

Morfometria geométrica – aplicações em paleobiologia de Dinossáurios

L. A. Rodrigues⁽¹⁾ & V. F. Santos⁽²⁾

Museu Nacional de História Natural (Mineralogia e Geologia), Rua da Escola Politécnica-58, P-1250-102 Lisboa
1 - lrodrigues@fc.ul.pt; 2 - vf.santos@fc.ul.pt

RESUMO

Palavras-chave: morfometria geométrica; Dinosauria; pegadas.

É apresentada uma síntese do actual estado de conhecimento teórico de algumas técnicas de Morfometria Geométrica. São igualmente descritas algumas aplicações metodológicas nesta área, através da sua aplicação a uma amostra de 22 pegadas de *Sauropodomorpha* do registo icnológico mundial (2D) e de um estudo preliminar em fálanges e metatarsos de *Ornithopoda* (3D).

Introdução teórica

A Morfometria Geométrica (MG) é um conjunto de novas técnicas no estudo da forma de estruturas biológicas em que são utilizados Marcos Anatómicos (Landmarks) (Rohlf & Marcus, 1993) ou Contornos. Os landmarks são os pontos nos quais as estruturas biológicas são amostradas e que permitem identificar as variações de forma entre as mesmas estruturas morfológicas nos diferentes exemplares em estudo. Nos métodos morfométricos tradicionais são usadas variáveis de quantificação de forma, por exemplo, razões entre distâncias ou entre ângulos de estruturas. Utilizando-se Landmarks obtém-se uma maior informação morfológica. Uma das principais vantagens da MG sobre os métodos tradicionais é o processo através do qual se quantifica a variação entre formas – Distância de Procrustes (Rohlf, 1999).

Seguiu-se a definição de Morfometria Geométrica de discriminação de forma, segundo a qual, a forma é a configuração de pontos que são invariantes à translação, rotação e escalamento (Bookstein, 1989).

A Análise Estatística da Forma baseia-se num espaço curvo denominado Espaço Forma de Kendall (Kendall, 1984; Dryden & Mardia, 1998; Rohlf, 1999). No Espaço Forma de Kendall não podem ser directamente empregues métodos de Análise Estatística Multivariada. Pode ser feita uma aproximação ao Espaço de Forma através de uma projecção das formas num Espaço Tangente de Forma, no qual se podem empregar os métodos lineares de Análise Estatística Mutivariada (Rohlf, 1999). Esta nova abordagem permite a descrição da variabilidade usando uma análise estatística robusta bem como a utilização de Thin-Plate Spline (TPS) para ilustrar e descrever os resultados em termos de deformações. Uma das principais inovações da MG foi a reformulação das ideias de D'Arcy Thompson, o qual visualizava as formas biológicas como distorções de um sistema de Coordenadas Geométricas (Thompson, 1917).

- **Sobreposição de Marcos Anatómicos (Landmarks)**

Análise de Distâncias de Procrustes – método de sobreposição em que se comparam formas, definidas pela configuração de landmarks, através de diversos critérios de optimização (Chapman, 1990; Rohlf & Slice, 1990). Este método envolve **translação** (centra a configuração de landmarks), **rotação** (rotação de todas as configurações de landmarks de forma a minimizar as distâncias entre elas) e **escalamento** (padronização da configuração de landmarks a partir do tamanho do centróide).

- **Estratégias de Análise de Distâncias de Procrustes**

GPA (*Generalized Procruste Analysis*) – optimização fazendo a sobreposição de vários exemplares a uma dada configuração referência. Os parâmetros de sobreposição são escolhidos de maneira a minimizar a soma de quadrados de distâncias entre pontos de cada configuração e os pontos correspondentes à referência. A referência é a configuração de landmarks na qual os dados são sobrepostos. A referência pode ser qualquer exemplar da amostra ou a configuração média (*consensus*) da amostra. Para cada landmark, um residual de Procrustes é a diferença entre a posição dos landmarks dos exemplares e a posição do landmark homólogo do *consensus*. A matriz dos residuais de Procrustes utiliza-se para qualquer procedimento estatístico. (e.g. Chapman, 1990; Rohlf & Slice, 1990).

- **Análise e Deformações - Thin Plate Spline (TPS)**

A função TPS é uma função que minimiza a energia de torsão da deformação, originando variações localizadas mínimas dos elementos de uma grelha relativamente aos seus elementos vizinhos (Bookstein, 1989). Esta função modela o comportamento de uma placa de fina metal, de proporções lineares infinitas, quando tem de ser deformada para ajustar uma configuração de landmarks que esteja sobre a placa numa configuração abaixo dela, sendo esta a configuração em estudo.

A análise de TPS inicia-se com a decomposição da matriz de torsão (*bending energy*) em *eigenvectors* ortogonais denominados *Principal Warps* (Bookstein, 1989, 1990).

A geometria dos *Principal Warps* é definida exclusivamente pela configuração de referência e descreve direcções possíveis de transformação da última no Espaço Tangente.

Tendo como objectivo expressar cada exemplar em termos de parâmetros Thin-Plate Spline, um novo conjunto de variáveis são geradas - *Partial Warps* (Bookstein, 1989). Estas são calculadas como coordenadas das projecções dos exemplares alinhados em cada *eigenvector*.

Foi utilizado o software TpsSmall 1.19 (Rohlf, 1998) para comprovar se as diferenças entre formas eram suficientemente pequenas para, utilizando métodos estatísticos, se usar o espaço tangente ao espaço de Kendall (que é não-linear), sendo esta uma aproximação utilizada na análise TPS.

Comprovou-se que existe uma relação não-linear entre as distâncias de Espaço Tangente ao Espaço de Kendall e de Procrustes, sendo válida, a aproximação descrita no método de análise de Thin-Plate Spline.

A análise de TPS foi efectuada com tpsSpln 1.17 – Rohlf 2002.

A análise de deformações é iniciada efectuando um GPA da amostra e calculando, assim, o indivíduo *consensus* que vamos incluir no nosso estudo.

• Relative Warps

O método das deformações relativas (*Relative Warps*) baseia-se na Análise de Componentes Principais dos *scores* das deformações parciais (*Partial Warps*).

Para se analisar as *Relative Warps (RW)* foi utilizado o software tpsRelative Warps 1.29 – Rohlf 2002.

A análise dos Relative Warps foi efectuada com $\alpha=0$ e com componente afim.

α é o parâmetro descrito por Rohlf (1993). Ao se empregar $\alpha=0$ vai ser dada igual importância aos *partial warps*, a todas as escalas espaciais, sendo esta a melhor opção para estudos exploratórios (Bookstein, 1993).

Aplicações em Paleobiologia de Dinossáurios - Icnologia

Procurou quantificar-se e discriminar, utilizando-se diversos métodos morfométricos, diferenças morfométricas entre 22 pegadas de *Sauropodomorpha*, com evidências de marcas de quatro dedos.

As técnicas utilizadas foram Sobreposição de Marcos Anatômicos (*Landmarks*) e Análise de Deformações.

Na descrição dos landmarks utilizados neste trabalho utilizou-se a terminologia mais difundida na descrição de pegadas de dinossáurio (Leonardi, 1987; Thulborn, 1990).

Também foi seguida uma metodologia de fácil reconhecimento visual dos landmarks; assim foram escolhidos os landmarks de I a VII e IX; os landmarks VIII e X foram seleccionadas (método descrito mais pormenorizadamente adiante) de forma a proporcionar uma distribuição mais homogênea de landmarks nos exemplares.

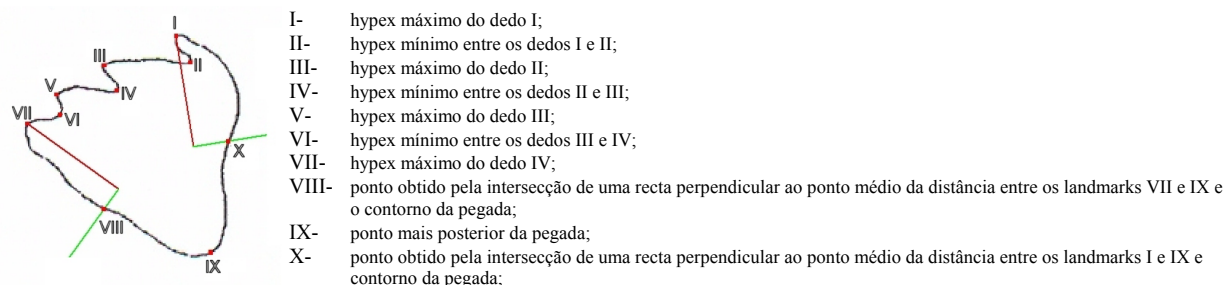


Figura 1 – Localização e descrição dos landmarks numa impressão de *Sauropodomorpha*.

Foram efectuados alguns efeitos de espelho (inversão) em pegadas ou seja foram todas analisadas como sendo pegadas de *pes* esquerdo (Tabela 1 com as indicações de inversão); assumiu-se neste trabalho que as pegadas são simétricas e que estamos comparando exemplares muito distintos de maneira que este argumento nos parece válido.

Em *Prosauropoda* os dedos apresentam rotação interna (relativamente ao eixo médio); o pé não apresenta rotação significativa. Em *Sauropoda* a rotação dos dedos é externa tal como a do pé relativamente ao eixo médio).

O exemplar 12 foi utilizado neste trabalho como pegada de *pes* de saurópode. Contudo, poderemos considerar que constitui uma mistura de caracteres morfométricos entre *pes* e *manus*.

Metodologia

Foram seguidas várias fases prévias e comuns aos diversos métodos utilizados.

- foram utilizadas silhuetas de pegadas de dinossáurio incluídas em artigos publicados. Em alguns exemplares na base para da elaboração da silhueta foram utilizadas fotos;
- escolha dos landmarks;
- digitalização das fotos e esquemas. Utilizou-se Scanner Hp 5470C;

Tabela 1– Lista dos exemplares de pegadas analisados neste trabalho, referência bibliográfica, localização e inversão.

REF.	IDADE	BIBLIOGRAFIA	LOCAL	INVERSÃO
1	Cretácico inf	Thulborn 1990	Texas - EUA	SIM(DIREITA)
2	Jurássico sup	Meyer <i>et al</i> 1994	Cabo Espichel - Portugal	NÃO
3	Jurássico sup	Santos in prep	Cabo Espichel - Portugal	SIM(DIREITA)
4	Jurássico sup	Santos in prep	Cabo Espichel - Portugal	NÃO
5	Jurássico sup	Santos in prep	Serra Bouro - Portugal	NÃO
6	Jurássico sup	Santos in prep	Serra Bouro - Portugal	NÃO
7	Jurássico sup	Santos <i>et al</i> 2000	Serra Bouro - Portugal	SIM(DIREITA)
8	Jurássico med	Santos <i>et al</i> 1994	Pedreira do Galinha - Portugal	SIM(DIREITA)
9	Jurássico sup	Lires 2000	Oviedo - ESPANHA	NÃO
10	Jurássico sup	Lires 2000	Oviedo - ESPANHA	SIM(DIREITA)
11	Jurássico sup	comunicação pessoal Corbal 2002	Oviedo - ESPANHA	NÃO
12	Jurássico sup	Thulborn 1990	EUA	SIM(DIREITA)
13	Jurássico sup	Lockley 1997	Arizona - EUA	SIM(DIREITA)
14	Jurássico sup	Lockley,1997	Arizona - EUA	SIM(DIREITA)
15	Jurássico sup	Lockley1997	Arizona - EUA	SIM(DIREITA)
16	Cretácico inf	Thulborn 1990	Texas - EUA	SIM(DIREITA)
17	Triásico sup	Thulborn 1990	Lesotho	SIM(DIREITA)
18	Triásico sup	Thulborn 1990	Lesotho	SIM(DIREITA)
19	Triásico sup	Thulborn 1990	Lesotho	SIM(DIREITA)
20	Jurássico	Thulborn 1990	Marrocos	SIM(DIREITA)
21	Cretácico inf	Woodhams Submt. Gaia 15	East Sussex, Inglaterra	SIM(DIREITA)
22	Cretácico inf	Woodhams Submt. Gaia 15	East Sussex, Inglaterra	SIM(DIREITA)

- tratamento digital (limpeza digital, efeitos de espelho em alguns exemplares) das imagens com Adobe Photoshop 6.0 (Adobe Systems Incorporated) e Paint Shop Pro 7.0 (Jasc Software 2001);
- cálculo de ponto médio entre landmarks I e IX e igualmente entre VII e IX. Posterior marcação de uma linha perpendicular aos pontos médios e marcação do ponto de intersecção daquela linha com o contorno da pegada. Estes cálculos foram efectuados com Microsoft Visio 2000;
- as coordenadas dos landmarks de cada exemplar foram obtidas com tpsDig 1.31 (Rohlf 2001);

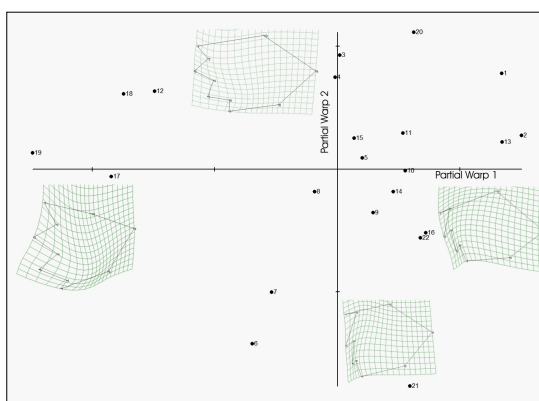


Figura 2– Diagrama de Componentes Principais para os escores dos dois primeiros Partial Warps (Relative Warps) e formas com escores positivos e negativos para cada um dos RW; variância observada para os três principais Relative Warps – RW1 34.62%, RW2 16.17%, RW3 14.63%; formas estimadas para cada sector do diagrama de Componentes Principais.

Resultados parciais

Os três principais RW explicam 65.43% de variação não-linear (localizada) na nossa amostra. Da análise de RW poderemos constatar que:

- Existem associações de exemplares em Partial Warp 1: 2, 13 e 1 com *escores* positivos; 19, 17, 12 e 18 com *escores* negativos;

- Existem duas associações de exemplares em Partial Warp 2: 20, 3 e 4 com *escores* positivos; 21, 6, 7 e 22 com *escores* negativos.

Aplicações em paleobiologia de Dinossáurios - osteologia

A recolha de dados morfométricos em três dimensões, utilizando-se Microscribe, incidiu fundamentalmente em material osteológico de *Ornithopoda*. Este trabalho que se realizou no *American Museum of Natural History* consistiu na recolha de coordenadas em 3D em falanges e metatarsos sobre 16 landmarks. Como complemento desta informação morfométrica foram igualmente recolhidas coordenadas de contornos, em espaçamentos de 2 mm. Esta metodologia tem como objectivos caracterizar morfometricamente o processo evolutivo de *autopodium* deste grupo e contribuir para uma melhor correlação com o seu registo icnológico.

Conclusões/perspectivas futuras

A aplicação dos métodos de Morfometria Geométrica a um conjunto de pegadas de *Sauropodomorpha* e autópodos de *Ornithopoda* permitiu:

- identificar e discriminar grupos morfológicos distintos em pegadas de dinossáurio analisadas ainda que exista uma grande variabilidade nos agrupamentos no Morfoespaço gerado; todavia existem agrupamentos ou exemplares extremos em termos morfológicos - *Prosauropoda* (17, 18 y 19)/Lockley 86 (12) *versus* *Brontopodus birdi* (1)/Arizona 28 (13)/ PMUA (2);
- verificar que a amostra analisada possui grande variabilidade em quase todos os landmarks; por este motivo o método mais adequado para analisar os exemplares será preferencialmente GPA;
- caracterizar de uma forma mais objectiva, através de uma descrição quantitativa, a actual classificação icnológica que é meramente descritiva.

Os resultados poderão ser aprofundados através da utilização e análise de Semi-Landmarks.

No estudo 3D pretende-se contribuir para uma identificação taxonómica mais restrita do dinossáurio responsável por determinado icnito/trilho, o que poderá constituir uma importante contribuição nesta área da Paleocnologia.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a: Professor F. James Rohlf (*Stony Brook University – New York*) a revisão e comentários ao estudo de Morfometria Geométrica da Icnologia de Dinossáurio; ao Dr. José Lires (*Universidad de Oviedo*) dois exemplares cedidos neste estudo; grupo NYCEP (*American Museum of Natural History – New York*) a cedência de MicroScribe e todo o apoio prestado na colecta de dados osteológicos em *Dinosauria*.

Bibliografia

- Bookstein, F. L. (1989a) - Principal warps: thin-plate splines and the decomposition of deformations, *IEEE trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 11(6):567-585.
- Bookstein, F. L. (1989b) - "Size and Shape": a comment on semantics. *Systematic Zool.*, 38:173-180.
- Bookstein F. L. (1990) - Introduction to methods for landmark data. Eds Rohlf F.J., Bookstein F.L. Proceedings of the Michigan morphometric workshop. Ann Arbor (Michigan): *Univ. Michigan Mus. Zool. Spec. Publ. 2*. p. 215-225.
- Bookstein F. L. (1993) - A brief history of the morphometric synthesis, p. 15-40. In Marcus, L. F., E. Bello, and A. Garcia-Valdecasas. (eds.). Contributions to morphometrics. *Museo Nacional de Ciencias Naturales*, Madrid, Spain. 264 p.
- Bookstein F. L. (1996) - Combining the tools of geometric morphometrics. In LF Marcus, M Corti, A Loy, GJP Naylor, D Slice (eds), Advances in Morphometrics, Proceedings of the 1993 NATO-ASI on morphometrics, Plenum Publ., *NATO ASI, Life Sciences*, New York, 131-151.
- Chapman, R. E. (1989) - R.F.T.R.A. Resistant-Fit Theta-Rho-Analysis. for IBM compatible computers. [Computer data analysis program]. Copyright Smithsonian Institution, Washington, D. C.
- Chapman, R. E. (1990) - Conventional Procrustes approaches. p. 251-267. In: F. J. Rohlf and F. L. Bookstein (eds.), Proceedings of the Michigan Morphometrics Workshop. Special Publication No. 2, *The University of Michigan Museum of Zoology*, Ann Arbor, Michigan.
- Dryden, I. L., & Mardia, K. V. (1998). Statistical shape analysis. *John Wiley & Sons*, New York.
- Farlow, J. O.; Pittman, J. G. & Hawthorne, J. M. (1989) - *Brontopodus birdi*, Lower Cretaceous sauropod footprints from the U. S. Gulf coastal plain, in Gillette, D. D. & Lockley, M. G. (eds), *Dinosaur Tracks and Traces*, Cambridge Univ. Press. 371-394.
- Kendall, D. G. (1984) Shape manifolds, procrustean metrics, and complex projective spaces. *Bull. Lond. Math. Soc.* 16: 81–121.
- Leonardi, G. (1987). Glossary and Manual of Tetrapod Footprint Palaeoichnology. *Depart. Nac. Produção Mineral*, Brasília, 75 p.
- Lires, J. (2000) - Icnitas de dinosaurios cuadrúpedos del Jurásico de Asturias. Morfometria, morfología e interpretación. *Memoria de Investigación*, Dept. Geol., Univ. Oviedo, 73 p.
- Lockley, M. G., & Mickelson, D. (1997) - Dinosaur and pterosaur tracks in the Summerville and Bluff (Jurassic) beds of eastern Utah and northeastern Arizona New Mexico. *Geological Society Guidebook*, 48th Field Conf. Four Corners Region 133-138.

- Lockley, M. G. & Hunt, A. P (1995) - Dinosaur tracks and other fossil footprints of the western United States. *Columbia Univ. Press*, 338 p.
- Lockley, M. G.; Hunt, A. P. & Meyer, C. A. (1994) - Vertebrate tracks and the ichnofacies concept: implications for paleoecology and palichnostratigraphy. *In: S. Donovan (ed.), The Paleobiology of Trace Fossils*, 241-268.
- Monteiro, L. R. & Reis, S. F. (1999) - Princípios de Morfometria Geométrica. *Holos Editora*, Ribeirão Preto (Brasil).
- Rohlf, F. J. (1993) - Relative warp analysis and an example of its application to mosquito wings. *In: Contributions to Morphometrics*, Marcus, L. F.; Bello, E. & Garcia-Valdecasas, A. (eds.). *Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC)*, Madrid, 8: 131-159.
- Rohlf, F. J. (1999) - Shape statistics: Procrustes superimpositions and tangent spaces. *Journal of Classification* 16: 197-223.
- Rohlf, F. J. & Marcus, L. F. (1993) - A revolution in morphometrics. *Trends Ecology and Evolution* 8: 129-132.
- Rohlf, F. J. & Slice, D. E. (1990) - Extensions of the Procrustes method for the optimal superimposition of landmarks. *Systematic Zool.*, 39: 40-59.
- Santos, V. F. (2003) – Pistas de dinossáurio no Jurássico-Cretácico de Portugal. Considerações paleobiológicas e paleoecológicas. *Tese Doutorado, Fac. Ciências Univ. Autónoma Madrid*, 365 p. (inédito).
- Santos, V. F. *et al.* (2000) - Pistas de dinossáurio do Kimeridgiano da Serra do Bouro, Portugal. *I Congresso Ibérico de Paleontologia/XVI Jorn. Soc. Espanhola de Paleontología*, Évora, 18-19.
- Santos, V. F. *et al.* (1994) - A new sauropod tracksite from the Middle Jurassic of Portugal. *GAIÁ*, 10: 5-13.
- Thompson, D. W. (1917) - On growth and form. *Cambridge Univ. Press*, London, 753 p.
- Thulborn, R. A. (1990) - Dinosaur Tracks. *Chapman & Hall*, London, 410 p.