

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

RACHEL CLEMENTE CARVALHO

PREDIÇÃO INVERSA APLICADA A MEDIÇÕES DE ALTURA
COMERCIAL NA REGIÃO AMAZÔNICA

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2018

RACHEL CLEMENTE CARVALHO

PREDIÇÃO INVERSA APLICADA A MEDIÇÕES DE ALTURA
COMERCIAL NA REGIÃO AMAZÔNICA

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Florestal.

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2018

RACHEL CLEMENTE CARVALHO

PREDIÇÃO INVERSA APLICADA A MEDIÇÕES DE ALTURA COMERCIAL NA
REGIÃO AMAZÔNICA

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da
Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do
título de Engenheira Florestal.

Aprovada em ...03... de ...julho... de ...2018.....

COMISSÃO EXAMINADORA

Adriano Ribeiro de Mendonça

Prof. Dr. Adriano Ribeiro de Mendonça
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Gilson Fernandes da Silva

Prof. Dr. Gilson Fernandes da Silva
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Jeferson Pereira Martins Silva

Engº Jeferson Pereira Martins Silva
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Aos meus pais, por todo amor e confiança depositada em mim.

Dedico

“A vida roda. Toda folha é
recomeço depois de uma poda.”

Clarice Freire

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e por sempre guiar meus passos.

À Nossa Senhora, por sempre me proteger e passar na frente das adversidades.

Aos meus pais, João Dehon e Maria Geralda, à minha irmã Laura, pelo apoio incondicional, confiança e amor durante toda a minha vida, vocês são a minha base.

Ao professor Adriano Ribeiro de Mendonça pela orientação, paciência, ensinamentos e por abrir as portas do Laboratório de Manejo e Mensuração Florestal permitindo a realização deste trabalho.

Ao professor José Eduardo Macedo Pezzopane por ter me dado a primeira oportunidade como bolsista de iniciação científica, foi um período de muito aprendizado.

À Juliana, Taíza, Zélia e ao Sidônio, por todo o incentivo ao estudo que sempre me deram e todo apoio durante toda a minha vida, vocês são a minha família de coração.

Às minhas “flores”, Tamara e Thaís, pela amizade, cumplicidade e pela parceria incondicional, estarão para sempre no meu coração.

À Gardênia e Keila, amigas que fiz durante a vida e sempre acompanharam a minha trajetória.

Aos meus “meninos”, Caio, Eliel, Emerson, Gabriel e Lucas pela amizade, risadas, partidas de bisca e companheirismo, vocês são incríveis.

Ao Ciro e à Marina, grandes amigos que fiz durante o estágio na ESALQ e que foram essenciais nesse final de graduação.

Aos grandes amigos que fiz durante a graduação, à turma 2014/1 e a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação.

À Universidade Federal do Espírito Santo e seu corpo docente por me darem base para ser uma profissional responsável.

RESUMO

Inventários florestais são processos de obtenção de dados qualitativos e quantitativos dos recursos florestais, de forma a realizar um uso sustentável dos mesmos e permitir a continuidade da produção. Dentre as variáveis obtidas no inventário, a altura é fundamental para cálculos de volume de madeira, estoque de carbono, dinâmica da população e qualidade do sítio. No entanto, essas medições são passíveis de erros, que podem ser provenientes do operador ou da má calibração dos equipamentos utilizados. Tendo em vista a ocorrência de tais erros, pode-se realizar a calibração dessas medições como forma de minimizar os erros e permitir um melhor planejamento dos recursos. Diante disso, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a exatidão ao utilizar a técnica de calibração ou predição inversa em medições obtidas por diferentes métodos de obtenção da altura comercial em uma floresta nativa da região amazônica. Para isso, foram ajustados modelos utilizando o valor real das alturas como variável dependente, obtidos por meio de uma trena, e os valores estimados obtidos pelo hipsômetro Vertex IV ou visualmente por uma pessoa com experiência como variável independente. As equações foram avaliadas por meio do coeficiente de determinação (R^2) e erro padrão relativo [S_{yx} (%)]. Após isso, foi aplicada a técnica de predição inversa. As estimativas obtidas por meio da predição inversa foram analisadas com base nas estatísticas *Bias* (B), Média das diferenças absolutas (MD) e Raiz quadrada do erro médio ($RMSE$) e, também, na análise gráfica dos resíduos. Os resultados demonstram que ao aplicar a predição inversa, as estimativas do Vertex IV apresentaram uma melhor correção das alturas, aproximando-as do valor real, com menor viés e ganho de aproximadamente 40% em exatidão. Já para o método Visual, a predição inversa não se mostrou satisfatória, uma vez que o coeficiente de determinação foi baixo e teve aumento do viés. A predição inversa mostrou-se uma boa alternativa para aferição de resultados obtidos pelo Vertex IV.

Palavras-chave: Manejo Florestal, hipsômetro, calibração.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo geral.....	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Medição de altura em povoamentos florestais	3
2.1.1 Métodos de medição da altura de árvores	4
2.1.2 Instrumentos utilizados na medição de altura	4
2.1.3 Erros na realização das medições da altura das árvores.....	6
2.2 Exatidão e precisão.....	7
2.3 Calibração ou predição inversa.....	7
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	9
3.1 Fonte dos dados	9
3.2 Caracterização dos dados	9
3.3 Métodos utilizados nas medições	10
3.4 Predição inversa da altura comercial de árvores nativas da região amazônica	10
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	13
5 CONCLUSÕES	16
6 REFERÊNCIAS.....	17

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição das árvores-amostra para medição da altura comercial.	10
Tabela 2 – Estimativa dos parâmetros e estatísticas do ajuste dos modelos obtidos a partir da Equação 1.	13
Tabela 3 – Estatísticas obtidas a partir da predição inversa e as encontradas por Silva (2016) para altura comercial de espécies nativas na região amazônica.	13

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização do Projeto de Assentamento Florestal Havái.	9
Figura 2 – Distribuição dos resíduos, em porcentagem, em função das estimativas da predição inversa a partir das alturas comerciais obtidas com o método Visual e com o Vertex IV.....	14

1 INTRODUÇÃO

O dimensionamento de indústrias, o financiamento e planejamento da utilização dos recursos florestais, para serem eficientes, devem ser fundamentados em dados coletados, manipulados e analisados dentro de padrões técnicos que possam garantir uma decisão adequada e racional (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1997). A coleta de dados é feita por meio de inventários florestais, que são processos de obtenção de dados qualitativos e quantitativos dos recursos florestais (HUSCH et al., 1993).

Dentre as variáveis mensuradas no inventário, a altura é fundamental para obter o volume de madeira, estoque de carbono, dinâmica da população, qualidade do sítio, processos de otimização, dentre outros. Em florestas nativas, a altura total possibilita a compreensão da estrutura vertical da comunidade, indicando quais espécies são mais importantes ecologicamente (SILVA, 2012b). Em inventários de planos de manejo, é comum a medição da altura comercial.

Nos inventários florestais, a fim de facilitar a coleta de dados, é comum a utilização de equipamentos nas atividades de mensuração florestal. Dentre os equipamentos utilizados na medição de altura, encontram-se os hipsômetros Suunto, Weise, Haga, Blume-Leiss, Vertex IV, Haglöf II, dentre outros (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2009). Contudo, por mais eficiente que seja o método, podem surgir erros nas medições que podem ser classificados em amostrais e não amostrais.

Devido a importância das medições de altura, o uso de métodos mais eficientes e eficazes de medição das árvores para a realização de inventários florestais é imprescindível para o planejamento do uso dos recursos florestais. Esta necessidade pode ser notada quando se deseja medir a altura de árvores em florestas nativas, como nas florestas da Amazônia, onde a densidade de indivíduos é muito elevada (árvores, cipós), dificultando a identificação de instrumentos de medição de altura que sejam eficazes e que forneçam medidas exatas (LINGNAU et al., 2008; GONÇALVES; ELDINK; POKORNY, 2008; SILVA, 2016).

Para minimizar os problemas relacionados à exatidão dos equipamentos, uma alternativa é utilizar a calibração ou predição inversa para ajustar modelos relacionando as medições reais da altura e as obtidas por meio dos hipsômetros e, ou clinômetros. Por meio deste método, é possível corrigir as medições obtidas pelos

equipamentos, diminuindo os erros e aproximando tais valores aos valores reais da medida. Na área florestal ainda não há estudos avaliando essa metodologia, mas em outras áreas, principalmente em química, onde são necessárias medidas mais próximas do real, com menor custo e tempo de medição, essa metodologia é cada vez mais empregada.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a exatidão ao utilizar a técnica de calibração ou predição inversa em medições obtidas por diferentes métodos de medição de altura comercial em uma floresta nativa da região amazônica.

1.2.2 Objetivos específicos

- Ajustar modelos de predição inversa para diferentes métodos de medição de altura comercial de árvores nativas da região amazônica;
- Analisar a exatidão das estimativas de altura comercial obtidas das equações oriundas dos modelos obtidos para predição inversa em árvores nativas da região amazônica;
- Comparar os resultados obtidos pela predição inversa e os resultados obtidos por Silva (2016).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Medição de altura em povoamentos florestais

A altura da árvore, assim como o diâmetro, é uma característica importante da árvore ou do próprio povoamento florestal. É extremamente importante para o cálculo do volume e do incremento de um povoamento (COUTO; BASTOS, 1988; FREITAS; WICHERT, 1998).

A altura de uma árvore é a distância linear ao longo de seu eixo principal, partindo do solo até o topo ou algum ponto de interesse, de acordo com o objetivo desejado. Em medições florestais, é sempre necessário informar qual o ponto da altura que se está medindo, podendo ser classificadas em:

a) altura total: é a distância vertical ao longo do seu eixo principal, iniciando rente ao solo até o ápice da copa da árvore (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2009). É muito utilizada quando deseja-se estimar o volume do fuste e avaliar a qualidade de sítio (SOARES; PAULA NETO; SOUZA, 2012);

b) altura do fuste: refere-se à distância vertical entre o terreno e a base da copa da árvore. Em algumas ocasiões é confundida com a altura comercial (SOARES; PAULA NETO; SOUZA, 2012);

c) altura comercial: é o comprimento do fuste a partir do solo ou da altura de corte até um ponto acima estipulado por um diâmetro mínimo de uso, ou até mesmo algum ponto que limite o uso comercial, como a presença de bifurcações, galhos, defeitos e tortuosidades. Porém, a definição deste termo é subjetiva, dependendo da finalidade a que se destina a madeira, do mercado e da região. No caso de florestas nativas, as árvores costumam apresentar sapopemas (raízes tabulares) e, portanto, a altura comercial passa a ser a distância entre o final das sapopemas até um ponto ao longo do fuste da árvore, podendo ser a primeira bifurcação ou injúria (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2009);

d) altura da copa: é a distância entre o início e o final da copa da árvore. É utilizada ao avaliar o grau de desrama de árvores destinadas à produção de madeira serrada (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2009).

2.1.1 Métodos de medição da altura de árvores

A obtenção das medidas de altura das árvores pode ser feita de forma expedita, direta ou indireta. A medição de forma direta pode ser feita com a árvore abatida, em que se mede a altura com o uso de uma trena; ou pode ser feita com a árvore em pé, realizando escalada e medindo com uso de uma trena (devido às dificuldades de medição não é muito utilizada). Em povoamentos jovens ou que possuem árvores não muito altas, utiliza-se uma régua telescópica, a qual é disposta ao lado da árvore e faz-se a distensão até esta ficar à altura da árvore, registrando-se a leitura da escala da mesma (CUNHA, 2004; SILVA; PÉLLICO NETTO; BRENA, 1997).

Na obtenção da altura por medição indireta (estimativas), o medidor não entra em contato direto com a árvore, realizando a medida à distância, utilizando instrumentos medidores de altura, conhecidos como hipsômetros (CAMPOS; LEITE, 2017). Dentro desse mesmo princípio, têm-se também os clinômetros e altímetros, frequentemente utilizados em topografia (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2009). Há também como estimar a altura das árvores por meio de modelos de regressão. Estes modelos são ajustados a partir de dados de diâmetro a 1,3m do solo (DAP) e altura das árvores. A relação entre estas variáveis é chamada de relação hipsométrica. Os modelos mais simples utilizam apenas o DAP, que são aplicáveis apenas em pequenas áreas homogêneas ou para uma parcela de inventário florestal porque nem sempre resultam em estimativas precisas, uma vez que a altura é dependente da qualidade do sítio, idade, densidade e também de outros fatores (CAMPOS; LEITE, 2017). Em florestas nativas, devido à alta densidade de indivíduos e heterogeneidade do povoamento, as relações hipsométricas geralmente não funcionam bem. Já o método expedito é feito a olho desarmado por mensuradores experientes, muito comum em florestas nativas (CUNHA, 2004).

2.1.2 Instrumentos utilizados na medição de altura

Ao longo do tempo, os mensuradores florestais criaram diversos tipos de instrumentos para medir a altura de árvores. Alguns deles foram idealizados para medir a altura de forma direta, como as réguas telescópicas e outros para medir

indiretamente, conhecidos como hipsômetros ou clinômetros (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2009).

A diferença entre hipsômetros e clinômetros é que o primeiro possui uma utilização específica para medição de altura, em que após a operação é dada o valor da altura diretamente no visor do instrumento. Já o segundo tem como finalidade específica a medição de ângulos, onde são feitos cálculos a partir dos ângulos para posterior obtenção da altura das árvores (CUNHA, 2004).

O Clinômetro Suunto possui escala em graus, onde a tangente da visada inferior é somada com a tangente da visada superior, e é multiplicada pela distância em metros. Já quando se usa a escala em porcentagem, as leituras obtidas são divididas por 100, somadas, e multiplicada pela distância (ENCINAS et al., 2002).

Em florestas nativas, hipsômetros baseados em distâncias fixas, como o Haga e o Blume-Leiss, não funcionam bem na estimação da altura devido a necessidade do mensurador se afastar a uma distância fixa da árvore, fazendo com que ele perca a visão dessa distância, diminuindo a confiabilidade da medição (CAMPOS; LEITE, 2017; SILVA, 2016).

O hipsômetro e clinômetro Haglöf possibilita medidas acuradas de altura e de ângulos (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2009). Para a medição de altura com este instrumento, toma-se como referência a distância entre o mensurador e o objeto a ser mensurado, sendo que está distância pode ser definida pelo operador, desde que ela seja conhecida (SILVA, 2012b).

O Vertex é um hipsômetro capaz de realizar a medição de altura, ângulos de inclinação, distância e temperatura (CAMPOS; LEITE, 2017). É um aparelho que agiliza a medição de altura, mas também auxilia na implantação de parcelas circulares, sem a necessidade de trenas ou cordas. É composto do Vertex propriamente dito e do transmissor-receptor (transponder). A medição de altura pode ser obtida com o uso ou a ausência de instrumento de comunicação para medir a distância. No primeiro caso, é necessário obter a medida da distância utilizando uma trena e essa medida deve ser inserida no aparelho. No segundo caso, a utilização do Vertex com o transponder. Para a obtenção da altura, é necessária a calibração do aparelho. Primeiramente, ao ligar o equipamento, calibra-se o transponder para a altura pré-definida de 1,30 metros. Em seguida, o transponder é fixado na árvore e o

operador procura uma posição que possibilite visualizar tanto o transponder quanto o topo da árvore. Posteriormente, pressiona-se o botão vermelho por alguns segundos na direção do transponder até o sensor piscar, e, após isso, aponta-se para o topo da árvore e aciona-se novamente o botão vermelho. A medida é dada automaticamente no visor do aparelho (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2009).

De acordo com Silva et al. (2012a), o hipsômetro Vertex é uma boa opção para se medir a altura de árvores em florestas nativas. O emprego de impulsos ultrassônicos pelo aparelho permite realizar a medição da altura a qualquer distância, sendo que um dos fatores negativos é o custo mais elevado e as dificuldades para sua manutenção.

2.1.3 Erros na realização das medições da altura das árvores

Qualquer medida ou estimativa, ao ser realizada, está sujeita à ocorrência de erros. Os principais erros cometidos na realização de uma medida são: aleatórios, sistemáticos, grosseiros, compensantes e de estimativa.

Os erros aleatórios são resultantes de fatores não controláveis, relacionados à variabilidade natural dos processos físicos. Os erros sistemáticos são os que ocorrem sempre em um mesmo sentido, para mais ou para menos em relação ao verdadeiro valor da grandeza. Eles têm causas diversas e, geralmente, estão relacionados à falta de calibração do instrumento e erros na operação do aparelho na medição propriamente dita (SOARES; PAULA NETO; SOUZA, 2012).

Já os erros grosseiros, em relação à teoria do erro, não são considerados como erros, mais sim enganos que o operador comete durante a medição ou cálculos na análise de dados (SOARES; PAULA NETO; SOUZA, 2012). Exemplos relacionados a esta classe de erros são aqueles decorrentes de pouco treino do operador, distração e cansaço.

Os erros compensantes são independentes do operador e estão relacionados ao arredondamento do valor da medida, estão relacionados a instrumentos de menor exatidão (CUNHA, 2004). Por fim, os erros de estimação são erros decorrentes de amostragem, onde se mede parte de uma população e se extrapola valores para toda a população (SILVA; PAULA NETO, 1979).

2.2 Exatidão e precisão

A exatidão está relacionada à aproximação de uma medida do verdadeiro valor da grandeza (SOARES; NETO; SOUZA, 2012). Por exemplo, um aparelho medidor de altura, quando graduado de decímetro em decímetro é mais exato que um outro graduado de 50 em 50 centímetros (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2009).

Precisão é um conceito qualitativo que expressa a magnitude dos erros presentes na medida. Quanto menor a magnitude dos erros, maior a precisão da medida. Em mensuração florestal, a precisão demonstra uma concordância entre valores em uma série de medidas (HUSCH et al, 1993).

Em uma amostragem, uma medida exata possui sua estimativa do parâmetro o mais próximo possível de seu valor médio verdadeiro. Já uma medida precisa é expressa como erro padrão, ou seja, refere-se ao desvio de valores estimados em relação à sua própria média. Uma medida estimada pode ser precisa, mas não necessariamente exata, porque exatidão engloba erros amostrais e não amostrais (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2009).

2.3 Calibração ou predição inversa

Problemas relacionados à calibração geralmente resultam em medidas rápidas, mais baratas e aproximadas, relacionadas com medidas precisas, caras e demoradas sobre n observações. Nestes casos, deve-se utilizar o processo de predição inversa, também denominada calibração, a fim de obter medidas mais rápidas e com menor viés.

A predição inversa é utilizada para avaliar a calibração de determinado instrumento e suas incertezas associadas, onde o modelo de regressão assume uma variável aleatória X conhecida e uma variável aleatória Y desconhecida (ALMEIDA, 1999; PIMENTEL; GALVÃO; ARAÚJO, 2008). A partir do método dos mínimos quadrados, são calculadas as estimativas do coeficiente angular (β_1) e do intercepto da curva de regressão resultante (β_0). Este modelo é utilizado para prever os valores de Y a partir dos valores de X . A regressão de Y sobre X é usada para estimar o valor de X , o qual originou um novo valor de Y . A partir do modelo de regressão, tem-se

uma nova observação ($Y_{i(novo)}$) onde deseja-se estimar $X_{i(novo)}$. As equações serão detalhadas posteriormente no item 3.4.

Pimentel e Barros Neto (1996) ressaltaram a importância da calibração na obtenção de dados analíticos, pois afeta diretamente a aplicabilidade, a exatidão, a precisão, duração e o custo de uma análise. A partir da descrição de todo o método e análise de exemplos, concluíram que utilizando da regressão de forma inversa diminui os erros residuais das medições, tornando os valores estimados mais próximos aos valores verdadeiros de determinada medida.

Tavares e Vaz (2007) avaliaram a calibração da relação entre altura e fase em medições 3D precisas na profilometria de medição de fase. Primeiramente, analisaram a expressão analítica para esta relação e verificaram suas estatísticas, que justificaram a necessidade de calibração como forma de correção dos dados experimentais. Após a calibração, notou-se uma correspondência notável entre os dois resultados, concluindo que o procedimento de calibração linear aumentou a confiabilidade das variáveis estudadas.

Em um estudo sobre a relação entre medidas de peso e estatura reais e estimadas entre residentes de São Paulo, Carvalho et al. (2014) notaram que houve uma alta correlação entre essas medidas. Em todas as faixas etárias e ambos os sexos, medidas de peso estimadas podem substituir parâmetros reais na população, porém ressaltou-se que em idosos essa estimativa tendeu a superestimar e subestimar algumas alturas necessitando de cautela para utilização do método. De maneira geral, a calibração mostrou-se um método menos oneroso e dispendioso para obtenção dessas variáveis.

Na área florestal, essa metodologia ainda não foi empregada, mas demonstra ser uma alternativa para minimizar o viés e o custo das medições. A partir da obtenção de dados reais de apenas uma parte das árvores de uma parcela, é possível realizar o ajuste de uma equação que possibilite corrigir os dados obtidos no restante do povoamento. A estimativa da altura das árvores adequa-se perfeitamente a um problema de calibração, em que se tem a medida gerada pelos equipamentos medidores de altura, relacionada com a medida obtida por trena (demorada e exata).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Fonte dos dados

A coleta de dados ocorreu em uma área do Projeto de Assentamento Florestal Havaí (PAF Havaí), criado pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), sob a Portaria nº 226, de 08 de abril de 2004 (Figura 1). A área possui aprovação para o Manejo Florestal Sustentável Comunitário nos municípios de Mâncio Lima e Rodrigues Alves no Estado do Acre, situado entre as coordenadas 07°47' Latitude Sul e 73°14' Longitude Oeste.

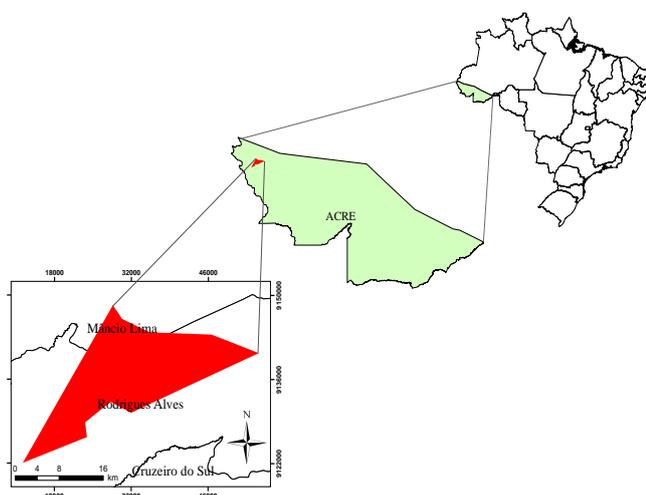


Figura 1 – Localização do Projeto de Assentamento Florestal Havaí.

Fonte: SILVA (2016).

3.2 Caracterização dos dados

Para a realização das análises propostas neste estudo, utilizou-se dados de altura comercial obtida por dois métodos de medição, obtidos por Silva (2016). Baseando-se nos mapas do censo do PAF Havaí, foram verificadas as espécies presentes e a quantidade de indivíduos selecionados para a exploração. Com base nestas informações, selecionaram-se as quatro espécies com maior quantidade de indivíduos, sendo elas: abiurana (*Pouteria guianensis* Aubl.), bajão (*Parkia multijuga* Benth.), pau-garrote (*Bagassa guianensis* Aubl.) e ucuuba (*Virola decorticans* Ducke.). Foram selecionadas 30 árvores-amostra, divididas em diferentes classes de diâmetro

e altura (nove indivíduos de abiurana; sete de bajião, seis de pau-garrote e oito de ucuuba).

Tabela 1 – Distribuição das árvores-amostra para medição da altura comercial.

Classe de DAP (cm)	Classe da altura comercial (m)					Total
	8 F 11	11 F 14	14 F 17	17 F 20	20 F 23	
58 F 69	0	2	5	2	0	9
69 F 80	0	1	1	4	1	7
80 F 91	2	1	3	1	2	9
91 F 102	0	1	0	0	0	1
102 F 113	0	0	2	0	0	2
113 F 124	0	1	0	0	1	2
Total	2	6	11	7	4	30

3.3 Métodos utilizados nas medições

Foram feitas medições com os seguintes métodos:

- Método 1: Medição da altura comercial feita de forma visual por uma pessoa com experiência;
- Método 2: Medição da altura comercial com o hipsômetro Vertex IV.

Considerou-se como altura comercial a distância vertical iniciando na base até a primeira bifurcação ou injúria ao longo do fuste. A altura comercial real foi obtida pela medição com trena após o abate da árvore, somando-se o comprimento do toco da árvore e a parte do fuste cortada até um ponto ao longo do fuste considerado comercial.

3.4 Predição inversa da altura comercial de árvores nativas da região amazônica

Primeiramente, foi ajustado um modelo de regressão linear (Equação 1). Os ajustes dos modelos para os diferentes métodos foram realizados por meio da função *lm* do software R (R Core Team, 2015).

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 X_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

Em que: Y_{ij} : Altura estimada (m) obtida pelos equipamentos (j) na árvore i; X_{ij} : altura real (m) obtida por trena; β_i : parâmetros do modelo; ε_{ij} : erros aleatórios.

A equação de regressão resultante é, então, utilizada para estimar uma medida precisa, $X_{ij(novo)}$, para uma medida aproximada nova $Y_{ij(novo)}$. Para isso, isola-se X_{ij} na Equação 1. A partir disso obtêm-se a Equação 2, onde X_{ij} é denominado de $\hat{X}_{ij(novo)}$ e \hat{Y}_{ij} denominado de $Y_{ij(novo)}$.

$$\hat{X}_{ij(novo)} = \frac{Y_{ij(novo)} - \hat{\beta}_0}{\hat{\beta}_1} \quad (2)$$

Em que: $\hat{X}_{ij(novo)}$ = altura comercial estimada (m) após a predição inversa; $Y_{ij(novo)}$ = medição da altura comercial (m) obtida pelos métodos analisados; $\hat{\beta}_i$ = parâmetros do modelo.

As equações ajustadas na sua forma original (Equação 1), para cada método, foram avaliadas por meio das seguintes estatísticas:

a) Coeficiente de determinação (R^2)

$$R^2 = \frac{SQ_{Regressão}}{SQ_{Total}} \quad (3)$$

Em que: $SQ_{Regressão}$ = soma de quadrados da regressão; SQ_{Total} = soma de quadrados total.

b) Erro padrão da estimativa (S_{yx})

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

Em que: Y_i = altura comercial real (m) obtida por meio da trena; \hat{Y}_i = altura comercial (m) obtida pelos métodos analisados; n = número de observações; p = número de parâmetros do modelo.

Posteriormente, foi analisada a exatidão das estimativas obtidas pela predição inversa (Equação 2) por meio das estatísticas *Bias* (B) (Equação 5), Média das diferenças absolutas (MD) (Equação 6), Raiz do quadrado médio do erro ($RMSE$) (Equação 7), conforme descritos em Campos e Leite (2017).

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i - \sum_{i=1}^n \hat{Y}_i}{n} \quad B(\%) = \frac{B}{\bar{Y}} \cdot 100 \quad (5)$$

$$MD = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i|}{n} \quad MD(\%) = \frac{MD}{\bar{Y}} \cdot 100 \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad RMSE(\%) = \frac{RMSE}{\bar{Y}} \cdot 100 \quad (7)$$

Em que: Y_i = Altura comercial real (m) obtida por trena; \hat{Y}_i = Altura comercial estimada (m) obtida pela predição inversa; \bar{Y} = Média da altura real (m); n = número de observações.

Além disso, realizou-se a análise gráfica dos resíduos. O valor do erro relativo (ER) foi obtido por meio da Equação 8.

$$ER(\%) = \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i} \cdot 100 \quad (8)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os coeficientes estimados e as estatísticas do ajuste dos modelos para predição inversa para os métodos de medição analisados estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Estimativa dos parâmetros e estatísticas do ajuste dos modelos obtidos a partir da Equação 1.

Método	Coeficientes		R^2	S_{yx} (%)
	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$		
Visual	-0,9072 ^{ns}	0,9435*	0,4327	21,95
Vertex IV	2,1954 ^{ns}	1,0417*	0,6702	14,84

Em que: * e ^{ns}: significativo e não significativo a 5% de significância pelo teste t.

A partir dos resultados da Tabela 2, é possível notar que as estimativas do modelo de predição inversa aplicadas aos dados do Vertex IV apresentaram maior R^2 e menor S_{yx} (%) que o método Visual.

As estatísticas obtidas a partir das estimativas da predição inversa (Equação 2) bem como as encontradas por Silva (2016) para as estimativas de altura comercial de árvores nativas pelos métodos analisados estão na Tabela 3.

Tabela 3 – Estatísticas obtidas a partir da predição inversa e por Silva (2016) para altura comercial de espécies nativas na região amazônica.

Estatísticas	Predição Inversa		Silva (2016)	
	Visual	Vertex IV	Visual	Vertex IV
B (%)	12,20	0,003	11,40	-18,09
MD (%)	21,70	11,81	20,28	18,96
$RMSE$ (%)	25,57	13,77	24,10	23,10

Analisando os resultados da predição inversa para os dois métodos, verifica-se o melhor desempenho para o Vertex IV. As estimativas para este aparelho apresentaram menor valor de MD (%) e $RMSE$ (%) e ausência de viés quando comparadas ao método Visual. Ao se comparar as estatísticas obtidas pela predição inversa e as obtidas por Silva (2016), nota-se que a predição inversa a partir de dados de medição da altura comercial com o Vertex IV diminuiu consideravelmente o viés nas estimativas, ou seja, diminuiu a tendência das estimativas encontrada no trabalho de Silva (2016). Além disso, houve uma redução do $RMSE$ (%) e MD (%) aumentando a exatidão nas estimativas, indicando um maior grau de concordância entre o valor estimado e o valor verdadeiro. O ganho em exatidão foi de 40,4% para o $RMSE$ (%) e de 37,7% para a MD (%), ou seja, tais valores comprovam a aproximação dos valores estimados aos valores reais.

Em relação a medição pelo método Visual realizado por uma pessoa com experiência, as estatísticas encontradas pela predição inversa apresentaram aumento de B (%), MD (%) e $RQME$ (%) em relação ao encontrado por Silva (2016).

A análise gráfica dos resíduos para as estimativas da predição inversa a partir dos dados do método Visual e das medições com o Vertex IV está na Figura 2.

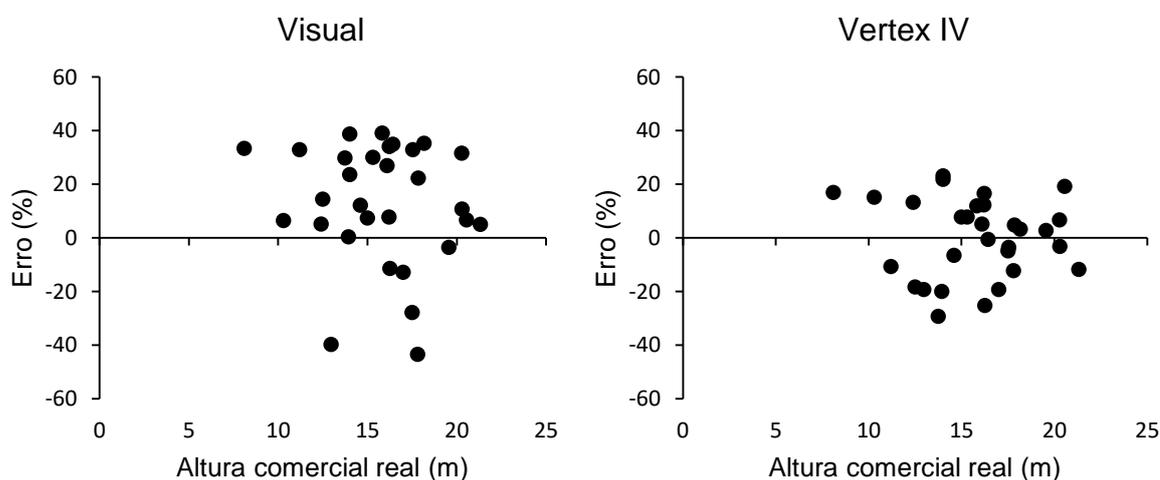


Figura 2 – Distribuição dos resíduos, em porcentagem, em função das estimativas da predição inversa a partir das alturas comerciais obtidas com o método Visual e com o Vertex IV.

A partir da análise gráfica dos resíduos das estimativas pela predição inversa em função das medidas obtidas pelo Vertex IV (Figura 2), observou-se que não houve

tendência ao estimar as alturas comerciais. Já Silva (2016) observou que, claramente, este instrumento teve tendência em superestimar as medidas em toda faixa de variação da altura comercial, apresentando variação residual no intervalo de -50 a 1%.

Para as estimativas baseadas no método Visual, observa-se pela Figura 2, uma tendência de subestimar as alturas comerciais em todos os intervalos. Silva (2016) observou que as medidas obtidas pela medição visual tiveram tendência em subestimar as alturas comerciais, com erro distribuído no intervalo de $\pm 40\%$.

Nota-se pelos resultados das estatísticas de exatidão (Tabela 3) e análise gráfica dos resíduos (Figura 2) que, com a aplicação da técnica de predição inversa, houve uma melhoria na exatidão das estimativas do Vertex IV e redução da exatidão das estimativas da altura comercial por uma pessoa com experiência. A partir desses resultados, observa-se que a adoção da predição inversa pode proporcionar melhorias na exatidão das estimativas de aparelhos de medição de altura em inventários florestais.

5 CONCLUSÕES

A partir das estatísticas avaliadas e a análise de resíduos, é possível concluir que a predição inversa obteve bom desempenho na correção de altura comercial para o hipsômetro Vertex IV, diminuindo consideravelmente o viés e aproximando as medidas estimadas aos valores reais obtidos por trena. Já para as estimativas visuais, esta técnica não obteve bom desempenho. A adoção da predição inversa pode proporcionar aumento na exatidão das estimativas de aparelhos de medição de altura em inventários florestais.

6 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, S. S. **Calibração absoluta funcional sem a suposição de normalidade**. 77 f Dissertação (Mestrado em Estatística), Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 1999.
- CAMPOS, J. C. C; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 5.ed. Viçosa: UFV. 2017. 636 p.
- CARVALHO, A. M. de; PIOVEZAN, L.G.; SELEM, S. S. C.; FISBERG, R. M.; MARCHIONI, D. M. L. Validation and calibration of self-reported weight and height from individuals in the city of São Paulo. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v.17, n. 3, 735-746, 2014.
- COUTO, H. T. Z.; BASTOS, N. L. M. Erros na medição de altura em povoamentos de *Eucalyptus* em região plana. **IPEF**, n. 39, p. 21-31, 1988.
- COUTO, H. T. Z.; BATISTA, J. L. F.; RODRIGUES, L. C. E. **Mensuração e gerenciamento de pequenas florestas**. Documentos florestais, n. 5, p. 1-37, 1989.
- CUNHA, U. S. da. **Dendrometria e inventário florestal**. Manaus: Escola Agrotécnica Federal de Manaus. 2004. 61 p.
- ENCINAS, J. I; SILVA, G.F. da; TICCHETTI, I. **Variáveis dendrométricas**. Comunicações técnicas florestais, v.4, n. 1, 2002, 112 p.
- FREITAS, A. G. de; WICHERT, M. C. P. **Comparação entre instrumentos tradicionais de medição de diâmetro e altura com o Criterion 400**. Piracicaba: IPEF. 1998. (Circular Técnica, 88).
- GONÇALVES, D. de A.; ELDIK, T. V.; POKORNY, B. O uso de dendrômetro a laser em florestas tropicais: aplicações para o manejo florestal na Amazônia. **Floresta**, v.39, n.1, p.175-187, 2009.
- HUSCH, B.; MILLER, C. I.; BEERS, T. W. **Forest mensuration**. 3.ed. Malabar: Krieger Publishing Company. 1993. 402 p.
- LINGNAU, C.; SILVA, M.; SANTOS, D.; MACHADO, L. J. Mensuração de alturas de árvores individuais a partir de dados laser terrestre. **Ambiência**, v. 4, n. 1, p. 85-96, 2008.

MACHADO, S. do A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2. Ed. Guarapuava: UNICENTRO. 2009. 316 p.

PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. **Inventário Florestal**. Curitiba: UFPR, v.1, 1997. 316 p.

PIMENTEL, M. F.; BARROS NETO, B de. Calibração: uma revisão para químicos analíticos. **Química Nova**, v.19, n.3, p.268-277, 1996.

PIMENTEL, M. F.; GALVÃO, R. K. H.; ARAÚJO, M. C. U. de. Recomendações para calibração em química analítica parte 2. Calibração Multianalito. **Química Nova**, v. 31, n. 2, 462-467, 2008.

R Core Team (2015). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.

Silva, G. F. da; Oliveira O. M. de; Souza C. A. M. de; Soares, C. P. B.; Lemos, R. Influência de diferentes fontes de erro sobre as medições de alturas de árvores. **Cerne**, v.18, n.3, p.397-405, 2012b.

SILVA, G. F.; CURTO, R. A.; SOARES, C. P. B.; PIASSI, L. C. Avaliação de métodos de medição de altura em florestas naturais. **Revista Árvore**, v. 36, n. 2, p. 341-348, 2012a.

SILVA, J. A. A da; PAULA NETO, F. de. **Princípios básicos de dendrometria**. Recife: UFRPE, 1979.185p.

SILVA, J. C. da. **Métodos de medição da altura e do volume comercial de árvores no bioma Amazônico**. 70 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo. Jerônimo Monteiro. 2016.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F. de; SOUZA, A. L. de. **Dendrometria e inventário florestal**. 2.ed. Viçosa: UFV, 2012. 272 p.

TAVARES, P. J.; VAZ, M. A. Linear calibration procedure for the phase-to-height relationship in phase measurement profilometry. **Optics Communications**, v. 15, p. 307-314, 2007.