



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro Biomédico

Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes

Carlos Augusto Lengruher Castanheira Conti

A morfometria geométrica aplicada à cinemática do movimento

Rio de Janeiro

2022

Carlos Augusto Lengruher Castanheira Conti

A morfometria geométrica aplicada à cinemática do movimento

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Evolução da Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Orientador: Prof. Dr. Oscar Rocha-Barbosa

Coorientador: Dr. Leandro dos Santos Lima Hohl

Rio de Janeiro

2022

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC-A

C762 Conti, Carlos Augusto Lengruher Castanheira
A morfometria geométrica aplicada à cinemática do movimento/
Carlos Augusto Lengruher Castanheira Conti. – 2022.
57 f.: il.

Orientador: Oscar Rocha Barbosa
Coorientador: Leandro dos Santos Lima Hohl
Dissertação (Mestrado em Ecologia e Evolução) - Universidade do
Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Biologia Roberto Alcântara
Gomes.

1. Locomoção animal - Teses. 2. Morfometria - Teses. 3. Roedores -
Teses. I. Barbosa, Oscar Rocha. II. Hohl, Leandro dos Santos Lima. III.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto de Biologia Roberto
Alcântara Gomes. IV. Título.

CDU 591.17

Patricia Bello Meijinhos CRB7/5217 - Bibliotecária responsável pela elaboração da ficha catalográfica

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta
dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Carlos Augusto Lengruher Castanheira Conti

A morfometria geométrica aplicada à cinemática do movimento

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Evolução da Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Orientador:

Prof. Dr. Oscar Rocha Barbosa
Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes - UERJ

Banca examinadora:

Prof. Dr. Jayme Prevedelo
Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes - UERJ

Prof. Dr. Sergio Potech de Carvalho e Silva
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Prof.^a Dra. Ana Maria Paulino Telles de Carvalho e Silva
Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro - UNIRIO

Rio de Janeiro

2022

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação aos meus pais, que sempre estiveram comigo, me apoiaram, e batalharam a vida toda para eu chegar onde estou. Amo eternamente.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Alcemir Lengruber de Souza e José Carlos Castanheira Conti, que são as pessoas que mais amo na minha vida, que sempre estiveram comigo e não me deixaram faltar nada. Serei eternamente grato por tudo e sempre estarei em dívida pelo que já fizeram por mim.

Ao meu orientadores Oscar Rocha-Barbosa e Leandro dos Santos Lima Hohl por terem me dado a chance de produzir essa dissertação e pela enorme paciência, serei eternamente grato.

À minha família linda, e muito chata, que amo tanto e sempre que precisei estavam lá para me ajudar.

Aos meus amigos, Lucas Alves, João Paulo, Pedro Silveira, André Fialho, Matheus Correa, Evandro Junior, Victor Amaral e Isadora Correa.

Aos meus amigos de infância no IFPJ: Andressa Mendes, Andressa Magalhães, Pedro Costa, Marina Oliveira e Luciana Menezes.

Aos meus parceiros desde criança, Eduardo Raul, Leo Veltri, Marcos Mantuano.

Quando somos bons para os outros, somos ainda melhores para nós.

Benjamin Franklin

RESUMO

CONTI, Carlos Augusto Lengruher Castanheira. **A morfometria geométrica aplicada à cinemática do movimento**. 2022. 57 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Evolução) – Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2022.

A locomoção de um animal pode ser motivada por diferentes fatores. A capacidade de se locomover confere a cada indivíduo chances de manifestar uma resposta direta a estes, sendo uma característica intimamente ligada a processos ecológicos e evolutivos. Tradicionalmente, estudos locomotores baseiam-se em filmagem e construção de diagramas de locomoção utilizando números distintos de variáveis que não contemplam as deformações das cadeias articulares. O objetivo do trabalho foi analisar e testar a eficiência do uso da técnica de morfometria geométrica durante os estudos de diferenciação dos padrões locomotores, utilizando *landmarks*, marcos anatômicos homólogos. Para isso, filmagens de 4 espécies de mamíferos roedores (Cavidae, Ctenomidae, Dasyproctidae) e mais uma espécie de Artiodactyla (Tragulidae), obtidas no Laboratório de Zoologia de Vertebrados – Tetrapoda da UERJ, com seus padrões locomotores determinados pela metodologia tradicional, foram adaptadas para atender aos padrões exigidos pela técnica de morfometria geométrica MG. O estudo utilizou os momentos de máxima flexão e extensão do membro de referência durante padrões locomotores reconhecidamente distintos, e assim gerou um banco de imagens no programa TPSUtil. A partir deste banco de imagens usou-se o programa TPSDig2 para pontuar os *landmarks* nas articulações dos membros. Após, foram realizadas, no programa MorphoJ, as seguintes análises: Sobreposição dos Quadrados Mínimos de Procrustes, Análise de Componentes Principais (PCA), Análise de Função Discriminante (DFA) e Análise de Variáveis Canônicas (CVA). Os resultados da pesquisa indicam que quando em um mesmo indivíduo são analisados padrões locomotores diferentes há uma separação espacial nos gráficos resultantes e também nas formas em que as cadeias articulares variam. Além disso, quando analisadas espécies diferentes sobre um único padrão locomotor, a técnica demonstrou uma separação espacial entre as espécies estudadas nos gráficos. Assim a técnica de MG aparece como uma forma adicional de estudos sobre a locomoção em animais.

Palavras-chave: Morfometria. Rodentia. Artiodactyla. Mamíferos. Locomoção.

ABSTRACT

CONTI, Carlos Augusto Lengruher Castanheira. **Geometric morphometry applied to movement cinematics**. 2022. 57 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Evolução) – Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2022.

The locomotion of an animal can be motivated by different factors. The ability to move gives each individual chances to express a direct response to these, being a characteristic closely linked to ecological and evolutionary processes. Traditionally, locomotor studies are based on filming and construction of locomotion diagrams using different numbers of variables that do not consider joint chain deformations. The objective of this work was to analyze and test the efficiency of using the geometric morphometry technique during studies of differentiation of locomotor patterns, using landmarks, homologous anatomical landmarks. For this, footage of 4 species of rodent mammals (Cavidae, Ctenomidae, Dasyproctidae) and one more species of Artiodactyla (Tragulidae), obtained at the Laboratory of Vertebrate Zoology – Tetrapoda at UERJ, with their locomotor patterns determined by traditional methodology, were adapted. to meet the standards required by the MG geometric morphometry technique. The study used the moments of maximum flexion and extension of the reference limb during recognizably different locomotor patterns, and thus generated an image bank in the TPSUtil program. From this image bank, the TPSDig2 program was used to score the landmarks in the joints of the limbs. Afterwards, the following analyzes were carried out in the MorphoJ program: Procrustean Analysis, Principal Components Analysis (PCA), Discriminant Function Analysis (DFA) and Canonical Variables Analysis (CVA). The research results indicate that when different locomotor patterns are analyzed in the same individual, there is a spatial separation in the resulting graphs and also in the ways in which the joint chains vary. Furthermore, when analyzing different species on a single locomotor pattern, the technique demonstrated a spatial separation between the species studied in the graphs. Thus, the MG technique appears as an additional form of studies on locomotion in animals.

Keywords: Morphometry. Rodentia,. Artiodactyla. Mammals. Locomotion.

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	11
1	LOCOMOÇÃO UTILIZANDO MEMBROS	12
1.2	Diagramas de locomoção	15
1.3	Padrões locomotores	16
1.3.1	<u>Padrões simétricos</u>	17
1.3.1.1	Sequências laterais e diagonais.....	17
1.3.1.2	Pace e trote.....	18
1.3.2	<u>Padrões assimétricos</u>	19
1.3.2.1	Galopes.....	19
1.3.2.2	Salto, meio salto e “pronk”.....	20
1.4	Morfometria geométrica	21
2	OBJETIVOS	22
3	HIPÓTESE	22
4	MATERIAS E MÉTODOS	22
4.1	Aquisição das imagens	22
4.2	Determinação dos landmarks	22
4.3	Visualização das variações de forma	25
5	RESULTADOS	25
5.1	Variações em <i>Cavia porcellus</i>	25
5.1.1	<u>Galope x trote em momentos de extensão</u>	25
5.1.2	<u>Galope x trote em momentos de flexão</u>	26
5.2	Variações em <i>Dasyprocta leporina</i>	28
5.2.1	<u>Trote x Salto em momentos de extensão</u>	28
5.2.2	<u>Trote x Salto em momentos de flexão</u>	29
5.3	Variações em <i>Tragulus javanicus</i>	31
5.3.1	<u>Galope x trote em momentos de extensão</u>	31
5.3.2	<u>Galope x trote em momentos de flexão</u>	32
5.4	Variações em <i>Ctenomys talarum</i>	34
5.4.1	<u>Sequência lateral x trote em momentos de extensão</u>	34
5.4.2	<u>Sequência lateral x trote em momentos de flexão</u>	35
5.5	Variações em <i>Dolichotis patagonum</i>	37

5.5.1	<u>Galope x pace x sequência lateral x trote em momentos de extensão</u>	37
5.5.2	<u>Galope x pace x sequência lateral x trote em momentos de flexão</u>	41
5.6	Variações em <i>Ctenomys talarum</i>, <i>Dasyprocta leporina</i>, <i>Dolichotis patagonum</i>, <i>Tragulus javanicus</i> e <i>Cavia porcellus</i> sobre o movimento de trote durante a extensão	43
5.7	Variações em <i>Ctenomys talarum</i>, <i>Dasyprocta leporina</i>, <i>Dolichotis patagonum</i>, <i>Tragulus javanicus</i> e <i>Cavia porcellus</i> sobre o movimento de trote durante a flexão	44
6	DISCUSSÃO	45
6.1	Análises	45
6.2	Variação entre tipos de locomoção	46
6.2.1	<u>Galope x trote</u>	46
6.2.2	<u>Trote x Salto</u>	47
6.2.3	<u>Sequência lateral x trote</u>	47
6.2.4	<u>Galope x pace x sequência lateral x trote</u>	47
6.3	Variação entre as espécies estudadas durante o movimento de trote	48
6.4	Deformações das cadeias articulares	48
	CONCLUSÕES	48
	REFERÊNCIAS	49

INTRODUÇÃO

A locomoção de um animal, que está relacionada com sua ecologia e história evolutiva, pode ser motivada pela busca por alimento, fuga de predadores e procura por parceiros sexuais ou abrigo (Hildebrand e Goslow, 2006; Nathan, 2008; Lobo-Ribeiro, 2015). Esta característica é uma forma de manifestação realizada pelos indivíduos aos fatores bióticos e abióticos, portanto ligada a processos evolutivos e ecológicos (Nathan, 2008).

Existem diferentes questões que podem influenciar a locomoção de um indivíduo, como velocidade, aceleração, manobrabilidade, estabilidade, resistência e eficiência energética. Como a energia é um recurso limitado, ela deve ser otimizada, assim alguns traços se mostram mais desenvolvidos que outros (Alexander, 2003).

Um exemplo disso é a diferença entre velocistas e maratonistas, cada um possui adaptações para cada tipo de modalidade. Os primeiros possuem musculatura desenvolvida para atingir grandes velocidades, alcançando-as e apenas mantendo por poucos segundos, caracterizando-se por um esforço anaeróbico dos músculos esqueléticos. Enquanto os maratonistas são especializados em corridas de longas distâncias, com adaptações no miocárdio, elevando o aporte de oxigênio para o tecido muscular (esforço aeróbico) e assim esses corredores conseguem manter velocidades moderadas ao longo de um percurso (Alexander, 2003).

Outro exemplo pode ser visto nas diferenças entre o cavalo e o guepardo, com o primeiro sendo caracterizado por conseguir correr grandes distâncias em uma locomoção adaptada para estabilidade e resistência e o segundo para uma corrida de velocidade e aceleração (Kardong, 2008).

Assim, os diferentes fatores que influenciam a performance dos indivíduos são analisados pelos estudos de locomoção, que utilizam métodos que se baseiam nos tipos e hábitos de locomoção desses organismos formando então os padrões locomotores (Hildebrand, 1976).

O ser humano sempre foi interessado em entender o movimento dos organismos que os cercavam, como em uma caverna antiga em Altamira, cidade espanhola, onde há pinturas no teto e paredes que datam aproximadamente 15 mil anos a.C. (Loguercio, 2009; Santori *et al.*, 2014). Durante a metade do século XIX, Eadweard Muybridge (1887) e Étienne Jules-Marey (1873) utilizaram câmeras fotográficas para estudar o deslocamento de animais, surgindo então técnicas que

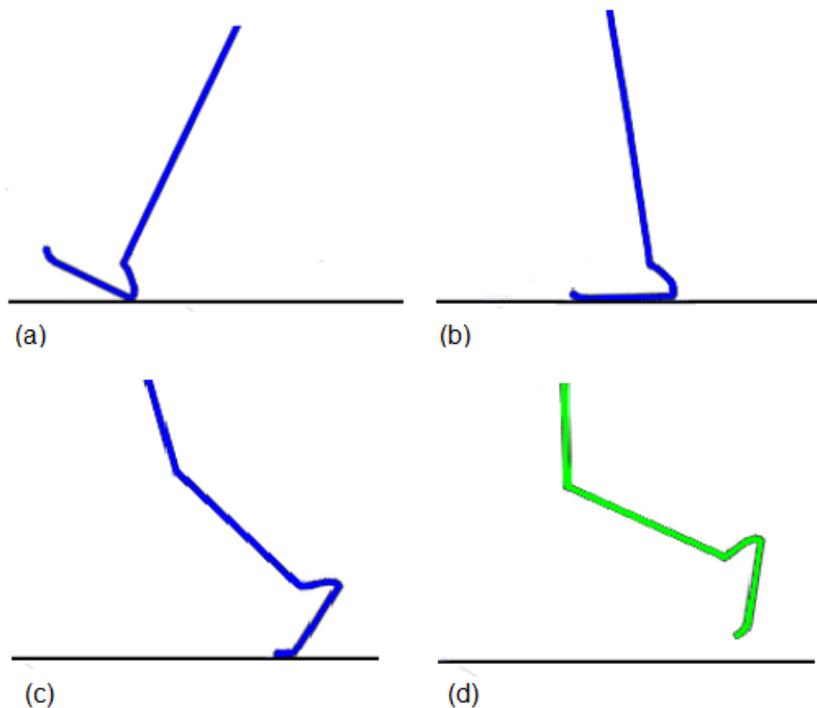
impulsionaram do estudo da locomoção (McMahon, 1985; Loguercio, 2005; Santori *et al.*, 2014).

Com a evolução tecnológica das filmagens e dos métodos de análises das mesmas, houve construções de propostas gráficas que possibilitaram representar a locomoção de vertebrados terrestres (Hildebrand, 1966; Abourachid, 2003). Essas propostas trouxeram novas descobertas sobre como a locomoção terrestre de quadrúpedes era diversa e aumentaram a importância do entendimento das mesmas (Hildebrand, 1966; Rocha-Barbosa, 1997).

1 LOCOMOÇÃO UTILIZANDO MEMBROS

No que se refere à locomoção bípede e quadrúpede, cada membro é colocado e retirado do solo repetidas vezes, o que caracteriza as passadas. Sua duração é denominada ciclo locomotor (Hildebrand, 1976; Cartmill *et al.*, 2002). Durante um ciclo, cada membro atravessa um período em contato com o substrato (fase de apoio) e outro suspenso (fase de suspensão) sobre o mesmo. Ao longo destes os membros alternam entre momentos de flexão e de extensão de suas cadeias articulares (Gambaryan, 1974; Bels *et al.*, 2011) (Figura 1).

Figura 1 - Ciclo locomotor, sinalizando os momentos de apoio e suspensão do membro analisado. A progressão das letras demonstra o ciclo completo desde (a) apoio até (d) flexão.



Fonte: elaborado pelo autor.

Na fase de apoio, o membro em destaque suporta o peso do animal sobre o solo, no momento em que suas articulações distais são estendidas e as demais estão em flexão para a absorção do impacto (Philipson, 1905; Goslow *et al.*, 1973; Rocha-Barbosa, 1997; Loguercio, 2005). No término desta etapa, o se estende totalmente, ocasionando a liberação de energia elástica armazenada nos músculos, tendões e ligamentos (Alexander, 1992; Loguercio 2005) (Figura 2).

Figura 2 - Momento de extensão do membro analisado (posterior esquerdo) em um indivíduo de *Dolichotis patagonum*.



Fonte: Filmagens presentes no Laboratório de Zoologia de Vertebrados – Tetrapoda (LAZOVERTE).

No momento de suspensão o membro é levantando e inicia o deslocamento para uma nova posição no plano de apoio, iniciando um novo ciclo. Este trajeto percorrido pelo membro nesta fase é correspondente ao tamanho ou comprimento da passada, onde este membro sofre uma flexão de suas articulações e posterior extensão das mesmas (Rocha-Barbosa, 1997; Loguercio, 2005; Bels *et al.* 2011) (Figura 3).

Figura 3 - Momento de flexão do analisado (posterior esquerdo) em um indivíduo de *Dolichotis patagonum*



Fonte: Filmagens presentes no Laboratório de Zoologia de Vertebrados – Tetrapoda (LAZOVERTE).

Neste trabalho em conjunto dos membros, quando há o intervalo do ciclo locomotor de qualquer um deles, os demais terão iniciado seu ciclo (Rocha-Barbosa, 1997). Nos quadrúpedes, cada padrão locomotor se espelha em uma sequência de passadas dos quatro membros no intervalo de um ciclo (Renous, 1994). Tradicionalmente, diagramas de locomoção são utilizados para retratar os padrões locomotores, a partir dos quais é possível extrair diferentes variáveis de cunho temporal que auxiliam na interpretação do padrão observado (Hildebrand, 1976; Rocha-Barbosa, 1997).

A definição de um membro de referência contribui com a padronização do método para os estudos de locomoção quadrúpede. Esta dissertação segue a bases de Hildebrand (1976), em que as análises dependem da escolha de um membro posterior como referência. Esta escolha se dá como mais indicada, pois os membros posteriores são mais expressivos na propulsão, o tempo de apoio destes membros é geralmente mais duradouro, e os indivíduos bípedes apenas utilizam esses membros posteriores para locomoção. Porém existem trabalhos que os autores dão por opção mais viável a utilização dos membros anteriores (Alexander, 1984; Renous, 1994; Abourachid, 2003; Abourachid *et al.*, 2007) (Figura 4).

Figura 4 - Membro utilizado (posterior esquerdo) para as análises de morfometria geométrica e demarcação dos *landmarks* em um indivíduo de *Dolichotis patagonum*.

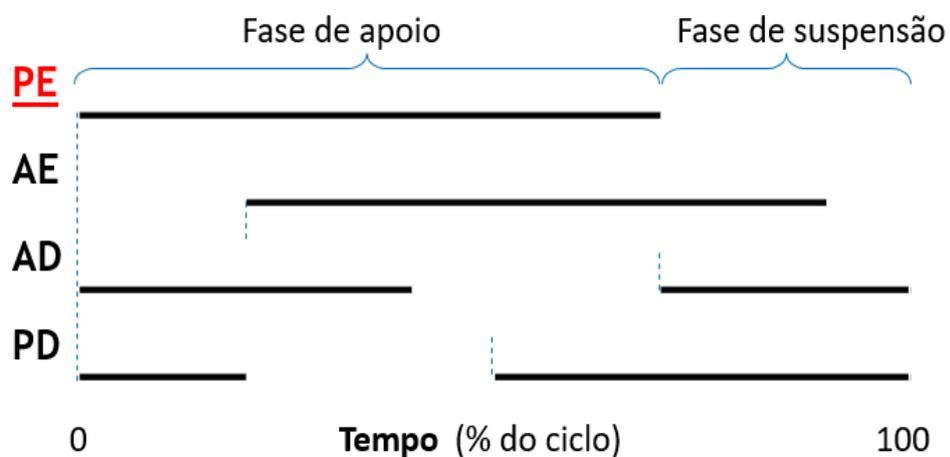


Fonte: Filmagens presentes no Laboratório de Zoologia de Vertebrados – Tetrapoda (LAZOVERTE).

1.2 Diagramas de locomoção

São esquemas utilizados para demonstrar os padrões locomotores, através dos mesmos é possível avaliar diferentes variáveis temporais que auxiliam na interpretação dos padrões em observação, como a duração das fases de apoio e suspensão dos membros, sequência dos membros e suas combinações (Hildebrand, 1976; Rocha-Barbosa, 1997) (Figura 5).

Figura 5. Duração das fases de apoio e suspensão, utilizando o mesmo posterior esquerdo como membro de referência.



Fonte: O autor.

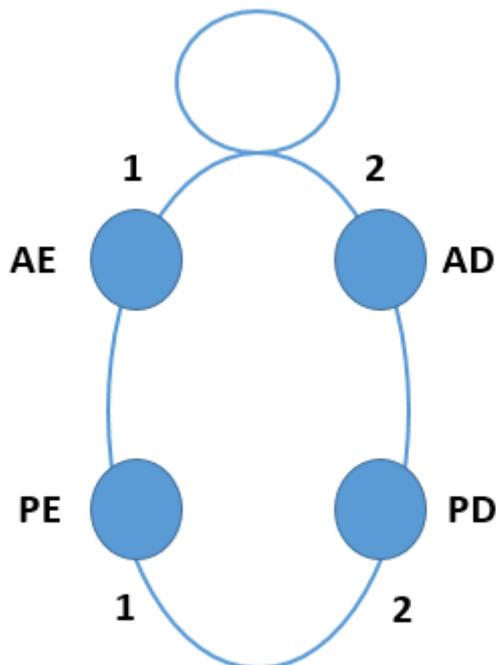
Para a construção dos diagramas de locomoção é utilizado um conjunto de quatro linhas e N colunas, representando os membros do indivíduo analisado e o número de quadros analisados no ciclo. Assim é possível através deste conjunto demonstrar o padrão que se é observado nas trilhas deixadas pelos animais (Hildebrand, 1976). A quantidade de quadros que poderão ser analisados, depende da velocidade de gravação da câmera que for utilizada (Lobo-Ribeiro, 2015).

No gráfico formado, o encontro de uma linha com uma coluna informa o posicionamento de um membro em contato ou não com o plano de apoio. Sempre que há contato do membro com o plano de apoio o campo correspondente é marcado, caso não haja contato o campo é mantido em branco. Assim o total de campos marcados em uma linha fornece a informação de duração da fase de apoio e o total de campos em branco a duração da fase de suspensão do membro em questão (Lobo-Ribeiro, 2015).

1.3 Padrões locomotores

De acordo com Alexander (1984) e Renous (1994) os padrões podem ser divididos em simétricos e assimétricos, de acordo com o tempo em que os membros direito e esquerdo de cada se separam (Figura 6). Nos padrões simétricos, o ciclo locomotor de cada membro tem início na metade do ciclo do seu par (Hildebrand, 1976; Hildebrand, 1977; Alexander, 1984; Renous, 1994; Cartmill *et al.*, 2002, Renous *et al.*, 2004). Em relação aos padrões assimétricos, a atuação dos membros ocorre de uma forma quase sincronizada, com seus membros direito e esquerdo não se intercalando igualmente no tempo, assim com um membro vindo antes do outro. Porém existem padrões em que esses ciclos começam juntos (Hildebrand, 1977; Alexander, 1984; Rocha-Barbosa, 1997; Loguercio, 2005; Hildebrand & Goslow, 2006).

Figura 6 - Exemplo de padrão locomotor. Membro anterior esquerdo (AE), membro anterior direito (AD), membro posterior esquerdo (PE), membro posterior direito (PD). Os números representam a sequência em que os membros tocam o substrato, o número 1 antecede ao 2.



Fonte: O autor.

Segundo Hildebrand (1976) e Cartmill *et al.* (2002) o tempo de início do apoio dos membros direito e esquerdo é calculado como uma fração da duração do ciclo, caso o intervalo seja determinado em 0,5 o padrão é considerado simétrico, caso seja

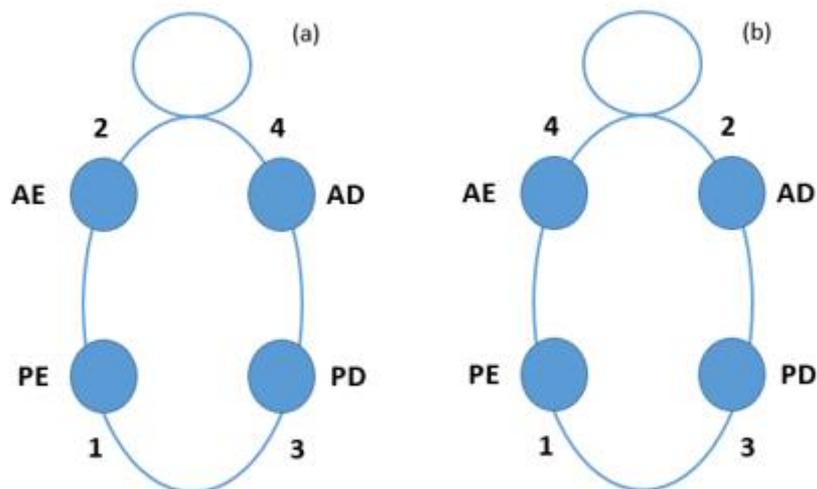
diferente deste número ele é considerado assimétrico. Seguindo o pensamento que sistemas biológicos não seguem um padrão rigoroso quanto ao valor determinado e considerando grau de assimetria qualquer desvio em relação a este valor, admite-se uma variação de $\pm 0,05$ para que um padrão seja considerado simétrico (Cartmill *et al.*, 2002; Renous *et al.*, 2004).

1.3.1 Padrões simétricos

1.3.1.1 Sequências laterais e diagonais

Nestes dois tipos de movimentos, os membros anteriores e posteriores se intercalam. Durante as sequências laterais cada membro anterior entra em movimento após o posterior do mesmo lado do corpo ou homolateral, e nas sequências diagonais os membros anteriores seguem os posteriores do outro lado do corpo ou contralaterais (Hildebrand, 1976; Cartmill *et al.*, 2002) (Figura 7).

Figura 7 - (a) Exemplo de locomoção classificado como sequência lateral. (b) Sequência diagonal. Os números indicam a sequência em que os membros tocam o substrato, seguindo de forma crescente.



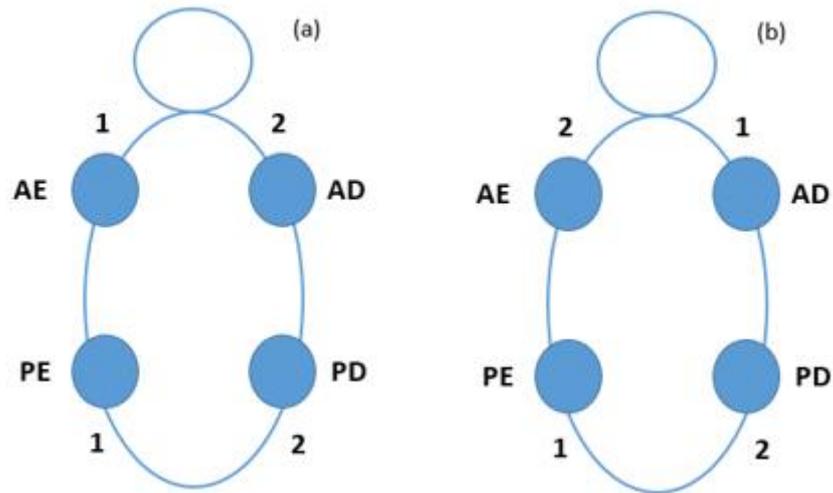
Fonte: O autor.

1.3.1.2 Pace e trote

São movimentos dos indivíduos em que cada membro anterior coincide com a de um posterior. No movimento de *pace* os membros anteriores e posteriores do mesmo lado do corpo seguem um sincronismo, enquanto no movimento de trote o sincronismo ocorre nos membros de lados diferentes do corpo (Hildebrand, 1976). Com o uso de câmeras de alta velocidade é possível perceber que o toque dos

membros no plano de apoio nem sempre segue uma sincronia perfeita (Lobo-Ribeiro, 2015) (Figura 8).

Figura 8. (a) Exemplo de locomoção classificado como *pace*. (b) Trote. Os números indicam a sequência em que os membros tocam o substrato, seguindo de forma crescente.



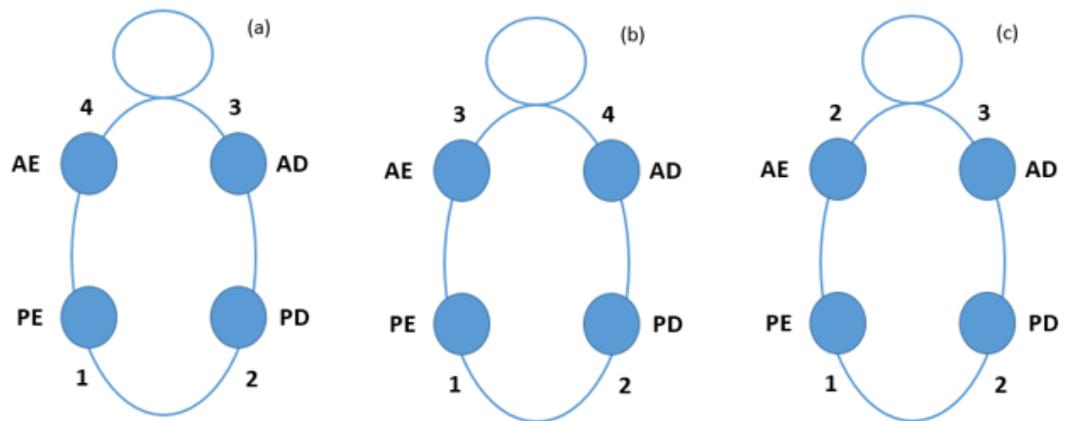
Fonte: O autor.

1.3.2 Padrões assimétricos

1.3.2.1 Galopes

De acordo com Hildebrand (1977) existem três tipos de galopes: transverso, rotatório e cânter. Os dois primeiros se caracterizam por seus membros tocarem o plano de apoio de forma sequencial. Em ambos os membros posteriores tocam ao solo antes dos membros anteriores, porém no galope rotatório os membros que se sucedem estão localizados no lado oposto do corpo, enquanto no transverso estão no mesmo lado. O tipo de galope cânter se caracteriza pelo toque simultâneo ao solo do membro posterior que ainda não tocou o plano de apoio e do membro anterior que será o primeiro dentre os anteriores a tocar o plano de apoio (Figura 9).

Figura 9 (a) Exemplo de locomoção classificado como galope rotatório. (b) Galope transverso. (c) Cânter. Os números indicam a sequência em que os membros tocam o substrato, seguindo de forma crescente.

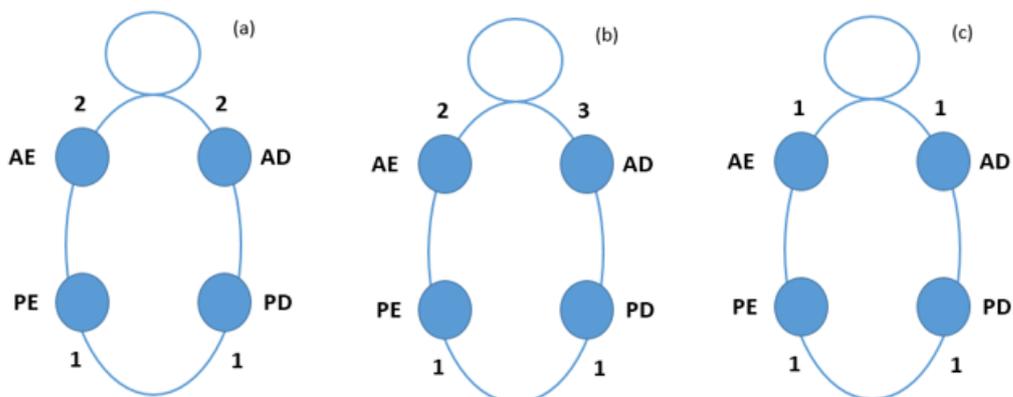


Fonte: O autor.

1.3.2.2. Salto, meio salto e “pronk”

O movimento de salto é caracterizado pelos membros direito e esquerdo de cada par operarem juntos, com um intervalo entre a ação de membros anteriores e posteriores. No meio salto os membros posteriores são simultâneos, porém os anteriores que operam logo depois são sucessivos. O movimento de “pronk” se demonstra como um tipo de salto em que os quatro membros se elevam em relação ao plano de apoio simultaneamente (Hildebrand, 1977) (Figura 10).

Figura 10. (a) Exemplo de locomoção classificado como salto. (b) Meio-salto. (c) “Pronk”. Os números indicam a sequência em que os membros tocam o substrato, seguindo de forma crescente.



Fonte: O autor.

1.4 Morfometria geométrica

Morfometria é conceituada como o estudo estatístico da variação de formas em relação a fatores causais (Bookstein, 1991). Assim, não busca apenas quantificar as formas biológicas, mas também buscar causas que expliquem as diferenças de forma (Monteiro e Reis, 1999). Segundo Slice (2005) a morfometria geométrica é um conjunto de métodos de aquisição, processamento e análise das variáveis de forma segundo a informação geométrica dos dados

A Morfometria Geométrica (Bookstein, 1991; Rohlf e Marcus, 1993) é baseada na variação da configuração espacial de um conjunto de *landmarks*. Estes são marcos anatômicos homólogos, escolhidos em uma estrutura que podem trazer explicações sobre processos biológicos, além de evidenciar variações morfológicas entre os organismos estudados (Monteiro e Reis, 1999). Tradicionalmente, esta metodologia é utilizada para determinar variações morfológicas de uma estrutura através de testes estatísticos sobre dados de uma configuração de Coordenadas Cartesianas de *landmarks* (Zelditch *et al.*, 2004).

Os dados utilizados nesta metodologia não são baseados em medidas ou ângulos, mas coordenadas chamadas de marcos anatômicos ou *landmarks* (Rohlf e Marcus, 1993; Monteiro e Reis, 1999). Estas coordenadas podem ser definidas num plano e ter duas dimensões (x, y= 2D) ou três dimensões (x, y e z= 3D) (Fornel e Cordeiro-Estrela, 2012).

Segundo Monteiro e Reis (1999) os landmarks tem grande importância em processos biológicos e na busca por explicações de variações morfológicas entre os organismos estudados. Esses marcos anatômicos podem ser divididos em três tipos: Tipo I são justaposições discretas de tecidos; Tipo II são processos morfogenéticos locais ou pontos de máxima curvatura; as do tipo III são pontos extremos definidos por distâncias através de uma determinada forma (Bookstein, 1991).

Além de se adquirir as coordenadas brutas dos *landmarks*, a importância da morfometria geométrica está em suas posições relativas (Adams *et al.*, 2004; Zelditch *et al.*, 2004). Tais coordenadas devem seguir um procedimento de sobreposição para se eliminarem os efeitos de escala, posição e orientação (Bookstein, 1991).

2 OBJETIVOS

(I) Analisar os padrões locomotores das cinco espécies de mamíferos presentes no estudo. (II) Diferenciar esses padrões, por meio da técnica de morfometria geométrica. (III) Avaliar o uso da técnica de morfometria geométrica como método para diferenciar os padrões locomotores existentes.

3 HIPÓTESE

A hipótese do presente estudo é que a morfometria geométrica é uma ferramenta eficaz para a diferenciação entre padrões locomotores simétricos e assimétricos, no estudo da cinemática do movimento de vertebrados.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram analisados 53 vídeos de 5 espécies de mamíferos, sendo 4 Rodentia: *Dolichotis patagonum*, Zimmermann 1780 (Mara); *Ctenomys talarum*, Thomas 1898 (Tuco tuco); *Cavia porcellus*, Linnaeus 1758 (Preá); *Dasyprocta leporina*, Linnaeus, 1758 (Cutia); *Hydrochoerus hydrochaeris*, Linnaeus 1766 (Capivara) e um Artiodactyla *Tragulus javanicus*, Osbeck, 1765 (Trágulo pequeno, Tragulidae).

Para as análises de morfometria geométrica, as imagens foram capturadas de forma sistematizada, minimizando quaisquer erros de proporção. Foram tomadas imagens dos momentos de máxima extensão e flexão do membro posterior em cada ciclo locomotor, previamente determinado.

4.1 Aquisição das imagens

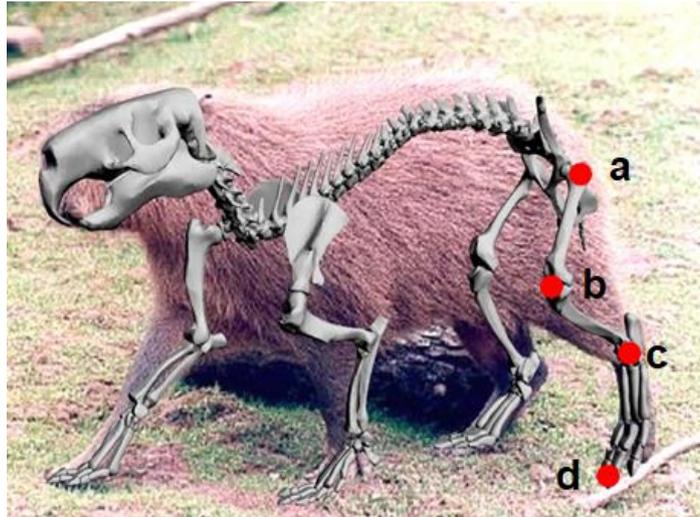
Para cada espécie, as informações sobre os padrões locomotores existentes em cada vídeo foram obtidas do acervo presente no Laboratório de Zoologia de Vertebrados – Tetrapoda (LAZOVERTE), da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Em seguida, foi gerado um banco de imagens através do programa TPSUtil (Rohlf, 2006).

4.2 Determinação dos *landmarks*

Após a criação do banco de imagens por meio do programa TPSUtil, este banco de imagens foi organizado por espécie e por exemplar, com as fotos dos momentos de flexão e extensão do membro posterior em cada ciclo locomotor, foram tomadas como base cinco imagens de cada momento (flexão e extensão), totalizando cento e vinte imagens. O programa TPSDig2 (Rohlf, 2004) foi utilizado para pontuar os *landmarks*. Estes foram pontuados nas articulações e extremidades dos membros em seus momentos máximos de flexão e extensão.

Foram utilizados quatro *landmarks* em cada indivíduo, seguindo a anatomia óssea do membro tomado como referência: inserção da cintura, extremidade do joelho, extremidade inicial da pata e extremidade final da pata (Figura 11).

Figura 11. (a): inserção na cintura; (b) extremidade do joelho; (c) extremidade inicial da pata; (d) extremidade final da pata. Espécie: *Hydrochoerus hydrochaeris*.



Fonte: arquivo de imagens presentes no Laboratório de Zoologia de Vertebrados – Tetrapoda (LAZOVERTE).

Após a pontuação dos *landmarks*, essas imagens passaram por uma análise de Procrustes, a partir das coordenadas brutas das *landmarks* pontuadas. Este tipo de análise é também chamada de superposição ortogonal dos quadrados mínimos, ou análise generalizada de Procrustes (em inglês *Generalized Procrustes Analysis – GPA*) (Rohlf e Slice, 1990). Este tipo de análise realiza a translação, reescalonamento e a rotação da configuração de *landmarks*, isso resulta na diminuição da diferença existente entre as configurações, explicitando as diferenças entre as marcações e removendo os efeitos de tamanho e posição (Hohl, 2015). Todos os indivíduos são superpostos a uma forma de referência, também chamada de configuração consenso ou média da amostra (Monteiro e Reis, 1999). Esta forma considerada como média representa uma posição que seja equidistante à todas as configurações que foram analisadas, diminuindo as diferenças, permitindo analisar tamanhos e formas de uma estrutura separadamente (Moraes, 2004).

Após as análises de Procrustes, foram realizadas as Análises de Componentes Principais (em inglês *Principal Component Analysis – PCA*) e Análises de Variáveis Canônicas (em inglês *Canonical Variate Analysis – CVA*). Essas análises utilizam as matrizes de coordenadas provenientes da GPA.

Na análise de PCA, há a reunião das variáveis originais que possuem o mesmo sentido de variação em variáveis, independentes entre si, chamadas Componentes Principais (em inglês *Principal Components – PCs*). Segundo Zelditch *et al.* (2004), o

objetivo desta análise é tornar mais fácil a interpretação dos dados utilizando poucas PCs, facilitando as variações existentes.

Segundo Viscosi e Cardini (2011) os PCs são explicitam os eixos de maior variação no espaço da forma, assim os indivíduos analisados podem ser interpretados como uma nuvem de pontos em um espaço multivariado. Essa nuvem de pontos facilita a visualização do conjunto de dados e padrões, se existentes, que foram formados entre os indivíduos amostrados (Sydney, 2010).

Neste estudo, foram realizadas as análises PCA e DFA (do inglês *Discriminant Function Analysis*), este segundo método equivale ao CVA para dois grupos. Estes métodos permitem a observação da ordenação das variações das angulações dos membros utilizados durante os momentos de locomoção dos espécimes. Estas análises foram utilizadas para separar dois tipos de locomoção diferentes em uma mesma espécie, assim como um mesmo tipo de locomoção entre duas espécies diferentes.

Com a observação das tendências de formação de grupos que se relacionavam durante as análises de PCA, foram realizadas análises CVA com as informações de coordenadas fornecidas durante as marcações dos espécimes.

A CVA permite a observação das diferenças entre grupos selecionados anteriormente, utilizando um conjunto de dados multivariados, como os dados fornecidos por PCs e as Coordenadas das Procrustes (Monteiro & Reis, 1999; Webster & Sheets, 2010). Segundo Webster & Sheets (2010) este método é similar à PCA, pela construção de novos eixos e por resumir as diferenças máximas entre os grupos analisados, assim as CVs são dimensionadas seguindo padrões de variação dentro dos grupos.

Outra diferença entre a CVA e PCA é a forma de em que a primeira resume eficientemente as diferenças entre os grupos, seguindo a variação dentro do grupo (Webster & Sheets, 2010).

4.3 Visualização das variações de forma

De acordo com Viscosi & Cardini (2011) as variações de forma entre grupos são obtidas ao longo dos eixos de variação (e.g., vetores PC1, PC2, assim como vetores das análises multivariadas, CV1, CV2). Nos trabalhos de Amaral *et al.* (2009) Webster & Sheets (2010), os autores encontraram grande similaridade entre as variações obtidas a partir de CVs (CV1, CV2, CV3) e de PCs (PC1, PC2, PC3). No

presente estudo as análises citadas foram utilizadas para a separação entre os padrões locomotores, de acordo com a disposição espacial das coordenadas de *landmarks* nos gráficos gerados.

5 RESULTADOS

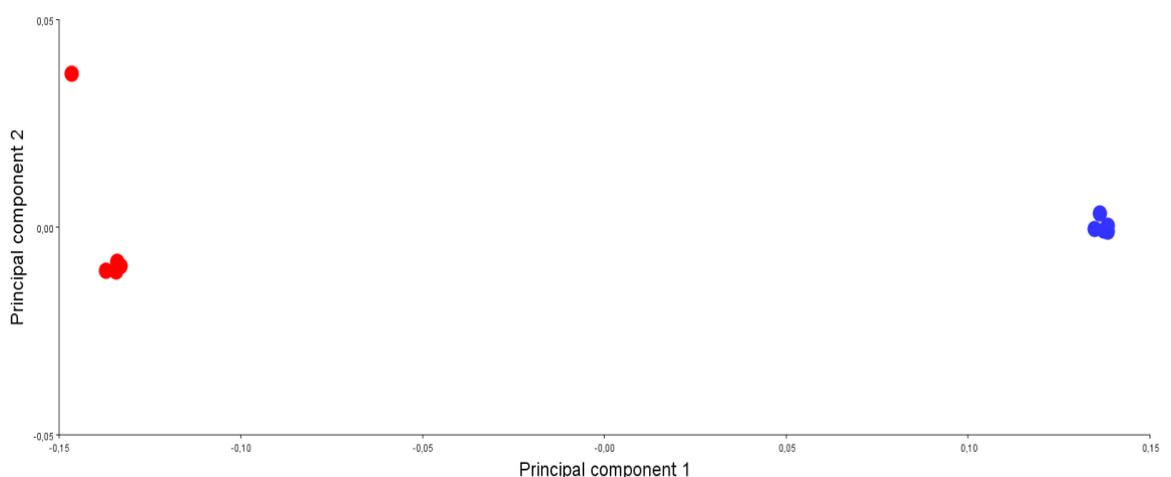
Neste estudo foram utilizadas análises de PCA e DFA quando em questão estivesse se analisando dois tipos de locomoção dentro de uma mesma espécie. Análises de PCA e CVA foram geradas para as variações entre 3 ou mais tipos de locomoção analisadas ou quando se tratavam de três ou mais espécies utilizando o mesmo movimento.

5.1 Variações em *Cavia porcellus*

5.1.1 Galope x trote em momentos de extensão

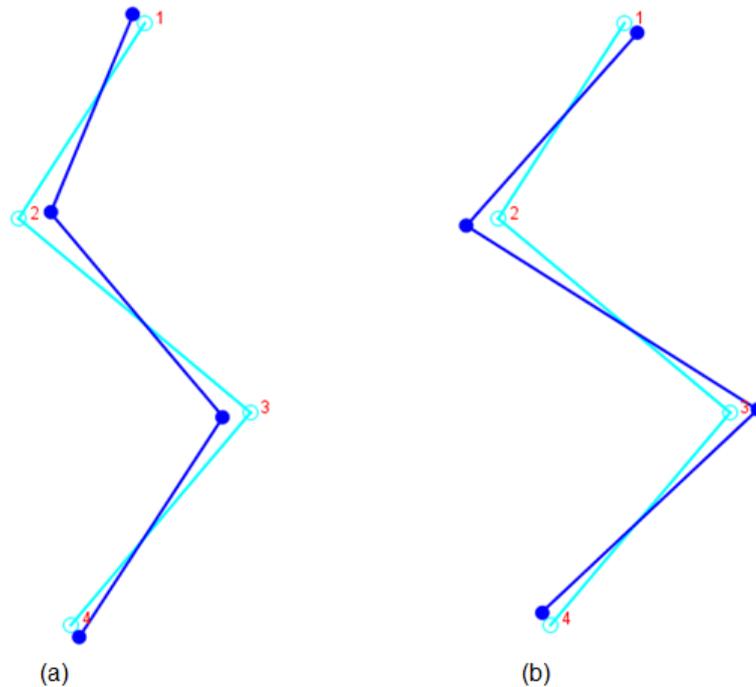
Foram analisados dez momentos de extensão do membro posterior de *Cavia porcellus*, sendo cinco representando galope e cinco representando trote. Nas análises de componentes principais (PCA), o eixo representado pelo PC1 explicou 99,04% da variação entre os grupos e o PC2 explicou 0,93%, totalizando 99,97% da variação. De acordo com o gráfico de dispersão da PCA, dos dois principais eixos de variação (PC1 e PC2), é possível observar uma separação entre os grupos no gráfico (Figura 12). As deformações das cadeias articulares demonstraram diferenças significativas quando comparadas com a média, indicando as variações destas cadeias analisadas (Figura 13). A análise de função discriminante (DFA) demonstrou diferenças significativas entre os padrões de galope e trote (t^2 de Hotelling= 78504,1638; $P < 0,0001$).

Figura 12 - Análise PCA, galope em vermelho e trote em azul.



Fonte: gráfico originado pelo programa MorphoJ.

Figura 13 - Análise de deformação das cadeias articulares. A coloração mais clara indica a média dos dois padrões analisados. (a) demonstra PC1 sobre a variação de trote; (b) demonstra PC1 sobre a variação de galope.

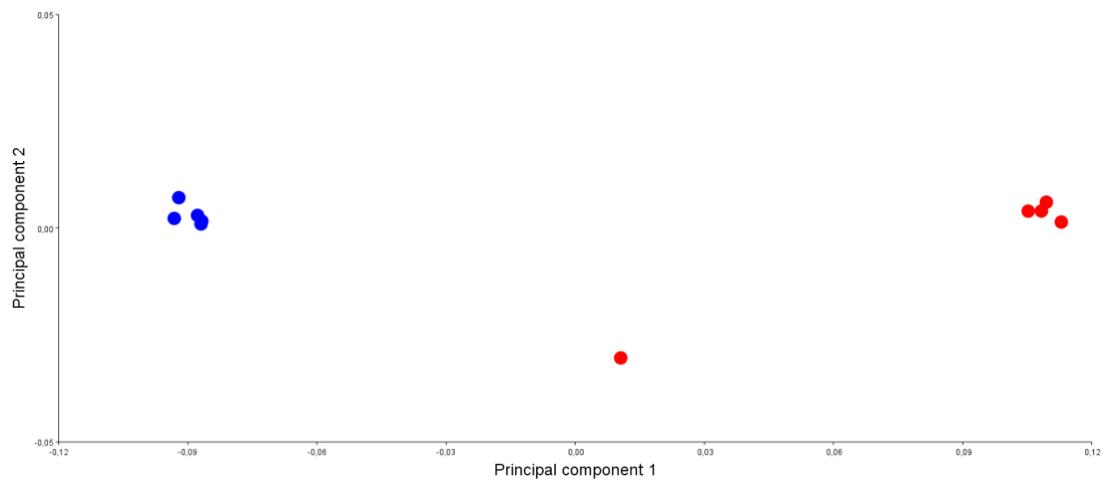


Fonte: Gráfico originado pelo programa MorphoJ.

5.1.2 Galope x trote em momentos de flexão

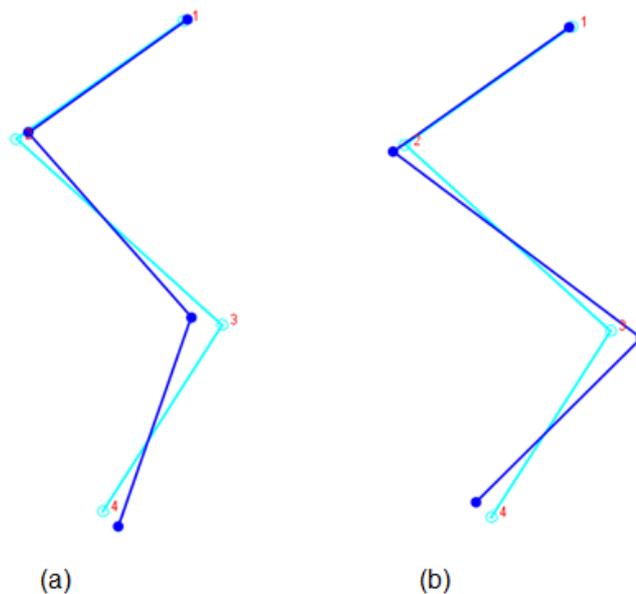
A partir das informações da análise de PCA, foram produzidos dois eixos de diferenciação entre os padrões de locomoção. O eixo PC1 representa 98,69% da explicação de variação e o PC2 explicou 1,20% da variação, assim o gráfico PCA indica separação entre os padrões utilizados (Figura 14). A partir da média dos padrões analisados, foi possível perceber variações que indicam diferenças das cadeias articulares durante cada movimento em questão (Figura 15). Ao final da análise DFA surgiram diferenças marcantes entre os tipos de locomoção ($t^2=1932,3476$; $P<0,0001$).

Figura 14 - Análise PCA, galope em vermelho e trote em azul.



Fonte: gráfico originado pelo programa MorphoJ.

Figura 15 - Análise de deformação das cadeias articulares. A coloração mais clara indica a média dos dois padrões analisados. (a) demonstra PC1 sobre a variação de trote; (b) demonstra PC1 sobre a variação de galope.



Fonte: gráfico originado pelo programa MorphoJ.

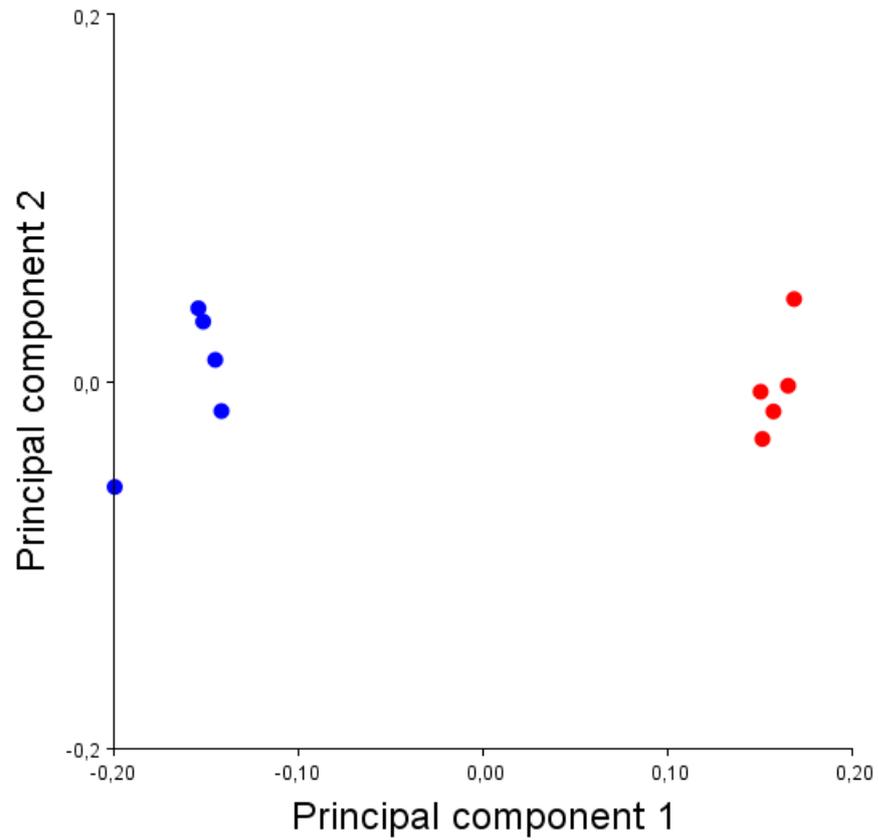
5.2 Variações em *Dasyprocta leporina*

5.2.1 Trote x Salto em momentos de extensão

Após as análises de dez momentos de extensão do membro posterior da espécie (cinco referentes a trote e cinco à salto), as análises de PCA demonstraram através dos eixos PC1 (95,22%) e PC2 (3,63%) da variação, indicando através do gráfico PCA uma separação dos padrões locomotores indicados (Figura 16). A partir da média de deformação das cadeias articulares, foi possível notar diferenças entre

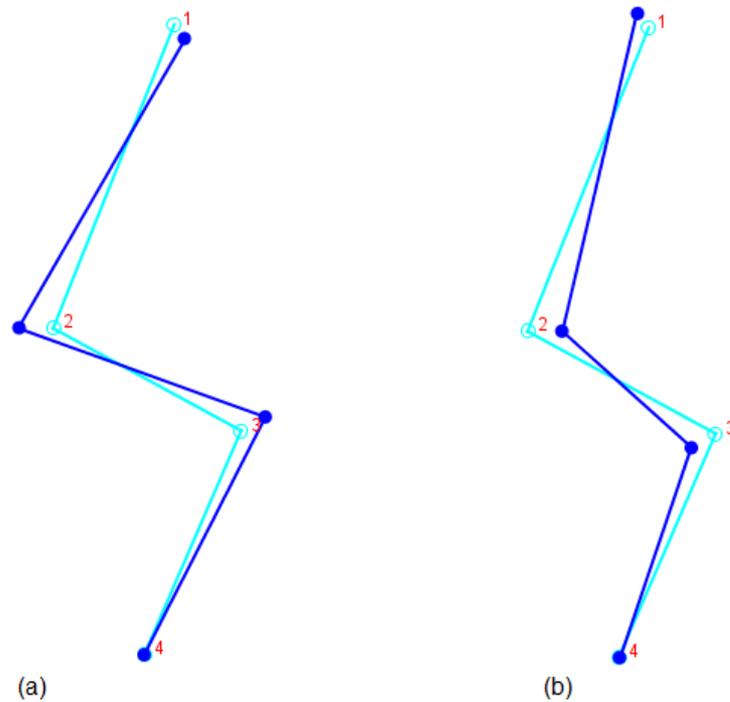
os dois padrões analisados (Figura 17). A DFA indicou diferenças entre os tipos locomotores, de acordo com os seguintes dados: $t^2= 4385,2646$; $P<0,0001$.

Figura 16 - Análise PCA, salto em vermelho e trote em azul.



Fonte: gráfico originado pelo programa MorphoJ.

Figura 17 - Análise de deformação das cadeias articulares. A coloração mais clara indica a média dos dois padrões analisados. (a) demonstra PC1 sobre a variação de trote; (b) demonstra PC1 sobre a variação de salto.

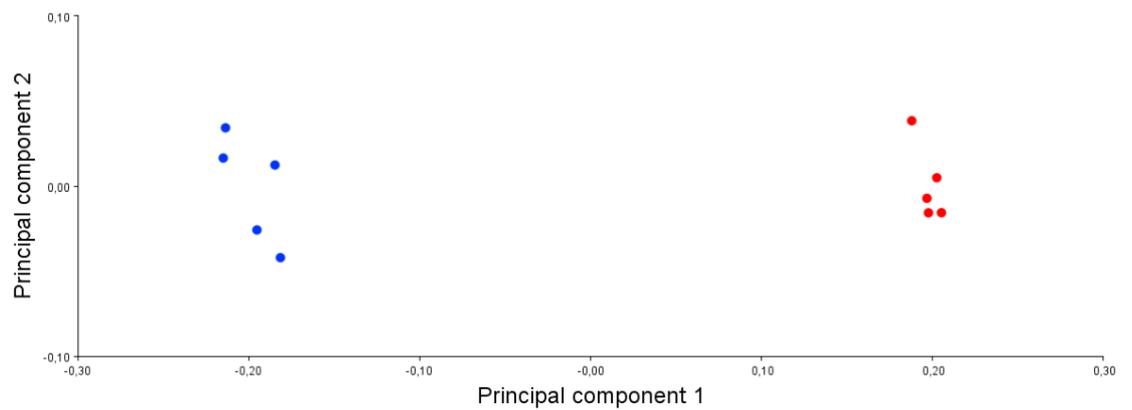


Fonte: gráfico originado pelo programa MorphoJ.

5.2.2 Trote x Salto em momentos de flexão

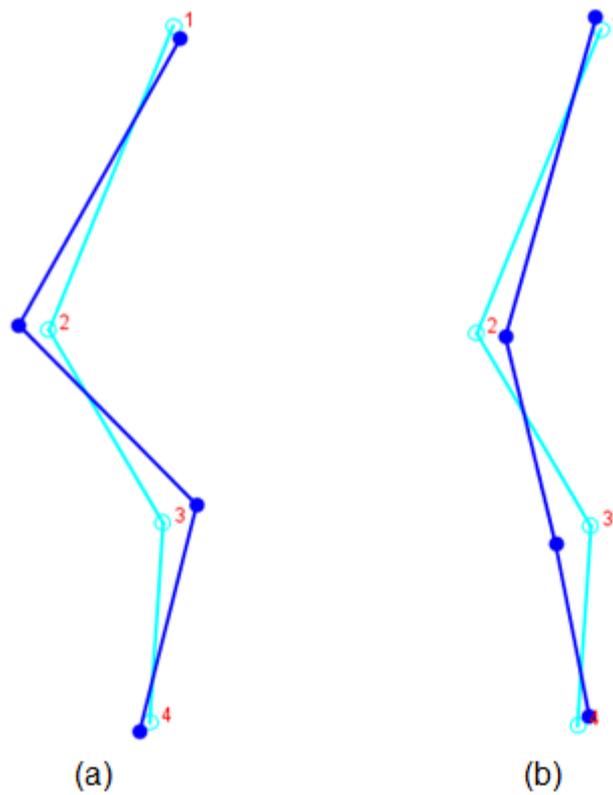
Após as análises PCA, os dados de PC1 e PC2, 98,07% e 1,52% respectivamente, demonstraram diferenças entre os padrões apresentados. Foram analisados cinco movimentos de trote e cinco de salto (Figura 18). As comparações das cadeias articulares com a média entre os dois padrões, indica uma diferença entre os pontos de flexão (Figura 19). A DFA representou $t^2 = 11375,0244$; $P < 0,0001$, indicando separação dos grupos de padrões analisados.

Figura 18 - Análise PCA, salto em vermelho e trote em azul.



Fonte: gráfico originado pelo programa MorphoJ.

Figura 19 - Análise de deformação das cadeias articulares. A coloração mais clara indica a média dos dois padrões analisados. (a) demonstra PC1 sobre a variação de trote; (b) demonstra PC1 sobre a variação de salto.



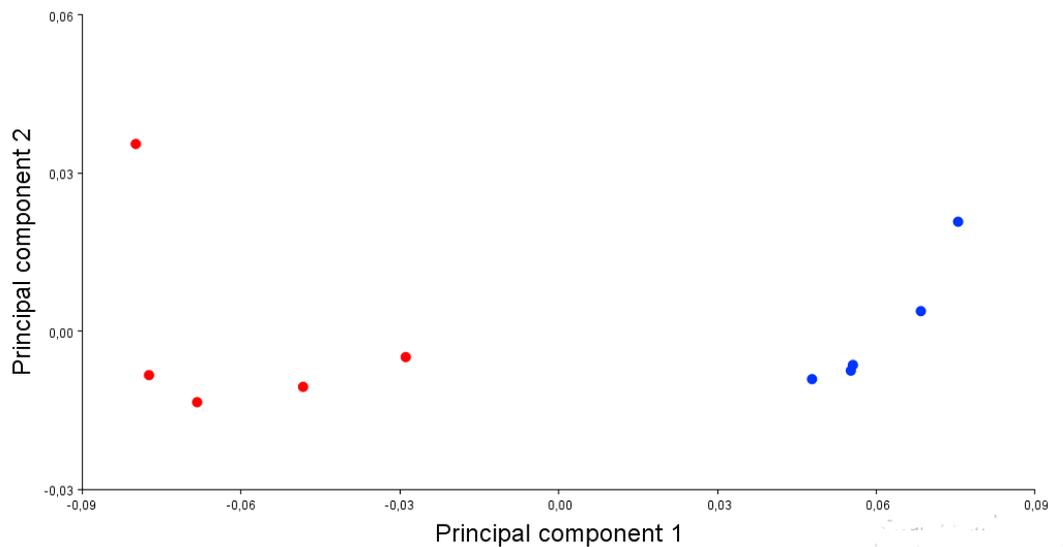
Fonte: Gráfico originado pelo programa MorphoJ.

5.3 Variações em *Tragulus javanicus*

5.3.1 Galope x trote em momentos de extensão

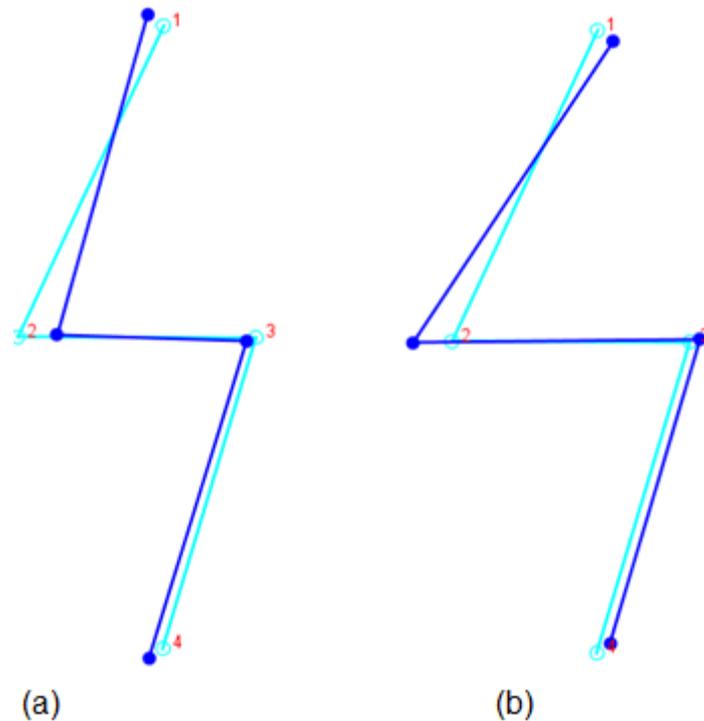
Através das análises de PCA, os eixos PC1 e PC2 representaram 88,52% e 5,17% de variação respectivamente. Esses valores auxiliam na visualização da diferença entre os padrões. Foram utilizadas cinco imagens de galope e cinco imagens de trote nas análises (Figura 20). As deformações das cadeias articulares demonstraram diferenças significativas quando comparadas com a média, indicando as variações destas cadeias analisadas (Figura 21). A partir da DFA realizada acerca dos padrões citados, foram encontrados os seguintes índices: $t^2= 369,8365$; $P<0,0001$.

Figura 20 - Análise PCA, galope em vermelho e trote em azul.



Fonte: Gráfico originado pelo programa MorphoJ.

Figura 21 - Análise de deformação das cadeias articulares. A coloração mais clara indica a média dos dois padrões analisados. (a) demonstra PC1 sobre a variação de galope; (b) demonstra PC1 sobre a variação de trote.

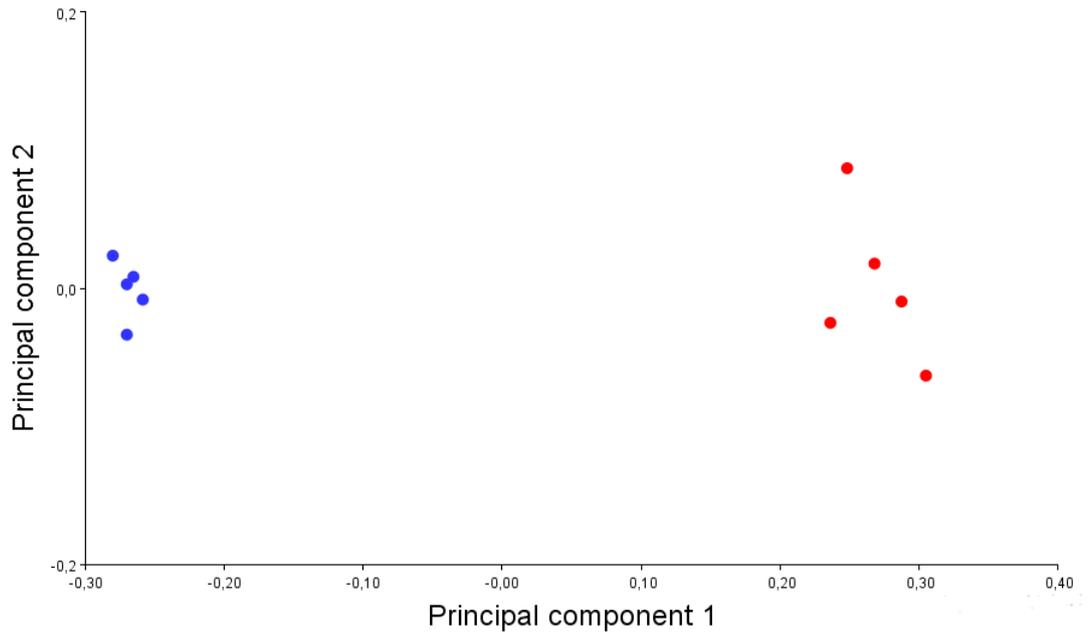


Fonte: Gráfico originado pelo programa MorphoJ.

5.3.2 Galope x trote em momentos de flexão

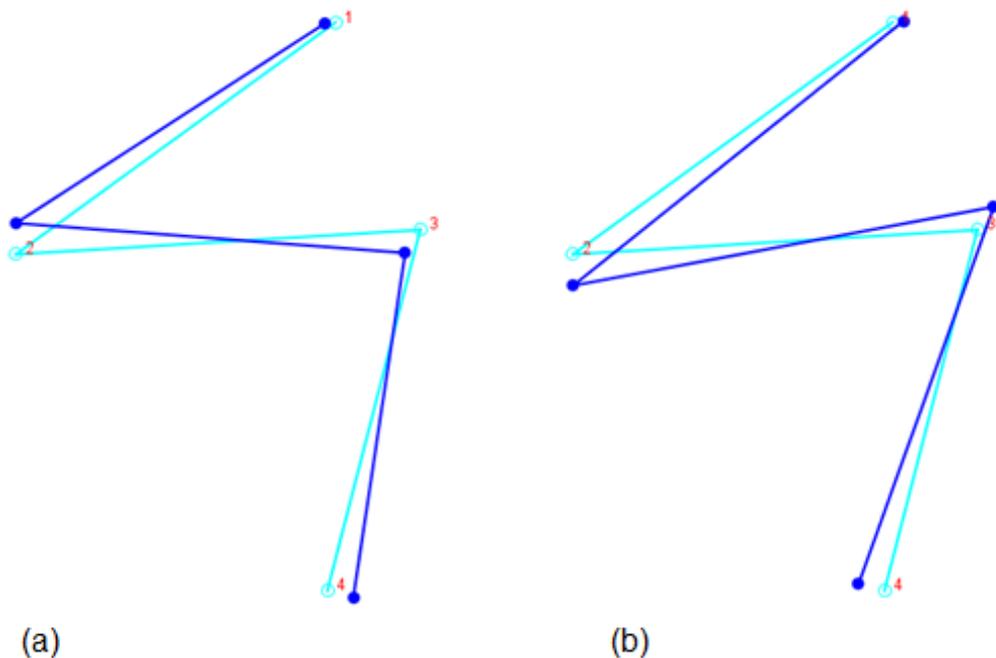
Foram utilizados cinco momentos de flexão de galope, assim como cinco de trote para as análises de PCA, que forneceram as seguintes informações: PC1 representando 97,53% da variação e PC2 1,934% (Figura 22). As variações diante da média das formas articulares durante o movimento demonstraram diferenças entre os padrões analisados (Figura 23). Os índices que as análises DFA forneceram o $t^2=3726,2187$; $P<0,0001$.

Figura 22 - Análise PCA, galope em vermelho e trote em azul.



Fonte: Gráfico originado pelo programa MorphoJ.

Figura 21 - Análise de deformação das cadeias articulares. A coloração mais clara indica a média dos dois padrões analisados. (a) demonstra PC1 sobre a variação de trote; (b) demonstra PC1 sobre a variação de galope.



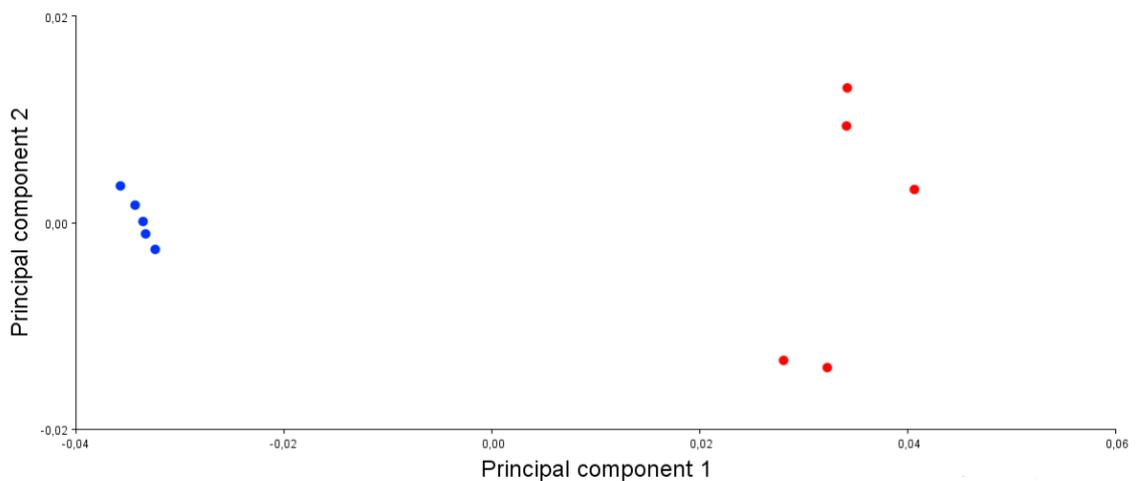
Fonte: Gráfico originado pelo programa MorphoJ.

5.4 Variações em *Ctenomys talarum*

5.4.1 Sequência lateral x trote em momentos de extensão

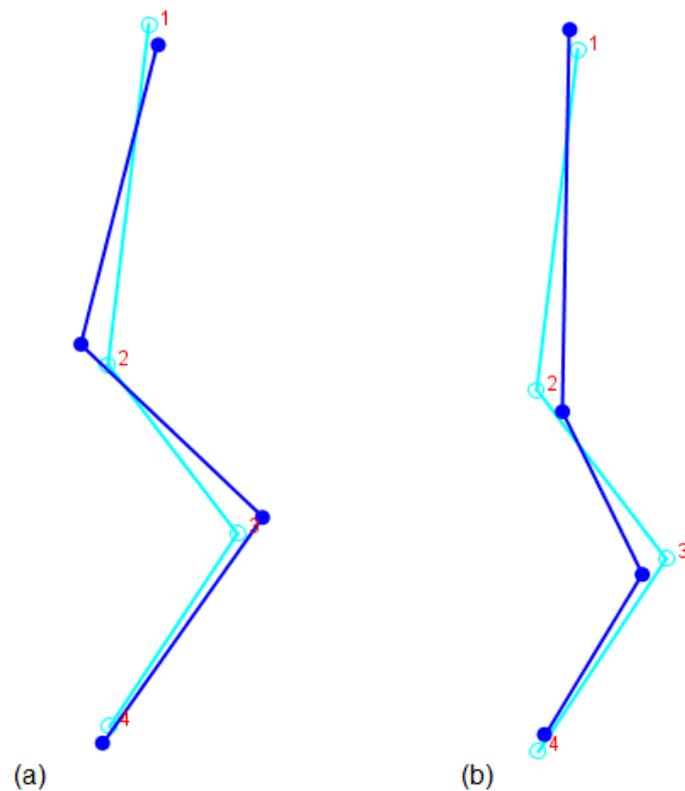
Os gráficos PCA formados por cinco imagens de sequência lateral e por cinco de trote, com suas respectivas variações representadas por PC1 (92,96%) e PC2 (5,38%) demonstram diferenças nas posições dos *landmarks*, separando os diferentes padrões (Figura 24). A análise DFA fornece os dados $t^2= 1578,6379$; $P<0,0001$. As análises das cadeias articulares fornecem diferenças na variação das mesmas relacionadas à média (Figura 25).

Figura 24. Análise PCA, Sequência lateral (marcha) em vermelho e trote em azul.



Fonte: gráfico originado pelo programa MorphoJ.

Figura 25 - Análise de deformação das cadeias articulares. A coloração mais clara indica a média dos dois padrões analisados. (a) demonstra PC1 sobre a variação de trote; (b) demonstra PC1 sobre a variação de sequência lateral (marcha).

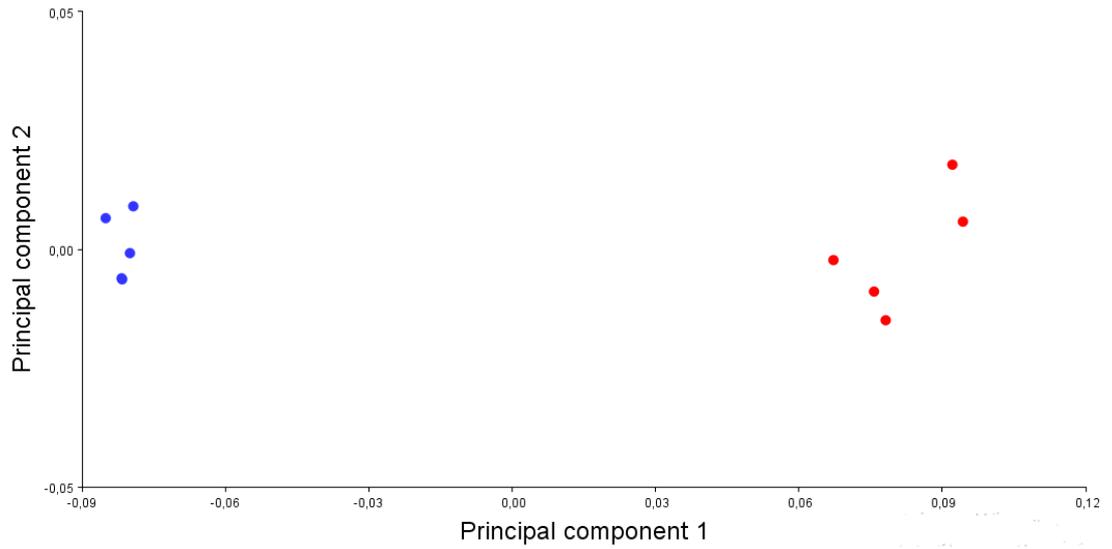


Fonte: gráfico originado pelo programa MorphoJ.

5.4.2 Sequência lateral x trote em momentos de flexão

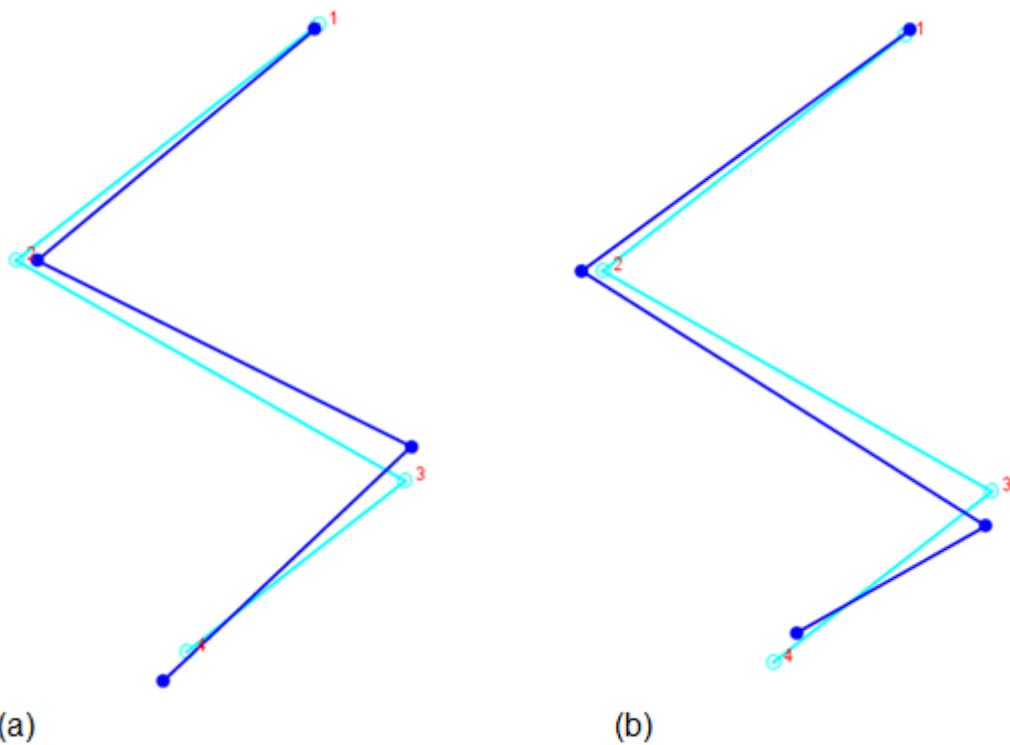
Os componentes PC1 e PC2 visualizados a partir da análise do PCA, forneceram 97,96% e 1,26% das explicações de variação respectivamente. Esses dados foram retirados de cinco imagens de ambos padrões utilizados (Figura 26). A DFA forneceu os seguintes dados que possibilitam a separação destes tipos de locomoção na espécie avaliada: $t^2= 2151,3321$; $P<0,0001$. Nas análises das cadeias em referência indicam as variações entre os tipos de locomoção analisados a priori (Figura 27).

Figura 26 - Análise PCA, Sequência lateral (marcha) em vermelho e trote em azul.



Fonte: Gráfico originado pelo programa MorphoJ.

Figura 27- Análise de deformação das cadeias articulares. A coloração mais clara indica a média dos dois padrões analisados. (a) demonstra PC1 sobre a variação de trote; (b) demonstra PC1 sobre a variação de sequência lateral (marcha).



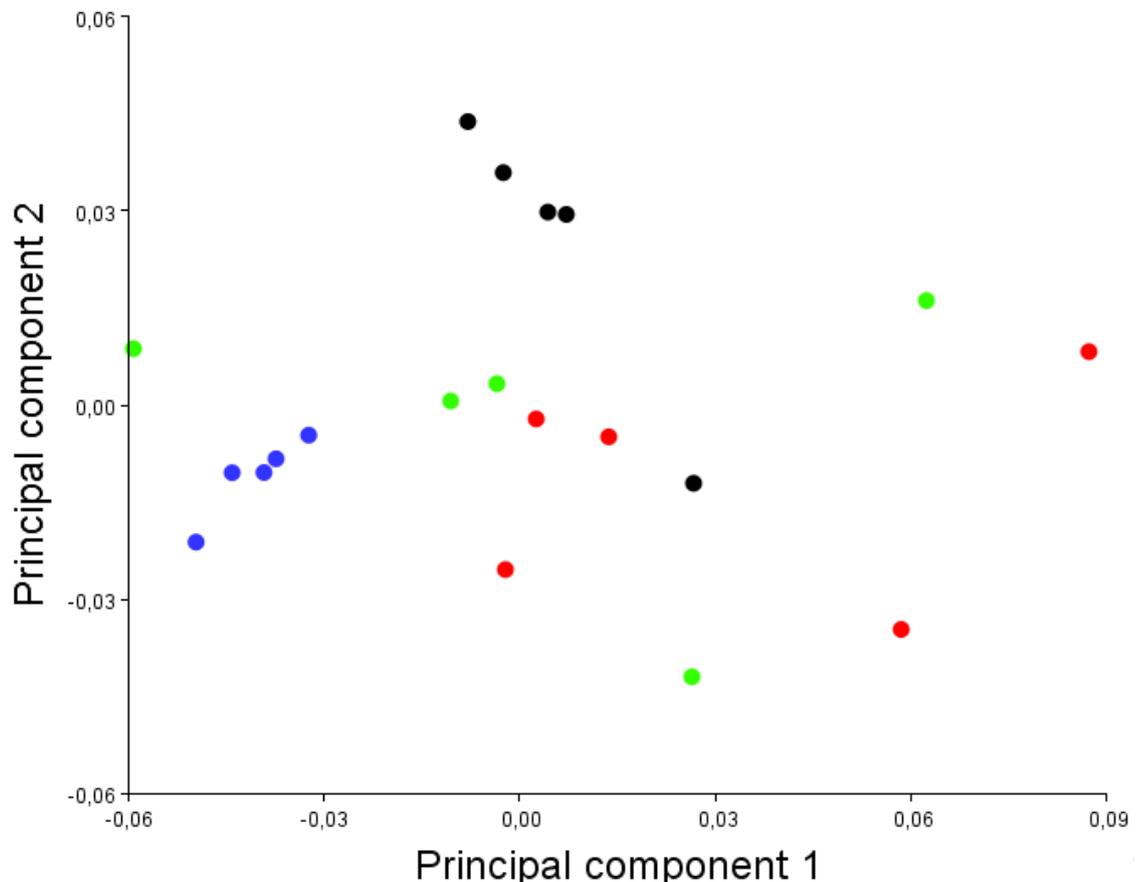
Fonte: gráfico originado pelo programa MorphoJ.

5.5 Variações em *Dolichotis patagonum*

5.5.1 Galope x pace x sequência lateral x trote em momentos de extensão

Nas análises PCA de cinco imagens de cada padrão citado, os eixos PC1 e PC2 forneceram 59,40% e 20,48% respectivamente. Segundo o gráfico, houve uma sobreposição dos padrões, dificultando a separação a partir deste tipo de análise (Figura 28).

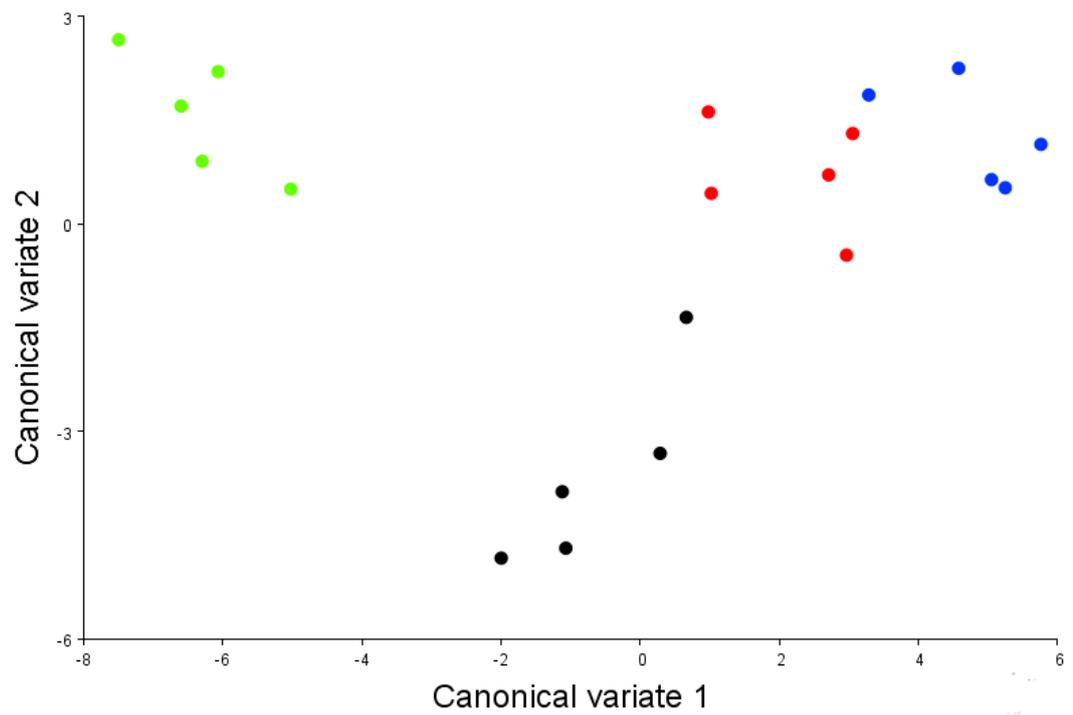
Figura 28 - Análise PCA, galope em vermelho; pace em verde; sequência lateral em azul; trote em preto.



Fonte: Gráfico originado pelo programa MorphoJ.

Para a separação mais distinta entre os padrões locomotores, foi realizada uma CVA, cujos eixos CV1 e CV2 foram responsáveis por 76,99% e 20,25% da explicação das variações no gráfico, assim indicando separação espacial dos padrões (Figura 29). Para uma visualização mais nítida das variações articulares entre os padrões analisados, os gráficos foram baseados nas análises CVA, tanto em CV1 (Figura 30) quanto em CV2 (Figura 31).

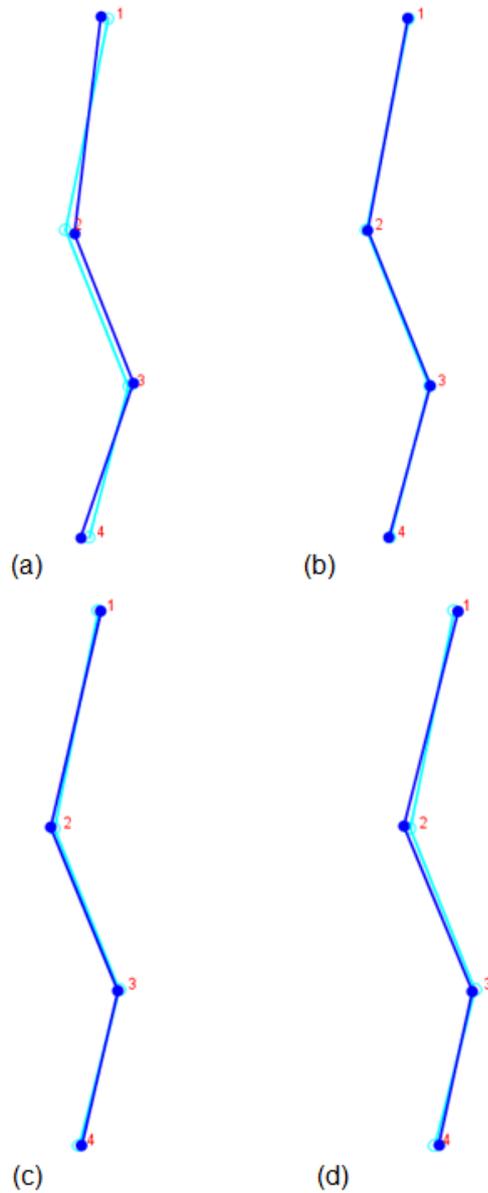
Figura 29. Análise CVA, galope em vermelho; pace em verde; sequência lateral em azul; trote em preto.



Fonte: gráfico originado pelo programa MorphoJ.

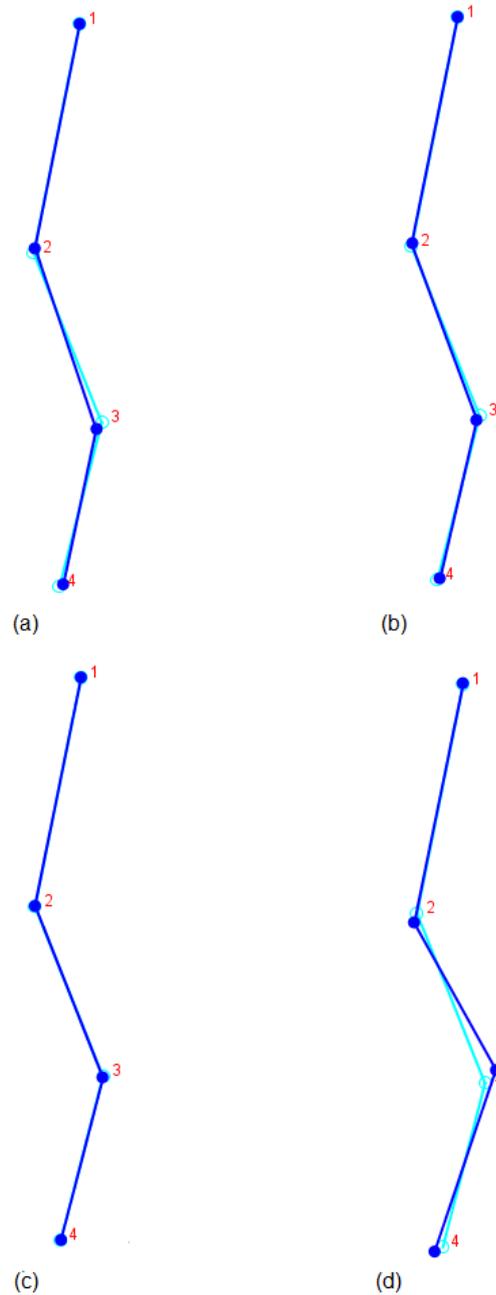
Figura 30 - Análise de deformação das cadeias articulares. A coloração mais clara indica a média dos dois padrões analisados. (a) demonstra CV1 sobre a variação de *pace*; (b) demonstra CV1 sobre a

variação de trote; (c) demonstra CV1 sobre a variação de galope; (d) demonstra CV1 sobre a variação de seqüência lateral (marcha).



Fonte: Gráfico originado pelo programa MorphoJ.

Figura 31 - Análise de deformação das cadeias articulares. A coloração mais clara indica a média dos dois padrões analisados. (a) demonstra CV2 sobre a variação de *pace*; (b) demonstra CV2 sobre a variação de sequência lateral (marcha); (c) demonstra CV2 sobre a variação de galope; (d) demonstra CV2 sobre a variação de trote.

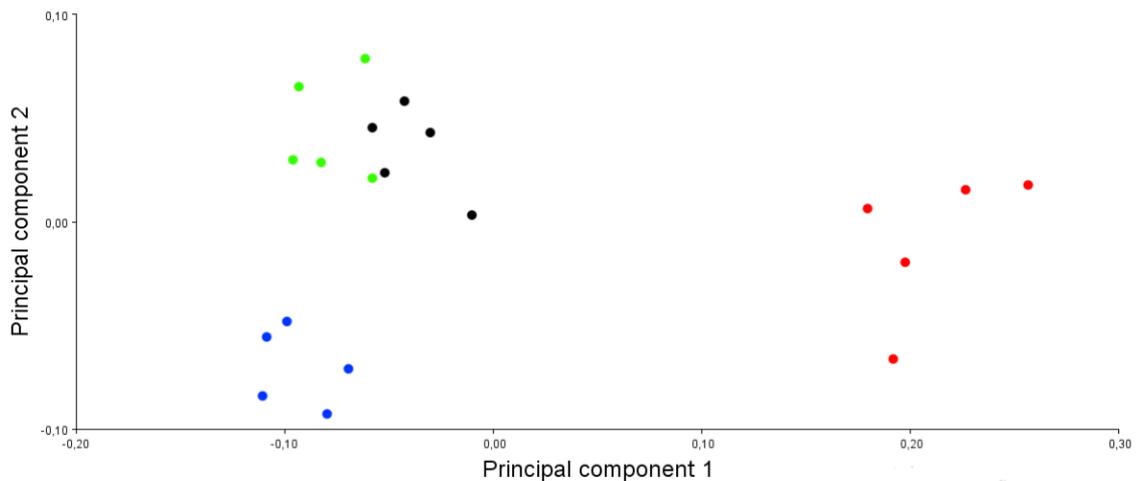


Fonte: Gráfico originado pelo programa MorphoJ.

5.5.2 Galope x pace x seqüência lateral x trote em momentos de flexão

Nas análises PCA de cinco imagens de cada padrão citado, os eixos PC1 e PC2 forneceram 80,80% e 13,50% respectivamente, indicando uma diferença entre os padrões trabalhados neste tipo de análise (Figura 32).

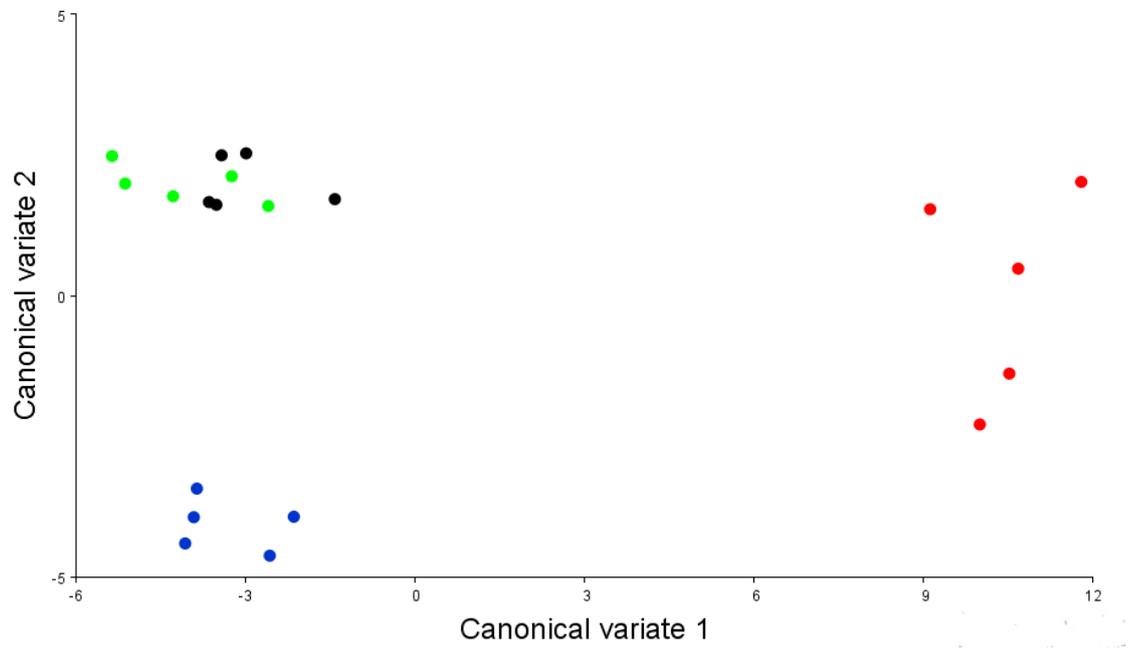
Figura 32 - Análise PCA, galope em vermelho; pace em verde; seqüência lateral em azul; trote em preto.



Fonte: Gráfico originado pelo programa MorphoJ.

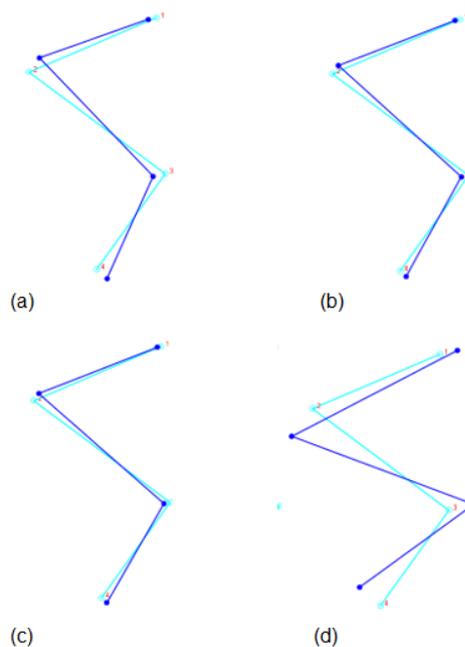
Para possível maior distinção entre os padrões, foi realizada uma CVA que forneceu um CV1 de 83,80% e CV2 de 14,12%, essas porcentagens de explicação das diferenças é significativamente considerável para a separação dos tipos de locomoção (Figura 33). Para uma visualização mais nítida das variações articulares entre os padrões analisados, os gráficos foram baseados nas análises CVA, tanto em CV1 (Figura 34) quanto CV2 (Figura 35).

Figura 33 - Análise CVA, galope em vermelho; pace em verde; sequência lateral em azul; trote em preto.



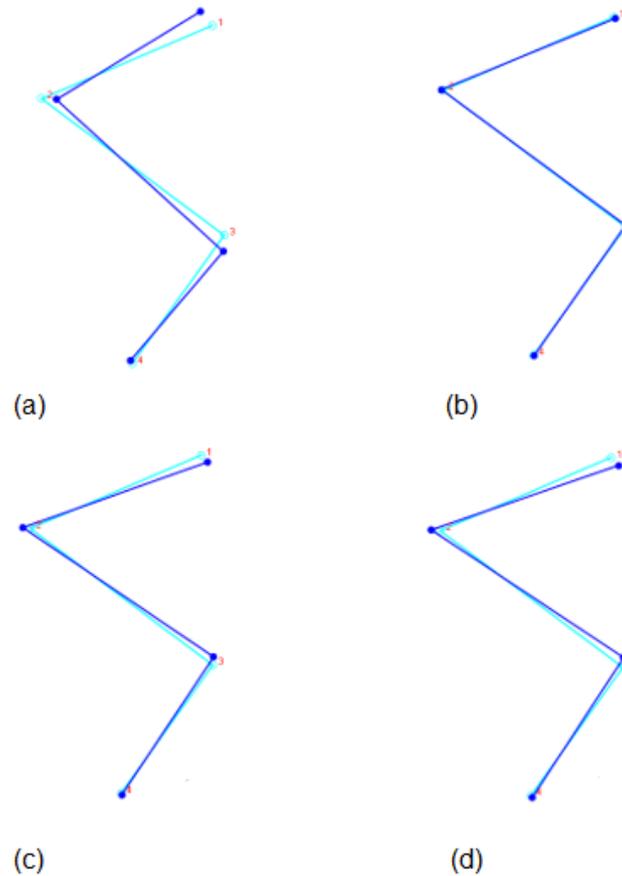
Fonte: Gráfico originado pelo programa MorphoJ.

Figura 34 - Análise de deformação das cadeias articulares. A coloração mais clara indica a média dos dois padrões analisados. (a) demonstra CV1 sobre a variação de *pace*; (b) demonstra CV1 sobre a variação de sequência lateral (marcha); (c) demonstra CV1 sobre a variação de trote; (d) demonstra CV1 sobre a variação de galope.



Fonte: Gráfico originado pelo programa MorphoJ.

Figura 35 - Análise de deformação das cadeias articulares. A coloração mais clara indica a média dos dois padrões analisados. (a) demonstra CV2 sobre a variação de seqüência lateral (marcha); (b) demonstra CV2 sobre a variação de galope; (c) demonstra CV2 sobre a variação de *pace*; (d) demonstra CV2 sobre a variação de trote.

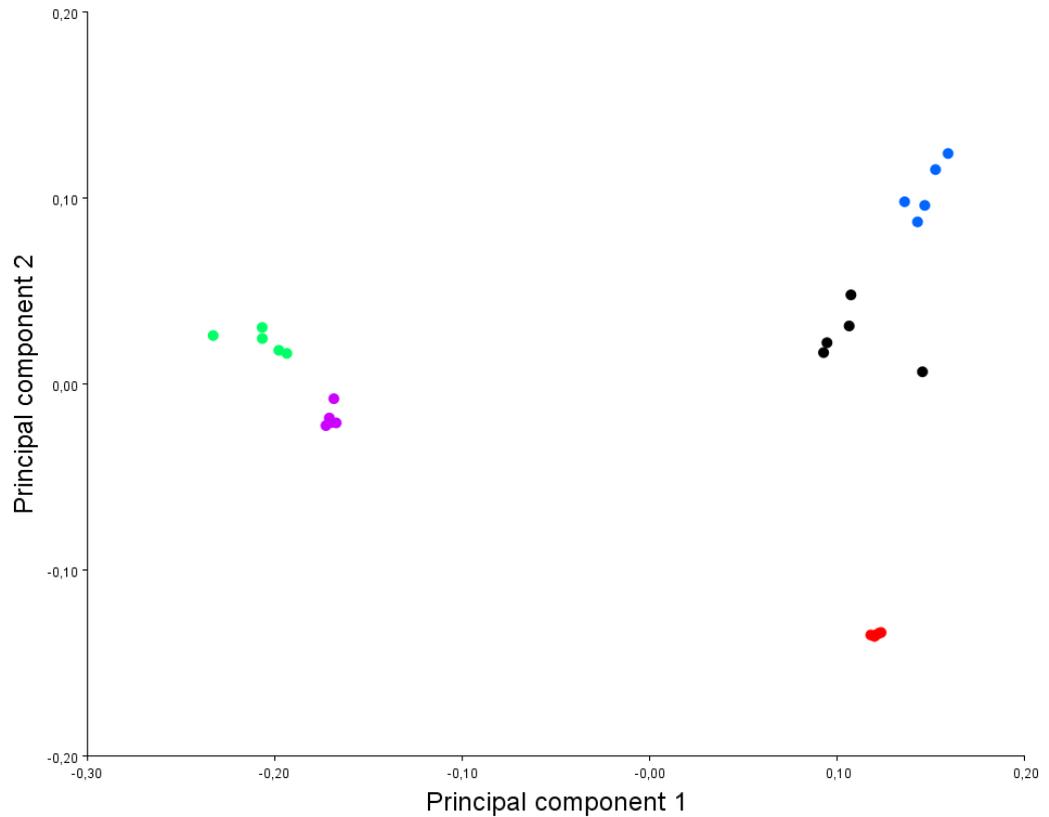


Fonte: Gráfico originado pelo programa MorphoJ.

5.6 Variações em *Ctenomys talarum*, *Dasyprocta leporina*, *Dolichotis patagonum*, *Tragulus javanicus* e *Cavia porcellus* sobre o movimento de trote durante a extensão

Nas análises PCA de cinco imagens de cada espécie, sendo todas relativas ao movimento de trote, os eixos PC1 e PC2 forneceram 75,47% e 19,26% respectivamente, indicando uma diferença entre as espécies trabalhadas neste tipo de análise (Figura 32).

Figura 32 - Análise PCA, *Ctenomys talarum* em violeta, *Dasyprocta leporina* em preto, *Dolichotis patagonum* em verde, *Tragulus javanicus* em azul, e *Cavia porcellus* em vermelho.

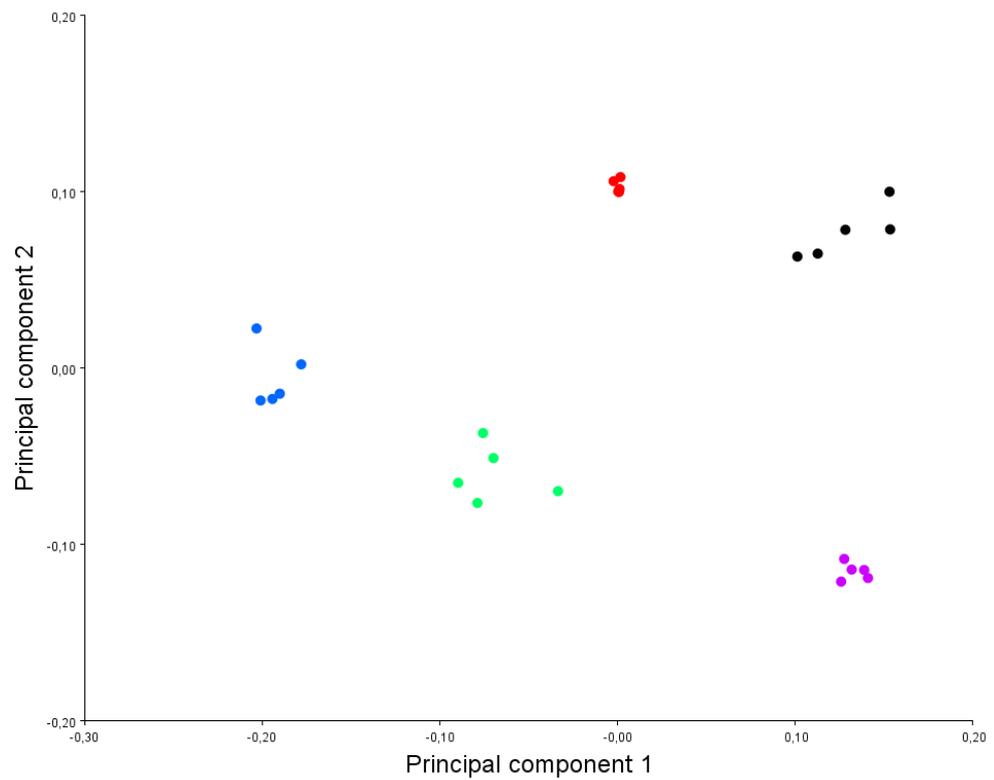


Fonte: Gráfico originado pelo programa MorphoJ.

5.7 Variações em *Ctenomys talarum*, *Dasyprocta leporina*, *Dolichotis patagonum*, *Tragulus javanicus* e *Cavia porcellus* sobre o movimento de trote durante a flexão

As diferenças entre as espécies durante o padrão foram constatadas por meio das análises PCA, que através de PC1 e PC2 indicaram uma explicação de 65,64% e 28,84% respectivamente. Estes resultados indicam uma diferença espacial entre os dados analisados (Figura 33).

Figura 33. Análise CVA, *Ctenomys talarum* em violeta, *Dasyprocta leporina* em preto, *Dolichotis patagonum* em verde, *Tragus javanicus* em azul, e *Cavia porcellus* em vermelho.



Fonte: Gráfico originado pelo programa MorphoJ.

6.1 Análises

Para a realização das análises de Morfometria Geométrica, são utilizados conjuntos de *landmarks* que são escolhidos de acordo com a anatomia e finalidade do estudo apresentado. (Monteiro e Reis, 1999). Neste estudo os *landmarks* foram utilizados nas variações anatômicas dos membros de referência durante o movimento, foi escolhido o membro posterior esquerdo.

As análises estatísticas utilizadas pela morfometria geométrica através das informações de PCA e CVA disponibilizam informações que são utilizadas para diferenciar formações anatômicas e morfológicas entre indivíduos (Sidney, 2010). Os métodos de PCA e CVA aparecem como um método de facilitar a visualização das diferenças expressas entre os grupos (Monteiro & Reis, 1999; Webster & Sheets, 2010). No estudo realizado a base das análises não tinham como prioridade a diferenciação anatômica ou morfológica das espécies, no entanto a prioridade foi a separação entre os tipos de locomoção. Este tipo de separação por esta técnica ainda não aparece na literatura.

O uso da técnica PCA auxilia diretamente na distinção de padrões entre indivíduos utilizando poucos PCs, sendo utilizada amplamente para diferenciar dois grupos (Zelditch *et al.* 2004). Durante a metodologia do presente estudo, foram utilizadas análises de PCA para a separação entre dois padrões locomotores observados em uma mesma espécie, sendo utilizados como base a extensão ou flexão do membro posterior esquerdo de cada indivíduo. A escolha da PCA ocorreu devido à grande explicação deste método na separação dos padrões durante as análises estatísticas.

A utilização da DFA busca a confirmação dos resultados da PCA, ela se caracteriza como um método equivalente a CVA para dois grupos (Hohl, 2015). O uso desta técnica acabou por confirmar as diferenças entre as análises de dois tipos de locomoção na mesma espécie.

Em análises que utilizam mais de dois grupos, a técnica PCA fornece dados que indicam ou não separações entre os grupos envolvidos, a partir destes dados é possível se realizar o método de análise CVA, que permite a observação das diferenças entre grupos selecionados anteriormente, utilizando um conjunto de dados multivariados e pela construção de novos eixos que resumam as diferenças máximas entre os grupos analisados (Webster & Sheets, 2010). No presente estudo as análises de CVA foram utilizadas para diferenciar quatro padrões locomotores presentes em

Dolichotis patagonum, este fato se deu graças a ausência de explicação significativa fornecida pela PCA. Sendo assim, as análises canônicas contribuíram para uma análise mais aprofundada, permitindo a separação dos padrões determinados a priori. Outro uso das análises CVA foram sobre padrão trote realizado por diferentes espécies, afim de buscar explicações que possam demonstrar as variações entre espécies diferentes.

6.2 Variação entre tipos de locomoção

6.2.1 Galope x trote

Na comparação dos movimentos, o primeiro se caracteriza pelo contato dos membros posteriores antes dos anteriores, enquanto o padrão conhecido como trote pode ser determinado pelo contato simultâneo entre o posterior esquerdo e o anterior direito, seguidamente os outros dois membros tocam o solo também simultaneamente (Hildebrand, 1977). De acordo com as análises de morfometria geométrica realizadas neste trabalho, houve uma diferença significativa durante as análises de PCA nos indivíduos *Cavia porcellus*, *Tragulus javanicus*. Essas diferenças ocorreram tanto nos movimentos de extensão e flexão do membro posterior utilizado como base para o início do movimento.

6.2.2 Trote x Salto

Segundo Hildebrand (1977) o movimento de trote se inicia pelo contato dos membros posteriores inicialmente durante o movimento quando comparados com os anteriores, quando analisado o membro posterior esquerdo como precursor do movimento. Já o segundo movimento tratado se notabiliza pelos membros esquerdos e direitos de cada par operarem juntos, ocorrendo um intervalo entre os anteriores e posteriores. A partir das análises de PCA nesta pesquisa, os espécimes de *Dasyprocta leporina* apresentaram diferenças que podem caracterizar uma separação entre os padrões por meio da morfometria geométrica. Essas diferenças ocorreram tanto nos movimentos de extensão e flexão do membro posterior utilizado como base para o início do movimento.

6.2.3 Sequência lateral x trote

No primeiro padrão os membros anteriores e posteriores atuam de forma intercalada, ou seja, cada membro anterior age no movimento logo depois do posterior

que está localizado ao mesmo lado do corpo (Cartmill *et al.* 2002). O segundo movimento como já tratado anteriormente, sinaliza o contato simultâneo entre o posterior esquerdo e o anterior direito, seguidos dos outros dois membros tocam o solo também simultaneamente (Hildebrand, 1977). Os indivíduos *Ctenomys talarum* analisados neste trabalho demonstraram uma diferença entre os padrões apresentados por meio das análises PCA, seja durante os momentos de flexão quanto de extensão, confirmando as diferenças de outros tipos de análises na bibliografia.

6.2.4 Galope x paces x sequência lateral x trote

De acordo com Cartmill *et al.* (2002) o primeiro padrão locomotor se caracteriza pelo contato primário ao solo pelos membros posteriores e então sequencialmente o contato dos membros anteriores. O movimento de *paces* corresponde à sincronia dos membros anteriores e posteriores localizados do mesmo lado. O padrão dito por sequência lateral cada membro anterior é acionado logo depois do posterior do mesmo lado do corpo e o padrão trote os membros posteriores e anteriores que estão de lados diferentes tocam simultaneamente o substrato, seguidos pelos outros dois membros também simultâneos (Hildebrand, 1976). Neste estudo a separação destes padrões locomotores foi realizada de duas formas pela morfometria geométrica, primariamente foram realizadas análises de PCA que indicaram uma diferença entre os padrões, porém não tão significativa. Isso pode ocorrer pelo número maior de movimentos em uma mesma análise, sendo assim houve análises de CVA em que os resultados demonstrados indicaram clara separação entre os tipos de locomoção colocados em questão.

6.3 Variação entre as espécies estudadas durante o movimento de trote

Durante deslocamentos que são considerados mais rápidos, alguns fatores podem diferenciar entre as espécies estudadas, mesmo quando se analisa o mesmo movimento. Essas diferenças podem ocorrer graças aos fatores como centro de massa (Biknevicius & Reilly, 2006) e fator de carga (Cartmill *et al.*, 2002). Os resultados aqui presentes corroboram esses possíveis fatores, indicando que cada espécie tende a ter uma área específica, mesmo durante as análises do mesmo padrão locomotor, seja pelas análises PCA ou CVA.

6.4 Deformações das cadeias articulares

A relação do movimento e das cadeias articulares é notável, principalmente na diferenciação entre as velocidades desempenhadas em diversos momentos durante a ecologia dos animais (Loguercio, 2007). No estudo realizado de acordo com o tipo de locomoção empregado há diferenças entre os formatos destas cadeias articulares. Estas diferenças podem se dar por razões como velocidade, em que de acordo como o aumento ou diminuição há mudanças na flexão e extensão dos membros.

CONCLUSÕES

A técnica de morfometria geométrica se mostrou eficaz nas análises das diferenças dos padrões locomotores, o que indica que esta ferramenta pode ser utilizada em tais tipos de estudos.

O uso desta ferramenta pode auxiliar os estudos desta área, como uma forma de poupar tempo durante análises e assim aumentar a eficiência de outros tipos de observações que se podem levar em consideração durante as pesquisas sobre locomoção animal.

A ausência de trabalhos relacionando esta técnica e a cinemática do movimento animal abre novas formas de estudos e um possível futuro do emprego rotineiro desta técnica, afim de facilitar e otimizar as pesquisas relacionadas a tais assuntos.

REFERÊNCIAS

ABOURACHID, A. A new way of analysing symmetrical and asymmetrical gaits in quadrupeds. *Comptes Rendus Biologies*, 326(7): 625-630, 2003.

- ABOURACHID, A.; HERBIN, M.; HACKERT, R.; MAES, L.; MARTIN, V. Experimental study of coordination patterns during unsteady locomotion in mammals. *The Journal of Experimental Biology*, v. 210, p. 366-372, 2007.
- ADAMS, D.C., ROHLF, F.J.; SLICE, D.E. Geometric morphometrics: ten years of progress following the 'revolution', 2004.
- ALEXANDER, R.M. The gaits of bipedal and quadrupedal animals. *The International Journal of Robotics Research*, 1984.
- ALEXANDER, R.M. *Comparative & environmental physiology*. Springer-Verlag, 304p, 1992.
- ALEXANDER, R.M. *Principles of animal locomotion*. Princeton University Press. 384 p, 2003.
- BELS, V.; CASINOS, A.; DAVENPORT, J.; GASC, J.P.; JAMON, M.; LAURIN, M.; RENOUS, S. *How vertebrates moved onto land*. 2011.
- BIKNEVICIUS, R.A.; REILLY, M.S. Correlation of symmetrical gaits and whole body mechanics- debunking myths in locomotor biodynamics, 2006.
- BOOKSTEIN, F.L.; *Morphometric tools for landmark data: geometry and biology*. Cambridge University Press, Cambridge, 1991.
- CARTMILL, M.; LEMELIN, P.; SCHIMITT, D. Support polygons and symmetrical gaits in mammals. *Zoological Journal of Linnean Society*, v.136, p. 401-420, 2002.
- FORNEL, R. & CORDEIRO-ESTRELA, P. *Morfometria geométrica e a quantificação da forma dos organismos*, 2012.
- GAMBARYAN, P.P. *Biomechanics of terrestrial locomotion*. 1974.
- GOSLOW JR., G. E.; REINKING, R.M.; STUART, D.G. The cat step cycle: hind limb joint angles and muscle lengths during a restrained locomotion. *Journal of Morphology*, v. 141, p 1-42, 1973.
- HILDEBRAND, M. Analysis of asymmetrical gaits. *Journal of Mammalogy*, v.58, n. 2, p.131-156, 1977.
- HILDEBRAND, M. Analysis of asymmetrical gaits of tetrapods. *Folia Biotheoretica*, v.6, p. 9-22, 1966.
- HILDEBRAND, M. Analysis of tetrapod gaits: general considerations and symmetrical gaits. In Herman, T.M.; Grillner, S.; Stein, P.S.G.; Stuart, D. G. (eds.) *Neural control of locomotion*. New York: Plenum Press, v. 18, p.203-236, 1976.
- HILDEBRAND, M.; GOSLOW, G. E. Correndo e saltando. In: Hildebrand, M.; Goslow, G. E. (aa). *Análise da estrutura dos vertebrados*. São Paulo: Atheneu, p. 431-453, 2006.
- HOHL, L. S. L. *Variações cranianas em *Tursiops truncatus* (Mammalia: Cetartiodactyla) em diferentes localidades dos oceanos, com ênfase na costa sul-americana: uma abordagem pela técnica de morfometria geométrica*, 2015.
- KARDONG, K. V. Skeletal system: the appendicular skeleton. In: Kardong, K. V. (a.) *Vertebrates*. McGraw Hill Primis, p. 322-369, 2008.

LOBO-RIBEIRO, L.; Considerações sobre os métodos empregados na análise dos padrões de locomoção quadrúpede em vertebrados terrestres, 2015.

LOGUERCIO, M.F.C. Desempenho e comportamento locomotor da capivara *Hydrochaeris hydrochaeris*, Linnaeus 1766 (Rodentia: Caviioidea). 2005. 93 f. Dissertação (Mestrado em Biociências Nucleares) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2005.

LOGUERCIO, M. F. C. . Desempenho e comportamento locomotor da capivara, *Hydrochaeris hydrochaeris* (Linnaeus, 1766) (Rodentia, Caviioidea). *Mastozoologia Neotropical* , v. 13, p. 117-118, 2007.

MCMAHON, T.A. The role compliances in mammalian running gaits. *Journal of Experimental Biology*, 115: 263-282, 1985.

MONTEIRO, L.R.; REIS, S.F. Princípios de Morfometria Geométrica. Holos, Ribeirão Preto. 1999.

MORAES, D.A. A morfometria geométrica e a “Revolução na Morfometria” localizando e visualizando mudanças na forma dos organismos, 2004.

NATHAN, R. Na emerging movement ecology paradigma. *Proceedings of National Academy of Sciences*, v. 105, n. 49, p. 1950-1951, 2008.

RENOUS, S. Locomotion. Paris:Dunod, p. 161-234, 1994.

RENOUS, S; GERBIN, M.; GASC, J-P. Contribution to analysis of gaits: Practical elements to complemente the Hildebrand Method, 2004.

ROCHA-BARBOSA, O. Analyse morpho-fonctionnelle des convergences de l'appareil locomoteur de grands rourngers Caviomorphes d'Amerique du Sud et des petits Artiodactyles d'Afrique et d'Asie, 1997. 237 f. Tese (Doutorado em Zoologie). Museum National d'Histoire Naturelle de Paris, Paris, 1997.

ROHLF, F.J. tpsDig, digitize landmarks and outlines, version 2.0. Department of Ecology and Ecolution, State University of New York at Stony Brook, 2004.

ROHLF, F.J. TPSUtil, Version 1.38. Department of Ecology and Evolution, State University of New York at Stony Brook, 2006.

ROHLF F.J.,MARCUS L.F. A revolution in morphometrics. *Trends Ecol. Evol.* 1993.

ROHLF, F.J.; SLICE, D.E. Extensions of the Procrustes methd for the optimal superimposition of landmark, 1990.

SANTORI, R.T.; Loguercio, M.F.C.; Boccacino, D.; Cunha, P.A.; Rocha-Barbosa, O. Técnicas de registro e análise de imagens em movimento aplicadas ao estudo do comportamento de mamíferos, 2014.

SLICE, D.E. Modern Morphomertrics em Slide, D.E. (ed) *Modern Morphometrics in Physical Anthropology*. Kluwer Academic/Plenum Publishers. 1-45. 2005.

SYDNEY, N.V.; MACHADO, F.A; HINGST-ZAHER, E. Timing of ontogenetic changes of two cranial regions in *Sotalia guianensis* (Delphinidae), 2012.

VISCOSI, V.; CARDINI, A. Leaf morphology, taxonomy and geometric morphometrics: a simplified protocol for begginers, 2011.

WEBSTER, M. A. R. K.; SHEETS, H.D. A practical introduction to landmark-based geometric morphometrics, 2010.

ZELDITCH, M.L.; SWIDERSKI, D. L; SHEETS, H.D. Geometric morphometrics for biologists: a primer. Academic Press, 2004.