



MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA APROXIMAÇÃO DO DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO DE ÁRVORES DE REGIÕES DE MANGUE VIA ESCANEAMENTO TRIDIMENSIONAL A LASER

Gisele Goulart Tavares, Thales Luís Rodrigues Sabino, Leonardo Goliatt da Fonseca

{giselegoulart, tluis}@ice.ufjf.br

leonardo.goliatt@ufjf.edu.br

Universidade Federal de Juiz de Fora - Faculdade de Engenharia

Campus Universitário, São Pedro, 36036-330, Juiz de Fora, MG, Brasil

Filipe O. Chaves, Beatriz Cotrim

{fochaves, beatrizcotrimbfv}@gmail.com

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - Faculdade de Oceanografia

Rua São Francisco Xavier, 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Abstract. *O inventário florestal é um documento importante para pesquisadores da área da ecologia florestal. Ele contém informações qualitativas e quantitativas de uma floresta de interesse. Dentre as informações apresentadas estão os chamados parâmetros estruturais como: a espécie, o diâmetro dos troncos, altura, área basal, densidade da madeira e geolocalização, além de outras informações que se fizerem relevantes. Este trabalho tem como objetivo a análise de três métodos computacionais para determinação do DAP a partir de dados provenientes de escaneamento tridimensional a laser de indivíduos de uma região de mangue. A partir da nuvem de pontos, a seção transversal do caule a aproximadamente 1,30m do solo foi modelada por círculos, elipses e splines e seu diâmetro calculado em seguida. As aproximações obtidas foram comparadas com as mensurações realizadas em campo e apresentaram bons resultados. A metodologia proposta se mostrou promissora por apresentar um valor baixo de erro percentual e pelo ajuste satisfatório da geometria das árvores. Além disso, ela assiste na apuração dos parâmetros estruturais e possibilita a redução dos trabalhos em campo.*

Keywords: *Escaneamento a laser, DAP, Inventário florestal, Manguezal*

1 INTRODUÇÃO

Os manguezais são ecossistemas costeiros que ocorrem em regiões tropicais e subtropicais do mundo, ocupando áreas entre marés, portanto, um ecossistema pantanoso (Menezes et al., 2008). Os manguezais estão entre os ecossistemas mais produtivos em termos de sequestro de carbono da atmosfera (Feliciano et al., 2014), logo, quantificar o estoque de carbono das florestas de mangue é de suma importância no estudo do ciclo do carbono e sua influência no clima do planeta.

O LiDAR, do inglês *Light Detection and Ranging*, é uma tecnologia de sensoriamento remoto ativa que mede propriedades de luz refletida para determinar a distância de um objeto afastado. Essa distância é calculada através da medição do atraso entre a transmissão de um pulso laser e a detecção do sinal refletido (Lesky et al., 2002). Devido a capacidade de gerar dados tridimensionais com alta densidade, essa tecnologia está cada vez mais sendo utilizada no campo da ecologia (De Pádua Chaves E Carvalho et al., 2015), geomorfologia (Glenn et al., 2006), sismologia (Lee et al., 2009) e sensoriamento remoto (Brandtberg et al., 2003).

Recentemente, o escaneamento terrestre a laser (TLS) se tornou uma importante ferramenta para adquirir dados tridimensionais de florestas, dada sua capacidade de mapear uma grande área de floresta em um tempo bastante reduzido. O resultado do mapeamento é uma nuvem de pontos 3D que representa com precisão a área escaneada. Por este motivo o uso de TLS para aferição de características florestais, apesar de relativamente recente, tem se mostrado promissor no campo da ecologia computacional. Contudo, mesmo com a precisão dos escâneres atuais, o resultado do processo continua sendo uma nuvem de pontos desconexa, sem informação estrutural ou identificação dos objetos escaneados. Um exemplo de um trecho de floresta obtida através de um equipamento TLS é mostrado na Figura 1.

O estudo da relação entre forma e tamanho de seres vivos é conhecido como alometria. A determinação da biomassa de uma floresta utilizando parâmetros estruturais é, portanto, conhecido como abordagem alométrica. Os modelos matemáticos obtidos através da aplicação da abordagem alométrica são chamados de equações alométricas. No estudo de florestas, essas equações procuram relacionar a forma dos indivíduos com a sua biomassa, de forma a obter uma estimativa para a biomassa em uma grande área de floresta. Um dos problemas com a abordagem alométrica é o trabalho de campo intensivo necessário para levantar os parâmetros de interesse. Além disso, esses parâmetros estão sujeitos a erros de medição que variam entre 10% e 15% (Chave et al., 2005). Outro agravante é que modelos alométricos tendem a ser específicos para uma certa região, dessa forma, reduzir o custo da obtenção de tais modelos é de extrema importância para que mais florestas possam ser estudadas e sua biomassa determinada.

A obtenção de relações alométricas entre o diâmetro na altura do peito (DAP) e a biomassa de uma floresta foram reportados por diversos pesquisadores (Fu and Wu, 2011; Clough and Scott, 1989; Ong et al., 2004; Feliciano et al., 2014; Tavares et al., 2015). O objetivo deste trabalho é a análise de três métodos computacionais para determinação do DAP de indivíduos de florestas de mangue obtidos por TLS. O DAP foi calculado para 16 indivíduos com espécies distribuídas entre *Avicennia Schaueriana*, *Laguncularia Racemosa* e *Rhizophora Mangle* através do ajuste de círculos, elipses e *splines*. Os erros foram obtidos e comparados com o valor do DAP medido em campo e são analisados os coeficientes de correlação (R^2), raiz quadrada do erro quadrático médio (RQME) e média das diferenças absolutas (MDA). Apesar da conveniência da utilização de equipamentos de TLS, deve-se levar em conta a vasta quantidade

de dados produzida. É evidente que quanto maior a quantidade de dados, maior será o tempo necessário para efetuar o processamento computacional das nuvens de pontos obtidas. Também é objetivo deste trabalho a análise do impacto que a densidade de pontos tem na determinação do DAP através do ajuste de formas geométricas.

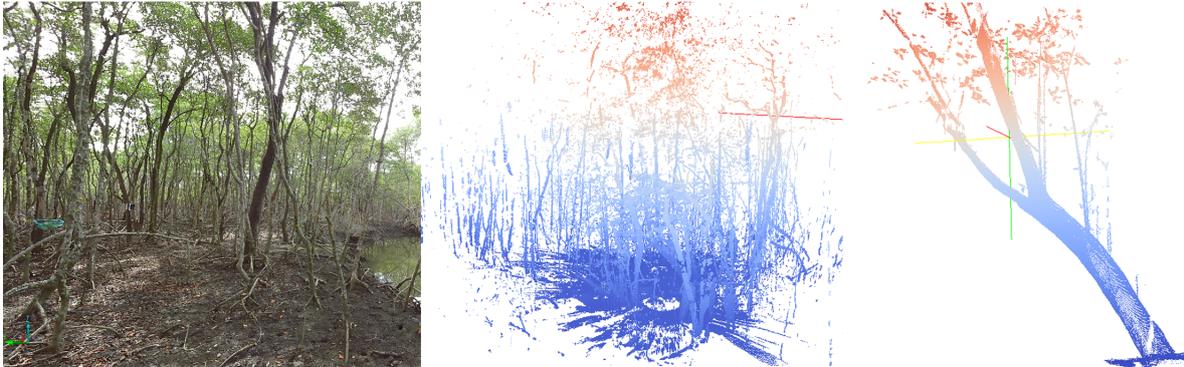


Figura 1: Manguezal, nuvem de pontos e árvore segmentada.

O estudo realizado neste trabalho visa contribuir com o desenvolvimento de um método computacional que possa extrair informações relevantes sobre a estrutura de indivíduos de manguezais para auxílio em atividades de pesquisa em ecologia de florestas. A avaliação da melhor forma de aproximação do DAP mostrada tem por objetivo colaborar com um projeto em desenvolvimento de um sistema aplicado que faz uso de métodos computacionais para auxiliar em atividades de pesquisa sobre inventários florestais. A Figura 2 mostra em destaque a etapa do processo onde ocorre a atuação deste trabalho. Espera-se contribuir também com as etapas de Visualização e Processamento com os estudos aqui realizados.

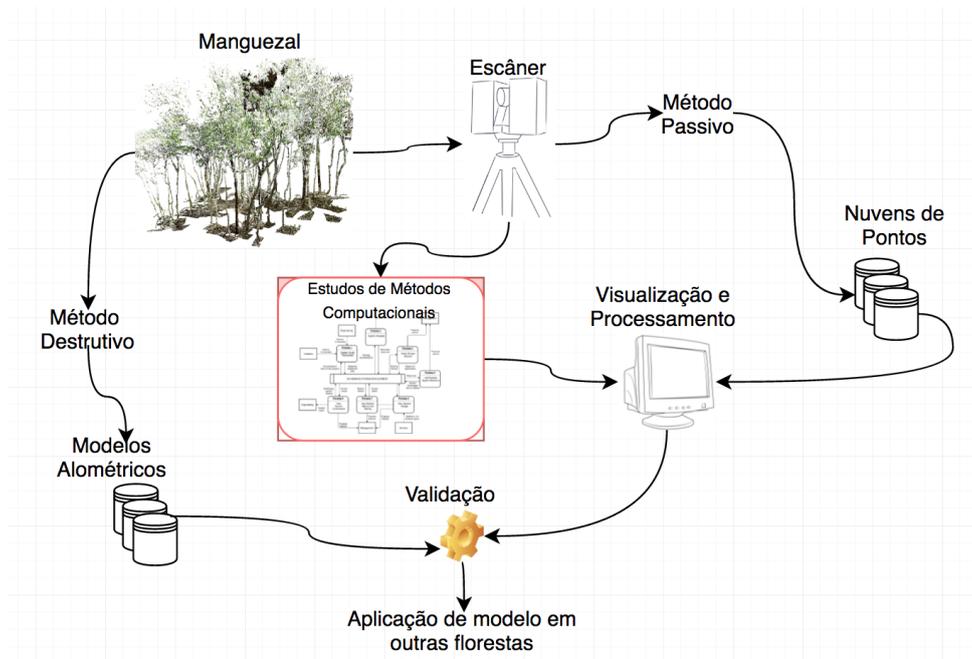


Figura 2: Fluxo de dados na realização de estudos em ecologia envolvendo métodos computacionais. Destacado na figura encontra-se a etapa de contribuição deste trabalho no estudo de métodos computacionais para extração de parâmetros de interesse a partir de nuvens de pontos de florestas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A área de estudo, mostrada na Figura 3, é a Reserva Biológica de Guaratiba (RBG) uma unidade de conservação que engloba um complexo de florestas de mangue com área total de 28,3 km², sendo 20,9 km² de florestas de mangue e 7,4 km² de planícies hipersalinas (Almeida, 2007). Estão presentes ao fundo da baía de Sepetiba, na sua porção leste, que se localiza no litoral sul, a sudoeste do Estado do Rio de Janeiro compreendida entre os paralelos 22° 53' S e 23° 05' S e os meridianos 043° 33' W e 044° 01' W. Neste complexo situa-se o campo experimental do laboratório NEMA/UERJ que possui diversos estudos desenvolvidos ao longo dos últimos 20 anos em ecologia de manguezais.

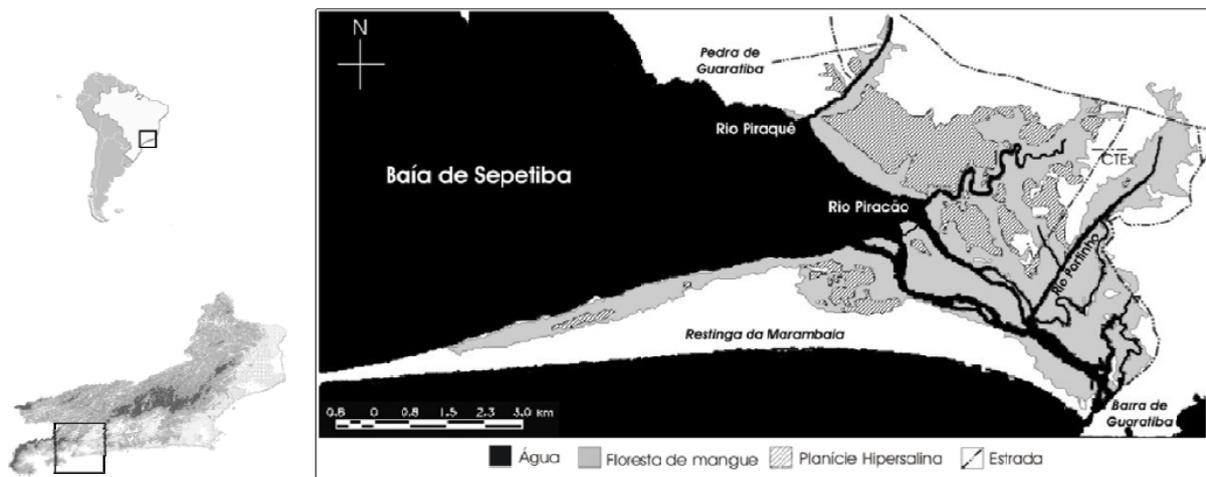


Figura 3: Visão geral da região de estudo.

2.2 Obtenção dos Dados

O equipamento de TLS adquire uma nuvem de pontos tridimensional a partir de uma posição fixa. Isso quer dizer que, em boa parte dos casos, é necessária a realização de mais de uma leitura, e as nuvens de pontos geradas devem passar por um processo de consolidação, obtendo uma nuvem de pontos que possui dados que cobrem todas as áreas de interesse. Esse processo de consolidação é conhecido como registro de nuvem de pontos. Em alguns casos, duas ou três leituras podem ser suficientes, por exemplo, em aplicações de inspeção de construções ou análise forense. Na aplicação apresentada, deve-se levar em consideração que florestas de mangue não apresentam uma estrutura organizada, fazendo com que um número maior de leituras seja necessária para capturar todos os lados de todas as árvores.

É importante notar que quanto maior o número de leituras efetuadas, maior é a densidade de pontos gerada pelo equipamento. No entanto, esse aumento de densidade implica em um maior tempo de uso do escâner. É importante tentar reduzir esse número de forma a reduzir também o tempo necessário para obtenção dos dados e, conseqüentemente, reduzir o tempo necessário para fazer o processamento dos dados.

Para o mapeamento da região de mangue o equipamento escolhido foi o TLS FARO Laser Scanner Focus 3D, adequado para escaneamentos a grandes distâncias, que realiza uma leitura



Figura 4: Comparação do número de leituras (1 leitura na extrema esquerda até 6 leituras na extrema direita) realizadas no indivíduo 7 da RBG. Conforme o aumento das cenas é possível ver de maneira mais detalhada a estrutura da árvore, com nuvens de pontos com estrutura bastante semelhante para 4, 5 e 6 leituras.

de 360° em torno de seu eixo horizontal e 305° em torno do eixo vertical. As demais especificações técnicas são mostradas na Tabela 1. O escâner consegue capturar de forma satisfatória a estrutura das árvores, possibilitando boa visualização de galhos e folhas.

Foram escaneadas 16 árvores da Reserva Biológica de Guaratiba, sendo 4 da espécie *Avicennia Schaueriana*, 1 *Laguncularia Racemosa* e 11 *Rhizophora Mangle*, como mostrado na Tabela 2. Para cada indivíduo da área monitorada foram realizadas de 1 a 6 leituras a partir de pontos fixos pré-estabelecidos, de forma que a área monitorada estivesse bem representada sob vários ângulos.

Houve a variação do parâmetro relativo ao número de leituras a fim de avaliar a representação tridimensional da estrutura arbórea e a relação entre o número de cenas capturadas e os melhores ajustes. Após o escaneamento o software Scene, desenvolvido para o FARO Focus 3D, foi utilizado para a digitalização dos dados obtidos, processamento e individualização das árvores.

Para demonstrar a quantidade de dados que foi gerada no experimento realizado, a quantidade de pontos dos indivíduos foi somada para cada quantidade de leituras efetuadas. Esses valores podem ser vistos na Figura 5. Como pode ser visto, o número de pontos varia de aumento consideravelmente a medida que o número de leituras também aumenta.

2.3 Métodos

Entre as tarefas realizadas no trabalho de campo feito na área de estudo, foi feito o levantamento do DAP das 16 árvores que foram escaneadas. Esse valor será usado como base nas comparações com os valores calculados a partir das nuvens de pontos.

O primeiro passo para calcular o DAP a partir da nuvem de pontos é determinar os pontos



Figura 5: Comparação do número de leituras (1 leitura na extrema esquerda até 6 leituras na extrema direita) realizadas no indivíduo 7 da RBG. Conforme o aumento das cenas é possível ver de maneira mais detalhada a estrutura da árvore, com nuvens de pontos visualmente semelhantes para 4, 5 e 6 leituras.

que estão a 1.30m do chão. A partir desses pontos uma forma geométrica conhecida é ajustada e então o valor do diâmetro é calculado e comparado. Para determinar esses pontos o seguinte procedimento é realizado

1. Estabelecimento da altura de onde os pontos vão ser extraídos: $h = 1.30m$ e do valor de tolerância $\Delta h = 0.009m$;
2. Para cada ponto $\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)$ da nuvem de pontos é verificado se $|p_z - h| < 0.009$, ou seja, se o ponto encontra-se em uma região em torno de 1.30m de altura do chão;

O valor de tolerância foi escolhido de forma empírica baseado na densidade de pontos colhidos pelo escâner. Os pontos que passam nessa verificação são considerados os pontos que correspondem ao local onde a medição do DAP foi realizada e as formas geométricas serão ajustadas nesse subconjunto de pontos.

Tabela 1: Especificações técnicas do FARO Laser Scanner Focus 3D

FARO Laser Scanner Focus 3D	
Classe	Classe de laser 1
Alcance	0.6 - 330m
Velocidade de aquisição	976000 pontos/segundo
Precisão	$\pm 2mm$
Peso	5.2kg

Tabela 2: Relação das espécies estudadas

Rótulo	Espécie	Rótulo	Espécie
1	Avicennia schaueriana	30	Rhizophora mangle
7	Avicennia schaueriana	38	Rhizophora mangle
10	Avicennia schaueriana	43	Rhizophora mangle
11	Avicennia schaueriana	47	Rhizophora mangle
17	Laguncularia racemosa	50	Rhizophora mangle
19	Rhizophora mangle	52	Rhizophora mangle
21	Rhizophora mangle	82	Rhizophora mangle
22	Rhizophora mangle	92	Rhizophora mangle

Com o objetivo de orientar os pontos filtrados na direção de maior variação, foi feito uso na análise de componentes principais (PCA) de forma que a direção de maior variação fique orientada no eixo-x e a de menor variação no eixo-z.

A fim de determinar a forma ajustada cujo diâmetro melhor se aproxima do DAP medido em campo, é necessário, a partir dos pontos filtrados encontrar uma maneira de determinar os parâmetros das formas a serem ajustadas. Neste trabalho foram escolhidas as formas círculo, elipse e *spline*. Cada método será detalhado a seguir.

Ajuste do Círculo

Para realizar o ajuste de um círculo no conjunto de dados filtrado, os pontos extremos são escolhidos com o intuito de descobrir o tamanho C da corda que liga esses dois pontos. A menor distância entre o segmento de reta que liga os extremos até os demais pontos a serem utilizados para a aproximação é calculada, de maneira que a maior delas, chamada de flecha F , também aparece como parâmetro na Equação 1 definida por:

$$R = \frac{\left(\left(\frac{C}{2}\right)^2 + F^2\right)}{(2F)} \quad (1)$$

onde C é chamado de tamanho da corda e F de flecha e R é o raio que será usado na comparação com o DAP medido em campo.

Ajuste da Elipse

O ajuste da elipse no conjunto de pontos é feito da seguinte forma:

1. O baricentro dos dados é determinado;
2. O ângulo de rotação em torno do centro que melhor se ajuste aos pontos recebidos como parâmetro é encontrado;
3. O tamanho dos eixos maior e menor é estabelecido;
4. A elipse aproximada é calculada utilizando centro, ângulo de rotação e eixos obtidos anteriormente.

Ajustes da Spline

Matematicamente, uma *spline* é utilizada para fazer a interpolação de uma função por partes utilizando polinômios de um grau menor, de forma a evitar fazer a interpolação utilizando um único polinômio de grau maior, evitando assim o aparecimento do efeito de Runge, que surge quando um polinômio de grau alto é utilizado para fazer a interpolação.

Os pontos filtrados são considerados pontos de uma função que e uma *spline* de grau 5 é utilizada para fazer esse ajuste.

Cálculo do Diâmetro

Para cada uma das formas ajustas é preciso encontrar uma relação com o diâmetro medido em campo. O diâmetro do círculo é determinado de forma direta.

O valor do DAP extraído da elipse e da *spline* é calculado de forma semelhante, as funções de ajuste retornam também a área das geometrias. Levando em conta que a seção transversal das árvores possui forma aproximadamente circular, interpretamos o resultado como área do círculo e utilizamos a Equação 2 para definir o raio da figura plana.

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (2)$$

onde R corresponde ao raio aproximado e A representa a área retornada pela função de ajuste.

Os seguintes critérios estatísticos foram utilizados para avaliação dos resultados ajustados: Erro Relativo (ER), entre os valores reais e estimados, raiz quadrada do erro quadrático médio (RQEM), média das diferenças absolutas (MDA) e coeficiente de correlação ($Ry\hat{y}$). Estas estatísticas foram estimadas através das Equações 3, 4, 5 e 6.

$$ER(\%) = 100 \frac{|\hat{Y} - Y|}{Y} \quad (3)$$

$$RQEM(\%) = \frac{100}{\bar{Y}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y})^2} \quad (4)$$

$$MDA = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{Y}_i - Y_i| \right) \quad (5)$$

$$Ry\hat{y} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \hat{Y}_m)(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \hat{Y}_m)^2)(\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2)}}; \hat{Y}_m = \frac{\sum_{i=1}^n \hat{Y}_i}{n} \quad (6)$$

onde Y_i , \hat{Y}_i e \bar{Y} representam os valores reais, os estimados e a média da variável sob análise, respectivamente, e n representa o número de casos.

3 RESULTADOS

Para cada um dos indivíduos obtidos a partir do escaneamento tridimensional da área monitorada foi realizado o ajuste do DAP através de círculos, elipses e *splines*. O resultado aproximado pelo algoritmo foi comparado com o esperado, medido por meio de técnicas convencionais para verificação do diâmetro à altura do peito.

Foram comparados os ajustes de 1, 2, 3, 4, 5 e 6 leituras, com a intenção de encontrar o número de escaneamentos suficiente para um bom ajuste do diâmetro. Os três métodos apresentaram comportamentos semelhantes principalmente em 4, 5 e 6 cenas, como mostrado na Figura 6, um indicativo de que o número conveniente de escaneamentos encontra-se neste intervalo.

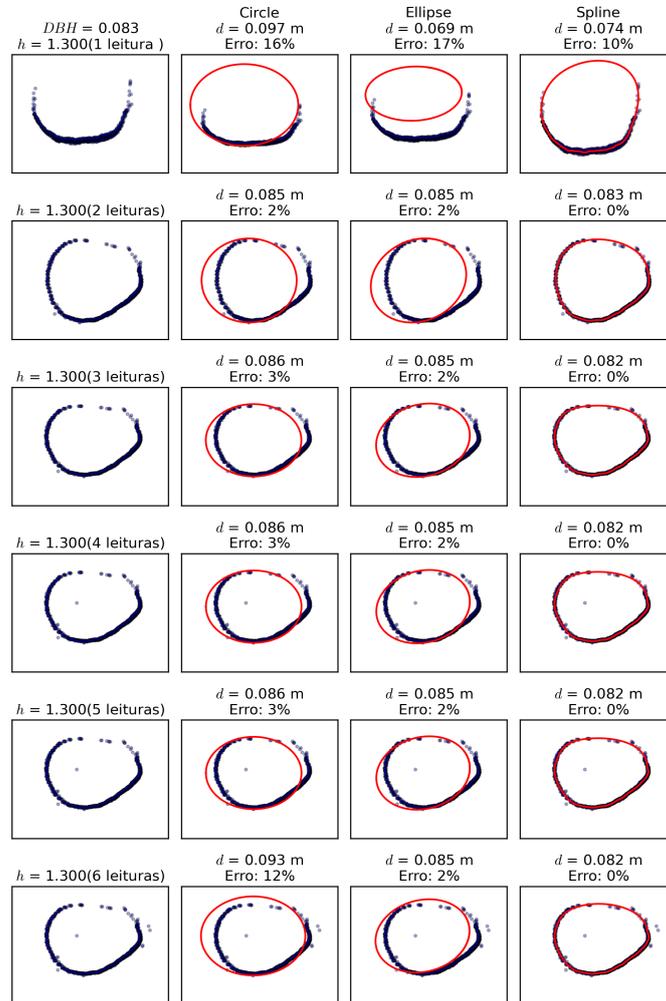


Figura 6: Comparação dos ajustes para o indivíduo 22. Os três métodos apresentam comportamentos semelhantes na maior parte das leituras por conta da qualidade dos dados ser suficiente para as aproximações.

As Tabelas 3 e 4 apresentam os ajustes retornados pelo algoritmo em 2 e 6 leituras, comparados com os valores reais através do erro relativo percentual.

Quando analisamos a Tabela 3, referente a realização de 2 leituras é possível notar que existem altos valores de erro, em torno de 300% nos ajustes da *spline*. Esse comportamento se deve aos dados serem insuficientes para ao ajuste ou formarem uma figura desconexa, fazendo com que o algoritmo não consiga realizar os cálculos corretamente. As Figuras 9, 10 e 11 mostram o comportamento dos erros para as árvores e sua variação com a forma utilizada para aproximação do DAP e o número de leituras. É importante notar que na Figura 11 não estão disponíveis os erros para 1, 2 e 3 leituras. Os respectivos erros foram removidos por terem um valor muito alto (> 500%) como exemplificado na Figura 8, sendo considerados insatisfatórios.

As medidas de precisão para 1, 2, 3, 4, 5 e 6 leituras são apresentadas na Tabela 5. Os coe-

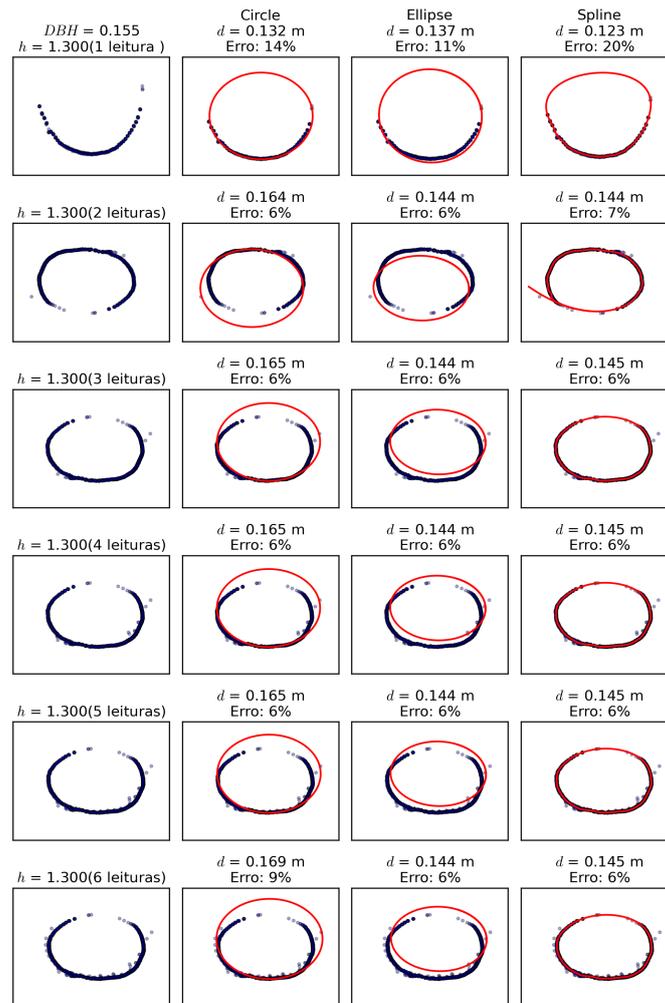


Figura 7: Comparação dos ajustes para o indivíduo 11. Os três métodos apresentam comportamentos semelhantes na maior parte das leituras por conta da qualidade dos dados ser suficiente para as aproximações.

ficientes de correlação ($R_{y\hat{y}}$) em 4, 5 e 6 leituras se encontram próximos de 1, indicando que as aproximações computacionais e os dados reais estão fortemente correlacionados. No intervalo de 1 a 3 leituras a *spline* apresenta baixos valores de $R_{y\hat{y}}$, de forma que os resultados computacionais e experimentais possuem correlação moderada quando essa medida se aproxima de 0.7 e desprezível quando próxima de 0.

A RQEM mede com quanta precisão o método prevê a resposta. Dessa forma, exceto para a *spline* em 1, 2 e 3 leituras os valores de RQEM foram baixos, indicando boas aproximações para DAP. A MDA fornece a ideia de amplitude dos erros, confirmando boa precisão na maior parte dos ajustes.

De acordo com a análise do RQEM e $R_{y\hat{y}}$ pode-se verificar que a melhor forma geométrica utilizada para aproximar o diâmetro das árvores analisadas é a elipse. Os troncos das árvores possuem uma forma aproximadamente elíptica, desta maneira era esperado que a elipse fosse a geometria que melhor aproximasse o DAP real.

É importante notar que a aproximação por *splines* foi boa para um número maior de leituras (4, 5 e 6), no entanto, é importante levar em conta que um maior número de leituras implica em

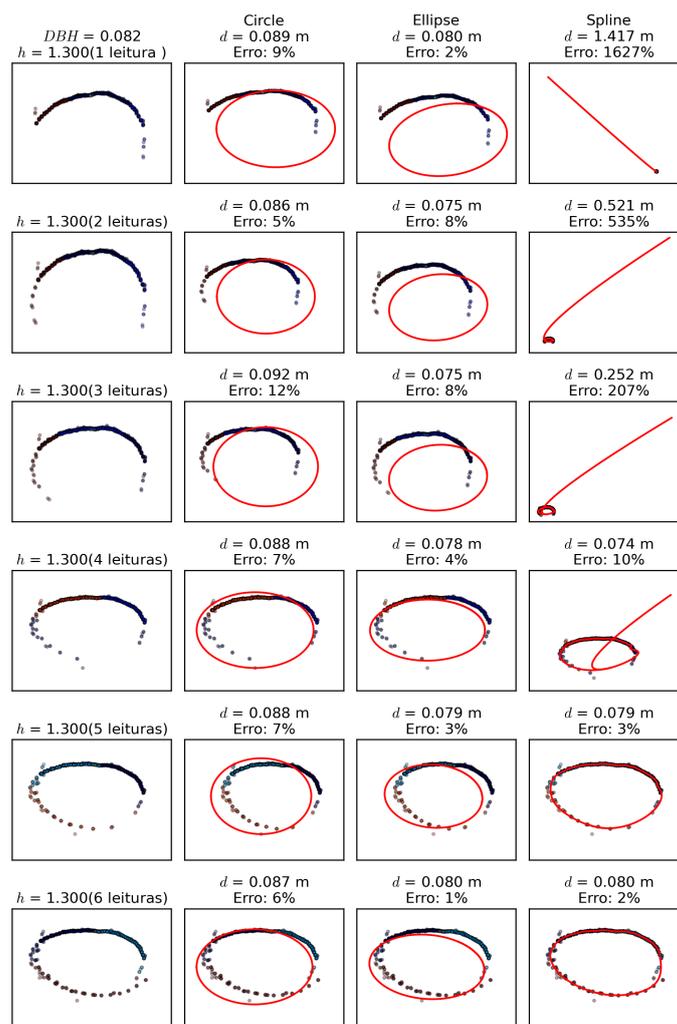


Figura 8: Comparação dos ajustes para o indivíduo 30. É possível notar que a *spline* apresentou comportamento insatisfatório em 1, 2 e 3 leituras, com altos valores de erro. Isso ocorreu por conta do método considerar os dados utilizados insuficientes para os ajustes.

um maior tempo de trabalho de campo. Encontrar uma boa aproximação com uma quantidade menor de dados é o ideal para agilizar a produção de resultados.

4 CONCLUSÕES

Através das análises efetuadas conclui-se que a melhor para aproximar o DAP nas árvores de espécies de *Avicennia schaueriana*, *Laguncularia racemosa* e *Rhizophora mangle* é a elipse, dado que é a forma que mais se aproxima da forma dos troncos. Apesar de este ser um resultado esperado, é importante obter uma confirmação baseada na comparação com outras formas geométricas.

A concepção e modelos alométricos para predição da quantidade de biomassa de uma floresta é comumente feita através do estabelecimento de uma relação entre o DAP e a biomassa. No entanto, o levantamento de inventários florestais mais detalhados é uma demanda crescente, a fim de reduzir a granularidade da estimativa da quantidade de carbono presente em um território. Com isso em vista, é proposto como trabalho futuro a determinação do diâmetro dos troncos

Tabela 3: Resultados das aproximações em 2 leituras com o uso de círculos, elipses e *splines* do DAP em centímetros dos indivíduos da RBG. Ao lado são apresentados os valores de erro percentual em relação ao valor real. Em algumas árvores os erros para os ajustes da *spline* foram altos por conta dados serem insuficientes ou formarem uma figura desconexa.

Árvore	DAP Real	Círculo	Erro (%)	Elipse	Erro (%)	Spline	Erro (%)
1	14.8	14.47	2.21	13.88	6.21	61.60	315.94
7	26.8	28.02	4.57	25.16	6.13	24.90	7.16
10	17.1	16.76	2.01	16.39	4.14	16.10	6.07
11	15.5	16.45	6.11	14.44	6.84	14.40	7.39
17	17.2	19.05	10.78	15.81	8.07	15.80	8.11
19	7.1	9.48	33.49	8.11	14.17	7.86	10.69
21	5.9	7.40	25.46	5.34	9.56	5.49	6.95
22	8.3	8.51	2.57	8.49	2.23	8.27	0.37
30	8.2	8.61	5.05	7.54	8.08	52.10	535.05
38	9.6	10.17	5.98	10.01	4.31	9.58	0.22
43	10.2	12.33	20.85	10.39	1.88	9.90	2.92
47	8.6	9.86	14.70	8.45	1.71	69.00	702.76
50	5.8	6.85	18.14	5.20	10.32	5.26	9.30
52	8.8	9.00	2.27	8.43	4.22	36.80	318.69
82	10	12.41	24.05	12.52	25.24	11.50	14.74
92	9	9.90	11.11	8.4	6.67	7.00	22.22

dos manguezais em diversas alturas, a fim de determinar o volume com maior precisão. É proposto também como trabalho futuro a possibilidade da inclusão da detecção de ramificações e o estudo dos métodos propostos neste trabalho atuando nessas condições.

A crescente adoção de equipamentos TLS por parte dos pesquisadores torna o tipo de estudo realizado neste trabalho de extrema relevância para a área de ecologia. A determinação dos melhores parâmetros para aproximação da estrutura real das árvores deve ser levada em conta ao determinar a quantidade de biomassa presente em uma certa região de floresta. Espera-se que os levantamentos feitos neste trabalho possam ser utilizados por pesquisadores no momento de estimar parâmetros a partir de nuvens de pontos de florestas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a empresa FARO, que por meio de seu representante Adriano Scheuer possibilitou o escaneamento das florestas de mangue de Guaratiba e a Embrapa Agroindústria de Alimentos pela disponibilização dos espaços para limpeza do material.

Agradecemos também as agências CNPq e FAPEMIG pelo auxílio financeiro, ao Núcleo de Estudos em Manguezais da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, ao Departamento de Mecânica Aplicada e Computacional e ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal de Juiz de Fora pelo apoio na realização deste trabalho.

Tabela 4: Resultados das aproximações em 6 leituras com o uso de círculos, elipses e *splines* do DAP em centímetros dos indivíduos da RBG. Ao lado são apresentados os valores de erro percentual em relação ao valor real.

Árvore	DAP Real	Círculo	Erro (%)	Elipse	Erro (%)	Spline	Erro (%)
1	14.8	15.21	2.79	14.72	0.54	14.70	0.50
7	26.8	28.34	5.76	26.36	1.64	26.30	1.69
10	17.1	17.42	1.90	16.31	4.59	16.00	6.51
11	15.5	16.94	9.29	14.42	6.95	14.50	6.76
17	17.2	19.43	12.96	15.71	8.66	16.40	4.90
19	7.1	9.61	35.41	7.21	1.48	7.17	1.01
21	5.9	7.39	25.17	5.83	1.15	5.82	1.41
22	8.3	9.34	12.52	8.49	2.32	8.25	0.61
30	8.2	8.73	6.51	8.05	1.87	8.01	2.37
38	9.6	10.94	13.93	10.00	4.15	9.66	0.62
43	10.2	12.52	22.79	10.36	1.53	10.10	0.80
47	8.6	10.65	23.84	8.36	2.80	8.23	4.28
50	5.8	7.82	34.81	6.11	5.31	6.07	4.63
52	8.8	11.20	27.30	9.29	5.58	9.25	5.13
82	10	13.46	34.63	11.56	15.56	11.60	16.01
92	9	9.65	7.21	7.69	14.50	7.74	14.03

Tabela 5: Medidas de precisão de 1 a 6 leituras para cada um dos métodos. Os valores foram calculados utilizando os resultados aproximados pelo algoritmo e os valores reais obtidos em campo

Método	Medida	Número de Leituras					
		1	2	3	4	5	6
Círculo	$R\hat{y}y$	0.973	0.986	0.989	0.985	0.989	0.987
	RQEM	12.558	11.726	12.175	12.184	13.097	15.959
	MDA	1.270	1.130	1.145	1.177	1.271	1.611
Elipse	$R\hat{y}y$	0.892	0.995	0.988	0.983	0.988	0.991
	RQEM	26.354	7.041	7.386	8.782	7.711	6.560
	MDA	1.989	0.691	0.650	0.668	0.620	0.553
Spline	$R\hat{y}y$	-0.068	-0.119	0.623	0.992	0.991	0.993
	RQEM	234.512	2980.988	44.980	6.661	6.910	6.143
	MDA	16.862	95.144	2.339	0.586	0.588	0.501

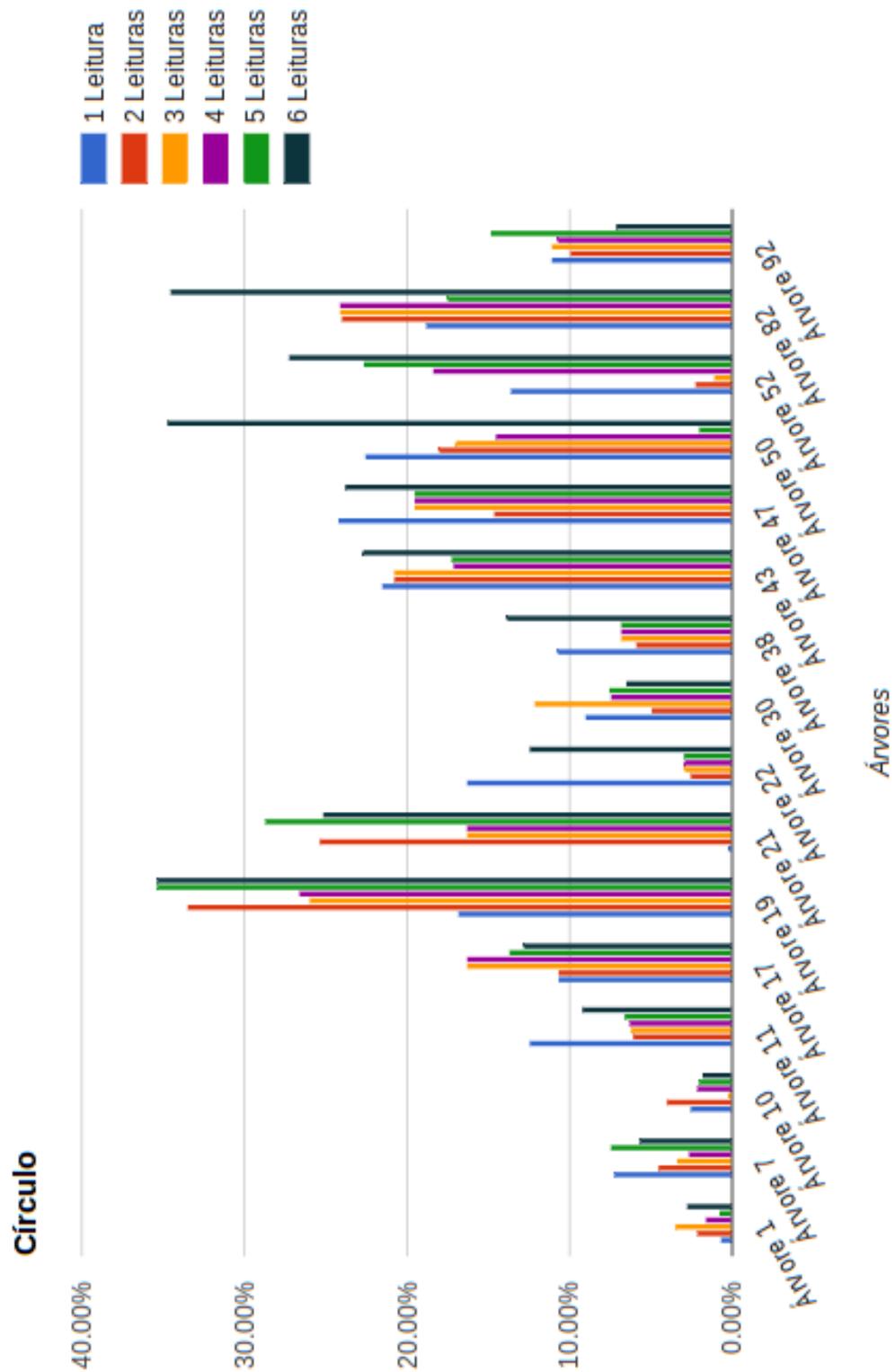


Figura 9: Gráfico com a comparação dos valores de erro na utilização de círculos para aproximação do DAP para cada uma das árvores.

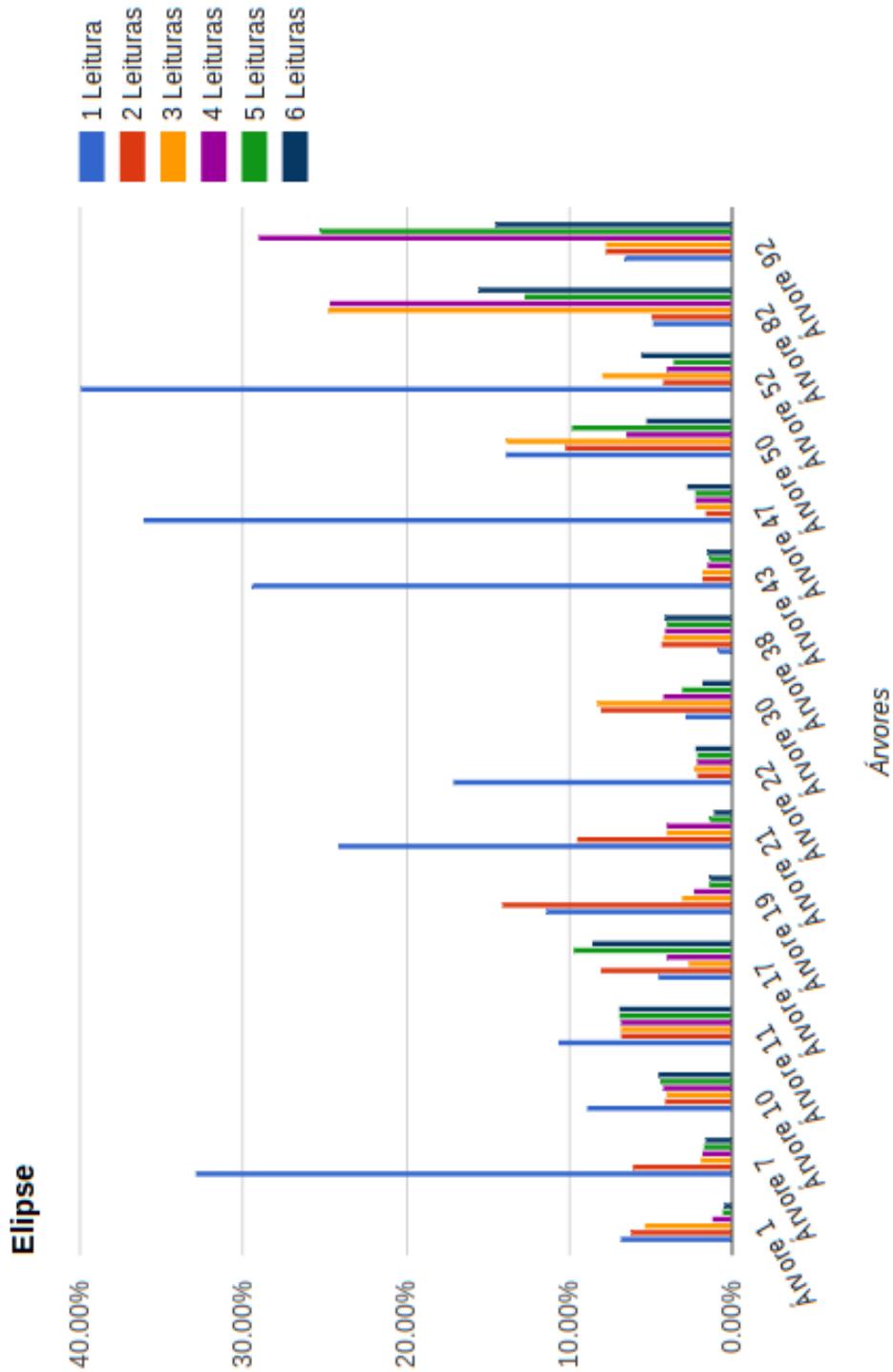


Figura 10: Gráfico com a comparação dos valores de erro na utilização de elipses para aproximação do DAP para cada uma das árvores.

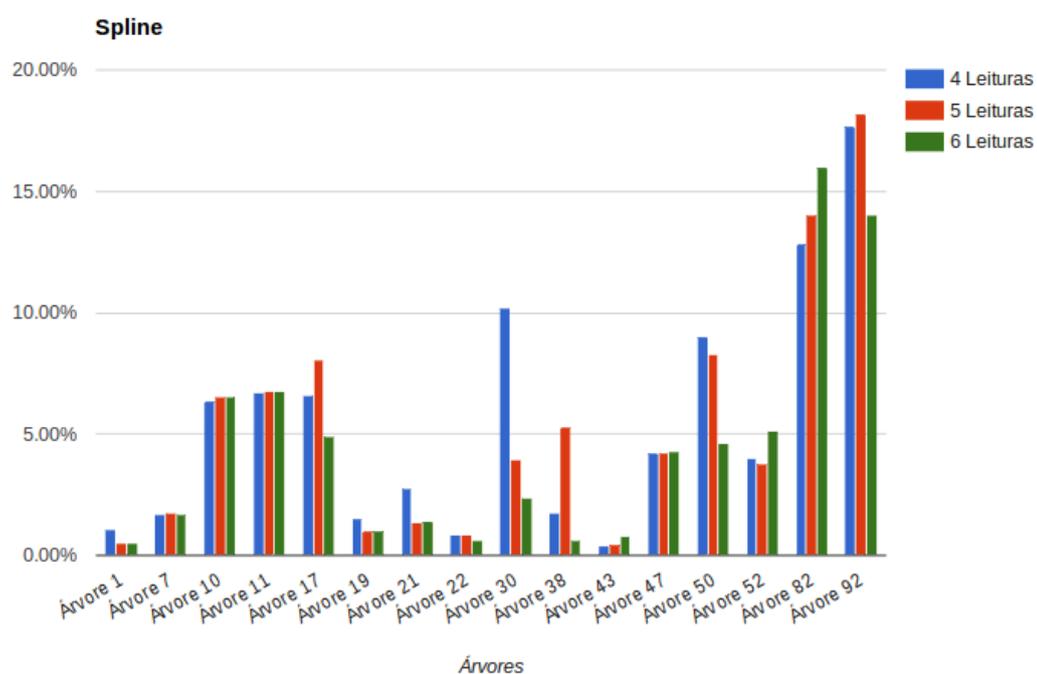


Figura 11: Gráfico com a comparação dos valores de erro na utilização de *splines* para aproximação do DAP para cada uma das árvores.

REFERÊNCIAS

- Almeida, P. (2007). Utilização de imagens de satélite para análise multi-temporal do manguezal de guaratiba-rj. *Monografia de Bacharelado. Departamento de Oceanografia. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 91p.*
- Brandtberg, T., Warner, T. A., Landenberger, R. E., and McGraw, J. B. (2003). Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. *Remote Sensing of Environment*, 85(3):290–303.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M., Chambers, J., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J.-P., Nelson, B., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B., and Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1):87–99.
- Clough, B. and Scott, K. (1989). Allometric relationships for estimating above-ground biomass in six mangrove species. *Forest Ecology and Management*, 27(2):117–127.
- De Pádua Chaves E Carvalho, S., Estraviz Rodriguez, L. C., Silva, L. D., De Carvalho, L. M. T., Calegario, N., De Lima, M. P., Silva, C. A., De Mendonça, A. R., and Nicoletti, M. F. (2015). Predição do volume de árvores integrando Lidar e Geoestatística. *Scientia Forestalis/Forest Sciences*, 43(107):627–637.
- Feliciano, E. A., Wdowinski, S., and Potts, M. D. (2014). Assessing mangrove above-ground biomass and structure using terrestrial laser scanning: A case study in the everglades national park. *Wetlands*, 34(5):955–968.
- Fu, W. and Wu, Y. (2011). Estimation of aboveground biomass of different mangrove trees based on canopy diameter and tree height. *Procedia Environmental Sciences*, 10(PART C):2189–2194.
- Glenn, N. F., Streutker, D. R., Chadwick, D. J., Thackray, G. D., and Dorsch, S. J. (2006). Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology*, 73(1-2):131–148.
- Lee, S. J., Chan, Y. C., Komatitsch, D., Huang, B. S., and Tromp, J. (2009). Effects of realistic surface topography on seismic ground motion in the Yangminshan region of Taiwan based upon the spectral-element method and LiDAR DTM. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(2 A):681–693.
- Lesky, M. A., Cohen, W. B., Parker, G. G., and Harding, D. J. (2002). Lidar remote sensing for ecosystem studies. *BioScience*, 52(1):19–30.

- Menezes, M. P. M. d., Berger, U., and Mehlig, U. (2008). Mangrove vegetation in amazonia: a review of studies from the coast of pará and maranhão states, north brazil. *Acta Amazonica*, 38(3):403–420.
- Ong, J., Gong, W., and Wong, C. (2004). Allometry and partitioning of the mangrove, *Rhizophora apiculata*. *Forest Ecology and Management*, 188(1-3):395–408.
- Tavares, G. G., Goliatt, L., Neves, G. H. C., Bastos, F. S., Chaves, F. O., and Sabino, T. L. R. (2015). Estimativa da biomassa arbórea de regiões de mangue via escaneamento tridimensional a laser - comparação de métodos computacionais. Proceedings of XXXVI Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering.