17 a 19, boa parte dos valores de vApEn encontrados para as transições entre os indivíduos corresponde a valores altos, geralmente superiores a ruído branco, e na faixa de distribuições de Lévy (Tabela 20). Como no caso dos indivíduos tratados de maneira isolada, tais resultados indicam alta variabilidade dos tempos de transição entre os indivíduos.

Tabela 17 – vApEn – Transições *Scinax perpusillus* - Quantidade (n), valores mínimos, máximos, médias e desvios obtidos para os intervalos de tempo de vocalização das transições entre indivíduos. A quantidade de pontos utilizado em cada trecho das análises está indicado na primeira coluna . A última coluna contém valores de P obtidos por análise de variância com significância de 0,05.

Transição/ Tamanho da série / dia	N	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	p ANOVA (0,05)
1-1/ 108 / 1 (50 pts)	3	561,5	2204	1588	895,2	0,7395
1-2/ 113 / 1 (50 pts)	3	1795	2138	1912	195,8	
2-1/ 113 / 1 (50 pts)	3	1278	1937	1697	364,2	
2-2/ 82 / 1 (50 pts)	3	1279	1919	1598	324,3	
1-1/ 96 / 2 (96 pts)	1	-	-	1922	0	0,1310

1-2/ 313 / 2 (100 pts)	5	985.8	3260	1908	1176	
1-3/ 169 / 2 (100 pts)	2	998.8	1048	1024	35.04	
2-1/ 361 / 2 (100 pts)	6	812.2	3190	1812	975.3	
2-2/ 166 / 2 (100 pts)	2	1535	2756	2145	863.7	
2-3/ 312 / 2 (100 pts)	5	1217	3623	2339	1002	
3-1/ 121 / 2 (100 pts)	1	-	-	1442	0	
3-2/ 361 / 2 (100 pts)	6	1297	3781	1939	928.8	
3-3/ 45 / 2 (100 pts)	1	-	-	784.7	0	

Tabela 18 – vApEn – Transições *Hypsiboas faber* - Quantidade (n), valores mínimos, máximos, médias e desvios obtidos para os intervalos de tempo de vocalização das transições entre indivíduos. A quantidade de pontos utilizado em cada trecho das análises está indicado na primeira coluna . A última coluna contém valores de P obtidos por análise de variância com significância de 0,05.

Transição/ Tamanho da série / dia	n	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	p ANOVA (0,05)
1-1/ 2599 / 1 (100 pts)	25	1068	3202	1940	583,4	<0,0001
1-2/ 3922 / 1 (100 pts)	39	976,1	2005	1119	163,6	
1-3/ 359 / 1 (100 pts)	6	1011	1147	1080	46	
2-1/ 3860 / 1 (100 pts)	38	968,9	1614	1108	107,9	
2-2/ 102 / 1 (100 pts)	3	950,9	965,3	958,8	7,332	
2-3/ 306 / 1 (100 pts)	6	1051	1225	1128	60,31	
3-1/ 419 / 1 (100 pts)	8	1024	1293	1116	87,72	
3-2/ 246/1 (100 pts)	4	1012	1168	1074	66,81	
1-1/ 850 / 2 (100 pts)	16	1258	2295	1801	282.4	<0.0001
1-2/ 1923 / 2 (100 pts)	18	987.1	3799	1406	737.1	
1-3/ 1225 / 2 (100 pts)	11	1071	1225	1137	49.7	
2-1/ 2074 / 2 (100 pts)	19	975.5	2319	1283	353.8	
2-2/ 2823 / 2(100 pts)	27	1175	2933	1869	386.4	
2-3/ 2010 / 2 (100 pts)	19	910.2	1388	1104	112.5	
3-1/ 1073 / 2(100 pts)	20	1038	3757	1311	592.6	
3-2/ 2161 / 2 (100 pts)	42	982	1426	1171	121.1	
3-3/ 1227 / 2 (100 pts)	23	1232	2639	1885	386.7	

Tabela 19 – vApEn – Transições *Hypsiboas pardalis* - Quantidade (n), valores mínimos, máximos, médias e desvios obtidos para os intervalos de tempo de vocalização das transições entre indivíduos. A quantidade de pontos utilizado em cada trecho das análises está indicado na primeira coluna . A última coluna contém valores de P obtidos por análise de variância com significância de 0,05.

Transição/ Tamanho da série / dia	Quantidades de vApEn	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	p ANOVA (0,05)
1-2/ 78 (50 pts)	4	928,8	1498	1098	270,3	0,5423
2-1/ 78 (50 pts)	4	816,1	2127	1540	587,4	
2-2/ 215 (50 pts)	6	895,9	2010	1284	392,9	
1-1/ 272 (100 pts)	4	1274	2358	1787	457.1	<0.0001
1-2/ 1315 (100 pts)	12	1114	2618	1353	405.4	
1-3/ 366 (100 pts)	6	1113	1508	1313	127.6	
2-1/ 1298 (100 pts)	11	1104	1825	1362	217.3	
2-2/ 587 (100 pts)	10	1251	2381	1795	369.6	
2-3/ 447 (100 pts)	7	1133	1885	1421	235.6	
3-1/ 383 (100 pts)	6	1210	1866	1394	243.2	
3-2/ 430 (100 pts)	7	1133	1846	1385	267.3	
3-3/ 30 (30 pts)	1	-	-	697.9	0	

Tabela 20 – vApEn – Séries temporais de referencia- Quantidade (n), valores mínimos, máximos, médias e desvios obtidos para as séries construídas como referência. A quantidade de pontos utilizadas em cada trecho das análises está indicado na primeira coluna.

Série Temporal / Tamanho	n	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Seno/ 45 (45 pts)	1	-	-	181.1	181.1
Ruído Branco/ 45 (45 pts)	1	-	-	749.2	0
Lévy/ 45 (45 pts)	1	-	-	1197.2	0
Seno/ 500 (50 pts)	20	97,54	97,87	97,60	0,10
Ruído branco/ 500 (50 pts)	20	742,88	1001,2	853,77	79,28
Lévy/ 500 (50 pts)	20	1101,8	2186,3	1604,5	301,0153
Seno/ 500 (100 pts)	11	109	110.8	109.3	0.5333
Ruído Branco/ 500 (100 pts)	11	1075	1241	1143	58.28

Lévy/ 500 (100 pts)	11	940.1	3432	2270	745
---------------------	----	-------	------	------	-----

Séries temporais de referência aproximadamente do tamanho das menores séries empíricas foram criadas com o intuito de facilitar a comparação destas com as séries maiores (Tabela 20). Pode-se verificar, então, que as duas transições menores (45 transições de, sendo *Scinax perpusillus* do indivíduo 3 para ele mesmo e *Hypsiboas pardalis* do indivíduo 3 para ele mesmo, 30 transições), possuem valores de vApEn próximos à ruído branco.

Assim como descrito para as séries temporais dos indivíduos e conjunto de indivíduos, os desvios de Ruído Branco e Seno são menores que os das séries temporais analisadas e que as séries de referência que obedecem a distribuição de Lévy (Tabela 20, Figuras 18 a 20).

Figura 18 - Gráfico dos conjuntos de vApEn obtidos para as séries temporais das transições entre indivíduos de *Scinax perpusillus*. A-) Dia 1 B-) Dia 2 C-) Séries temporais de referência. Nas abscissas estão as séries temporais e nas ordenadas, estão os valores de vApEn obtidos.

Figura 19 - Gráfico dos conjuntos de vApEn obtidos para as séries temporais das transições entre indivíduos de *Hypsiboas faber*. A-) Dia 1 B-) Dia 2 C-) Séries temporais de referência. Nas abscissas estão as séries temporais e nas ordenadas, estão os valores de vApEn obtidos.

Figura 20 - Gráfico dos conjuntos de vApEn obtidos para as séries temporais das transições entre indivíduos de *Hypsiboas pardalis*. A-) Dia 1 B-) Dia 2 C-) Séries temporais de referência. Nas abscissas estão as séries temporais e nas ordenadas, estão os valores de vApEn obtidos..

4.c.2 - Análise de Potência Espectral

Como algumas transições apresentam uma quantidade pequena de pontos, e este é um fator importante para o uso desta ferramenta, transições com menos de 100 intervalos de tempo foram excluídas desta análise. Os valores de β obtidos para as transições, em sua maioria, se mantêm próximos à faixa característica de ruído branco,

apesar de alguns valores aparecerem na faixa de ruído 1/f (Tabelas 21, 22 e 23). Isto indica que nestas séries há o predomínio de intervalos mais curtos em detrimento de intervalos mais longos.

Tabela 21 – Quantidade de transições, β e r^2 das PSA obtidas das transições entre indivíduos de *Scinax perpusillus*.

Espécie/ Transição	Quantidade de intervalos	β	r^2
<i>Scinax</i> / 1-1	108	-0.0938 a 0.0656	0,0006
<i>Scinax</i> / 1-2	113	-0.0205 a 0.2917	0,01378
<i>Scinax</i> / 2-1	113	0.1231 a 0.5593	0,04335
<i>Scinax</i> / 1-2/ 2	313	-0.06833 a 0.03586	0.002416
<i>Scinax</i> / 1-3/ 2	169	-0.6255 a 0.03875	0.03641
<i>Scinax</i> / 2-1/ 2	361	-0.2385 a 0.07446	0.005895
<i>Scinax</i> / 2-2/ 2	166	-0.1601 a -0.04949	0.1497
<i>Scinax</i> 2-3/ 2	312	-0.1307 a 0.03938	0.007139
<i>Scinax</i> 3-1/ 2	121	-0.2186 a 0.2650	0.000635
<i>Scinax</i> 3-2/ 2	361	-0.03285 a 0.01343	0.003788

Tabela 22 – Quantidade de transições, β e r^2 das PSA obtidas das transições entre indivíduos de *Hypsiboas faber*.

Espécie/ Transição / dia	Quantidade de intervalos	β	r^2
<i>H. faber</i> / 1-1 / 1	855	-0.6587 a -0.3937	0.1248
<i>H. faber</i> 1-2 / 1	1923	0.06339 a 0.1257	0.0356
<i>H. faber</i> 1-3 / 1	1225	-0.4316 a -0.2228	0.05825
<i>H. faber</i> 2-1 / 1	2074	-0.01448 a 0.01708	0.00002512
<i>H. faber</i> 2-2 / 1	2823	-0.4573 a -0.3213	0.08202
<i>H. faber</i> 2-3 1/ 1	2010	-0.5113 a -0.3533	0.1029
<i>H. faber</i> 3-1 / 1	1073	-0.0005161 a 0.0005451	0
<i>H. faber</i> 3-2 / 1	2161	-0.4733 a -0.3082	0.07392
<i>H. faber</i> 3-3 / 1	1227	-0.4710 a -0.2595	0.06973

<i>H. faber</i> / 1-1 / 2	2599	-0.3980 a -0.3332	0,08915
<i>H. faber</i> 1-2 / 2	3922	-0.1212 a -0.0306	0,001432
<i>H. faber</i> 1-3 / 2	359	-0.2910 a -0.2702	0,03935
<i>H. faber</i> 2-1 / 2	3860	-0.1872 a -0.0964	0,005037
<i>H. faber</i> 2-2 / 2	102	-1.0658 a -0.6422	0,02495
<i>H. faber</i> 2-3 / 2	306	-0.8020 a -0.5768	0,1989
<i>H. faber</i> 3-1 / 2	419	-0.4681 a -0.2671	0,06066
<i>H. faber</i> 3-2 / 2	246	-0.6106 a -0.3636	0,1139

Tabela 23 – Quantidade de transições, β e r^2 das PSA obtidas das transições entre indivíduos de *Hypsiboas pardalis*.

Espécie/ Transição	Quantidade de intervalos	β	r^2
<i>H. pardalis</i> /2-2	315	-0,0708 a 0,0496	0,000199
<i>H. pardalis</i> / 1-1	272	-0.3059 a -0.2142	0.4801
<i>H. pardalis</i> / 1-2	1315	-0.7567 a -0.5476	0.1858
<i>H. pardalis</i> / 1-3	366	-0.2727 a 0.07463	0.006856
<i>H. pardalis</i> / 2-1	1298	-0.5584 a -0.3745	0.1325
<i>H. pardalis</i> /2-2	587	-0.8477 a -0.5420	0.2143
<i>H. pardalis</i> /2-3	447	-0.3603 a -0.01361	0.01982
<i>H. pardalis</i> /3-1	383	-0.4750 a -0.04461	0.02877
<i>H. pardalis</i> /3-2	430	-0.6718 a -0.2433	0.07601

4.c.3. - Plot de Poincaré

Os plots (Figuras 21, 22 e 23) mostram que, na maior parte das séries temporais, a dispersão é grande, não sendo possível ver uma correlação entre as transições analisadas. Da mesma maneira do obtido para os indivíduos tratados de maneira isolada, esses resultados evidenciam a alta variabilidade dos tempos de transição.

Figura 21 - Plot de Poicaré das transições entre indivíduos de *Scinax perpusillus*. Como observado nos dados da Tabela 21, não há correlação temporal entre os intervalos de vocalização. Os números acima dos plots são as transições analisadas. Nos eixos, os intervalos de tempo entre transições em x e o próximo intervalo de tempo em que ocorre a mesma transição em y. Os números correspondem à transição, e as letras correspondem ao dia A-) Dia 1; B-) Dia 2.

Figura 22 - Plot de Poicaré das transições entre indivíduos de *Hypsiboas faber*. Em A 1 – 2, A 2 – 1, e A 3 – 1, é possível observar a presença de poucos tempos grandes de silêncio, o que faz com que eles tenham a aparência parecida com os plots da análise dos animais individualmente, e da série temporal dos intervalos de tempo entre as vocalizações de todos os indivíduos, sem distinção da transição entre eles. Também é interessante notar certa diferenciação que aparece nas transições A 1 – 3, A 2 – 3 e A 3 – 2. Em x os intervalos de tempo entre vocalizações e em y o próximo intervalo presente na série temporal. As letras representam os dias A-) Dia 1; B-) Dia 2; e os números representam as transições entre indivíduos.

Figura 23 - Plot de Poicaré das transições entre indivíduos de *Hypsiboas pardalis*. Como observado nos dados da Tabela 23, não há correlação temporal entre os intervalos de vocalização. Os números acima dos plots são as transições analisadas. Nos eixos, os intervalos de tempo entre transições em x e o próximo intervalo de tempo em que ocorre a mesma transição em y. Os números correspondem a transição, e as letras correspondem ao dia A-) Dia 1; B-) Dia 2.

Através das Tabelas 24 a 26, percebe-se que as altas variâncias permanecem, resultando em altos valores de SD1 e SD2. Entretanto, valores negativos destas variáveis novamente são computados, indicando que há uma inversão de SD2 com

relação ao eixo de referencia x_2 . Ao analisar os valores absolutos, notamos que as variabilidades continuam altas e as relações SD1/SD2 superiores a 1 (se considerarmos valores absolutos), indicando a alta variabilidade das séries temporais das transições entre indivíduos.

Boa parte das transições de *Hypsiboas faber* e algumas de *Hypsiboas pardalis* aparecem nesta análise quantitativa do plot com um alto nível de correlação (valores de SD1, SD2 e da relação SD1/SD2 próximas à zero, apresentando valores próximos a seno, ver Tabela 27). No entanto, esta alta correlação não é evidenciada pelas outras ferramentas de análise (ver acima, Tabelas 17 a 23 e Figuras 18 a 20).

Tabela 24- Valores de SD1, SD2 e a relação SD1/SD2 obtidos na análise dos plots de Poincaré das transições entre indivíduos de *Scinax perpusillus*.

Transição/ Dia/ Tamanho da série	SD1	SD2	SD1/SD2
1-1/ 1/ 108	59,3595	-43,3884	-1,3681
1-2/ 1/ 113	115,3762	-93,9083	-1,2286
2-1/ 1 / 113	174,9112	-146,255	-1,19593
2-2/ 1/ 82	155,4748	130,4273	1,192042
1-1/ 2/ 96	17.6261	-8.2502	-2.13645
1-2/ 2/ 313	19.4662	-10.4741	-1.85851
1-3/ 2/ 169	0.6704	1.1086	0.604727
2-1/ 2/ 361	9.0191	-1.2105	-7.45072
2-2/ 2/ 166	33.846	-21.7483	-1.55626
2-3/ 2/ 312	37.0221	-24.6328	-1.50296
3-1/ 2/ 121	4.7319	-0.2458	-19.251
3-2/ 2/ 361	129.4649	-106.62	-1.21427
3-3/ 2/ 45	0.9472	1.3234	0.715732

Tabela 25- Valores de SD1, SD2 e a relação SD1/SD2 obtidos na análise dos plots de Poincaré das transições entre indivíduos de *Hypsiboas faber*.

Transição/ Dia/ Tamanho da série	SD1	SD2	SD1/SD2
1-1/ 1/ 850	0,0593	0,527	0,112524
1-2/ 1/ 1923	0,0303	0,3757	0,080649
1-3/ 1/ 1225	0,0143	0,2694	0,053081
2-1/ 1/ 2074	0,0302	0,3723	0,081117
2-2/ 1/ 2823	0,0076	0,2827	0,026884
2-3/ 1/ 2010	0,0091	0,234	0,038889
3-1/ 1/ 1073	0,0107	0,2511	0,042613
3-2/ 1/ 2161	0,0113	0,2486	0,045455
1-1/ 2/ 850	0,086	0,6755	0,127313
1-2/ 2/ 1923	211,5398	-182,447	-1,15946
1-3/ 2/ 1225	0,0133	0,2597	0,051213
2-1/ 2/ 2074	570,0629	-522,321	-1,0914
2-2/ 2/ 2823	0,0546	0,5633	0,096929
2-3/ 2/ 2010	0,0193	0,3303	0,058432
3-1/ 2/ 1073	1169,4	-1101	-1,06213
3-2/ 2/ 2161	0,0172	0,3201	0,053733
3-3/ 2/ 1227	0,0372	0,5123	0,072614

Tabela 26- Valores de SD1, SD2 e a relação SD1/SD2 obtidos na análise dos plots de Poincaré das transições entre indivíduos de *Hypsiboas pardalis*.

Transição/ Dia/ Tamanho da série	SD1	SD2	SD1/SD2
/ 1-1/ 1/ 272	0,0317	0,4163	0,076147
1-2/ 1/ 1315	7,0096	-0,33	-21,2412
2-1/ 1/ 1298	223,3385	-192,098	-1,16263
2-2/ 1/ 587	221,2379	-189,859	-1,16527
1-1/ 2/ 272	17,5192	-8,2725	-2,11776
1-2/ 2/ 1315	0,9761	1,9292	0,505961
1-3/ 2/ 366	0,3014	0,7987	0,377363
2-1/ 2/ 1298	1,4909	1,576	0,946003
2-2/ 2/ 587	3,1506	2,9265	1,076576
2-3/ 2/ 447	0,3122	0,8363	0,373311
3-1/ 2/ 383	0,2718	0,9109	0,298386
3-2/ 2/ 430	0,3067	0,8704	0,352367

3-3/ 2/ 30	0,281	0,8829	0,318269
------------	-------	--------	----------

Tabela 27 – Valores de SD1, SD2 e a relação SD1/SD2 obtidos na análise dos plots de Poincaré de séries temporais de referencia.

Série temporal	SD1	SD2	SD1/SD2
Seno	$2,46 \times 10^{-4}$	1,415383	$1,74 \times 10^{-4}$
Ruído Branco	1,007624	0,880157	0,873498
Lévy	1519,8	-1441,9	-1,0540

4.c.4 - Parâmetro μ da distribuição de probabilidade nas transições entre indivíduos

As Tabelas 28 a 30 mostram que todas as transições analisadas apresentam valores de μ dentro ou muito próxima à faixa da distribuição de Lévy. Ao compararmos a coluna de máximos e mínimos com as Figuras 4 a 7 é possível observar que os extremos das séries temporais de intervalos de vocalização não apresentam valores tão grandes quanto os observados nas séries temporais individuais. Todavia, algumas transições apresentam grandes intervalos (acima de 50 segundos), maiores que os valores de máximo das outras transições dos indivíduos da mesma espécie.

Outro aspecto importante de ser notado é que as transições que foram obtidas a partir das gravações de apenas dois indivíduos, a presença de grandes intervalos é mais pronunciada (intervalos de maior valor). Para duas transições de *Hypsiboas faber* (1 – 1 e 2 - 2, dia 1) os valores obtidos foram maiores que 3, de novo indicando que tendem a um passeio aleatório de distribuição normal (movimento browniano).

Tabela 28 – Valores de μ , erro e r^2 , máximo e mínimo obtidos para as séries temporais de *Scinax perpusillus*.

Transição/ Dia	μ	Tamanho da série	extremos (s)
1-1/1	1,7759	108	0,6912 - 80,4611
1-2/1	1,2616	113	0,0144 - 98,6345
2-1/1	1,2553	113	0,0263 - 109,1832
2-2/1	1,5789	82	0,5316 - 91,2513
1-1/2	1,3312	96	0,081 - 33,97
1-2/2	1,1615	313	0,001 - 78,89
1-3/2	1,1653	169	0,002 - 3,177
2-1/2	1,1989	361	0,005 - 62,11
2-2/2	1,4985	166	0,275 - 78,62
2-3/2	1,1314	312	0,0022 - 103,88
3-1/2	1,1735	121	0,002 - 22,72
3-2/2	1,2011	361	0,003 - 216,54
3-3/2	1,8088	45	0,909 - 6,601

Tabela 29 – Valores de μ , erro e r^2 , máximo e mínimo obtidos para as séries temporais de *Hypsiboas faber*.

Transição/ Dia	μ	Tamanho da série	extremos (s)
1-1 / 1	1,1635	850	0,1827 - 4,335
1-2 /1	1,1384	1923	0,0001 - 637,91
1-3 /1	1,1190	1225	∞ - 0,653
2-1 /1	1,1510	2074	∞ - 1070
2-2 /1	1,6053	2823	0,154 - 5,14
2-3 /1	1,1319	2010	∞ - 1,62
3-1 /1	1,1193	1073	∞ - 1119,8
3-2 /1	1,1104	2161	∞ - 0,424
1-1 / 2	3,0001	2599	0,4166 - 10,9738
1-2 / 2	1,1327	3922	∞ - 2,2306
1-3 /2	1,196	359	∞ - 0,5369
2-1 /2	1,1559	3860	∞ - 3,8604
2-2 / 2	3,9784	102	0,4439 - 1,2781
2-3 / 2	1,1573	306	∞ - 0,5325

3-1 / 2	1,2003	419	0 - 0,5992
3-2 / 2	1,2555	246	0,0024 - 0,4919

Tabela 30 – Valores de μ , erro e r^2 , máximo e mínimo obtidos para as séries temporais de *Hypsiboas pardalis*.

Transição/ Dia	μ	Tamanho da série	extremos (s)
1-2/ 1	1,2973	78	0,0633 - 15,6776
2-1/ 1	1,2175	78	0,0258 - 136,14
2-2/ 1	1,6191	315	1,2058 - 254,9177
1-1/ 2	1,2861	272	0,056 - 76,92
1-2/ 2	1,1155	1315	0,001 - 23,92
1-3/ 2	1,2157	366	0,0047 - 3,511
2-1/ 2	1,1410	1298	0,0024 - 37,74
2-2/ 2	1,9083	587	0,684 - 38,26
2-3/ 2	1,1833	447	0,002 - 4,41
3-1/ 2	1,2092	383	0,003 - 4,03
3-2/ 2	1,1785	430	0,001 - 5,874
3-3/ 2	2,6782	30	0,97 - 3,28

5. Discussão

5.a. – Das características das vocalizações

As discrepâncias encontradas entre as vocalizações obtidas e as características descritas na literatura aparecem, principalmente, no que tange à quantidade de notas por vocalização e aos pulsos por nota. Em parte, isto advém de estudos que analisam poucos eventos de vocalização, como acontece em *Hypsiboas pardalis* (Bokermann, 1968). Em *Scinax perpusillus*, ocorre um outro tipo de problema,

pois acredita-se que este grupo não represente apenas uma espécie (Pombal Jr. & Bastos, 2003; Heyer, et. al., 1990), e existem, portanto, diferenças regionais entre os cantos onde as vocalizações foram gravadas.

Outros motivos do surgimento de tais diferenças podem estar no fato de que os animais, geralmente, não vocalizam sob condições climáticas e de interação constantes; de que há diferenças ao longo da estação de reprodução, da quantidade de animais no entorno e das distancias entre indivíduos que interagem. Tal número de fatores pode, dessa maneira, fazer com que o comportamento vocal se altere (observações pessoais).

Portanto, reiterando o que já foi apresentado na seção 4, estas discrepâncias não comprometem as análises de dados subsequentes, e também não influenciam as conclusões abaixo apresentadas, pois elas se focam, basicamente, na dinâmica dos intervalos de vocalização, e não na estrutura da vocalização em si.

5.b. – Do surgimento da distribuição de Lévy nos dados obtidos

Os resultados encontrados mostram que há muito pouca regularidade na dinâmica temporal das vocalizações das três espécies analisadas uma vez que um alto grau de aleatoriedade foi evidenciado pelas análises feitas, tanto nos intervalos de tempo entre vocalizações quanto na interação entre os indivíduos. As séries temporais analisadas apresentam características similares aos passeios de Lévy, nos quais seqüências de rápidas vocalizações são intercaladas por grandes silêncios (Sims, 2007).

Comportamentos que obedecem a distribuições de Lévy têm sido relatados no contexto de forrageamento. Estes padrões vêm sendo encontrados em diferentes grupos animais e sob diversas circunstâncias. Por exemplo, em trabalhos conduzidos com chacais, concluiu-se que este tipo de distribuição de tamanhos de deslocamento seria a melhor estratégia para encontrar comida em ambientes intrincados e imprevisíveis. Além disso, sugere-se que esta estratégia de busca permita que novas áreas para exploração sejam encontradas mais rapidamente (Atkinsons, 2002). Para microplânctons, o passeio de Lévy também surge como estratégia utilizada para a busca de alimento. Discute-se que, talvez, esse tipo de distribuição de probabilidades seja mais eficiente que o movimento browniano por acarretar uma maior área explorada em diferentes escalas (Bartumeus, 2003).

Nesse sentido, outros autores propõem que a chance de repetir uma visita a um determinado local é menor quando as distâncias percorridas na busca obedecem a uma distribuição de Lévy ao invés de uma distribuição gaussiana (Levandowsky, et.al. apud Viswanathan, et. al., 1999). Outra explicação proposta é a de que forrageadores utilizam passeios de Lévy porque o número de novos locais visitados é maior para quem se utiliza deste tipo de distribuição em relação ao movimento browniano (Shlesinger & Klafter, apud Viswanathan, et. al., 1999). Segundo da Luz et. al (2001), numa área onde os recursos estão distribuídos aleatoriamente e que é possível visitar alguma região, é necessário aperfeiçoar a busca através de uma aproximação probabilística do “problema”. Observa-se que o passeio de Lévy é a estratégia utilizada, e que nestas condições, $\mu = 2$ surge como um parâmetro ótimo. Um modelo de forrageamento construído por Viswanathan e colaboradores (1999) mostrou, a partir de

resoluções numéricas, que tal valor de μ otimiza o encontro de recursos quanto maior for a distância entre duas fontes de recurso.

Outros modelos computacionais, feitos por Bartumeus e colaboradores (2002), utilizaram a relação da velocidade de deslocamento entre presa e predador, a relação de tamanhos dos mesmos, o tamanho da área de busca e o tipo de movimento de ambos (movimento browniano ou distribuição de Lévy). A partir destes modelos, os autores concluíram que a utilização de passeios de Lévy pelo predador é mais eficiente quando ele é maior e mais rápido que a presa, quanto maior for o tamanho da área e quando as presas utilizam movimento browniano. Para presas que utilizam passeios de Lévy na movimentação, ou que são tão grandes ou maiores que os predadores, movimento browniano se mostra tão eficiente ou até melhor que Lévy. Movimento browniano também se revela a melhor estratégia para o predador quando há abundância de alvos (Bartumeus et. al., 2001).

Todas as conclusões acima apontam para a otimização de um processo de busca que envolve distâncias de locomoção em diversas direções, ou seja, estão no âmbito do espaço. O presente projeto analisa propriedades temporais dos dados coletados. A nossa constatação de que as séries analisadas também obedecem a uma distribuição de Lévy pode estar relacionada a um processo de otimização. Esta perspectiva é a que será discutida agora.

Especula-se que canto em coro possa ser desvantajoso para o indivíduo devido à interferência sonora (Wells, 1977). Tal interferência possivelmente diminuiria a eficácia da sinalização nos machos que sincronizassem seus cantos. Foi observada, em *Rana clamitans*, a existência de uma tendência de espaçamento irregular entre

vocalizações, variando de 2 a 10 segundos (Wells, 1977). Há, ainda, o fato de que raramente surge sobreposição entre vocalizações de indivíduos que cantam próximos uns aos outros (Wells, 1977).

Mais ainda, o comportamento de evitar sobreposições de sinais foi observado em duas espécies de peixes que se comunicam através de sinais elétricos (Takizawa, et. al. 1999; Capurro & Malta, 2004). O peixe sul-americano *Gymnotus carapo* utiliza descargas elétricas para eletrolocalização e para comunicação. Os intervalos entre descargas apresentam baixa variabilidade, o que pode levar a sobreposições no processo de comunicação, mas são importantes para o processo de eletrolocalização. No entanto, entre os peixes que possuem taxas de disparo similares, o peixe com maior taxa de disparo pode diminuir o transiente do mesmo, apresentando o comportamento chamado “Jamming Avoidance Response” ou “JAR”, evitando assim sobreposição (Capurro & Malta, 2004). Um peixe do gênero *Eigenmannia* possui o mesmo comportamento, sendo que pôde ser observado que alguns indivíduos aumentam a frequência de disparo, enquanto outros indivíduos a diminuem (Takizawa, et. al. 1999).

Tendo estes dados empíricos em vista, passeios de Lévy possivelmente aumentariam a eficácia da comunicação por diminuir a probabilidade de sobreposições nos eventos de canto entre indivíduos.

Em nossos dados, é possível verificar a presença de intervalos de vocalização próximos a zero, principalmente nas séries temporais relativas à interação entre indivíduos, mais notadamente em *Hypsiboas faber*. Estes animais certamente possuem as maiores taxas de vocalização entre as espécies gravadas, o que poderia facilitar o

surgimento de sobreposições entre dois ou mais indivíduos. Contudo, como foi observado em campo e demonstrado através das análises, não há sobreposição entre os cantos, e, na grande maioria das vezes, a eventual sobreposição surge de forma que é possível distinguir o canto de dois indivíduos.

Dentro da perspectiva apresentada acima, passamos, agora, a procurar eventuais bases neurais que possam dar substrato ao surgimento das séries empíricas obtidas.

5.c. - Dos intervalos curtos entre as vocalizações

A característica apresentada pelas séries temporais, especificamente a variabilidade presente nos intervalos curtos entre vocalizações, pode ter sua origem em alguns controles neuronais de vocalização em anuros. Como citado na seção 1.f., em *Bombina bombina*, foi descrita a existência de duas entradas auditivas que modulam o sistema vocal desta espécie (Walkowiak, 1988; Wilczynski, 1992). Um sistema que reconhece uma pequena faixa de frequências, possivelmente a faixa presente no canto, age sobre os níveis mais altos das vias neurais de controle da vocalização, estimulando o canto. A outra é uma entrada que é estimulada por uma faixa mais ampla de frequências, a qual aumenta o período refratário dos cantos e age nos níveis mais baixos das vias neurais do controle de vocalização. Supõem-se que tais controles resultariam num comportamento comum de anuros, chamado de canto antifonal. Neste comportamento, machos respondem ao canto de conspecíficos, contudo com um atraso que reduz a interferência acústica (Wilczynski, 1992).

A partir disso, Walkowiak (1988) e Wilczynski (1992) sugerem que os animais podem ser relativamente seletivos em iniciar o canto em resposta a um som, mas podem ajustar sua taxa de emissão mesmo quando vocalizando espontaneamente de modo a evitar que sons altos e repetitivos (como ruídos ambientais ou vocalizações advindas de outras espécies) se sobreponham ao seu próprio canto.

Pesquisadores que estudaram a espécie *Leptodactylus albilabris* observaram, em campo, que o comportamento de vocalização entre grupos de indivíduos passavam da sincronização para a alternância de fase. Nos experimentos realizados, os animais eram apresentados a estímulos cíclicos (vocalizações da mesma espécie, gravadas em fitas cassete), de diversos períodos. As hipóteses de que os animais cantariam em fase com os estímulos e de que haveria um atraso constante com relação aos mesmos foram descartadas. O mesmo se deu em relação à hipótese de que os animais procurariam intervalos entre vocalizações de outros indivíduos para emitir seus cantos. Por outro lado, as análises mostraram que há um período de atraso pós-estímulo e um período refratário após a vocalização. Estas observações e a constatação de que os intervalos de canto espontâneos se encontram dispersos ao redor de uma média de 320 ms sugerem, segundo os autores, a presença de um controlador de vocalizações que funcionaria como um oscilador com ruído. Há que se ressaltar, no entanto, que no estudo em questão, os intervalos entre emissões que ultrapassavam 500 ms foram retirados das análises e foram gravados apenas trechos de 25 segundos de vocalização intensa (Moore, 1989). Mesmo restringindo os tipos de intervalos entre vocalizações utilizados para análise, utilizando somente intervalos curtos na realização

dos experimentos, os autores não observaram a presença de periodicidade marcante nos intervalos de vocalização dos animais estudados.

5.d. Dos intervalos longos entre as vocalizações

Os grandes intervalos registrados podem estar relacionados à alta demanda energética imposta pela vocalização. Dentro dessa perspectiva, machos de *Dendropsophus microcephalus* mantêm um baixo esforço de vocalização (emitindo cantos com menos notas) quando poucos machos estão presentes, mas aumentam o esforço vocal quando há muitos machos por perto (Faivovich, 2005). Nesta espécie, o custo da vocalização é muito alto, chegando a uma média de $1.7 \text{ ml O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ h}^{-1}$, o qual é onze vezes a taxa metabólica de repouso (Wells & Taigen, 1989). O aumento do número de notas é observado quando a competição vocal aumenta, fazendo com que haja um aumento concomitante e linear da taxa metabólica. São detectados, então, períodos de silêncio que parecem ser essenciais para a conservação de energia (Wells, 2001). Em *Hyla versicolor*, o aumento do custo energético está relacionado ao aumento do tempo dos eventos de vocalização (Taigen & Wells, 1985).

Apesar de não haver estudos específicos para o gasto energético relacionado à vocalização das espécies aqui analisadas, a interpretação do fenômeno parece se estender a elas. Em todas as análises feitas, há a presença de grandes intervalos de tempo ao longo das várias séries temporais, sendo que a espécie que apresenta os maiores intervalos é *Hypsiboas faber*, dia 1 (Figura 5).

5.e. - Entropia dos sinais analisados

Nas séries temporais da interação entre indivíduos de mesma espécie, nas quais há interação entre três indivíduos, é visível a diminuição da quantidade e escala dos grandes intervalos, e das médias de vApEn (Figura 6, Figura 12), indicando que a variabilidade na interação entre indivíduos é menor que nas séries individuais. A teoria da Informação de Shannon relaciona a organização de uma dada série temporal com a entropia presente na mesma (Shannon, 1948; Monteiro & Piqueira, 2000), nos permitindo supor que a entropia das séries temporais das interações entre indivíduos é menor que nas séries individuais.

A diminuição da geração de entropia no processamento destes sinais pode se dar, então, de uma forma diferente da que era prevista pelas hipóteses iniciais do projeto. A partir dos resultados, observa-se que cada indivíduo percebe um sinal que é, em média, mais organizado que o som que emite. Este fenômeno poderia facilitar o processamento das séries temporais relacionadas à comunicação.

Outro projeto conduzido neste laboratório utiliza-se de modelos matemáticos para testar as mesmas hipóteses apresentadas no presente estudo. Os resultados obtidos até o momento mostram que uma das condições de minimização de geração de entropia do sistema seria a de que cada animal emitisse vocalizações de acordo com a sua frequência natural de vocalização, como se não houvesse sincronização ou ajuste de fase entre os indivíduos. Outro dado interessante apontado pelo citado estudo é que passeios de Lévy surgem como emissões dos indivíduos modelados

quando se adiciona ruído branco a um dos parâmetros que representam o controle nervoso sobre a vocalização.

Estudo feito com controle motor e postura em seres humanos, no qual varinhas eram colocadas nas pontas dos dedos de voluntários para equilibra-las, teve como resultado que a flutuação na variação do deslocamento por unidade de tempo obedecia uma distribuição de Lévy (Cabrera & Milton, 2004). As hipóteses levantadas foram as de que o sistema nervoso não seria capaz de detectar o movimento da varinha, mas sim faria um esforço em “forrageá-la”. Ainda relacionado a esta questão, tal estudo discute que o sistema nervoso teria habilidade limitada de lidar com diversas tarefas simultaneamente (Cabrera & Milton, 2004; Just, et. al., 2001), e como consequência disso, estratégias de controle motor que não enfatizem predição seriam mais vantajosas ao liberar recursos intencionais para outros fins. O sistema nervoso efetuaria um menor controle corretivo intencional nestas tarefas (ou seja, haveria menor foco ou concentração), quando estas estivessem mais automatizadas (Milton, et.al., 2004). Podemos, assim, estender a discussão para o caso da vocalização de anuros e especular que haja um controle menos rígido do sistema nervoso sobre alguns processos, permitindo que recursos de processamento possam ser liberados para outros fins. Um desses processos é, possivelmente a regulação dos intervalos de tempo entre vocalizações dos indivíduos que estão interagindo. Ter consciência do que acontece nos arredores pode ser importante, principalmente em uma atividade na qual, de alguma forma, há a exposição e consequente atração de predadores, como a vocalização (Ryan, et. al. 1981).

Outros experimentos devem ser conduzidos para confirmar as especulações levantadas acima. Análise de séries temporais da interação de um conjunto maior de indivíduos, assim como análises de variabilidade em uma faixa menor de valores de intervalos de tempo de vocalização, a partir da exclusão dos grandes intervalos, são importantes para confirmar o que foi visto até agora. Deve-se ter em mente que outros fatores têm influência no processamento de informações no sistema nervoso central. A estrutura do canto, por exemplo, a qual não foi objeto de análise deste estudo, pode vir a revelar outras peculiaridades da comunicação destes animais.

6. Bibliografia

Atkinson, R. P. D., Rhodes, C. J., Macdonald, D. W. & Anderson, R. M. (2002). Scale-free dynamics in the movement patterns of jackals. *Oikos* 98: 134–140.

Bartumeus, F. (2005). Lévy processes in animal movement and dispersal. Tese de doutorado apresentada na Universidade de Barcelona. Acessado em janeiro de 2009 de http://www.tdr.cesca.es/TDX-0902105-104300/index_cs.html e http://www.tdr.cesca.es/TESIS_UB/AVAILABLE/TDX-0902105104300//2.INTRODUCTION.pdf.

Bartumeus, F., Peters, F., Pueyo, S., Marrasé, C. & Catalan, J. (2003). Helical Lévy walks: Adjusting searching statistics to resource availability in microzooplankton. *P.N.A.S.* 100, 22:12771–12775.

Bartumeus, F.; Catalan, J.; Fulco, U. L.; Lyra, M. L.; Viswanathan, G. M.; (2002). Optimizing the encounter rate in biological interactions: Lévy versus Brownian strategies. *Phys. Rev. Let.* 88,9:097901-1:097901-4.

Bee M. (2004). Within-individual variation in bullfrog vocalizations: implications for a vocally mediated social recognition system. *J. Acoust. Soc. Am.* 116:3770-8

Bejan, A. (2002). Fundamentals of exergy analysis, entropy generation minimization, and the generation of flow architecture. *Int. J. Energy Res.*; 26, 545-565

Bertoluci, J. & Rodrigues, M.T. (2002). Seasonal patterns of breeding activity of atlantic rainforest anurans at Boraceia, southeastern Brazil. *Amp. Rept.* 23:161-167.

Bokermann, W.C.A. (1968). Observações sobre “*Hyla pardalis*” Spix (Anura, Hylidae). *Rev. Bras. de Biol.* 28, 1:1-5.

Brennan, M., Palaniswami, M., Kamen, P. (2001). Do existing measures of Poincaré Plot geometry reflect nonlinear features of heart rate variability? *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 48:1342-1347.

Cabrera, J. L. & Milton, J. G. (2004). Human stick balancing: tuning Lévy flights to improve balance control. *Chaos* 14, 3:691-698.

- Caldirola, D., Bellodi, L., Caumo, A., Migliaresi, G., Perna, G. (2004). Approximate Entropy of respiratory patterns in panic disorder. *Am. J. Psychiatry*, 161:79-87.
- Capurro, A.; Malta, C. P. (2004). Noise autocorrelation and jamming avoidance
- Caramaschi, U. ; Napoli, M.F. (2004). Nomenclatural Status of the Synonyms of *Hyla pardalis* Spix, 1824, and Taxonomic Position of *Hyla biobeba* Bokermann and Sazima, 1974 (Anura: Hylidae). *J. Herpet.* 38, 4:501-509.
- Carrasco, S., Gaitán, M. J., R. González R., Yánes, O. (2001). Correlation among Poincaré' plot indexes and time and frequency domain measures of heart rate variability. *J. Med. Eng. & Tech.* 25, 6:240-248.
- Chaitin, G. (2006). Nos limites da razão. *Scien. Am. Brasil* 46:66-73.
- Clauset, A., Shalizi, C. R., & Newman, M. E. J. (2007). Power-law distributions in empirical data. Acessado em Dezembro de 2008 de <http://arxiv.org/abs/0706.1062> [Physics.data-an].
- Da Luz M. G. E., Buldyrevb S. V. , Havlinb S., Raposod E. P., Stanleyb, H. E. , Viswanathanb, G.M. , (2001) Improvements in the statistical approach to random Lévy flight searches. *Physica A.* 295:89–92.
- Da Silva, F.H.L. (1996). The generation of eletric and magnética signals of the brain by local networks. In. *Comprehensive human physiology*. Gerger, R. & Windhorst, U. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York.
- Denny, M. W. (1993). Sound in air and water: Listening to the enviroment. In. *Air and Water*. Denny, M. W.Princeton University Press.
- Desimone, R & Duncan, J (1995) Neural mechanisms of selective visual attention. *Ann. Rev. of Neurosci* 18:193-222.
- Dickey, D. A.; Fuller, W. A. (1979). Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *J. Am. Stat. Assoc.* 74, 336:427-431.
- Faivovich, J.; Haddad C.F.B.; Garcia, P.C.A.; Frost, D.R.; Campbell, J.A.; Wheller, W.C. (2005). Systematic review of the frog family Hylidae, with special reference to Hylinae : phylogenetic analysis and taxonomic revision. *Bulletin of the American Museum of Natural History. Bulletin of the AMNH.* 294:1-240.

Gazzaniga, M; Ivry, R & Mangun, G (1998). Cognitive Neuroscience. W. W. Norton & Company, New York.

Gerhardt, H.C & Schwartz, J.J. (2001). Auditory tuning and frequency preferences in anurans. In Anuran Communication, Ryan, J. M. Smithsonian Books, Washington D.C.

Goldberger, A.L.; Peng, C. K.; Lipsitz, L.A. (2002). What is physiologic complexity and how does it change with aging and disease. *Neurobiol. Ag.* 23:23-26.

Hausdorff, J.M., Peng, C.-K., Ladin, Z., Wei, J.Y., Goldberger, A. L. (1995). Is walking a random walk? Evidence for long-range correlations in stride interval of human gait. *J. Appl. Physiol.* 78:349–358.

Heyer, R. W.; Rand, A. S.; Cruz, C.A.G.; Peixoto, O.L.; Nelson, C. E. (1990). Frogs of Boracéia. *Arq. Zool.* 31, 4:231-410.

Huikuri, H. V., Seppänen, T., Koistinen, M, J., Airaksinen K. E. J., M.J. Ikäheimo, M. J., Castellanos, A., Myerburg, R. J. (1996). Abnormalities in beat-to-beat dynamics of heart rate before the spontaneous onset of life-threatening ventricular tachyarrhythmias in patients with prior myocardial infarction. *Circulation.* 93:1836-1844.

Just, M. A.; Carpenter, P. A.; Keller, T. A.; Emery, L.; Zajac, H.; Thulborn, K. R. (2001). Interdependence of nonoverlapping cortical systems in dual cognitive tasks. *Neuroimage*, 14:417-426.

Kay, J.J. (2000). Ecosystems as self-organizing holarchic open systems: narratives and the second law of thermodynamics. In. Handbook of ecosystem theories and management. Jørgensen, S. E & Müller, F. CRC-Press, Lewis Publishers.

Kelley, D.B.(1988). Sexual dimorphic behaviors. *Ann. Rev. Neurosci.*, 11:225-251.

Korpelainen, J. T., Kyösti A. Sotaniemi, A. K., Anne Mäkikallio, A., Heikki V. Huikuri, H. V., Vilho V. Myllylä, V. V. (1999). Dynamic Behavior of Heart Rate in Ischemic Stroke. *Stroke.* 30:1008-1013.

Ludovisi, A., Pandolfi, P., Taticchi, M. I. (2005). The strategy of ecosystem development: specific dissipation as an indicator of ecosystem maturity. *J. Theor. Biol.* 35, 33-43.

Lutz, B. (1960). The clay nests of *Hyla pardalis* Spix. *Copéia.* 4:364-366.

Martins, I.A. & Jim, J. (2003). Bioacoustic analysis of advertisement call in *Hyla nana* and *Hyla sanborni* (anura, hylidae) in Botucatu, São Paulo, Brazil. Braz. J. Biol. 63,3: 507-516. Martins, M. & Haddad, C.F.B. (1988). Vocalizations and reproductive behaviour in the smith frog, *Hyla faber* Wied (Amphibia: Hylidae). Amp.-Rept. 9:49-60.

Metes, D. V. (2005). Visual, Unit Root and Stationarity Tests and Their Power and Accuracy. Summer NSERC student report. Acessado em março, 2008, from <http://www.stat.ualberta.ca/~wiens/reprints/metes.pdf>.

Milton, J.G.; Small, S.S., Solodkin, A., (2004). On the road to automatic: dynamic aspects in the development of expertise. J. Clin. Neurophysiol. 21, 3:134-143.

Monteiro, L.H.A. & Piqueira, J.R.C. (2000). O que orienta a evolução biológica? In. Auto-organização, D'Ottaviano I.M.L & Gonzáles, M.E.Q. Coleção CLE30, Campinas.

Moore, S.W., Lewis, E. R., Narins, P. M., Lopez, P. T. (1989). The call-timing algorithm of the white-lipped frog, *Leptodactylus albilabris*. J. Comp. Physiol. A. 164:309-31.

Mourot, L., Bouhaddi, M., Perrey, S., Cappelle, S., Henriët, M. T., Wolf, J.P., Rouillon, J.D., Regnard, J. (2004). Decrease in heart rate variability with overtraining: assessment by the Poincaré plot analysis. Clin. Physiol. Funct. Imaging, 24:10–18.

Newman, M.E.J. (2005). Power laws, Pareto distributions and Zipf's law. Cont. Phys., 46,5:323 – 351.

Nicolis, G. & Prigogine, I. (1977). Self organization in non-equilibrium systems. Wiley & Sons, Inc. EUA.

performance in pulse type electric fish. Bull. Math. Biol. 66:885–905.

Pincus, S. (1995). Aproximated entropy ApEn as a complexity measure. Chaos 5, 1:110-117.

Pincus, S.M. & Viscarello, R.R (1992). Approximate entropy: a regularity measure for fetal heart rate analysis. Obst. & Gynecol.;79:249-255.

Pincus, S.M (1991). Approximate Entropy as a measure of system complexity. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 88:2297-2301

Pincus, S.M; Hartman M.L; Roelfsema, F.; Thorner, M.O; Veldhuis, J.D; (1999). Hormone pulsatility discrimination via coarse and short time sample. Am. J. Physiol, 277:948-957.

Pombal Jr., J.P. & Bastos, R.P. (2003). Vocalizações de *Scinax perpusillus* (A. Lutz & B. Lutz) e S. Arduous Peixoto (Anura, Hylidae), comentários taxonômicos. Rev. Bras. Zool. 20, 4:607-610.

Prigogine, I. (1980). From being to becoming. W.H.Freeman. EUA.

Richman, J.S. & Moorman, J. R., (2000). Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. Am J Physiol. Heart Circ. Physiol. 278: H2039–H2049.

Ryan, M. J.; Tuttle, M.D.; Taft, L.K. (1981). The Costs and Benefits of Frog Chorusing Behavior. Behav. Ecol. Sociobiol. 8:273-278.

Sabater, B. (2006). Are organisms committed to lower their rates of entropy production? Possible relevance to evolution of the Prigogine theorem and the ergodic hypothesis. BioSystems 83:10-17.

Santos B.T., Martins, R.A., Natali, J.E.S., Rodrigues, V.H. Marques, F. S. Chauí-Berlinck, J.G.(2009). Consistency in approximate entropy given by a volumetric estimate, Chaos, Solitons & Fractals doi:10.1016/j.chaos.2008.12.002

Shannon, C.E. (1948). A Mathematical theory of communication. The Bell Sys. Tech. J. 27:379-423, 623-656.

Simmons A (2004). Call recognition in the bullfrog, *Rana catesbeiana*: generalization along the duration continuum. J Acoust. Soc. Am. 115:1345-55.

Sonntag, R.E.; Borgnakke, C.; Van Wylen, G. J. (2003). Fundamentos da Termodinâmica. Editora Edgard Blücher Ltda.

Souza, G.M; Ribeiro, R.V; Santos, M.G; Ribeiro H.L; Oliveira, R.F. (2004). Approximate Entropy as a measure of complexity in sap flow temporal dynamics of two tropical tree species under water deficit. An. Acad. Bras. Cienc. 76(3):625-630

Strogatz, S.H. & Stewart, I.(1993). Coupled oscillators and biological synchronization. Sci. Am. 6:102-109.

Taigen, T.L. & Wells, K.D., (1985). Energetics of vocalization by an anuran amphibian (*Hyla versicolor*). J. Comp. Physiol. B., 155:163-170.

Takizawa, Y.; Rose, G.J.; Kawasaki, M. (1999). Resolving competing theories for control of the jamming avoidance response: the role of amplitude modulations in electric organ discharge decelerations. *J. Exp. Biol.*, 202:1377-1386.

Viswanathan, G. M.; Sergey V. Buldyrev, S. V.; Havlin, S.; da Luz, M. G. E.; E. P. Raposo; Stanley, E.H. (1999). Optimizing the success of random searches. *Nature*. 401: 911-914.

Voss, R.F. (1988). Fractals in nature: From characterization to simulation. In: *The Science of Fractal Images*. Peitgen, H. O. & Saupe, D. Springer – Verlag.

Walkowiak, W. (1988). Two auditory filter systems determine the calling behavior of the fire-bellied toad: a behavioral and neurophysiological characterization. *J. Comp. Physiol. A*.164, 1:31-41.

Weinberger, E. (2002). A theory of pragmatic information and its application to the Quasi-species model of biological evolution. *BioSystems* 66:105-119.

Wells, K. (1977). The social behaviour of anuran amphibians. *Anim. Behav.* 25:666-693.

Wells, K.D. & Taigen, T.L., (1989). Calling energetic of a neotropical treefrog, *Hyla microcephala*. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 25:13-22.

Wells, K.D. (2001). The energetic of calling in frogs. In *Anuran Communication*, Ryan, J. M. Smithsonian Books, Washington D.C.

Wicken, J.S. (1988). Thermodynamics, evolution and emergence: ingredients for a new synthesis. In *Entropy, information and evolution*. Weber, B.H.; Depew, D. J.; Smith, J.D. The MIT Press, London, England.

Wilczynski, W. (1992). The nervous system. In: *Environmental Physiology of the amphibians*. Feder, M. E. & Burggren, W.W. The University of Chicago press, Chicago.

Wiley, R.H. & Richards, D.G. (1978). Physical constraints on acoustic communication in the atmosphere: implications for the evolution of animal vocalization. *Behav. Ecol. Sociobiol.*, 3:69-94.