ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS VERTEBRAIS POR MEIO DE PROCESSAMENTO INTELIGENTE DE IMAGENS APLICADO A ESTIMAÇÃO DE IDADE ÓSSEA

DIEGO R. MORAES[1], JOÃO PAULO B. CASATI[1], EVANDRO L. L. RODRIGUES[1]

1. *LAVISIM, Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade de São Paulo*
Avenida Trabalhador São-Carlense, 400, 13566-590, São Carlos-SP
E-mails: diego.moraes@usp.br, jpcasati@usp.br, evandro@sc.usp.br

Abstract— Bone age is an important cue for medical diagnosis, assisting the detection of bone abnormalities and the monitoring of the growth stages. The bone age can be obtained by the analysis of any bone or set of bones in human body. This paper presents a methodology for feature extraction of the third cervical vertebra concavity. The feature was represented by a polynomial and then it generated the area and maximum height of the concavity. The features were correlated with bone age reports by two methods: artificial neural networks and linear regression. In every analysis, the neural networks presented better results, achieving around 0.89 of correlation for both genders. The polynomial showed the best performance but in systems which computational cost can be a problem, the area and maximum height may be used because each one has just one input and achieved 0.88 of correlation, while the polynomial has five inputs.

Keywords— Intelligent image processing, computer vision, bone age, cervical vertebra.

Resumo— A idade óssea é uma informação importante para o diagnóstico médico, auxiliando na detecção de anormalidades ósseas e acompanhamento das fases de crescimento. A idade óssea podem ser obtida pela análise de qualquer osso ou conjunto de ossos no corpo humano. Este trabalho apresenta uma metodologia para extração e análise de características da concavidade da terceira vértebra cervical. As características das concavidades foram representadas por um polinômio que posteriormente permitiu identificar a área e máxima altura desta concavidade. As características foram correlacionadas com os laudos da idade óssea por meio de dois métodos: redes neurais artificiais e regressão linear. Para todas as análises, as redes neurais apresentou melhores resultados, alcançando em torno de 0,89 de correlação para ambos os sexos. O polinômio mostrou o melhor desempenho, mas em sistemas onde o custo computacional deve ser considerado, a área e a máxima altura podem ser utilizados com segurança, pois correspondem a apenas uma entrada e alcançaram correlação de 0,88, enquanto que o polinômio possui cinco entradas.

Palavras-chave— Processamento inteligente de imagem, visão computacional, idade óssea, vértebra cervical.

1 Introdução

A idade óssea é um indicador utilizado para verificar o estado de maturidade esquelética de um indivíduo. É considerado o registro mais fiel da idade biológica que nem sempre corresponde à idade cronológica, esta última baseada na data de nascimento. Esta informação é importante para o diagnóstico de anomalias ósseas e identificação dos estágios de desenvolvimento na pediatria, endocrinologia e ortodontia, assim como na estimação de idade na área forense. É obtida pela análise de qualquer osso ou conjunto de ossos do corpo humano, por meio de radiografia da região de interesse (ROI).

Existem métodos para estimação de idade óssea por meio de radiografias carpais, também conhecido como mão e punho (GREULICH; PYLE, 1959; TANNER; WHITEHOUSE, 1959; EKLOF; RINGERTZ, 1967; OLIVETE; RODRIGUES, 2010). E por telerradiografias em norma lateral, conhecido por cervical (LAMPARSKI, 1972; HASSEL; FARMAN, 1995; BACCETTI; FRANCHI; MCNAMARA, 2005; CALDAS; AMBROSANO; HAITER, 2007; SAN ROMÁN et al., 2002). A vantagem de se utilizar as cervicais como ROI é a redução de doses de radiação, pois esta radiografia faz parte da documentação do paciente em tratamentos ortodônticos, diferentemente dos métodos carpais que exigem uma exposição extra à radiação.

Aprofundando o conhecimento nos métodos das cervicais buscou-se compreender as morfologias e os estágios dos corpos vertebrais, bem como os processos e métricas utilizados. Após a compreensão destes conceitos, foi identificado que o crescimento da concavidade do bordo inferior das cervicais mostrou-se homogêneo (LAMPARSKI, 1972; HASSEL; FARMAN, 1995; BACCETTI; FRANCHI; MCNAMARA, 2005). Baseado nesta informação, Moraes et al. extraíram o polinômio que descreve a curva da concavidade do bordo inferior da terceira vértebra cervical (C3), identificando o comportamento da concavidade ao variar a faixa etária, utilizando esta característica para auxiliar a estimação de idade óssea. Posteriormente, Moraes, Casati e Rodrigues (2013) utilizaram os polinômios extraídos da concavidade do bordo inferior da C3, porém, neste momento utilizaram os coeficientes do polinômio (CP) e os adicionaram como entrada para uma rede neural artificial (RNA), correlacionando assim os coeficientes com a idade óssea.

A proposta deste trabalho utiliza o polinômio de forma indireta, ou seja, ao invés de utilizar os coeficientes do polinômio como entrada para algum método de estimação, os mesmos foram utilizados em transformações visando obter novas características. Como características foram selecionadas a área (AR) e a máxima altura (MA) da concavidade do bordo inferior da C3. A área da concavidade é uma característica inédita, porque torna-se inviável ou não trivial a sua extração de forma manual. A maior altura da concavidade não é uma nova informação, entretanto,

existe subjetividade nas metodologias atuais. Em contrapartida, este trabalho propõe a extração exata da maior altura, pois a mesma foi calculada por meio de métodos matemáticos com auxílio de processamento de imagens.

O trabalho foi dividido em duas partes. A primeira parte trata do processamento de imagem, responsável pela segmentação e extração de características da C3 obtidas por telerradiografias em norma lateral. A segunda parte é responsável pela estimação da idade óssea, que propõe um estudo para correlacionar tais características (CP, AR e MA) com a idade óssea por meio de duas ferramentas, redes neurais artificiais (RNA) e regressão linear múltipla (RLM). Entre as RNA pesquisadas para solução de problemas de aproximação universal de funções, foi selecionada a rede Perceptron Multicamadas (PMC). A escolha foi baseada na capacidade de mapear o comportamento de processos por intermédio de exemplos (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

2 Propósito

Os objetivos do trabalho são identificar qual característica ou combinações de características apresentam maior correlação com a idade óssea, assim como qual a melhor ferramenta para esta aplicação.

A motivação é impulsionada pela busca de meios alternativos mais simples e com maior precisão para a avaliação do crescimento e desenvolvimento dos seres humanos, assim como a melhora da qualidade de vida dos mesmos, reduzindo exposições extras a doses de radiação.

3 Métodos

Para a implementação do método proposto foi utilizada a plataforma MATLAB, incluindo o *Neural Network Toolbox* para treinamento da PMC. A escolha foi baseada na sua versatilidade, o que permite um desenvolvimento simples, rápido e eficiente. Na Figura 1 é apresentado um diagrama dos processamentos computacionais da metodologia proposta. A seguir os mesmos são descritos e exemplificados.

Figura 1. Sequência dos processos computacionais.

3.1 Base de Imagens

As imagens utilizadas são amostras de telerradiografias em norma lateral (Figura 2) pareadas com radiografias carpais, pertencentes a FOP/UNICAMP de Piracicaba.

Esta base é composta por 591 indivíduos (318 meninas e 273 meninos), com faixa etária entre 9 e 16 anos (Figura 3), reunidas de arquivos digitais de seis clinicas de Radiologia provenientes das regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste e Sul do Brasil. Todas as imagens estão laudadas. O laudo das telerradiografias foi obtido pelo método de Caldas, Ambrosano e Haiter (2007), e o laudo das radiografias carpais pelo método de Tanner e Whitehouse (TW3).

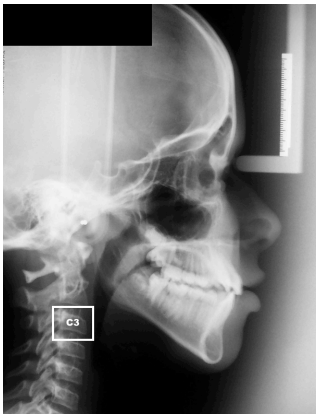

Figura 2. Amostra de telerradiografias com destaque na C3.
Fonte: Moraes, Casati e Rodrigues (2013).

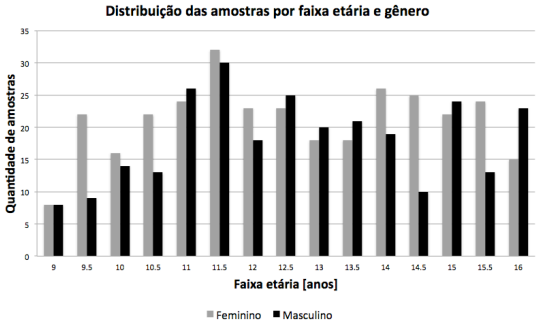

Figura 3. Distribuição das amostras por faixa etária e gênero.
Fonte: Moraes, Casati e Rodrigues (2013).

3.2 Extração de Características

Segmentação da concavidade: antes da segmentação é necessária uma única interação do usuário, trata-se da demarcação da concavidade (Figura 4a). Este procedimento pode ser realizado com auxílio de qualquer editor de imagem, desde que seja realizado na cor branca, com espessura de 1 pixel e sem uso de filtro *antialising* (MORAES et al., 2012). Em seguida, a imagem é facilmente segmentada e binarizada (Figura 4b) pelo maior *threshold* identificado na imagem (GONZALEZ; WOODS; EDDINS, 2009).

Extração dos pontos: para coletar os pontos da concavidade, foi implementado um procedimento que realiza varreduras verticais na imagem a procura dos pixels brancos (concavidade) e armazena as suas coordenadas (x,y) em dois vetores, Figura 4c (MORAES et al., 2012).

Parametrização: para comparar os polinômios com maior precisão é necessário que os mesmos estejam com a mesma dimensão, alinhados entre si e no eixo de coordenadas (0,0). Para isto foram desenvolvidas rotinas que utilizam matriz de rotação,

translação e escala, todas advindas de métodos de computação gráfica (FOLEY et al., 1990). No final é realizada uma nova amostragem a fim de padronizar as amostras, Figura 4d (MORAES et al., 2012). Este procedimento é necessário para que os polinômios sejam extraídos de forma padronizada, caso contrário não seria possível investigar e identificar o comportamento dos mesmos.

Identificação do polinômio: são extraídos os coeficientes do polinômio de 4º grau (equação 1) pela função "*polyfit*" do MATLAB, que por meio do ajuste de curva polinomial identifica os coeficientes pelo método dos Mínimos Quadrados (Figura 4e). A escolha do grau foi baseada na morfologia da concavidade e comprovada pela ferramenta "*splinetool*" do MATLAB, que permite analisar o erro entre o polinômio e a curva real de acordo com o grau desejado (MORAES et al., 2012).

$$f(x) = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e \qquad (1)$$

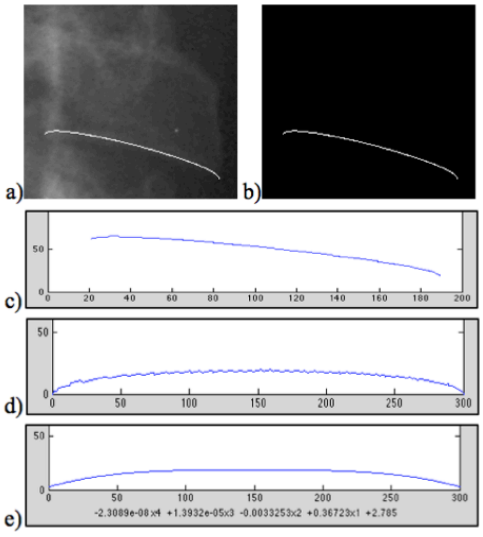

Figura 4. Exemplo da sequência dos processos computacionais.
(a) demarcação da concavidade da C3; (b) binarização;
(c) extração de características; (d) rotação, escala e translação;
(e) extração e aproximação para o polinômio de 4º grau.

Uso indireto do polinômio: foram investigadas duas características: no primeiro momento calculou-se a área da concavidade da C3 (AR); e no segundo momento a maior altura desta concavidade (MA). Para extrair a área baseada no polinômio foi aplicada uma integral definida. Este processo é demonstrado na Figura 5 e equação 2.

$$AR = \int_a^b f(x)\, dx \qquad (2)$$

sendo *f(x)* os coeficientes do polinômio (equação 1), *a* e *b* são os limites (inferior e superior), que para o domínio utilizado são 0 e 300 respectivamente, devido a parametrização realizada. Portanto AR retorna a área abaixo da curva.

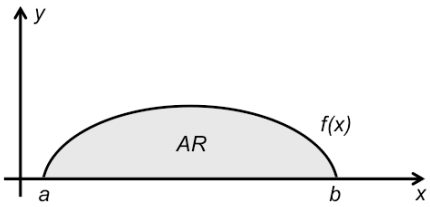

Figura 5. Identificação da área abaixo da concavidade.

Para extrair a maior altura aplica-se uma derivada no polinômio e iguala-se a zero pra encontrar as raízes, obtendo assim os pontos críticos. Por fim, dentre os pontos críticos é identificado o ponto de máximo local do polinômio, este último representa a maior altura da concavidade. Este processo é demonstrado na Figura 6 e na equação 3.

$$MA = f'(x) = 0 \quad \text{ou} \quad MA = \frac{df}{dx}(x) = 0 \qquad (3)$$

sendo *f'(x)* a derivada dos coeficientes do polinômio (equação 1), e MA retorna a maior altura da curva.

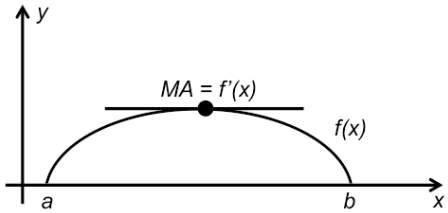

Figura 6. Identificação da máxima altura da concavidade.

3.3 Rede Neural Artificial

Como entrada para a RNA dispõe-se de três parâmetros, são eles: CP, AR e MA. Para mapear o CP, cada coeficiente foi utilizado como um sinal de entrada da rede, assim, a topologia contou com cinco entradas, x_1 a x_5, normalizadas pelo valor máximo de cada coeficiente. Em contrapartida, para a AR e MA basta uma única entrada, x_1, normalizada pelo máximo valor do seu respectivo parâmetro.

Para a seleção da topologia partimos da premissa de que a topologia de rede PMC para problemas de aproximação universal de funções pode ser constituída por apenas uma camada neural escondida (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010). Sendo assim, a mesma variou de 1 a 20 neurônios, dispondo de vinte diferentes topologias a serem testadas. A função de ativação utilizada foi a tangente hiperbólica.

Na camada de saída foi utilizado apenas um neurônio com função de ativação linear. A saída da rede é a idade óssea, também normalizada, calculada a partir da média dos laudos advindos da base fornecida, e será denominado "média dos laudos". Os pesos sinápticos e os limiares de ativação foram iniciados com números aleatórios entre 0 e 1. A arquitetura e as topologias são representadas na Figura 7.

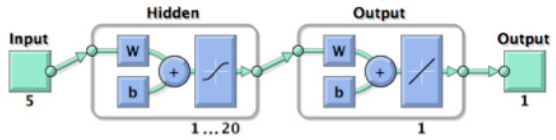

Figura 7. Arquitetura PMC e topologias testadas.
Fonte: Adaptado do *toolbox* de RNA do MATLAB.

A etapa de treinamento foi supervisionada. O algoritmo utilizado para o treinamento *backpropagation* foi a otimização de Levenberg-Marquardt (HAGAN; MENHAJ, 1994), função "*trainlm*" do MATLAB. O valor para o parâmetro taxa de aprendizagem foi definido como 0,01 e a precisão requerida foi de 10^{-5}.

As amostras utilizadas no processo de treinamento foram divididas em três conjuntos de forma aleatória. O primeiro com 70% das amostras corresponde ao conjunto de treinamento. O segundo, com 15% das amostras, refere-se ao conjunto de validação. O último dispõe de 15% das amostras e representa o conjunto de teste, que não foi utilizado no processo de treinamento.

Um algoritmo automatizado foi implementado em Moraes, Casati e Rodrigues (2013) para executar 20 treinamentos para cada uma das 20 topologias candidatas (que variaram de 1 a 20 neurônios na camada escondida, como mostrado na Figura 7). Portanto, a cada execução desta rotina foi realizado um total de 400 treinamentos. Para cada um dos 400 treinamentos foram armazenados diversos parâmetros: erro quadrático médio (EQM), erro relativo médio (ERM), erro entre cada época (gradiente), correlação (r), número de neurônios, número de épocas, entre outros. No final da rotina, ao analisar todos os parâmetros disponíveis, a correlação foi o parâmetro que apresentou variações mais significativas. Portanto, o critério de seleção da melhor topologia foi o maior valor de correlação (r_{max}), aplicado apenas no conjunto de testes das amostras.

4 Resultados

Considerando as três características investigadas, coeficientes do polinômio (CP), área (AR) e máxima altura (MA), onde foram analisadas de forma individual, ou seja, a cada execução da rotina de treinamento da rede, a mesma recebeu como entrada uma das três características. Posteriormente, como entrada para a rede, as características foram testadas de forma combinada. A Tabela 1 exibe os valores de correlação (r) para as características individuais.

Para a Tabela 1 vale ressaltar duas observações: a primeira é que em todas as análises a RNA mostrou-se superior à RLM, isto justifica o seu uso neste tipo de problema. A segunda observação é que os coeficientes do polinômio mostraram maior correlação para ambos os gêneros do que as demais características, área e maior altura. Os valores alcançados foram de 0,8914 e 0,8921, para o sexo masculino e feminino respectivamente.

Tabela 1. Correlação para cada característica, ferramenta e gênero.

Características	Masculino		Feminino	
	RNA	RLM	RNA	RLM
CP	0,8914	0,7299	0,8921	0,7230
AR	0,8853	0,7160	0,8867	0,7400
MA	0,8844	0,7170	0,8810	0,7415

Visando aumentar a correlação e/ou investigar alguma discrepância entre as características, realizou-se combinações entre as características. Os valores de correlação (r) são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Correlação para combinações de características, ferramenta e gênero.

Características	Masculino		Feminino	
	RNA	RLM	RNA	RLM
CP e AR	0,8961	0,7303	0,8839	0,7080
CP e MA	0,8840	0,7298	0,8607	0,7174
AR e MA	0,8994	0,7143	0,8781	0,7302
CP, AR e MA	0,8876	0,7302	0,8847	0,7063

Como pode ser observado na Tabela 2, novamente os valores da RLM são inferiores a RNA, reforçando assim o uso de RNA para este tipo de aplicação. Ao analisar a Tabela 2 identifica-se que para o sexo masculino a melhor combinação foi "AR e MA" atingindo correlação de 0,8994, e para o sexo feminino foi "CP e AR" com 0,8839. Analisando estes valores observa-se um ganho muito pequeno para o sexo masculino (apenas na terceira casa decimal), porém, uma pequena perda para o sexo feminino (na segunda casa decimal).

Portanto, avaliando-se a Tabela 2 em conjunto com a Tabela 1, observa-se que nenhuma das combinações de características para ambos os gêneros foram maiores que o CP, justificando assim o seu uso. Isto é fácil de comprovar pois para ambos os gêneros em nenhum momento foram atingidos valores superiores a 0,89, valor este encontrado apenas pela característica CP.

Vale ressaltar que o fato da AR e MA não aumentar a correlação não é ruim, pois também não a prejudica. Para métodos em que o número de entradas está relacionado diretamente com o custo de processamento, essas duas características (AR ou MA) podem ser utilizadas ao invés dos cinco coeficientes do polinômio (CP). Em contrapartida, como AR e MA são calculadas por derivadas e integrais baseadas no CP, deve-se adicionar também este processamento ao custo computacional.

Para a escolha da melhor topologia foi utilizado como entrada o CP, pois proporcionou a maior corre-

lação para ambos os gêneros. A Tabela 3 apresenta informações da melhor topologia para cada sexo assim como demais informações referentes ao treinamento das respectivas topologias.

Tabela 3. Informações referentes ao treinamento da melhor topologia para cada gênero.

Dados de Treinamento	Masculino	Feminino
Nº do melhor treinamento	1	7
Nº de neurônios	8	12
Nº de épocas	9	10
Nº de amostras*	41	48
*r**	0,8914	0,8921
EQM*	$2{,}1 \times 10^{-3}$	2×10^{-3}
ERM*	6,64%	6,45%
Gradiente	$7{,}13 \times 10^{-4}$	$1{,}96 \times 10^{-4}$

O número do melhor treinamento indica qual dentre os vinte treinamentos realizados pela topologia selecionada apresentou maior valor para correlação. Este foi utilizado para recuperar o restante das informações.

A quantidade de neurônios, 8 e 12, são considerados eficientes pois representam baixo esforço computacional. Um número elevado de neurônios ocasiona *overfitting*, que para o conjunto de treinamento produz EQM pequeno, entretanto em relação ao conjunto de testes é bastante significativo, prejudicando a capacidade de generalização. Em contrapartida, frente à precisão requerida, um número reduzido de neurônios é insuficiente para identificar o comportamento do processo, denominado *underfitting* (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

O número de épocas está dentro do esperado, 9 e 10, devido ao algoritmo de aprendizagem com otimização de Levenberg-Marquardt, considerado de rápida convergência para problemas de aproximação de função. Para este cenário, um número de épocas muito elevado indica que o número de neurônios está errado ou que as variáveis de entrada não tem relação com a saída desejada.

O número de amostras, 41 e 48, refere-se a quantidade de amostras disponíveis para cada gênero no conjunto de teste.

As topologias testadas para ambos os gêneros foram capazes de manter o fator de correlação em torno de 0,89, resultado este considerado eficaz, evidenciando que existe correlação forte e positiva das saídas desejadas com as obtidas.

Os dados referentes aos erros (EQM, ERM e Gradiente), foram extraídos considerando apenas o conjunto de teste, visando identificar a capacidade de generalização. Também estão dentro do previsto para aplicações de RNA para este tipo de arquitetura, em torno de 10^{-3} e 10^{-4}.

5 Conclusões

Este trabalho apresentou uma proposta para a extração de características da concavidade do bordo inferior da C3, que por meio de uma representação numérica da concavidade foi extraído um polinômio de 4º grau. Apesar de um dos seus procedimentos ocorrer de forma dirigida (demarcação da concavidade), foi capaz de proporcionar outras duas novas características, a área e máxima altura da concavidade, ambas de forma automática e precisa, isentas de subjetividade. Portanto, o polinômio pode ser utilizado de forma direta (CP: coeficientes do polinômio) e indireta (AR: área e MA: máxima altura) em métodos de estimação de idade óssea.

As três características (CP, AR e MA) foram investigadas individualmente e por meio de combinações entre si por duas ferramentas, RNA e RLM. Independente das características e/ou gênero, para todas as análises os valores de correlação da RNA foram superiores aos da RLM, justificando assim o seu uso como uma ferramenta eficiente e de baixo custo computacional para este tipo de aplicação. Isto permite que metodologias já desenvolvidas possam ser analisadas por RNA aumentando a correlação e precisão nas estimativas.

A característica que apresentou maior correlação foi o CP, com valores em torno de 0,89 para ambos os gêneros. Entretanto, para métodos em que um maior número de entradas eleva consideravelmente o custo de processamento, as duas características (AR ou MA) podem ser utilizadas com boa precisão, pois obtiveram valores de correlação em torno de 0,88.

Analisando os erros das saídas desejadas frente às saídas da rede, os mesmos também podem ser considerados baixos, dentro dos valores esperados para as aplicações deste tipo de problema, onde, considerando a média para ambos os gêneros, obteve-se valores para o EQM de 2×10^{-3} e ERM de 6,55%.

Como trabalho futuro fica a proposta de se testar as características extraídas da concavidade (CP, AR e MA) em conjunto com outras características da literatura, verificando assim a contribuição que essas características podem oferecer para outros métodos de estimação de idade óssea.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a CAPES pelo apoio financeiro à pesquisa, assim como ao Prof. Dr. Francisco Haiter Neto da FOP/UNICAMP pela contribuição na disponibilização da base de imagens.

Referências Bibliográficas

Baccetti, T., Franchi, L. and McNamara Jr., J. (2005). The cervical vertebral maturation (cvm) method for the assessment of optimal treatment timing in dentofacial orthopedics. Seminars in Orthodontics, vol. 11, pp. 119–129.

Caldas, M., Ambrosano, G. and Haiter-Neto, F. (2007). New formula to objectively evaluate skeletal maturation using lateral cephalometric radiographs. Braz Oral Res, vol. 21, pp. 330-335.

Eklof, O. and Ringertz, H. (1967). A method for assessment of skeletal maturity. Annals Radiology, vol. 10, pp. 330–336.

Foley, J.D., Van Dam, A., Feiner, S. and Hughes, J. (1990). Computer Graphics: Principles and Practice, 2nd ed, Reading, Addison-Wesley, MA.

Greulich, W. and Pyle, S. (1959). Radiographic atlas of skeletal development of the hand and wrist. Stanford University Press, Stanford.

Gonzalez, R., Woods, R. and Eddins, S. (2009). Digital Image Processing Using Matlab, 2nd ed, Gatesmark Publishing, USA.

Hagan, M. and Menhaj, M. (1994). Training feedforward networks with the marquardt algorithm. Neural Networks, IEEE Transactions on, vol. 5, no. 6, pp. 989–993.

Hassel, B. and Farman, A. (1995). Skeletal maturation evaluation using cervical vertebrae. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, vol. 107, pp. 58–66.

Lamparski, D. (1972). Skeletal age assessment utilizing cervical vertebrae. Pittsburgh.

Moraes, D.R. et al. (2012). Estimação de idade óssea cervical: uso de polinômio para identificar o comportamento da concavidade da C3. XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica. SBEB, Porto de Galinhas.

Moraes, D.R., Casati, J.P.B. and Rodrigues, E.L.L. (2013). Analysis of polynomial behavior of the C3 cervical concavity to bone age estimation using artificial neural networks. 4th IEEE Biosignals and Biorobotics Conference. BRC/ISSNIP, Rio de Janeiro.

Olivete, C. and Rodrigues, E.L.L. (2010). Bone maturity: estimation by means of Eklof and Ringertz method simplifications. Radiol Bras, vol. 43, pp. 13–18.

San Román, P., Palma, J., Oteo, M. and Nevado, E. (2002). Skeletal maturation determined by cervical vertebrae development. European Journal of Orthodontics, vol. 24, pp. 303–311.

Silva, I., Spatti, D. and Flauzino, R. Redes Neurais Artificiais para engenharia e ciências aplicadas: curso prático, 1st ed, Artliber.

Tanner, J. and Whitehouse, R. (1959). Standard for skeletal maturation. International Children's Center, Paris.

Tanner, J., Healy, M., Goldstein, H. and Cameron, N. (2001). Assessment of skeletal maturity and prediction of adult height (TW3 Method), 3rd ed, W.B. Saunders.