

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO - PR**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – PPGA**  
**MESTRADO**

**EQUAÇÕES ALOMÉTRICAS PARA A ESTIMATIVA**  
**DE BIOMASSA, CARBONO E NUTRIENTES EM UMA**  
**FLORESTA OMBRÓFILA MISTA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**LUIS CARLOS RATUCHNE**

**GUARAPUAVA-PR**

**2010**

Catálogo na Publicação  
Biblioteca Central da UNICENTRO, Campus Guarapuava  
Fabiano de Queiroz Jucá (CRB 9/1249)

R237e Ratuchne, Luis Carlos  
Equações alométricas para a estimativa de biomassa, carbono e nutrientes em uma floresta ombrófila / Luis Carlos Ratuchne. -- Guarapuava, 2010  
xiv, 98 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Pós-Graduação em Agronomia, 2010  
Orientador: Luciano Farinha Watzlawick  
Banca examinadora: Eleandro José Brun, Maurício Romero Gorenstein  
Bibliografia

1. Produção vegetal. 2. Floresta de araucária. 3. Regressão linear. 4. *Stepwise*. I. Título. II. Universidade Estadual do Centro-Oeste.

CDD 634.9751

**LUIS CARLOS RATUCHNE**

**EQUAÇÕES ALOMÉTRICAS PARA A ESTIMATIVA DE BIOMASSA, CARBONO  
E NUTRIENTES EM UMA FLORESTA OMBRÓFILA**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
à obtenção do grau de Mestre em Agronomia,  
Curso de Pós-Graduação em Agronomia, área  
de Concentração Produção Vegetal, da  
UNICENTRO-PR.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Farinha  
Watzlawick

Co-orientadores: Prof. Dr. Henrique Soares  
Koehler  
Prof. Dr. Marcos Vinicios  
Winkler Caldeira

GUARAPUAVA-PR

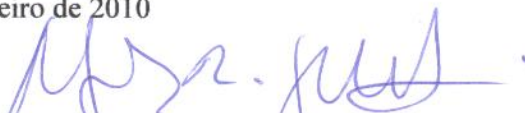
2010

**LUIS CARLOS RATUCHNE**


**EQUAÇÕES ALOMÉTRICAS PARA A ESTIMATIVA DE BIOMASSA, CARBONO E  
NUTRIENTES EM FLORESTA OMBRÓFILA MISTA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

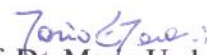
Aprovada em 26 de fevereiro de 2010



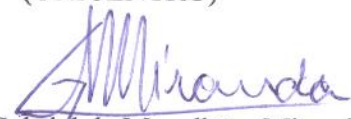
Prof. Dr. Mauricio Romero Gorenstein  
(UTFPR/Dois Vizinhos)



Prof. Dr. Eleandro José Brun  
(UTFPR/Dois Vizinhos)



Prof. Dr. Mario Umberto Menon  
(UNICENTRO)



Prof. Dr. Gabriel de Magalhães Miranda  
(UNICENTRO)



Prof. Dr. Luciano Farinha Watzlawick  
(Orientador – UNICENTRO)

GUARAPUAVA-PR

2010

Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende (Leonardo da Vinci).

## **BIOGRAFIA**

LUIS CARLOS RATUCHNE, nascido em 26 de outubro de 1982, em Guarapuava, Paraná, filho de João Ratuchne e Amélia Techy Ratuchne. Formou-se em Matemática – Licenciatura Plena pela Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO, no ano de 2003, concluiu os cursos de pós-graduação em nível de especialização *Lato Sensu* em Docência no Ensino Superior, no ano de 2005, e em Matemática Aplicada no ano de 2007, na mesma Instituição. Ingressou no Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Mestrado em Produção Vegetal, da UNICENTRO no ano de 2008 e concluiu no ano de 2010.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por esta conquista.

À minha família, pelo apoio, incentivo e compreensão pela ausência em muitos momentos.

À Priscila, minha companheira de todas as horas, pelo apoio incondicional, meu muito obrigado!

Ao meu orientador e acima de tudo amigo, que desde o início incentivou e acreditou em mim. Farinha, muito obrigado!

Ao Prof. Sebastião Brasil Campos Lustosa, chefe e amigo, pelo apoio e compreensão nos momentos de ausência nas atribuições.

Aos professores do curso de pós-graduação em agronomia, que me acolheram e acreditaram, mesmo não sendo da área das ciências agrárias.

Aos meus co-orientadores, que contribuíram com conhecimento e experiência para a realização deste trabalho.

À UNICENTRO, pela oportunidade de cursar o mestrado.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO GERAL .....</b>	<b>1</b>
<b>GENERAL ABSTRACT.....</b>	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO I: EQUAÇÕES PARA ESTIMATIVA DA BIOMASSA ACIMA DO SOLO EM UMA FLORESTA OMBRÓFILA MISTA MONTANA.....</b>	<b>3</b>
RESUMO.....	3
ABSTRACT.....	4
1. INTRODUÇÃO.....	5
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	6
2.1. A Floresta Ombrófila Mista.....	6
2.2. A Biomassa Florestal.....	7
2.3. Modelos de Regressão.....	8
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	10
3.1. Caracterização geral da área do estudo.....	10
3.2. Material experimental.....	12
3.3. Métodos.....	14
3.3.1. Modelagem da biomassa.....	14
3.3.2. Análises estatísticas e escolha das melhores equações.....	16
3.3.3. Validação das equações ajustadas.....	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	16
4.1. Matriz de correlação simples.....	16
4.2. Ajuste de equações para estimativa da biomassa aérea total.....	18
4.3. Ajuste de equações para estimativa da biomassa da madeira do fuste.....	20
4.4. Ajuste de equações para estimativa da biomassa da casca do fuste.....	22
4.5. Ajuste de equações para estimativa da biomassa da folhagem.....	23
4.6. Ajuste de equações para estimativa da biomassa dos galhos vivos.....	25
4.7. Ajuste de equações para estimativa da biomassa dos galhos mortos.....	27
4.8. Ajuste de equações para estimativa da biomassa da miscelânea.....	29
5. CONCLUSÕES.....	31
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32



<b>CAPÍTULO II: AJUSTE DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTIMATIVA DO CARBONO EM UMA FLORESTA OMBRÓFILA MISTA MONTANA .....</b>	<b>37</b>
RESUMO.....	37
ABSTRACT.....	38
1. INTRODUÇÃO.....	39
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	39
2.1. Estudos com o carbono florestal.....	39
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
4.1. Matriz de correlação simples.....	46
4.2. Ajuste de equações para estimativa do conteúdo de carbono.....	47
5. CONCLUSÕES.....	54
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54
<b>CAPÍTULO III: MODELAGEM DO CONTEÚDO DE NUTRIENTES DA BIOMASSA ACIMA DO SOLO NA FLORESTA OMBRÓFILA MISTA MONTANA .....</b>	<b>58</b>
RESUMO.....	58
ABSTRACT.....	59
1. INTRODUÇÃO.....	60
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	60
2.1. Nutrientes das plantas.....	60
2.2. Determinação e estimativa do conteúdo de nutrientes em espécies florestais.....	62
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	64
3.1. Caracterização geral da área do estudo.....	64
3.2. Material experimental.....	65
3.3. Métodos.....	67
3.3.1. Ajuste das equações para estimativa do conteúdo de nutrientes.....	67
3.3.2. Análises estatísticas e escolha das melhores equações.....	68
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	68
4.1. Ajuste de equações para estimativa do conteúdo de macronutrientes.....	69
4.1.1. Cálcio (Ca).....	69
4.1.2. Magnésio (Mg).....	71
4.1.3. Enxofre (S).....	74
4.1.4. Nitrogênio (N).....	77
4.1.5. Fósforo (P).....	80

4.1.6. Potássio (K).....	82
4.2. Ajuste de equações para estimativa do conteúdo de micronutrientes.....	85
4.2.1. Boro (B).....	85
4.2.2. Manganês (Mn).....	88
4.2.3. Cobre (Cu).....	90
4.2.4. Zinco (Zn).....	93
4.2.5. Ferro (Fe).....	95
5. CONCLUSÕES.....	98
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	98

## RESUMO GERAL

Luis Carlos Ratuchne. Equações alométricas para a estimativa de biomassa, carbono e nutrientes em uma Floresta Ombrófila Mista.

Os objetivos deste trabalho foram ajustar e selecionar equações alométricas para estimar a biomassa arbórea acima do solo, o carbono fixado e o conteúdo de nutrientes em uma Floresta Ombrófila Mista Montana, localizada no município de General Carneiro, Paraná. O trabalho foi dividido em três capítulos. No primeiro capítulo foi feito o ajuste e a seleção das equações de regressão para estimar a biomassa total e dos componentes: madeira do fuste, casca do fuste, galhos vivos, galhos mortos, folhagem e miscelânea. No ajuste das equações utilizou-se uma base de dados contendo as determinações de biomassa de 153 árvores de 38 espécies e 19 famílias. No segundo capítulo foram ajustadas e selecionadas equações para estimar o conteúdo de carbono fixado na biomassa florestal acima do solo da área em estudo. A base de dados era composta pelas determinações da biomassa e dos teores de carbono de 91 árvores de 38 espécies e 19 famílias. No terceiro capítulo foram ajustadas e selecionadas equações de regressão para estimar o conteúdo de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Mn, Cu, Zn e Fe) estocados na biomassa acima do solo da área em estudo, considerando os componentes: madeira do fuste, casca do fuste, galhos, folhagem e miscelânea e para o conteúdo total do respectivo nutriente. A base de dados utilizada no ajuste das equações foi composta pelas determinações de biomassa e dos teores de nutrientes de 85 árvores de 38 espécies e 19 famílias. Além das determinações da biomassa, carbono e nutrientes, as bases de dados continham as medidas dendrométricas altura total (ht) e a altura do ponto de inversão morfológica (hm), em metros, e o diâmetro a altura do peito (1,3 m) (dap), em centímetros, que foram utilizadas como variáveis independentes nas equações de regressão. Foram utilizados 20 modelos de equações de regressão comumente utilizados na literatura e equações de regressão fornecidas pelo método *stepwise*. No ajuste das equações utilizou-se o método dos mínimos quadrados e para a seleção das melhores equações observaram-se as estatísticas do coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ), erro padrão da estimativa ( $S_{yx}\%$ ), estatística F e análise gráfica da distribuição dos resíduos. Para a biomassa, os melhores resultados foram obtidos para biomassa total e para a biomassa da madeira fuste. Para os compartimentos casca do fuste, galhos vivos, galhos mortos, folhagem e miscelânea os resultados foram menos expressivos e as equações apresentaram estimativas com menor precisão. No ajuste das equações para a estimativa do conteúdo de carbono, os melhores resultados foram obtidos para o carbono total e para o carbono da madeira do fuste, com bom coeficiente de determinação ajustado e baixo erro padrão da estimativa. Já para os compartimentos casca do fuste, galhos, folhagem e miscelânea houve maior dificuldade em ajustar curvas de regressão aos dados, produzindo equações com menor precisão nas estimativas. O método *stepwise* mostrou-se eficiente e forneceu as melhores equações para os compartimentos galhos e miscelânea. As estimativas com o uso de equações de regressão podem ser uma boa alternativa como método indireto de quantificação de carbono fixado em florestas naturais. No ajuste das equações para estimar o conteúdo de nutrientes, para a maioria deles as equações com melhores estatísticas foram obtidas para o componente casca do fuste. Já os piores resultados foram obtidos para os componentes folhagem e miscelânea, em todos os nutrientes. O método *stepwise* mostrou-se eficiente na escolha das variáveis independentes a compor as equações de regressão, fornecendo as melhores equações de regressão para diversos componentes.

Palavras-chave: Floresta com araucária; Regressão linear; *stepwise*.

## GENERAL ABSTRACT

Luis Carlos Ratuchne. Allometric equations to the estimate of Biomass, Carbon and Nutrients in a Mixed Ombrophilous Montane Forest

The objectives of this study was to adjust and select allometric equations to estimate tree biomass above ground, fixed carbon and nutrient contents in a Mixed Ombrophilous Montane Forest, located in the city of General Carneiro, Paraná. The work was divided into three chapters. In the first chapter has been fitted and the selection of the regression equations to estimate the total biomass and components: stem wood, stem bark, live branches, dead branches, leaves and miscellaneous. In the setting of the equations we used a database containing the determination of biomass of 153 trees of 38 species and 19 families. In the second chapter were selected and adjusted equations to estimate the content of fixed carbon in forest biomass above ground of the study area. The database was composed by the determinations of biomass and carbon content of 91 trees of 38 species and 19 families. The third chapter has been adjusted and selected regression equations to estimate the content of macronutrients (N, P, K, Ca, Mg and S) and micronutrients (B, Mn, Cu, Zn and Fe) stored in above-ground biomass study area, considering the components: stem wood, stem bark, branches, leaves and miscellaneous and the content of the accompanying nutrient. The database used in the setting of the equations was made by the determinations of biomass and nutrient content of 85 trees of 38 species and 19 families. In addition to the determinations of biomass, carbon and nutrients, the databases contained measures dendrometric total height (ht) and the height of the morphological inversion (hm), in meters, and diameter at breast height (1.3 m) (dap) in centimeters, which were used as independent variables in the regression equations. We used 20 models of regression equations commonly used in literature and regression equations provided by the stepwise method. In the setting of the equations we used the least squares method of selecting the best fitting observed statistics adjusted coefficient of determination ( $R^2_{aj}$ ), standard error of estimate ( $S_{yx}\%$ ), F statistics and graphical analysis of the waste distribution. For biomass, the best results were obtained for total biomass and biomass of stem wood. For the stem bark, live branches, dead branches, leaves and miscellaneous results were less significant and the equations provided estimates with less precision. In the setting of the equations for estimating the carbon content, the best results were obtained for the total carbon and carbon from the wood of the bole, with good determination coefficient and low standard error of the estimate. As for the compartments of the stem bark, branches, leaves and miscellaneous greater difficulties in adjusting the regression curves to the data, producing equations with less precision in estimates. The stepwise method was efficient and provided the best equations for the compartments branches and miscellaneous. Estimates using regression equations may be a good alternative to the indirect method of quantification of fixed carbon in natural forests. In the setting of equations to estimate the nutrient content for most of these equations with better statistics were obtained for the stem bark component. The worst results were obtained for the miscellaneous and foliage components in all nutrients. The stepwise method was efficient in the selection of independent variables to compose the regression equations, providing the best regression equations for various components.

Keywords: Araucaria forest; Linear regression; *Stepwise*.

# CAPÍTULO I

## EQUAÇÕES PARA ESTIMATIVA DA BIOMASSA ACIMA DO SOLO EM UMA FLORESTA OMBRÓFILA MISTA MONTANA NO SUL DO PARANÁ

### RESUMO

O objetivo deste trabalho foi ajustar e selecionar equações para a estimativa da biomassa acima do solo das árvores individuais de uma Floresta Ombrófila Mista Montana, localizada no município de General Carneiro, Paraná. Foi utilizada uma base de dados obtida por métodos destrutivos de quantificação da biomassa, composta por 153 árvores pertencentes a 38 espécies e 19 famílias, sendo utilizados 20 modelos matemáticos e o método *stepwise* para o ajuste das equações de regressão para a estimativa da biomassa das árvores da área em estudo. Os compartimentos da biomassa utilizados foram: madeira do fuste, casca do fuste, galhos, folhagem, miscelânea e biomassa total. Como variáveis independentes das equações foram utilizadas a altura total (ht) e a altura do ponto de inversão morfológica (hm), em metros, e o diâmetro a altura do peito (1,3 m) (dap), em centímetros. Para o ajuste das equações de regressão, utilizou-se o método dos mínimos quadrados e na seleção das melhores equações consideraram-se as estatísticas do coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ), erro padrão da estimativa em percentagem ( $S_{yx}\%$ ), estatística F e análise gráfica da distribuição dos resíduos. Os melhores resultados foram obtidos para biomassa total, onde a melhor equação foi  $P = 284,499 - 58,61.dap + 4,213.dap^2 - 0,107.dap^3 + 0,001.dap^4 - (5,68E-6).dap^5$ , a qual apresentou  $R^2_{aj} = 0,955$  e  $S_{yx} = 45,47\%$ , e para a biomassa da madeira do fuste, onde a melhor equação foi  $P = 0,14.dap^2 + 0,10.hm^2 + 0,005.(dap^2.hm)$ , a qual apresentou  $R^2_{aj} = 0,972$  e  $S_{yx} = 34,30\%$ . Para os componentes casca do fuste, galhos vivos, galhos mortos, folhagem e miscelânea os resultados foram menos expressivos e as equações apresentaram estimativas com menor precisão. O método *stepwise* mostrou-se eficiente na escolha das variáveis a compor as equações de regressão e forneceu as melhores equações para os componentes casca do fuste, galhos vivos e miscelânea. A utilização de equações de regressão se mostrou uma boa alternativa como método não destrutivo de quantificação de biomassa.

Palavras-chave: Floresta com araucária; Regressão linear; *Stepwise*.

## ABSTRACT

Luis Carlos Ratuchne. Equations to estimative of biomass above ground in a Mixed Ombrophilous Montane Forest

The objective was to adjust and select equations for predicting above-ground biomass of individual trees in Mixed Ombrophilous Montane Forest, located in the city of General Carneiro, Paraná. We used a database obtained by destructive methods for quantification of biomass, consisting of 153 trees belonging to 38 species and 19 families, 20 being used mathematical models and the stepwise method for adjusting the regression equations to estimate the biomass of trees study area. The compartments of the biomass used were: stem wood, stem bark, live branches, dead branches, leaves and miscellaneous. As independent variables of the equations were used to total height (ht) and the height of the morphological inversion (hm), in meters, and diameter at breast height (1.3 m) (dap) in centimeters. To fit the regression, we used the least squares method and the selection of the best equations were considered the statistics of the adjusted coefficient of determination ( $R^2_{aj}$ ), standard error of estimate in percentage ( $S_{yx}\%$ ), F statistics and analysis graphical of waste distribution. The best results were obtained for total biomass, where the best equation was  $P = 284.499 - 58.61.dap + 4.213.dap^2 - 0.107.dap^3 + 0.001.dap^4 - (5.68 E-6).dap^5$ , which presented  $R^2_{aj} = 0.955$  and  $S_{yx} = 45.47\%$ , and the woody biomass of the stem, where the best equation was  $P = 0.14.dap^2 + 0.10.hm^2 + 0.005.(dap^2.hm)$ , which presented  $R^2_{aj} = 0.972$  and  $S_{yx} = 34.30\%$ . For the components of the stem bark, live branches, dead branches, leaves and miscellaneous results were less significant and the equations provided estimates with less precision. The stepwise method was efficient in the selection of variables to compose the regression equations and provided the best equations for the stem bark, live branches and miscellaneous components. The use of regression equations proved to be a good alternative as a non-destructive measurement of biomass.

Keywords: Araucaria forest; Linear regression; *Stepwise*.

## 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, tem sido crescente o interesse em conhecer os aspectos que envolvem a dinâmica das florestas tropicais, seu desenvolvimento, sua importância e formas de exploração sustentável. Este interesse vem do fato das florestas tropicais exercerem grande influência no balanço dos gases do efeito estufa e suas consequências para as mudanças climáticas do planeta, seja pelas emissões destes gases quando a floresta é queimada ou pelo potencial acúmulo na biomassa, quando do crescimento florestal (VISMARA, 2009).

Por acumular na estrutura carbônica das árvores elementos poluentes nocivos à qualidade de vida, cresce a cada dia o interesse pelos estudos de biomassa das florestas (SILVEIRA, 2008). No entanto, os estudos com a biomassa florestal também têm outras finalidades importantes, destacando-se a quantificação para fins energéticos, mercado de créditos de carbono, ciclagem de nutrientes e como base de informação para o manejo florestal (PÁSCOA *et al.*, 2008).

A grande maioria dos trabalhos com a biomassa florestal é realizada em plantações florestais, sendo pequena a quantidade de trabalhos de quantificação ou estimativa da biomassa em florestas naturais. Segundo Vismara (2009), a própria legislação impede, muitas vezes, a obtenção de amostras destrutivas de biomassa em florestas naturais, devido à proteção dos biomas e à extensão reduzida de muitos deles. Mas, as amostras destrutivas da biomassa são bases para o desenvolvimento de estudos de determinação e estimativas da biomassa florestal.

A Floresta Ombrófila Mista, apesar de seus fragmentos ainda apresentarem grande extensão territorial, aproximadamente 2,7 milhões de hectares no Paraná (SANQUETTA, 2003), não são muitos trabalhos de quantificação ou estimativa da biomassa. Assim, as informações sobre a biomassa, obtidas nos trabalhos realizados nesta tipologia florestal, ainda não compõem uma base capaz de caracterizar a biomassa da Floresta Ombrófila Mista como um todo, já que as características quantitativas da biomassa podem variar muito de local para local em um mesmo bioma (KOEHLER *et al.*, 2005).

O uso de estimativas da biomassa é bastante controverso, pois a utilização de equações para a estimativa da biomassa nos biomas das florestas tropicais pode incorrer em erros, já que estes biomas são os que apresentam maiores variações na biomassa (KOEHLER *et al.*, 2005). No entanto, devido a sua praticidade, as técnicas para estimativas vem sendo muito utilizadas e aprimoradas.

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi ajustar e selecionar equações matemáticas capazes de estimar a biomassa arbórea de um fragmento de Floresta Ombrófila Mista, localizada no município de General Carneiro, Paraná.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. A Floresta Ombrófila Mista

A Floresta Ombrófila Mista, ou floresta com araucária, é um tipo de vegetação do Planalto Meridional, onde ocorria com maior frequência. A sua composição florística, caracterizada por gêneros primitivos como *Drymis* e *Araucaria* (Australásicos) e *Podocarpus* (Afro-Asiáticos), sugere, em face da altitude e da latitude do Planalto Meridional, uma ocupação recente, apresentando quatro formações diferentes: aluvial, ao longo dos flúvios; submontana, de 50 a 400 metros de altitude; montana, de 400 a 1000 metros de altitude; e alto-montana, situadas a mais de 1000 metros de altitude (IBGE, 1992).

Esta tipologia florestal cobria originalmente cerca de 200.000 km<sup>2</sup> do território brasileiro, sendo 40% no Paraná, 31% em Santa Catarina, 25% no Rio Grande do Sul, 3% no sul de São Paulo e 1% distribuídos pelo sul dos estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais (CARVALHO, 1994). Atualmente, segundo Sanquetta (2003), os remanescentes da floresta com araucária ocupam cerca de 2,7 milhões de hectares do estado do Paraná, sendo, aproximadamente, 13% em bom estado de conservação.

A Floresta Ombrófila Mista distingue-se dos demais biomas florestais da Região Sul do Brasil pela presença marcante da *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze e se caracteriza pela ocorrência da mistura de diferentes espécies, definindo padrões fitofisionômicos típicos, em uma zona climática caracteristicamente pluvial (IBGE, 1992). Sendo a araucária uma espécie com madeira de alta qualidade, foi extensivamente explorada para atender à demanda do mercado interno e externo (ANJOS *et al.*, 2004). O processo extrativista e a derrubada da Floresta Ombrófila Mista começou por volta de 1895, quando o estado do Paraná era coberto por cerca de 167.000 km<sup>2</sup> desta floresta, com aproximadamente 70.000 km<sup>2</sup> de floresta natural de araucárias (MAACK, 1981).

Como os remanescentes da Floresta Ombrófila Mista estão presentes no Paraná e são muito importantes do ponto de vista florestal e ambiental, trabalhos com o intuito de elucidar a dinâmica destes fragmentos florestais, bem como quantificar a biomassa, o carbono e os nutrientes têm sido desenvolvidos, dos quais podem-se citar Sanquetta *et al.* (2001), Barth



Filho (2002), Caldeira (2003), Watzlawick (2003), Anjos *et al.* (2004), Rossi (2007), dentre muitos outros autores.

## 2.2. A Biomassa Florestal

A biomassa é a quantidade expressa em massa do material vegetal disponível em uma floresta (MARTINELLI *et al.*, 1994). Ela pode ser expressa por massa verde ou massa seca, sendo que a massa verde refere-se ao material fresco amostrado, contendo uma variável proporção de água. Já a massa seca refere-se à biomassa obtida após secagem do material em estufa (CALDEIRA, 2003).

Além dos principais elementos químicos que compõem a estrutura orgânica das plantas, carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O), existe uma grande variedade de outros elementos na biomassa, em várias formas químicas, e entre estes, os elementos químicos conhecidos como nutrientes, que são considerados essenciais para a vida. Devido à quantidade necessitada pelas plantas, são divididos em macronutrientes (nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S)) e micronutrientes (ferro (Fe), manganês (Mn), boro (B), cobre (Cu), zinco (Zn), molibdênio (Mo) e cloro (Cl)) (MALAVOLTA, 1980).

Segundo Larcher (2001), as concentrações dos constituintes da matéria seca da biomassa vegetal, formada especialmente por carbono e constituintes minerais, variam com a espécie, fase de desenvolvimento, estado nutricional, condições edafoclimáticas e com a parte do vegetal considerada. A madeira das árvores é composta, em média, por 50% de carbono, 43% de oxigênio, 6% de hidrogênio e 1% dos demais elementos minerais. Watzlawick *et al.* (2004) encontraram teores de carbono em espécies florestais da Floresta Ombrófila Mista Montana variando de 34,01% a 47,34%, dependendo da espécie e do componente considerado (fuste, casca, galhos, folhagem, miscelânea e da árvore total). Todos os componentes das árvores que não se enquadram como folhagem, fuste, galhos ou raízes são enquadrados como miscelânea.

Para Sanquetta (2002), os estudos da biomassa florestal podem ser realizados por determinações ou estimativas e podem ter diversas finalidades, como a quantificação do carbono fixado em uma floresta. O autor distingue determinação de estimativa, sendo a determinação uma medição real feita diretamente na biomassa. Já a estimativa é feita utilizando relações quantitativas ou matemáticas, como razões ou regressões. Para Watzlawick (2003), os estudos de quantificação da biomassa florestal são trabalhosos,

demorados e muito onerosos, pois envolvem procedimentos a campo, como de corte, separação e pesagem.

Em estudos feitos em pequenas áreas, todas as árvores podem ser derrubadas e pesadas. Em áreas maiores, não sendo possível a pesagem de todas as árvores, equações para estimativa podem ser ajustadas, correlacionando a biomassa com variáveis de fácil medição, como o diâmetro à altura do peito (dap), a área basal, a altura total da árvore ou a altura comercial (MARTINELLI *et al.*, 1994). Watzlawick *et al.* (2003) quantificaram a biomassa utilizando o método destrutivo, onde as árvores foram derrubadas, medidas, pesadas e seus componentes amostrados.

Mello e Gonçalves (2008) ajustaram equações para estimativa da biomassa dos componentes das árvores, a partir de dados coletados com a amostragem destrutiva de 10 árvores em cada sítio florestal. Segundo Martinelli *et al.* (1994), as equações para estimativa da biomassa florestal devem ser ajustadas e calibradas com dados obtidos por métodos de determinação direta, ou seja, métodos destrutivos.

Britez *et al.* (2006) destacaram a existência de poucos estudos avaliando a biomassa em ecossistemas tropicais. Para Watzlawick *et al.* (2004), isso se deve, principalmente, à complexidade destes ecossistemas.

### **2.3. Modelos de Regressão**

Segundo Rossi (2007), um modelo é qualquer representação simplificada de alguns aspectos de um sistema real, podendo tratar da estrutura ou de suas funções. O modelo pode envolver palavras, diagramas, mapas, equações, programas de computadores ou estruturas físicas para representar um sistema. Mas, os modelos não são capazes de fornecer claro entendimento sobre todas as questões que envolvem um sistema biológico e talvez nunca sejam. As equações são igualdades entre sentenças matemáticas e são compostas basicamente por variáveis e coeficientes. Os coeficientes têm seus valores conhecidos, enquanto as variáveis podem assumir qualquer valor.

Muitas relações dendrométricas são estudadas e passíveis de modelagem, tais como as relações entre altura e o diâmetro ou entre o peso, a altura e o diâmetro, e diversos problemas florestais são resolvidos utilizando-se de relações matemáticas, que possibilitam obter estimativas através de equações de regressão (SCHNEIDER, 1997). Segundo Finger (1992), o problema se resume em obter a expressão quantitativa de dependência entre uma variável de difícil medição, a variável dependente, e uma ou mais variáveis de fácil obtenção, as variáveis independentes.

Os modelos matemáticos de regressão podem ser lineares ou não lineares, sendo os modelos lineares aqueles cujos coeficientes apresentam-se na forma aditiva ou subtrativa e elevados ao expoente unitário (DRAPER e SMITH, 1981). Segundo Guimarães (2001), o ajuste de um modelo matemático de regressão, a um conjunto de dados obtidos experimentalmente, nada mais é do que encontrar os coeficientes da equação que melhor descreve o comportamento daquele conjunto de dados. E o ajuste dos modelos lineares de regressão pode ser feito pelo método dos mínimos quadrados, o qual garante que o erro cometido ao substituir os dados reais por dados estimados será mínimo (FINGER, 1992).

Para um conjunto de dados podem ser ajustados diversos modelos de regressão e a seleção de uma equação pode ser feita utilizando critérios estatísticos, como o coeficiente de determinação, o erro padrão da estimativa, a distribuição dos resíduos e a estatística F (SCHNEIDER, 1997; BAYER *et al.*, 2009).

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) expressa a quantidade de variação total explicada pela regressão. Assim, seleciona-se a equação que apresenta maior  $R^2$ . Já o erro padrão da estimativa ( $S_{yx}$ ) representa a dispersão entre os valores observados e estimados, sendo desejável que ele tenha o menor valor. A análise gráfica da distribuição dos resíduos entre a variável dependente estimada e observada permite observar possíveis tendências no ajuste ao longo da linha de regressão, sendo os resíduos calculados como a diferença entre a variável dependente observada e a estimada (MACHADO *et al.*, 2008). A estatística F mostra quanto o modelo ajustado representa a relação entre a variável dependente e as variáveis independentes, sendo preferíveis modelos com estatística F elevada (DRAPER e SMITH, 1981; SCHNEIDER, 1997).

Sanquetta *et al.* (2003) e Resende *et al.* (2006) utilizaram como critério para escolha dos melhores modelos de regressão maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) na equação ajustada, menor erro padrão da estimativa ( $S_{yx}$ ), maior estatística F e melhor distribuição gráfica dos resíduos. Já Silva *et al.* (2004) não utilizaram a estatística F, mas sim o erro padrão da estimativa em percentagem ( $S_{yx}\%$ ).

Segundo Draper e Smith (1981), a variável independente mais importante para compor um modelo de regressão é aquela que apresenta maior coeficiente de correlação simples com a variável dependente. Outra forma de obtenção das equações de regressão é a técnica *stepwise* ou regressão passo a passo. Segundo Téo (2009), o procedimento *stepwise* é uma tentativa de alcançar a melhor equação de regressão por meio da inserção de variáveis. A primeira variável independente a ser inserida no modelo matemático é a que apresenta o maior coeficiente de correlação com a variável dependente.

A inserção das demais variáveis é determinada pelo coeficiente de correlação parcial como medida da importância das variáveis que ainda não participam do modelo. Após a inserção de cada variável, o procedimento *stepwise* examina a significância das variáveis que já faziam parte do modelo matemático por meio do valor de “F” parcial. Se a variável apresenta valor de “F” estatisticamente significativo em um determinado nível de probabilidade, essa variável é mantida, caso contrário é eliminada. O procedimento se repete avaliando os coeficientes de correlação parcial e valores de “F” parcial para todas as variáveis independentes. De acordo com Draper e Smith (1981), o *stepwise* é o melhor procedimento de seleção de variáveis para compor equações de regressão.

Dependendo da natureza das estimativas, podem-se aceitar equações capazes de fornecer estimativas mais precisas ou menos precisas. Resende *et al.* (2006) ajustaram equações de regressão para estimar o volume, a biomassa e o estoque de carbono no Cerrado e consideraram, mesmo apresentando erros em torno de 30%, que as equações selecionadas foram satisfatórias, devido a variabilidade natural existente na estrutura da vegetação e na forma dos troncos das espécies lenhosas.

Baggio *et al.* (1995) ajustaram equações de regressão para estimar a biomassa de bracatinga (*Mimosa scabrella*) em idade de corte e fizeram ressalvas quanto à utilização das equações que ajustaram para a fração galhos, devido ao baixo nível de precisão. Já Mello e Gonçalves (2008), utilizaram equações para estimar a biomassa da parte aérea e do sistema radicular em povoamentos de *Eucalyptus grandis* e obtiveram resultados que consideraram satisfatórios, com  $R^2$  igual a 0,99 e  $S_{yx}$  igual a 0,6 nas melhores equações, resultados também obtidos por Schumacher e Caldeira (2007), o que sugere que em plantações as equações de regressão tendem a ser mais precisas do que em florestas naturais.

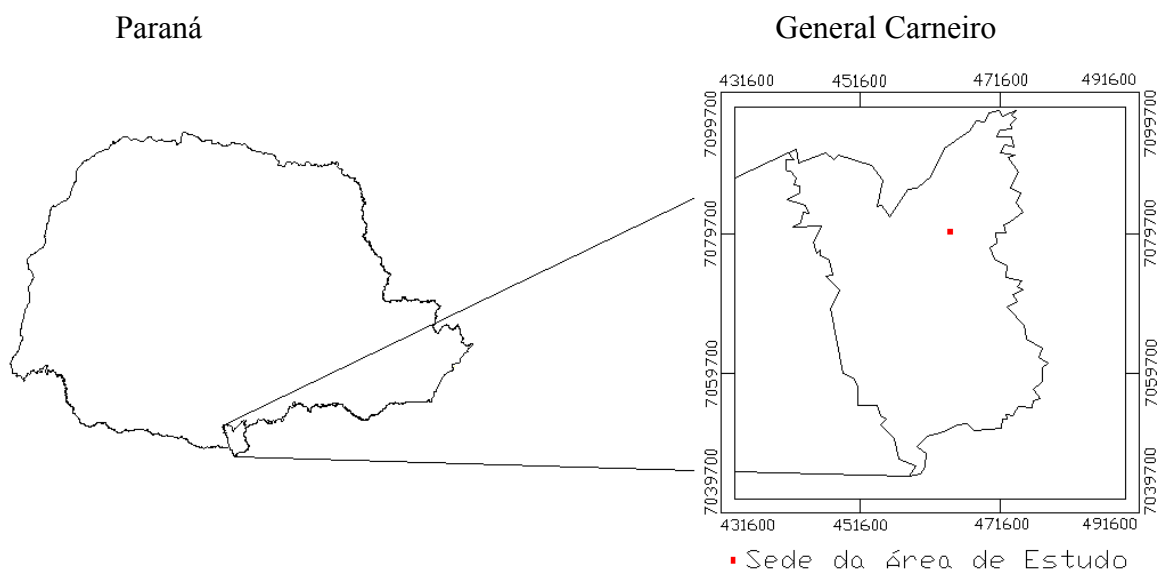
As equações ajustadas com dados de uma respectiva área não têm aplicação recomendada em outros fragmentos ou tipologias florestais, devido às características inerentes de cada área, como solo, espécies e condições climáticas, que têm influência direta no desenvolvimento vegetal (BAGGIO *et al.*, 1995; SILVEIRA, 2008).

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Caracterização geral da área do estudo**

A área em estudo localiza-se entre as coordenadas 26° 20' 35" e 26° 26' 13" Latitude Sul, e 51° 19' 49" e 51° 25' 29" Longitude Oeste, no município de General Carneiro, no estado do Paraná. A propriedade pertence às Indústrias Pedro N. Pizzatto Ltda e possui uma área de

4.210,75 hectares, e a sede está localizada nas coordenadas UTM 464478 E e 7079977 N, Fuso 22J, Datum SAD 69 Brasil. A Figura 1 apresenta a localização geográfica da área em estudo.



**Figura 1:** Localização geográfica da área em estudo.

Conforme classificação de Köppen, o clima da região é classificado como Subtropical Úmido Mesotérmico (Cfb), com verões amenos e invernos com severas geadas. Não possui estações secas e a precipitação anual média é de 1.830 mm. A temperatura média dos meses mais quentes é inferior a 22°C e dos meses mais frios é superior a 18°C (PARANÁ, 1987).

O substrato geológico da região é formado pelo derrame de Trapp da formação da Serra Geral (MAACK, 1981). Na região ocorre uma associação dos solos Neossolo Regolítico Húmico típico, de textura argilosa, álico, de relevo suave ondulado, e do solo Nitossolo Vermelho Distroférrico típico, de textura argilosa e relevo suave ondulado, ambos os solos tem como substratos rochas erúpticas (EMBRAPA, 2008). A topografia possui predominância da característica montanhosa, mas apresenta ainda relevos ondulado e plano (MAACK, 1981).

A vegetação natural da área corresponde ao bioma da Floresta Ombrófila Mista ou Floresta com Araucária (IBGE, 1992), tipologia florestal que cobria originalmente cerca de 70.000 km<sup>2</sup> do território paranaense (CARVALHO, 1994). Contudo, o fragmento florestal encontra-se bastante antropizado e em diversos estágios sucessionais.

Castella *et al.* (2001) descreveram a Floresta Ombrófila Mista Montana da região de General Carneiro – PR, em três estágios de sucessão: o inicial, o intermediário e o avançado.

No estágio inicial, os autores acima referenciados observaram as seguintes espécies: *Casearia obliqua*, *Cedrela fissilis*, *Mimosa scabrella*, *Piptocarpha angustifolia*, *Schinus*

*terebinthifolius*, *Zanthoxylum rhoifolium*, *Clethra scabra*, *Ocotea porosa*, *Prunus sellowii*, *Ilex paraguariensis*, *Rapanea ferruginea*, *Sapium glandulatum* e *Piptocarpha axillaris*. Na floresta em estágio médio, na maior parte dos fragmentos estudados foi observada a ocorrência de *Araucaria angustifolia*, porém com baixa frequência, sendo as principais espécies observadas: *Casearia decandra*, *Cedrela fissilis*, *Clethra scabra*, *Ilex brevicuspis*, *Ilex theezans*, *Jacaranda puberula*, *Litharea brasiliensis*, *Matayba elaeagnoides*, *Mimosa scabrella*, *Ocotea porosa*, *Piptocarpha angustifolia*, *Piptocarpha axillaris*, *Prunus sellowii*, *Rapanea ferruginea*, *Rapanea umbellata*, *Sapium glandulatum*, *Sebastiania brasiliensis*, *Sloanea lasiocoma*, *Syagrus romanzoffiana*, *Symplocos celastrine*, *Tibouchina sellowiana*, *Vernonia discolor* e *Zanthoxylum rhoifolium*.

Já no estágio avançado da floresta, os autores encontraram a *Araucaria angustifolia* ocorrendo no estrato dominante juntamente com outras espécies. As principais espécies encontradas foram *Campomanesia xanthocarpa*, *Cupania vernalis*, *Ilex brevicuspis*, *Matayba elaeagnoides*, *Mimosa scabrella*, *Ocotea porosa*, *Ocotea pulchella*, *Podocarpus lambertii*, *Prunus sellowii*, *Rapanea* sp. e *Sloanea lasiocoma*.

### 3.2. Material experimental

A base de dados do ajuste das equações para estimativas da biomassa arbórea foi obtida dos trabalhos de Watzlawick (2003). Os dados correspondem às medidas dendrométricas do diâmetro à altura do peito (1,3 m), o dap, a altura total da árvore e a altura do ponto de inversão morfológico, que corresponde a distância vertical entre o nível do solo e a primeira bifurcação, galho de grande porte ou tortuosidade (FINGER, 1992) e à quantificação da biomassa aérea de 153 árvores da Floresta Ombrófila Mista Montana, pertencentes a 38 espécies de 19 famílias. A Tabela 1 caracteriza a base de dados utilizada no trabalho.

**Tabela 1:** Espécies florestais da base de dados estudada (WATZLAWICK, 2003; CALDEIRA, 2003).

NOME CIENTÍFICO	NOME VULGAR	FAMÍLIA	N	DAP		HM		HT	
				MÍN.	MÁX.	MÍN.	MÁX.	MÍN.	MÁX.
<i>Allophylus edulis</i> (A. St.-Hil. et al.) Radlk	Chal-chal	<i>Sapindaceae</i>	5	7,03	44,60	2,41	4,36	7,37	19,30
<i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol.) Kuntze	Pinheiro-do-Paraná	<i>Araucariaceae</i>	15	45,60	105,68	5,10	27,45	12,70	30,10
<i>Calyptanthes concinna</i> DC.	Guamirim-ferro	<i>Myrtaceae</i>	2	8,79	20,69	4,00	4,29	8,03	10,55
<i>Campomanesia xanthocarpa</i> O. Berg	Guabioba	<i>Myrtaceae</i>	3	14,77	81,96	3,8	9,00	11,10	23,31
<i>Casearia decandra</i> Jacq.	Cafê-do-mato	<i>Salicaceae</i>	3	9,55	17,86	3,68	5,16	8,37	12,20

Continuação.

NOME CIENTÍFICO	NOME VULGAR	FAMÍLIA	N	DAP		HM		HT	
				MÍN.	MÁX.	MÍN.	MÁX.	MÍN.	MÁX.
<i>Clethra scabra</i> Pers.	Carne-de-vaca	<i>Clethraceae</i>	1	28,49	28,49	7,33	7,33	12,95	12,95
<i>Cupania vernalis</i> Cambess.	Miguel-pintado-graúdo	<i>Sapindaceae</i>	3	32,63	56,66	3,61	9,70	14,90	20,00
<i>Drimys cf. angustifolia</i> Miers	Cataia	<i>Winteraceae</i>	1	25,02	25,02	2,30	2,30	15,27	25,27
<i>Ilex dumosa</i> Reissek	Caúna-miúda	<i>Aquifoliaceae</i>	4	10,35	26,90	4,20	6,80	7,30	12,30
<i>Ilex microdonta</i> Reissek	Congonha	<i>Aquifoliaceae</i>	3	11,08	13,94	2,60	4,87	8,79	10,13
<i>Ilex paraguariensis</i> A. St. – Hil.	Erva-mate	<i>Aquifoliaceae</i>	14	5,41	23,68	5,10	7,40	6,40	13,10
<i>Ilex theezans</i> Mart.	Caúna-graúda	<i>Aquifoliaceae</i>	1	24,06	24,06	9,30	9,30	14,84	14,84
<i>Jacaranda puberula</i> Cham.	Caroba	<i>Bignoniaceae</i>	2	15,92	32,28	5,37	6,00	11,30	14,47
<i>Lamanonia ternata</i> Vell.	Guaperê	<i>Cunoniaceae</i>	1	38,67	38,67	8,00	8,00	15,34	15,34
<i>Lithraea brasiliensis</i> Marchand	Bugre	<i>Anacardiaceae</i>	4	7,00	17,57	3,50	4,00	9,60	11,20
<i>Matayba elaeagnoides</i> Radlk.	Miguel-pintado-miúdo	<i>Sapindaceae</i>	2	20,34	22,73	5,23	5,60	12,60	13,30
<i>Mimosa scabrella</i> Benth.	Bracatinga	<i>Mimosaceae</i>	4	22,73	35,52	4,70	7,90	12,70	16,22
<i>Myrcia</i> sp.	Guamirim	<i>Myrtaceae</i>	8	6,59	27,57	2,45	4,65	7,54	9,06
<i>Myrsine ferruginea</i> (Ruiz & Pav.) Mez	Copororoquinha	<i>Myrsinaceae</i>	10	10,66	37,08	2,10	13,00	10,80	18,20
<i>Myrsine umbellata</i> Mart.	Copororooca	<i>Myrsinaceae</i>	9	6,27	27,37	3,07	8,10	5,62	15,80
<i>Nectandra megapotamica</i> (Spreng.) Mez.	Canela-imbuia	<i>Lauraceae</i>	3	15,53	63,66	5,13	7,25	14,40	17,00
<i>Ocotea porosa</i> (Ness & Mart. Ex Ness) L. Barroso	Imbuia	<i>Lauraceae</i>	11	14,96	85,94	5,80	8,80	10,15	26,20
<i>Ocotea puberula</i> (A. Rich.) Ness	Canela-guaicá	<i>Lauraceae</i>	3	17,28	43,64	6,58	13,00	14,60	19,60
<i>Ocotea pulchella</i> Mart.	Canela-lageana	<i>Lauraceae</i>	2	11,94	47,43	4,50	5,40	11,15	19,20
<i>Persea major</i> (Ness) Kopp.	Pau-de-andrade	<i>Lauraceae</i>	1	40,01	40,01	4,93	4,93	15,20	15,20
<i>Piptocarpha angustifolia</i> Dusén	Vassourão-branco	<i>Asteraceae</i>	8	16,39	22,35	4,00	12,38	13,90	17,00
<i>Prunus brasiliensis</i> (Cham. & Schlechtr.) D. Dietr.	Pessegueiro-bravo	<i>Rosaceae</i>	1	33,87	33,87	8,84	8,84	17,00	17,00
<i>Quillaja brasiliensis</i> (A. St.-Hil. et Tul.) Mart.	Pau-sabão	<i>Rosaceae</i>	1	52,68	52,68	3,20	3,20	13,40	13,40
<i>Sapium glandulatum</i> (Vell.) Pax.	Leiteiro	<i>Euphorbiaceae</i>	7	14,90	27,85	10,30	13,96	12,80	18,60
<i>Schinus terebinthifolius</i> Raddi	Aroeira	<i>Anacardiaceae</i>	1	8,59	8,59	2,30	2,30	7,20	7,20
<i>Sebastiania brasiliensis</i> Spreng	Branquilha-miúdo	<i>Euphorbiaceae</i>	1	10,19	10,19	8,08	8,08	13,40	13,40
<i>Sebastiania commersoniana</i> (Baill.) L.B. Sm. & Downs	Branquilha	<i>Euphorbiaceae</i>	1	21,42	21,42	11,67	11,67	16,90	16,90
<i>Sloanea lasiocoma</i> K. Schum.	Sapopema	<i>Elaeocarpaceae</i>	1	31,61	31,61	6,00	6,00	10,60	10,60
<i>Styrax leprosus</i> Hook & Arn.	Maria-mole-graúda	<i>Styracaceae</i>	10	9,68	26,58	2,39	7,42	7,50	14,85
<i>Symplocos celastrina</i> Mart. ex Miq.	Maria-mole-branca	<i>Symplocaceae</i>	1	12,10	12,10	5,40	5,40	12,50	12,50
<i>Symplocos uniflora</i> (Pohl) Bent.	Sete-sanguia	<i>Symplocaceae</i>	4	10,98	21,96	5,75	6,23	10,13	11,60
<i>Vernonia discolor</i> (Spreng.) Less	Vassourão-preto	<i>Asteraceae</i>	1	25,46	25,46	6,00	6,00	13,20	13,20
<i>Xylosma</i> sp.	Sucará	<i>Flacourtiaceae</i>	1	17,35	17,35	2,05	2,05	11,30	11,30

Onde: N = número de indivíduos da mesma espécie; DAP = diâmetro a altura do peito (cm); HT = altura total (m); HM= altura do ponto de inversão morfológica (m).

Os dados da quantificação da biomassa de cada árvore estão apresentados na base de dados de forma total ou fracionados em biomassa da madeira do fuste, da casca do fuste, galhos vivos, galhos mortos, folhagem e miscelânea. A última corresponde ao material vegetal que não pode ser enquadrado nas outras categorias, tais como estruturas reprodutivas, líquens, dentre outros. A Tabela 2 apresenta as quantidades mínimas, médias e máximas de biomassa encontradas na base de dados utilizada no presente trabalho, por componente das árvores.

**Tabela 2:** Conteúdo de biomassa da base de dados (WATZLAWICK, 2003).

Componentes	Conteúdo de Biomassa (kg/árvore)		
	Mínimo	Máximo	Médio
Madeira do Fuste	3,86	3007,56	154,88
Casca do Fuste	0,29	2119,79	39,70
Galhos Vivos	1,62	2573,09	164,79
Galhos Mortos	0,01	177,72	4,60
Folhagem	0,12	165,10	9,41
Miscelânea	0,01	78,53	3,31
Total	7,87	5930,25	368,79

Pode-se observar na Tabela 2 que a amplitude dos dados é muito grande, caracterizando uma base de dados bastante heterogênea.

### 3.3. Métodos

#### 3.3.1. Modelagem da biomassa

A partir da base de dados, foram ajustadas equações de regressão utilizando como variável dependente o peso de biomassa em kg, e como variáveis independentes o diâmetro à altura do peito (1,3 m), a altura total da árvore (Ht) e a altura do ponto de inversão morfológico (Hm).

O ajuste destas equações foi feito com o objetivo de estimar a biomassa total das árvores, a biomassa do fuste, biomassa da casca, biomassa dos galhos vivos, biomassa dos galhos mortos, biomassa da folhagem e biomassa da miscelânea.

Para a modelagem da biomassa, a base de dados foi dividida em base de ajuste e base de validação. As 153 árvores foram dispostas em uma tabela de frequências, com 9 classes de dap, sendo selecionadas ao acaso 10 árvores para compor a base de validação, distribuídas de acordo com frequência relativa de cada classe. O número de classes foi calculado com a



fórmula:

Número de classes =  $2,5 * \sqrt[4]{n}$ , onde  $n$  é o número de elementos da amostra (KOEHLER, 2004).

Os modelos matemáticos utilizados para ajuste das equações de regressão, para estimativa da biomassa, estão apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3:** Modelos matemáticos para ajuste de equações de regressão.

Modelo	
1	$P = a.dap^b$
2	$P = a + b.dap + c.dap^2$
3	$P = a + b.dap + c.(dap^2.h)$
4	$P = a + b.dap + c.dap^2 + d.(dap^2.h)$
5	$P = a + b.dap^2 + c.(dap^2.h)$
6	$P = a + b.dap + c.h$
7	$P = a.dap^b.h^c$
8	$P = a + b.dap$
9	$P = a + b.dap^2$
10	$P = a + b.dap^3$
11	$P = a + b.dap^2.h$
12	$\ln P = a + b.\ln dap$
13	$\ln P = a + b.\ln dap^2$
14	$\ln P = a + b.\ln dap^3$
15	$\ln P = a + b.\ln (dap^2.h)$
16	$P = a + b.dap + c.dap^2 + d.dap^3$
17	$P = a + b.dap + c.dap^2 + d.dap^3 + e.dap^4$
18	$P = a + b.dap + c.dap^2 + d.dap^3 + e.dap^4 + f.dap^5$
19	$\ln P = a + b.\ln h$
20	$P = a + b.dap^2 + c.h^2 + d.(dap^2.h)$

Onde: a, b, c, d, e, f = coeficientes estimados por regressão; dap = diâmetro a altura do peito (1,3 m) da árvore; ln = logaritmo natural; P = peso da biomassa e h = altura total (ht) ou altura do ponto de inversão morfológica (hm).

O ajuste das equações para estimar a biomassa foi feito pelo método dos mínimos quadrados, utilizando o pacote Microsoft Office Excel 2003<sup>®</sup>. Para o método *Stepwise* utilizou-se o software estatístico SPSS<sup>®</sup>.

### **3.3.2. Análises estatísticas e escolha das melhores equações**

A escolha das melhores equações para estimativas da biomassa, ajustadas com a base de dados em estudo, foi realizada com base nos seguintes critérios estatísticos: maior coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ), menor erro padrão da estimativa ( $S_{yx}$ ), maior estatística F e melhor distribuição dos resíduos.

Para corrigir a discrepância logarítmica na estimativa da biomassa utilizando modelos logarítmicos linearizados, a biomassa estimada foi corrigida multiplicando-se pela expressão conhecida como índice de Meyer (IM):  $IM = e^{0,5*S^2_{yx}}$ , onde  $e$  = base dos logaritmos neperianos e  $S^2_{yx}$  = quadrado do erro padrão da estimativa (ORELLANA e KOEHLER, 2008; MACHADO *et al.*, 2008).

### **3.3.3. Validação das equações ajustadas**

A validação das equações foi feita utilizando a base de validação composta por 10 árvores independentes dos dados utilizados no ajuste, cobrindo toda a amplitude de diâmetros das árvores em estudo. Utilizando a base de validação, foi feita a distribuição gráfica dos resíduos, com a finalidade de auxiliar na escolha dos melhores modelos e de identificar possíveis tendências no ajuste.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1. Matriz de correlação simples**

A matriz de correlação simples é um importante instrumento para verificar o grau de associação entre as variáveis independentes e o peso da biomassa. No entanto, o agrupamento destas variáveis explicativas em uma equação pode mudar a capacidade de correlação com os dados.

As variáveis independentes que apresentaram melhor correlação com a biomassa total foram o  $dap^2$  e o  $dap^2.ht$ , resultados similares aos encontrados por Silveira (2008) em trabalhos de estimativa da biomassa em uma Floresta Ombrófila Densa.

A variável combinada  $dap^2.ht$  também apresentou o melhor coeficiente de correlação entre o compartimento biomassa da madeira do fuste (0,99). Resultado também encontrado por Urbano (2007), que encontrou um coeficiente de correlação entre estas variáveis igual a 0,970 em trabalhos com biomassa em bracatingais nativos. A matriz de correlação entre as

variáveis independentes dap, ht, hm e suas variações e o peso da biomassa dos compartimentos está apresentada na Tabela 4.

**Tabela 4:** Matriz de correlação simples entre as variáveis dependentes e independentes dos modelos de equações de regressão.

Variáveis Independentes	Compartimentos da Biomassa						
	BF	BC	BGV	BGM	BFL	BM	BT
dap	0,87	0,57	0,78	0,49	0,70	0,69	0,89
ht	0,70	0,50	0,53	0,22	0,60	0,50	0,69
hm	0,55	0,61	0,08	0,01	0,55	0,09	0,43
log dap	0,69	0,40	0,64	0,44	0,60	0,55	0,71
ln ht	0,59	0,39	0,48	0,23	0,53	0,44	0,59
dap <sup>2</sup>	0,96	0,70	0,78	0,46	0,68	0,72	0,96
dap <sup>3</sup>	0,97	0,80	0,69	0,38	0,62	0,67	0,95
dap <sup>4</sup>	0,94	0,86	0,58	0,30	0,54	0,59	0,89
dap <sup>5</sup>	0,90	0,90	0,47	0,23	0,48	0,50	0,83
dap <sup>2</sup> *ht	0,99	0,82	0,69	0,32	0,65	0,68	0,96
ln dap <sup>2</sup>	0,69	0,40	0,64	0,44	0,60	0,55	0,71
ln hm	0,41	0,40	0,08	0,02	0,42	0,09	0,32
dap <sup>2</sup> *hm	0,92	0,97	0,38	0,16	0,62	0,41	0,82

Onde: BF = biomassa da madeira fuste; BC = biomassa da casca do fuste; BGV = biomassa dos galhos vivos; BGM = biomassa dos galhos mortos; BFL = biomassa da folhagem; BM = biomassa da miscelânea; BT = biomassa total; dap = diâmetro a altura do peito (1,3 m) da árvore; ln = logaritmo natural; log = logaritmo na base 10; ht = altura total; hm = altura do ponto de inversão morfológica.

Observou-se que para os compartimentos da biomassa galhos vivos, galhos mortos, folhagem e miscelânea as correlações foram baixas e inferiores a 0,8. Silveira (2008) encontrou resultados similares para os compartimentos miscelânea e folhagem. Para os galhos este autor encontrou um coeficiente de correlação igual a 0,856. Já Urbano (2007) encontrou um coeficiente de correlação entre a biomassa dos galhos com mais de 4 cm de diâmetro e a variável dap<sup>2</sup>.hm, onde hm é a altura da copa, no caso igual a 0,95. Já para os galhos com diâmetro inferior a 4 cm este autor não encontrou coeficiente de correlação superior a 0,86, o que indica a dificuldade que as variáveis têm em correlacionar com a biomassa dos galhos, da folhagem e da miscelânea.

## 4.2. Ajuste de equações para estimativa da biomassa aérea total

Os ajustes das equações para estimativa da biomassa foram feitos utilizando as variáveis independentes altura total e altura do ponto de inversão morfológica, separadamente, apresentado resultados distintos.

Muitas equações apresentaram estimativas negativas da biomassa no momento da validação, sendo necessário nestes casos forçar a passagem da curva de regressão pela origem, igualando a constante a zero. Tal procedimento não apresentou alterações significativas nas estatísticas das equações de regressão.

As seis equações selecionadas para estimar a biomassa total apresentaram estatísticas muito parecidas, pois o  $R^2_{aj}$  ficou entre 0,954 e 0,971 e o  $S_{yx}\%$  entre 36,27 e 47,85. Santana *et al.* (2008) consideram um  $R^2$  de 0,85 alto para um modelo bastante abrangente, sugerindo que o  $R^2_{aj}$  superior a 0,9, encontrado na maioria das equações, é altamente significativo, como pode ser observado na Tabela 5.

**Tabela 5:** Resultados do ajuste de equações para estimativa da biomassa aérea total.

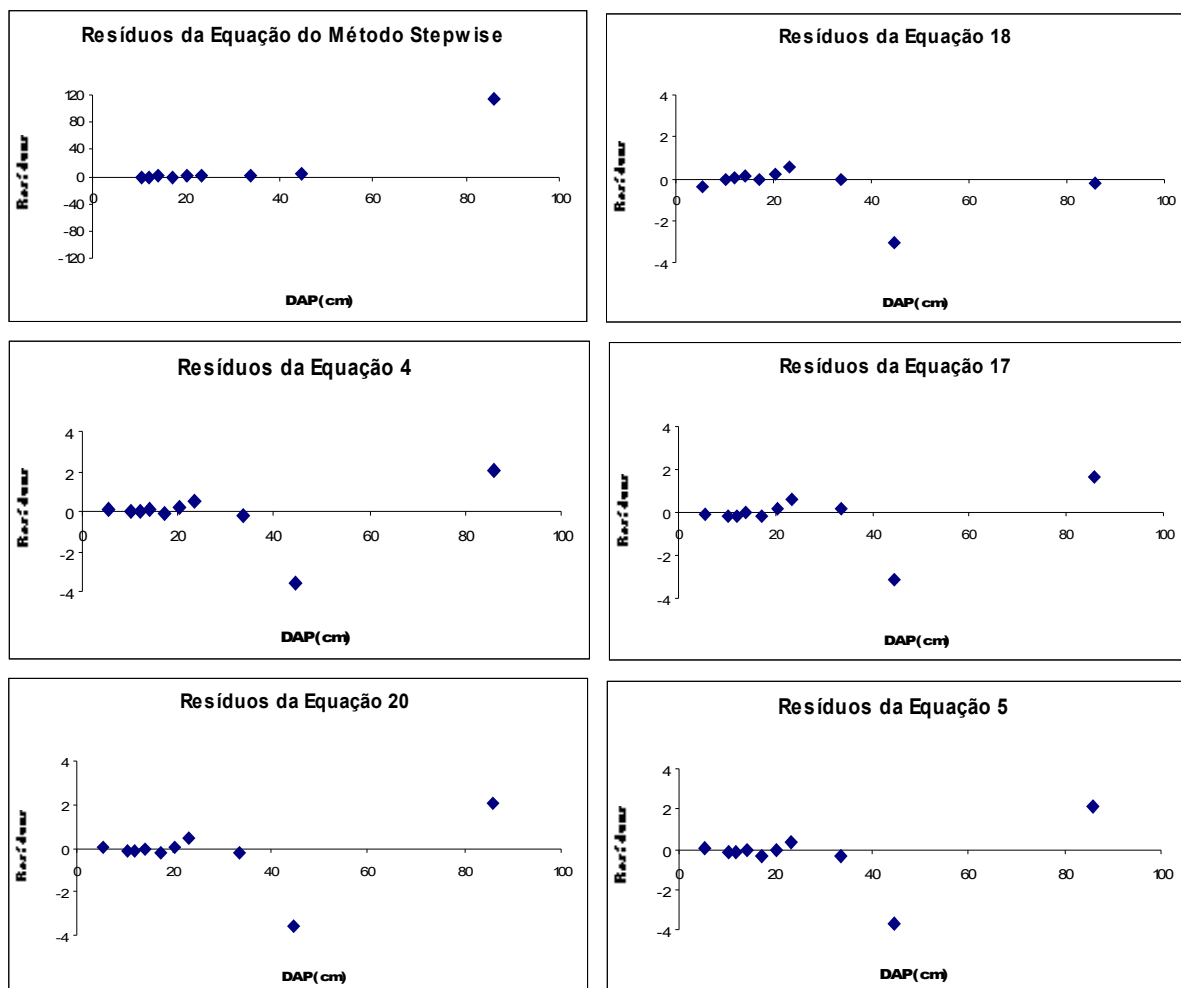
EQUAÇÕES	ESTATÍSTICAS		
	$R^2_{aj}$	$S_{yx}\%$	F
<i>Stepwise</i> : $P = 23,846 + 0,03 \cdot dap^2 \cdot ht - (2,15E-06) \cdot dap^5 - 0,011 \cdot dap^3$	0,971	36,27	1197,39
18 $P = 284,499 - 58,61 \cdot dap + 4,213 \cdot dap^2 - 0,107 \cdot dap^3 + 0,001 \cdot dap^4 - (5,68E-6) \cdot dap^5$	0,955	45,47	599,91
4 $P = -3,025 \cdot dap + 0,425 \cdot dap^2 + 0,006 \cdot (dap^2 \cdot ht)$	0,955	47,24	1192,31
17 $P = 4,268 \cdot dap - 0,114 \cdot dap^2 + 0,013 \cdot dap^3 - (7,22E-05) \cdot dap^4$	0,954	46,53	878,92
20 $P = 0,340 \cdot dap^2 - 0,122 \cdot ht^2 + 0,008 \cdot (dap^2 \cdot ht)$	0,954	46,71	1162,31
5 $P = 0,317 \cdot dap^2 + 0,009 \cdot (dap^2 \cdot ht)$	0,954	47,85	1740,17

Onde: a, b, c, d, e, f = coeficientes estimados por regressão; dap = diâmetro a altura do peito (1,3 m) da árvore; ln = logaritmo natural; p = peso da biomassa, ht = altura total e hm = altura do ponto de inversão morfológica.

Miranda (2008) encontrou resultados melhores no ajuste de equações para estimativa da biomassa total em áreas de restauração da Floresta Estacional Semidecidual, no sudoeste do estado de São Paulo, com  $R^2$  igual a 0,97 e  $S_{yx}$  de 20,98%, mas para áreas de vegetação exótica, com uniformidade de idades. Isso pode ser ratificado com os resultados encontrados por Valerio *et al.* (2007), que encontrou com o modelo 4 utilizado no presente trabalho, uma equação para estimativa da biomassa total com  $R^2_{aj}$  igual a 97,53 e  $S_{yx}$  de 9,77%, para a uva do Japão (*Hovenia dulcis* Thumb.), sugerindo que equações ajustadas com maior homogeneidade de espécies podem ser mais precisas.

A distribuição dos resíduos mostra tendência da equação obtida pelo método *stepwise* em subestimar a biomassa para árvores com dap maior, como se pode observar na Figura 2.

Característica também observada na maioria das demais equações, mas com menor expressão. Esta tendência pode ser explicada pelo fato de a base de dados, como a maioria das florestas naturais, apresentar baixa frequência de árvores nas classes diamétricas maiores.



**Figura 2:** distribuição dos resíduos das seis melhores equações para estimativa da biomassa total.

A equação 18 ( $P = 284,499 - 58,61.dap + 4,213.dap^2 - 0,107.dap^3 + 0,001.dap^4 - (5,68E-6).dap^5$ ) não apresentou as melhores estatísticas dentre as equações ajustadas, mas a análise gráfica dos resíduos descartou a equação obtida pelo método *stepwise*, devido a tendência expressiva em subestimar a biomassa em árvores de maior dap. Assim, pode-se considerar que a equação 18 é a melhor para a estimativa da biomassa total das árvores da área em estudo.

### 4.3. Ajuste de equações para estimativa da biomassa da madeira do fuste

A equação obtida pelo método *stepwise* apresentou as melhores estatísticas e é composta pelas variáveis dap, ht e hm, ao contrário das outras cinco equações, onde nenhuma apresentou estas três variáveis independentes na mesma equação. Também pode-se observar que as seis equações selecionadas apresentaram a variável combinada  $dap^2 \cdot hm$  ou  $dap^2 \cdot ht$ , sugerindo que a combinação das variáveis altura e dap fornece melhor correlação com a biomassa que quando estas variáveis são utilizadas separadamente.

Esses resultados também foram observados por Valerio *et al.* (2007), que encontraram  $R^2_{aj}$  de 0,968, mas com  $S_{yx}\%$  menor, igual a 11,49%, para equações similares ajustadas para estimativa da biomassa do fuste de uva do Japão (*Hovenia dulcis* Thumb.). Estes autores concluíram que equações compostas pelas variáveis altura total e dap possuem alta correlação com a biomassa. A Tabela 6 apresenta as seis melhores equações ajustadas para a estimativa da biomassa da madeira do fuste.

**Tabela 6:** Resultados do ajuste de equações para estimativa da biomassa da madeira do fuste.

EQUAÇÕES	ESTATÍSTICAS		
	$R^2_{aj}$	$S_{yx}\%$	F
<i>Stepwise</i> : $P = -77,89 + 0,007 \cdot (dap^2 \cdot ht) - (1,12E-06) \cdot dap^5 + 0,009 \cdot (dap^2 \cdot hm) - 0,006 \cdot dap^3 + 12,295 \cdot \ln(dap^3)$	0,990	21,55	2346,8
20 $P = 0,14 \cdot dap^2 + 0,10 \cdot hm^2 + 0,005 \cdot (dap^2 \cdot hm)$	0,972	34,30	2228,2
5 $P = 0,14 \cdot dap^2 + 0,01 \cdot (dap^2 \cdot hm)$	0,972	34,45	3313,2
4 $P = -0,37 \cdot dap + 0,15 \cdot dap^2 + 0,005 \cdot (dap^2 \cdot hm)$	0,972	34,45	2209,2
15 $\ln P = 0,54 \cdot \ln(dap^2 \cdot hm)$	0,972	148,34	6610,0
3 $P = -8,73 + 1,47 \cdot dap + 0,01 \cdot (dap^2 \cdot ht)$	0,971	36,45	2414,8

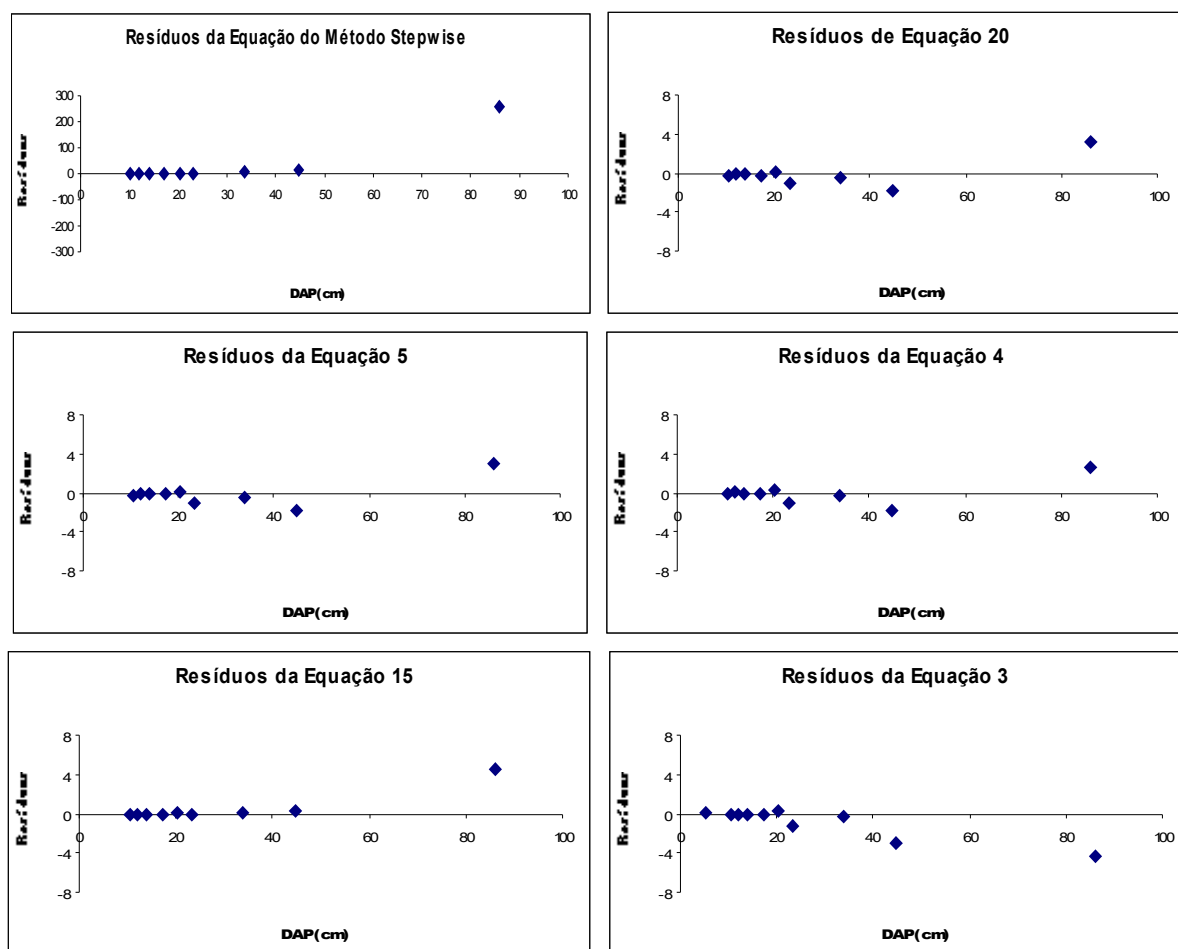
Onde: a, b, c, d, e, f = coeficientes estimados por regressão; dap = diâmetro a altura do peito (1,3 m) da árvore; ln = logaritmo natural; p = peso da biomassa, ht = altura total e hm = altura do ponto de inversão morfológica.

A equação 15 apresentou o  $R^2_{aj}$  elevado, no entanto, o  $S_{yx}\%$  foi de 148,34, devendo ser descartada, pois suas estimativas não são precisas. Já as equações 20, 5, 4, 3 e a equação obtida pelo método *stepwise* apresentaram coeficiente de determinação ajustado muito próximos, mas com erro padrão da estimativa significativamente menor, sendo mais interessantes do ponto de vista prático, pois fornecem estimativas mais precisas.

Miranda (2008), no ajuste de equações para estimativa da biomassa da madeira do fuste numa área de restauração, encontrou resultados similares aos do presente trabalho e observou que os modelos que apresentam apenas a variável dap não fornecem equações precisas, fato também observado no presente trabalho.

O resultado encontrado para as equações sugere bons ajustes, principalmente considerando a heterogeneidade das espécies, que estão em diversos estágios de desenvolvimento. Socher (2004) ajustou equações para estimativa da biomassa em uma área de Floresta Ombrófila Mista Aluvial e seus resultados foram muito próximos aos do presente trabalho, o  $R^2_{aj} = 0,939$  e  $S_{yx}\% = 20,21$ . Este autor considerou que os resultados foram satisfatórios, principalmente pelo fato das equações serem ajustadas com uma base de dados muito ampla, contemplando diversas espécies. Já Páscoa *et al.* (2008), encontraram  $R^2_{aj}$  de 0,930, no ajuste de equações para estimativa da biomassa do fuste de pinheiro bravo e consideram as equações de boa qualidade.

A distribuição gráfica dos resíduos mostrou que a equação obtida pelo método *stepwise* apresenta expressiva tendência em subestimar a biomassa da madeira do fuste para árvores com dap entre 80 e 90 cm, devendo ser descartada, uma vez que as demais equações apresentaram estatísticas similares. No entanto, todas as equações apresentaram tendência em aumentar a amplitude dos resíduos nas estimativas para árvores com maior dap, como pode ser observado na Figura 3, mas com menor expressão que para a equação *stepwise*.



**Figura 3:** Distribuição gráfica dos resíduos das seis equações selecionadas para estimativa da biomassa da madeira do fuste.

Neste sentido, como a equação obtida pelo método *stepwise* foi rejeitada pela análise gráfica dos resíduos, a melhor equação para estimativa da biomassa da madeira do fuste é a equação 20 ( $P = 0,14.dap^2 + 0,10.hm^2 + 0,005.(dap^2.hm)$ ).

#### 4.4. Ajuste de equações para estimativa da biomassa da casca do fuste

De uma maneira geral, as equações ajustadas para estimativa da biomassa da casca do fuste apresentaram bom coeficiente de determinação ajustado, mas alto erro padrão da estimativa. Os  $R^2_{aj}$  ficaram abaixo dos observados por Miranda (2008), que foram superiores a 0,98, e superiores ao encontrado por Páscoa *et al.* (2008), que foi de 0,9209. Já Socher (2004), encontrou coeficiente de determinação ajustado muito inferior (0,457) e erro padrão da estimativa similar ou superior aos do presente trabalho, 78,20%, como pode ser observado na Tabela 7.

**Tabela 7:** Resultados do ajuste de equações para estimativa da biomassa da casca do fuste.

EQUAÇÕES	ESTATÍSTICAS		
	$R^2_{aj}$	$S_{yx}\%$	F
<i>Stepwise</i> : $P = 52,269 + 0,011.dap^2hm - 0,004.dap^2ht + 2,752.dap - 13,263.ln(dap^2.hm)$	0,976	68,17	1469,2
4 $P = 0,755.dap - 0,052.dap^2 + 0,009.(dap^2.hm)$	0,963	78,22	1554,1
20 $P = -0,037.dap^2 + 0,110.hm^2 + 0,008.(dap^2.hm)$	0,962	79,31	1510,4
5 $P = -0,037.dap^2 + 0,008.(dap^2.hm)$	0,961	81,05	2166,2
3 $P = -1,051.dap + 0,007.(dap^2.hm)$	0,944	100,27	1390,8
11 $P = 0,006.dap^2.hm$	0,929	115,13	2074,8

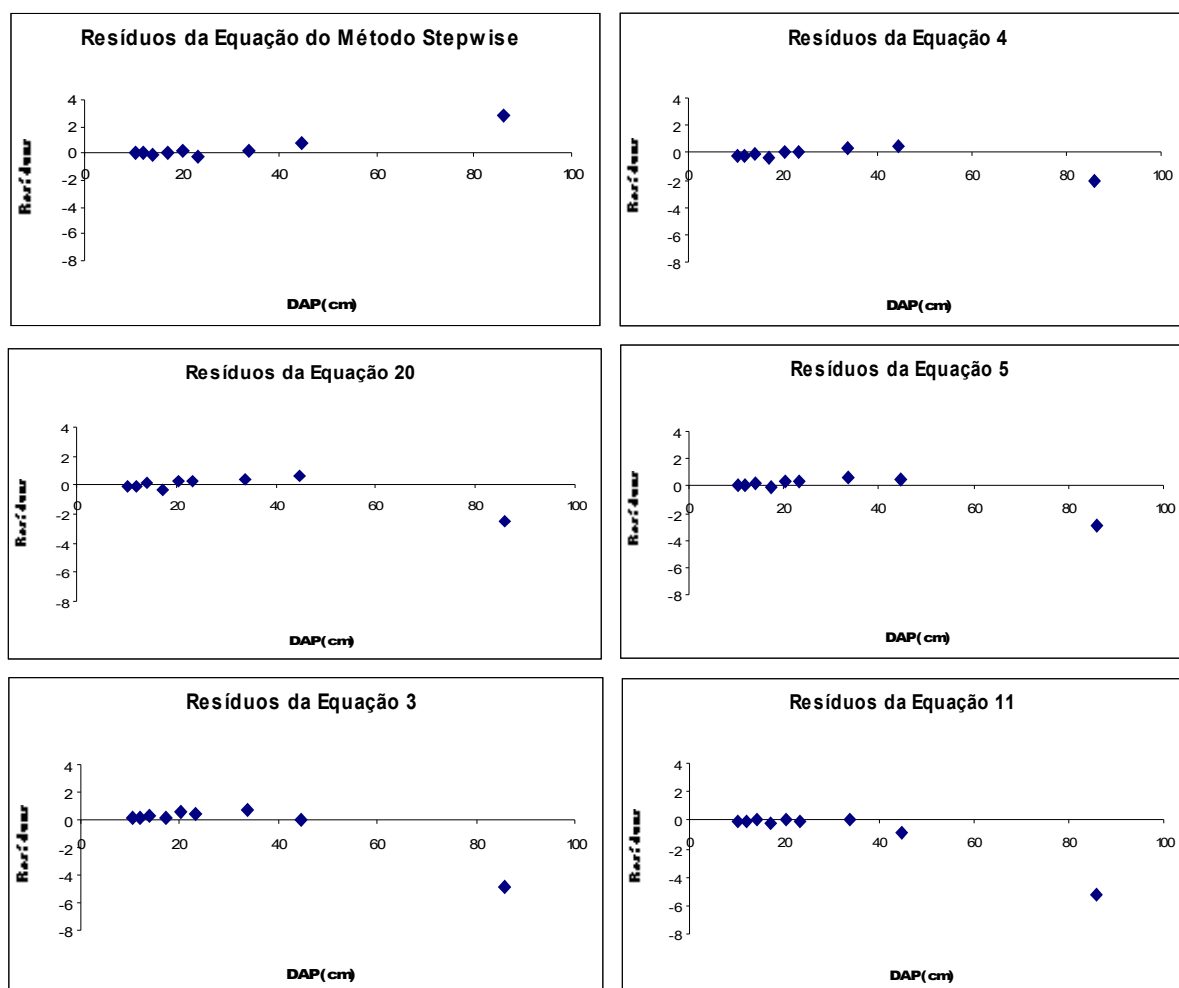
Onde: a, b, c, d, e, f = coeficientes estimados por regressão; dap = diâmetro a altura do peito (1,3 m) da árvore; ln = logaritmo natural; p = peso da biomassa, ht = altura total e hm = altura do ponto de inversão morfológica.

Novamente observou-se a presença da variável combinada  $dap^2.hm$  nas equações selecionadas, demonstrando a boa correlação desta variável com a biomassa da casca do fuste, fato também observado por Socher (2004), que utilizou modelos similares.

Embora o  $R^2_{aj}$  tenha se apresentado satisfatório, o  $S_{yx}$  foi muito elevado, o que denota certa imprecisão dos modelos. Socher (2004) encontrou equações com estatísticas similares para estimativa da biomassa da casca de um trecho de floresta Ombrófila Mista Aluvial. Este autor considerou insatisfatórios os resultados e ponderou que a inclusão de uma variável que represente a espessura da casca pode melhorar a precisão das estimativas das equações ajustadas.



Na análise gráfica dos resíduos verificou-se que a característica das equações aumentarem os resíduos absolutos nas estimativas para as árvores de maior dap ficou menos evidente, como pode ser observado na figura 4, no entanto, ainda está presente na maioria das equações.



**Figura 4:** Distribuição gráfica dos resíduos das seis equações selecionadas para estimativa da biomassa da casca do fuste.

Após análise gráfica dos resíduos e das estatísticas das equações, pode-se considerar que a melhor equação para a estimativa da biomassa da casca foi obtida pelo método *stepwise*, onde  $P = 52,269 + 0,011.dap^2hm - 0,004.dap^2ht + 2,752.dap - 13,263.ln(dap^2.hm)$ .

#### 4.5. Ajuste de equações para estimativa da biomassa da folhagem

As equações ajustadas se mostraram pouco eficientes para estimar a biomassa da folhagem, como pode ser observado na Tabela 8. A equação obtida pelo método *stepwise* apresentou coeficiente de determinação ajustado similar ao encontrado por Socher (2004), em

equações para a uma floresta Ombrófila Mista Aluvial, onde encontrou  $R^2_{aj}$  de 0,705 e  $S_{yx}$  de 62,79%, resultados que esse autor considerou insatisfatórios.

**Tabela 8:** Resultados do ajuste de equações para estimativa da biomassa da folhagem.

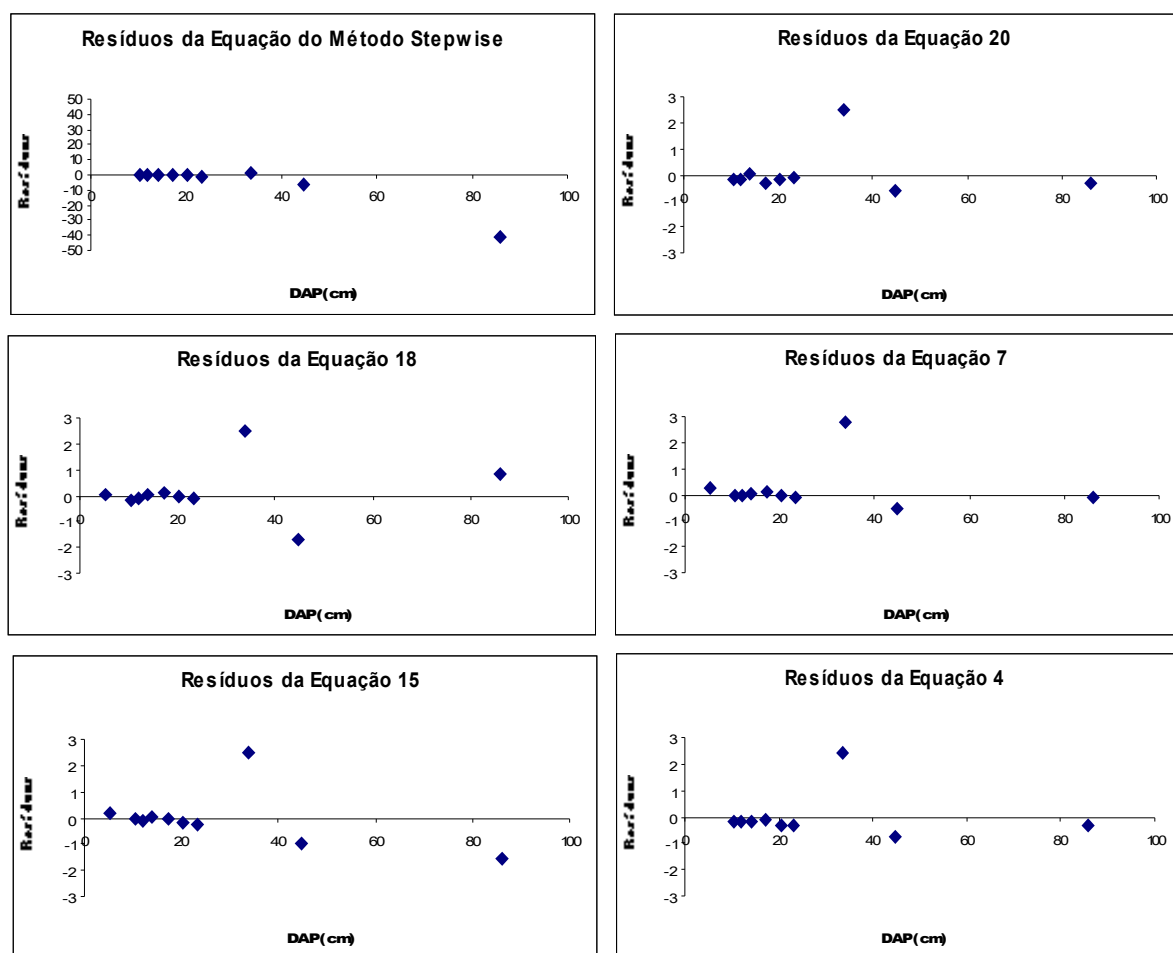
EQUAÇÕES	ESTATÍSTICAS		
	$R^2_{aj}$	$S_{yx}\%$	F
<i>Stepwise</i> : $P = 7,92 - (1,83E-07).dap^5 + 0,002.(dap^2.hm) + (2,14E-05).dap^4 - 4,187.ln$ hm	0,791	97,82	105,9
20 $P = 0,008.dap^2 + 0,091.hm^2 - 0,0002.(dap^2.hm)$	0,633	139,14	83,1
18 $P = 0,926.dap - 0,107.dap^2 + 0,005.dap^3 - (6,42E-05).dap^4 + (2,87E-7).dap^5$	0,601	145,17	44,0
15 $ln P = -5,118 + 0,742.ln (dap^2.ht)$	0,583	149,61	195,2
7 $P = 0,006.dap^{1,510}.ht^{0,685}$	0,580	150,18	96,9
4 $P = 0,280.dap + 0,003.dap^2 + (1,906E-04).(dap^2.hm)$	0,578	149,43	66,0

Onde: a, b, c, d, e, f = coeficientes estimados por regressão; dap = diâmetro a altura do peito (1,3 m) da árvore; ln = logaritmo natural; p = peso da biomassa, ht = altura total e hm = altura do ponto de inversão morfológica.

Valerio *et al.* (2007) ajustaram equações para estimar a biomassa da folhagem da uva do Japão (*Hovenia dulcis* Thumb.) e encontram uma equação com  $R^2_{aj}$  de 0,907 e  $S_{yx}$  de 22,58%. Nesse caso deve-se considerar que a equação foi ajustada para uma única espécie. Já Páscoa *et al.* (2008) encontraram resultados menos expressivos no ajuste de equações para estimativa da biomassa da folhagem do pinheiro bravo,  $R^2_{aj}$  de 0,865, mas ainda melhores que o do presente trabalho, no entanto, apenas para uma espécie.

Os baixos coeficientes de determinação ajustados e os altos erros padrão das estimativas das equações ajustadas para a estimativa da biomassa da folhagem podem ser explicados pela grande abrangência da base de dados, composta por diversas espécies com características muito diversificadas. Fato observado também por Miranda (2008), que considerou não satisfatórias as equações ajustadas para estimativa da biomassa da folhagem em uma área de restauração, quando encontrou coeficiente de determinação de 0,6868 e erro padrão de 81,71%.

A análise gráfica da distribuição dos resíduos mostrou a tendência em aumentar os resíduos absolutos nas estimativas para árvores com maior dap, característica também observada em outros compartimentos. Mas a análise mostra que a equação obtida pelo método *stepwise* deve ser descartada, pois superestimou a biomassa da folhagem de uma árvore com dap superior a 80 cm, como pode ser observado na Figura 5.



**Figura 5:** Distribuição gráfica dos resíduos das seis equações selecionadas para estimativa da biomassa da folhagem.

Neste sentido, a melhor equação ajustada para a estimativa da biomassa da folhagem das árvores da área em estudo, de acordo com as estatísticas e a análise gráfica da distribuição dos resíduos, é a equação 20 ( $P = 0,008.dap^2 + 0,091.hm^2 - 0,0002.(dap^2.hm)$ ). Apesar de não apresentar estimativas muito precisas, por apresentar um nível de erro bastante elevado, as estimativas da equação podem fornecer informações importantes sobre o estoque de biomassa na folhagem das árvores da Floresta Ombrófila Mista.

#### 4.6. Ajuste de equações para estimativa da biomassa dos galhos vivos

Os resultados mostram que existe boa correlação entre as variáveis independentes e a biomassa dos galhos vivos, mas que o erro padrão da estimativa é alto, mesmo na melhor equação ajustada. Nas seis equações selecionadas figurou a variável independente hm e apenas na equação com melhores estatísticas, que foi obtida pelo método *stepwise*, figurou a variável ht. Isso pode explicar as melhores estatísticas apresentadas pela equação *stepwise*, já

que foi a única equação composta pelas três variáveis independentes: dap, ht e hm., como pode ser observado na Tabela 9.

**Tabela 9:** Resultados do ajuste de equações para estimativa da biomassa dos galhos vivos.

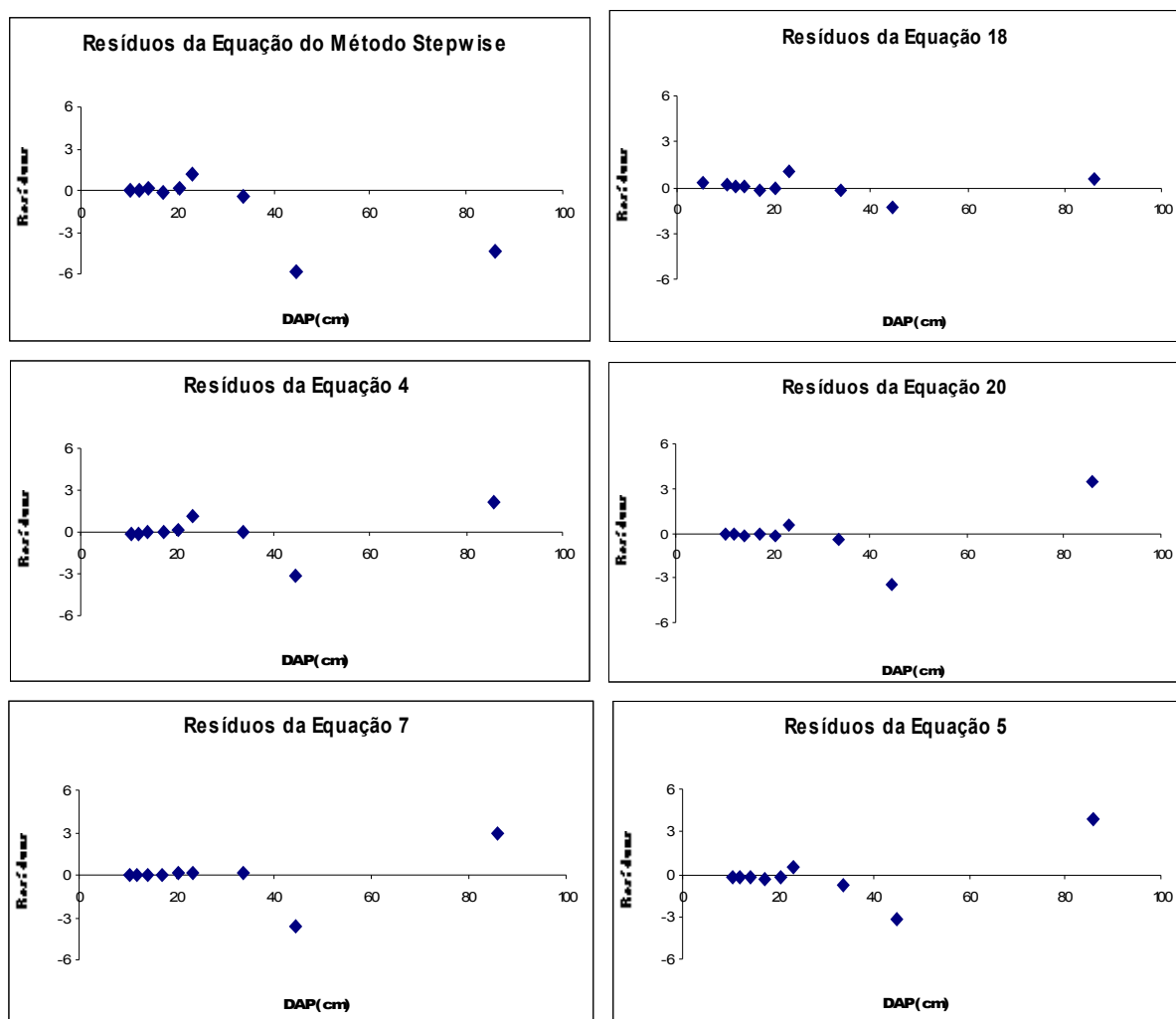
EQUAÇÕES	ESTATÍSTICAS		
	R <sup>2</sup> aj	S <sub>yx</sub> %	F
<i>Stepwise</i> : $P = -7,546 - 0,024.dap^2hm + 0,024.dap^2.ht$	0,913	70,53	745,6
18 $P = -18,53.dap + 2,451.dap^2 - 0,092.dap^3 + 0,001.dap^4 - (7,13E-06).dap^5$	0,861	93,99	188,5
4 $P = 114,442 - 13,37.dap + 0,570.dap^2 - 0,014.(dap^2.hm)$	0,852	91,87	274,2
20 $P = 0,357.dap^2 - 0,859.hm^2 - 0,008.(dap^2.hm)$	0,847	98,95	278,3
7 $P = 0,076.dap^{2,763}.hm^{-1,086}$	0,830	128,38	347,4
5 $P = 0,353.dap^2 - 0,011.(dap^2.hm)$	0,828	105,22	360,6

Onde: a, b, c, d, e, f = coeficientes estimados por regressão; dap = diâmetro a altura do peito (1,3 m) da árvore; ln = logaritmo natural; p = peso da biomassa, ht = altura total e hm = altura do ponto de inversão morfológica.

Baggio *et al.* (1995) ajustaram equações similares às do presente trabalho para estimar a biomassa dos galhos de bracatinga e obtiveram resultados mais satisfatórios, com coeficiente de determinação igual a 0,9988 e coeficiente de variação de 44,8%, assim como Urbano (2007), também para bracatingas, que ajustou equações com R<sup>2</sup><sub>aj</sub> de 0,907 e S<sub>yx</sub> de 43,16%, para galhos maiores que 4 cm de diâmetro, e R<sup>2</sup><sub>aj</sub> = 0,849 e S<sub>yx</sub> = 36,01%, para galhos com diâmetro menor que 4 cm. Cabe ressaltar que os resultados obtidos por Baggio *et al.* (1995) e Urbano (2007) são para uma única espécie, ao contrário dos ajustes do presente trabalho, que utilizou uma base de dados com 38 espécies.

Já para Socher (2004), que ajustou equações para estimativa da biomassa dos galhos de uma Floresta Ombrófila Mista Aluvial, os resultados também foram mais significativos que os do presente trabalho. Este autor ajustou uma equação com coeficiente de determinação ajustado igual a 0,94259 e erro padrão da estimativa de 43,84%, mas não considerou os resultados satisfatórios.

A análise gráfica da distribuição dos resíduos mostra a tendência apresentada pelas equações em fornecer estimativas com maiores resíduos absolutos à medida que aumenta o dap, o que pode ser observado na Figura 6.



**Figura 6:** Distribuição gráfica dos resíduos das seis equações selecionadas para estimativa da biomassa dos galhos vivos.

No entanto, foi possível identificar diferenças significativas entre as seis equações selecionadas. Assim, a equação obtida pelo método *stepwise* ( $P = -7,546 - 0,024.dap^2hm + 0,024.dap^2.ht$ ) é a melhor equação ajustada para estimativa da biomassa dos galhos vivos, mas que a utilização desta equação deve ser feita com ressalvas, devido ao baixo nível de precisão das estimativas.

#### 4.7. Ajuste de equações para estimativa da biomassa dos galhos mortos

Os resultados mostram que as equações ajustadas apresentaram menor correlação com a biomassa dos galhos mortos, com alto coeficiente de variação e baixo coeficiente de determinação ajustado, quando comparados aos resultados obtidos para os demais compartimentos da biomassa, o que pode ser observado na Tabela 10.

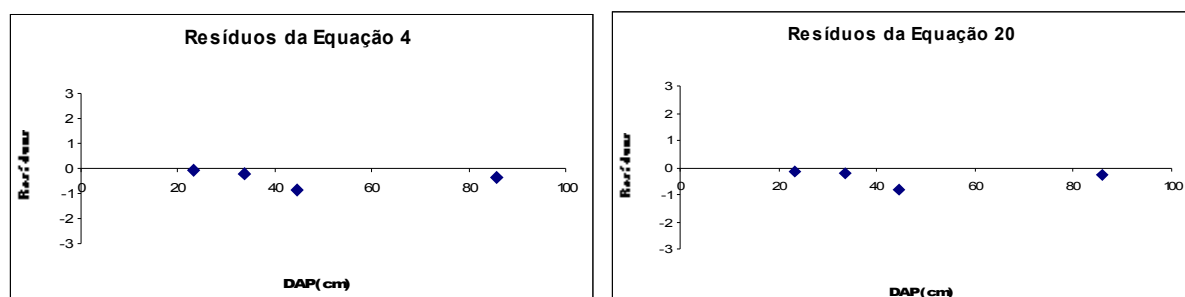
**Tabela 10:** Resultados do ajuste de equações para estimativa da biomassa dos galhos mortos.

EQUAÇÕES	ESTATÍSTICAS		
	R <sup>2</sup> aj	S <sub>yx</sub> %	F
4 P = -0,416.dap + 0,038.dap <sup>2</sup> - 0,001.(dap <sup>2</sup> .ht)	0,540	174,72	34,0
20 P = 0,029.dap <sup>2</sup> - 0,030.ht <sup>2</sup> - 0,001.(dap <sup>2</sup> .ht)	0,532	176,39	32,9
5 P = 0,024.dap <sup>2</sup> - 0,001.(dap <sup>2</sup> .ht)	0,503	181,84	43,6
1 P = 0,004.dap <sup>1,999</sup>	0,430	218,33	62,1
12 ln P = -5,505 + 1,999.ln dap	0,430	248,76	62,1
13 ln P = -5,505 + 0,999.ln dap <sup>2</sup>	0,430	248,76	62,1

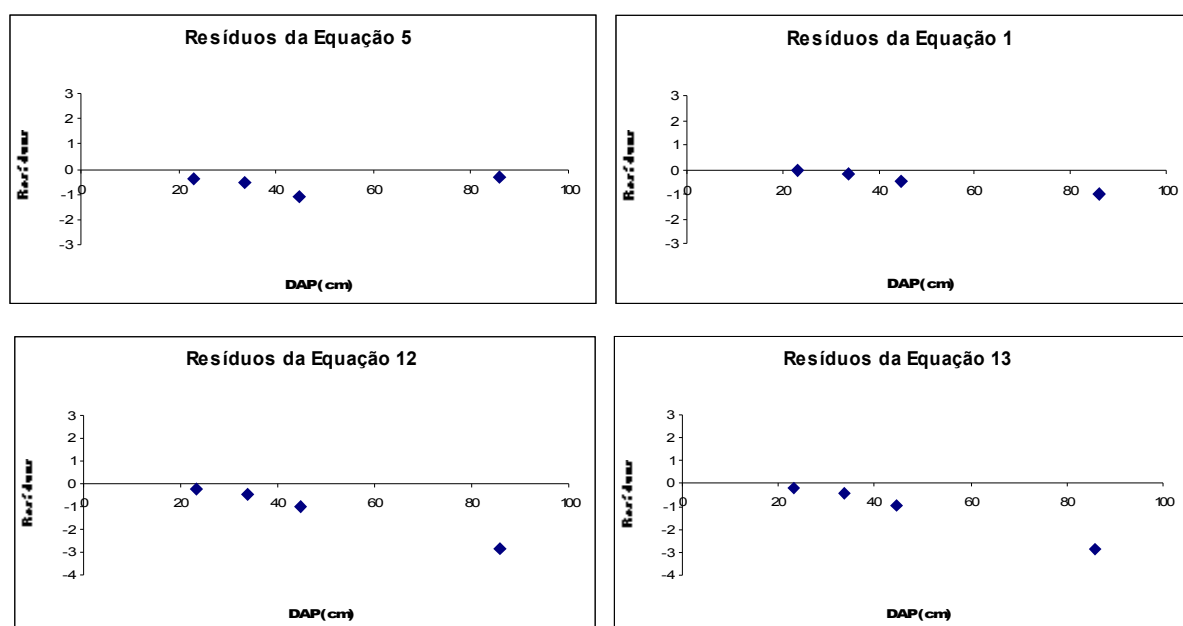
Onde: a, b, c, d, e, f = coeficientes estimados por regressão; dap = diâmetro a altura do peito (1,3 m) da árvore; ln = logaritmo natural; p = peso da biomassa, ht = altura total e hm = altura do ponto de inversão morfológica.

A baixa correlação pode ter origem no fato de que fatores externos às características das árvores podem afetar a quantidade de galhos mortos, como doenças, condições atmosféricas, ações de outros organismos, etc.. E tais eventos não estão associados a padrões alométricos, dificultando o ajuste de uma curva de regressão aos dados. Das seis equações selecionadas por apresentarem as melhores estatísticas, não figurou em nenhuma delas a variável altura do ponto de inversão morfológica. Este fato já era esperado, pois a correlação simples entre hm e a biomassa dos galhos mortos foi muito baixa, próxima de zero.

A análise da distribuição gráfica dos resíduos foi feita com apenas 4 árvores, pois as demais não apresentavam galhos mortos. Verificou-se a tendência das seis equações em superestimar a biomassa dos galhos mortos, em todas as classes de dap. As equações 4, 20, 5 e 1 apresentaram melhor distribuição dos resíduos, em relação às equações 12 e 13, com resíduos de menor valor absoluto, como pode ser observado nas Figuras 7 e 8.



**Figura 7:** Distribuição gráfica dos resíduos das equações 4 e 20, selecionadas para estimativa da biomassa dos galhos mortos.



**Figura 8:** Distribuição gráfica dos resíduos das equações 5, 1, 12 e 13, selecionadas para estimativa da biomassa dos galhos mortos.

Com base nas estatísticas apresentadas pelas equações e na distribuição gráfica dos resíduos, a equação 4 ( $P = -0,416.dap + 0,038.dap^2 - 0,001.(dap^2.ht)$ ) mostrou-se a melhor equação para estimativa da biomassa dos galhos mortos, embora suas estimativas sejam pouco precisas.

#### 4.8. Ajuste de equações para estimativa da biomassa da miscelânea

Para a miscelânea, o ajuste das equações de regressão apresentou equações com altos erros padrões da estimativa. Mas, a equação obtida pelo método *stepwise* apresentou bom coeficiente de determinação ajustado, como pode ser observado na Tabela 11.

**Tabela 11:** Resultados do ajuste de equações para estimativa da biomassa da miscelânea.

EQUAÇÕES	ESTATÍSTICAS		
	R <sup>2</sup> aj	S <sub>yx</sub> %	F
<i>Stepwise</i> : $P = -7,726 - 0,014.dap^2 - 0,001.dap^2.hm + 0,002.(dap^2.ht) - (3,65E-06).dap^4 - 0,12.ht^2 + 0,05.hm^2 + (2,3E-08).dap^5 + 1,874.ht$	0,900	102,52	152,26
4 $P = -0,18.dap + 0,011.dap^2 - 2,47E-4.(dap^2.hm)$	0,675	182,41	97,55
20 $P = 0,007.dap^2 - 0,027.hm^2 - (1,06E-4).(dap^2.hm)$	0,662	186,12	91,95
18 $P = -0,33.dap + 0,042.dap^2 - 0,002.dap^3 + (2,555E-5).dap^4 - (1,29E-7).dap^5$	0,655	188,14	53,82
7 $P = (3,446E-4).dap^{2,911}.hm^{-0,865}$	0,639	201,64	120,67
17 $P = 0,296.dap - 0,026.dap^2 + 0,001.dap^3 - (4,36E-6).dap^4$	0,636	193,38	61,69

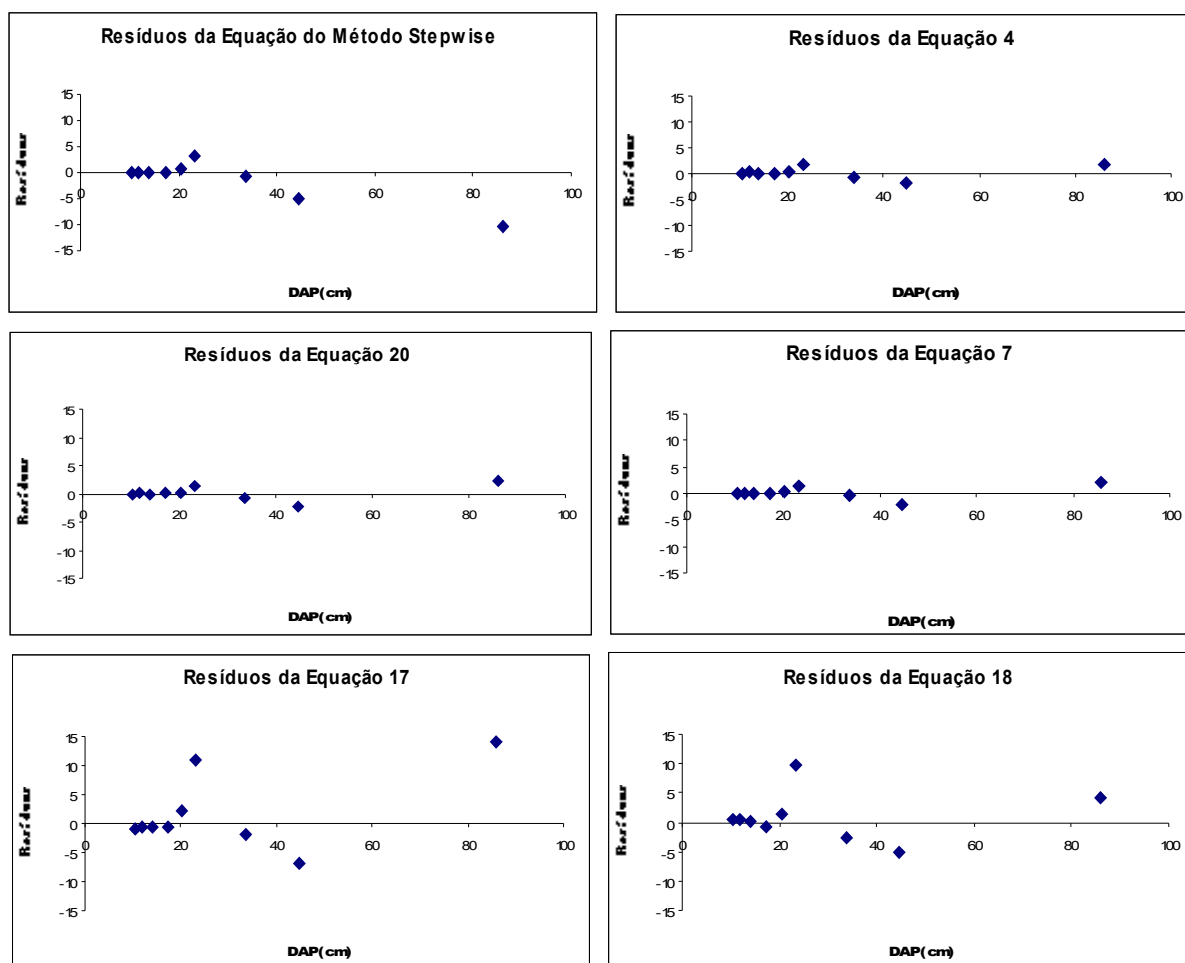
Onde: a, b, c, d, e, f = coeficientes estimados por regressão; dap = diâmetro a altura do peito (1,3 m) da árvore; ln = logaritmo natural; p = peso da biomassa, ht = altura total e hm = altura do ponto de inversão morfológica.

Para as demais equações, as estatísticas mostram que as variáveis independentes tiveram dificuldade em explicar a biomassa da miscelânea. Os coeficientes de determinação ajustados foram baixos e os erros padrão das estimativas elevados, mostrando que as estimativas das equações são pouco precisas.

Observou-se que apenas na equação obtida pelo método *stepwise* figuraram as três variáveis independentes: dap, ht e hm, justificando as melhores estatísticas desta equação. As baixas correlações simples, entre as variáveis independentes e a biomassa da miscelânea, apresentados na Tabela 4, podem justificar o baixo desempenho de todas as equações em estimar a biomassa deste componente.

Como todos os componentes das árvores que não puderam ser enquadrados como folhagem, fuste, galhos ou raízes foram enquadrados como miscelânea, este compartimento ficou muito desuniforme, podendo não apresentar características alométricas, dificultando o ajuste de curvas de regressão aos dados e fornecendo equações pouco precisas.

A Figura 9 apresenta a distribuição gráfica dos resíduos.



**Figura 9:** Distribuição gráfica dos resíduos das seis equações selecionadas para estimativa da biomassa da miscelânea.



Na análise da distribuição gráfica dos resíduos, pode-se observar que as seis equações apresentaram estimativas com baixos resíduos absolutos para árvores com dap menor que 20 cm. No entanto, à medida que aumenta o dap, aumentam os resíduos absolutos em todas as equações.

Após a análise das estatísticas das equações e da distribuição gráfica dos resíduos, considerou-se que a melhor equação ajustada para estimativa da biomassa da miscelânea para as árvores da área em estudo é a equação obtida pelo método *stepwise* ( $P = -7,726 - 0,014.dap^2 - 0,001.dap^2.hm + 0,002.(dap^2.ht) - (3,65E-06).dap^4 - 0,12.ht^2 + 0,05.hm^2 + (2,3E-08).dap^5 + 1,874.ht$ ).

Para ajustar equações mais precisas para estimativa da biomassa da miscelânea, a solução pode ser ajustar as equações por espécie ou família, na tentativa de homogeneizar as características inerentes de cada espécie, facilitando o ajuste de curvas de regressão aos dados.

## 5. CONCLUSÕES

O ajuste das equações para estimativa da biomassa aérea individual das árvores de um fragmento de Floresta Ombrófila Mista Montana apresentou resultados satisfatórios em alguns casos e ruins em outros, dependendo da fração analisada.

As equações com melhores estatísticas foram obtidas no ajuste para a biomassa total e para a biomassa da madeira do fuste. Já para as frações casca do fuste, galhos vivos, galhos mortos, folhagem e miscelânea, os resultados foram menos expressivos, pois as equações apresentaram alto erro padrão da estimativa, denotando imprecisão nas estimativas e, em alguns casos, baixo coeficiente de determinação ajustado. A baixa precisão nas estimativas deve estar associada à grande heterogeneidade dos dados, oriunda da diversidade de espécies presentes no fragmento florestal, tamanho e forma das árvores.

Os resultados mostraram que nem sempre a inclusão da variável explicativa altura total ou altura do ponto de inversão morfológica melhora a precisão da equação de regressão, pois o melhor resultado para estimativa da biomassa total foi obtido com um modelo de equação onde aparece apenas a variável diâmetro a altura do peito.

O método *stepwise* mostrou-se eficiente na seleção das variáveis a compor as equações de regressão, fornecendo as melhores equações para a estimativa da biomassa da casca do fuste, galhos vivos e miscelânea.

Para ajustar equações mais precisas, sugere-se ajustá-las por espécies ou por famílias. O agrupamento das árvores com as mesmas características pode fornecer uma base de dados que ajuste-se melhor a equações de regressão.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANJOS, A. dos; MAZZA, M. C.; SANTOS, A. C. M. C. dos.; DELFINI, L. T. Análise do padrão de distribuição espacial da araucária (*Araucaria angustifolia*) em algumas áreas do estado do Paraná, utilizando a função K de Ripley. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.66, p.38-45, dez. 2004.

BAGGIO, A. J.; CARPANEZZI, A. A.; SANMIGUEL, A. A. Equações para estimativa de peso da biomassa aérea de bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.) na idade de corte. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n.30/31, p.37-49, jan.-dez. 1995.

BARTH FILHO, N. **Monitoramento do crescimento e da produção em floresta ombrófila mista com uso de parcelas permanentes**. 2002. 86p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

BAYER, F.; SANTANA, J.; GONÇALVES, P.; CRIBARI-NETO, F. **Comparação de critérios de seleção em modelos de regressão beta**. Disponível em: <<http://emr11.de.ufpe.br/cd/trabalhos/T48.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2009.

BRITEZ, R. M. de; BORGIO, M.; TIEPOLO, G.; FERRETI, A.; CALMON, M.; HIGA, R. **Estoque e incremento de carbono em florestas e povoamentos de espécies arbóreas com ênfase na floresta atlântica do sul do Brasil**. Colombo: Embrapa, 2006. 165p.

CALDEIRA, M. V. W. **Determinação de biomassa e nutrientes em uma floresta ombrófila mista montana em General Carneiro, Paraná**. 2003. 176p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira**. Brasília: EMBRAPA-CNPQ; EMBRAPA-SPI, 1994. 640p.

CASTELA, P. R.; BRITEZ, R. M.; TIEPOLO, G.; PIRES, L. A. **Conservação do bioma floresta com araucária - relatório final: diagnóstico dos remanescentes florestais**. Curitiba: FUPEF, 2001. 121p.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. New York: J. Wiley & Sons, 1981. 2 ed. 709p.

EMBRAPA. Empresa brasileira de pesquisa agropecuária. **Mapa de solos do estado do Paraná: legenda atualizada**. Rio de Janeiro, 2008. 74p.

FINGER, C. A. G. **Fundamentos de biometria florestal**. Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC, 1992. 269p.

GUIMARÃES, P. S. **Ajuste de curvas experimentais**. Santa Maria: UFSM, 2001. 233p.

IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE, 1992. 92p.

KOEHLER, H. S. **Estatística experimental**. Curitiba: UFPR, 2004. 124p.

KOEHLER, H. S. WATZLAWICK, L. F. KIRCHNER, F. F. VALÉRIO, A. F. Fontes de erros nas estimativas da biomassa e carbono fixado na floresta ombrófila mista. **Biomassa & Energia**. Viçosa, v.2, n.1, p.69-77, 2005.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2001. 531p.

MAACK, R. **Geografia Física do Estado do Paraná**. Rio de Janeiro: José Olympio, 1981. 442p.

MACHADO, S. A.; AGUIAR, L. P.; FIGUEIREDO FILHO, A.; KOEHLER, H. S. Modelagem do volume do povoamento para *Mimosa scabrella* Benth. na região metropolitana de Curitiba. **Revista Árvore**. Viçosa, v.32, n.3, p.465-478, 2008.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1980. 251p.

MARTINELLI, L. A.; MOREIRA, M. Z.; BROWN, I. F.; VICTORIA, R. L. Incertezas associadas às estimativas de biomassa em florestas tropicais: o exemplo de uma floresta situada no estado de Rondônia. In: **Seminário Emissão x Sequestro de CO<sub>2</sub>**. Rio de Janeiro: Companhia Vale do Rio Doce, 1994. 221p.

MELLO, S. L. de M.; GONÇALVES, J. L. de M. Equações para estimar a biomassa da parte aérea e do sistema radicular em povoamentos de *Eucalyptus grandis* em sítios com produtividades distintas. **Revista Árvore**, Viçosa, v.32, n.1, p.101-111, 2008.

MIRANDA, D. L. C. de. **Modelos matemáticos de estoque de biomassa e carbono em áreas de restauração florestal no sudoeste paulista**. 2008. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

ORELLANA, R.; KOEHLER, A. B. Relações morfométricas de *Ocotea odorifera* (Vell.) Rohwer. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**. Curitiba, v.6, n.2, p.229-237, abr./jun. 2008.

PARANÁ. Secretaria do Estado de Agricultura e Abastecimento, Instituto de Terras, Cartografia e Florestas. **Atlas do estado do Paraná**. Curitiba, 1987. 73p.

PÁSCOA, F.; MARTINS, F.; GONZÁLEZ, R. S.; JOAO, C. Estabelecimento simultâneo de equações de biomassa para o pinheiro bravo. Disponível em: <<http://www.gruponahise.com/simposio/papers%20pdf/13%20Fernando%20P%Elcoa.pdf>>. Acesso em: 23 agosto 2008.

RESENDE, A. V.; VALE, A. T. do; SANQUETTA, C. R.; FIGUEIREDO FILHO, A. FELFILLI, J. M. Comparação de modelos matemáticos para estimativa do volume, biomassa e estoque de carbono da vegetação lenhosa de um cerrado *sensu stricto* em Brasília, DF. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.71, p.65-76, ago. 2006.

ROSSI, L. M. B. **Processo de difusão para simulação da dinâmica de floresta natural**. 2007. 148p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

SANQUETTA, C. R.; CUNHA, U. S. Da; WATZLAWICK, L. F.; CAMPOS, M. L. B. Projeção da distribuição diamétrica de fragmentos de floresta com matriz de transição. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Curitiba, v.3, n.1, p.65-78, jan. 2001.

SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; SCHUMACHER, M. V.; MELLO, A. A. de. Relações individuais de biomassa e conteúdo de carbono em plantações de *Araucária angustifolia* e *Pinus taeda* no sul do estado do Paraná, Brasil. **Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais**, Curitiba, v.1, n.3, p.33-40, jul./set. 2003.

SANQUETTA, C. R. Metodologias para determinação de biomassa florestal. In: ; SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M. A. B.; GOMES, F. dos S. **As florestas e o carbono**. Curitiba: UFPR, 2002. 264p.

SANQUETTA, C. R. **Os números atuais da cobertura florestal do Paraná**. Curitiba: UFPR, 2003. Disponível em: <<http://www.reasul.org.br/paginas/noticias.php?id=568>>. Acesso em: 22 maio 2008.

SANTANA, R. C.; BARROS, N. F. de.; LEITE, H. G.; COMERFORD, N. B.; NOVAIS, R. F. de. Estimativa de biomassa de plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v.32, n.4, p.697-706, 2008.

SCHNEIDER, P. R. **Análise de regressão aplicada à engenharia florestal**. Santa Maria: UFSM, 1997. 217p.

SCHUMACHER, M. V.; CALDEIRA, M. V. W. Estimativa da biomassa e do conteúdo de nutrientes de um povoamento de *Eucalyptus globulus* (Labillardière) sub-espécie *maidenii*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.11, n.1, p.45-53, 2007.

SILVA, H. D da.; FERREIRA, C. A.; CORRÊA, R. S.; BELLOTE, A. F. J.; TUSSOLINI, E. L. Alocação de biomassa e ajuste de equações para estimativa de biomassa em compartimentos aéreos de *Eucalyptus benthamii*. **Boletim de Pesquisas Florestais**, Colombo, n.49, p.83-95, jul./dez. 2004.

SILVEIRA, P. **Métodos indiretos de estimativa do conteúdo de biomassa e do estoque de carbono em um fragmento de floresta ombrófila densa**. 2008. 129p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

SOCHER, L. G. **Dinâmica e biomassa aérea de um trecho de floresta ombrófila mista aluvial no município de Araucária, Paraná.** 2004. 102p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

TÉO, S. J. **Quantificação e modelagem do conteúdo de nutrientes na biomassa aérea da bracatinga (*Mimosa scrabella* Bentham).** 2009. 157p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

URBANO, E. **Quantificação e estimativa da biomassa aérea e do carbono fixado em árvores de bracatingais nativos da região metropolitana de Curitiba.** 2007. 160p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

WATZLAWICK, L. F. **Estimativa de biomassa e carbono em floresta ombrófila mista e plantações florestais a partir de dados de imagens do satélite Ikonos II.** 2003. 120p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

WATZLAWICK, L. F.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E.; BALBINOT, R. Quantificação de biomassa total e carbono orgânico em povoamentos de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze no sul do estado do Paraná, Brasil. **Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais**, Curitiba, v.1, n.2, p.63-18, abr/jun. 2003.

WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; SANQUETTA, C. R.; CALDEIRA, M. V. W. Teores de carbono em espécies da floresta ombrófila mista. In: SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R.; ZILLOTTO, M. A. B. **Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas.** Curitiba: AM Impressos, 2004. 205p.

VALERIO, A. F.; WATZLAWICK, L. F.; SANTOS, R. T. dos; SILVESTRE, R.; KOEHLER, H. S. Ajuste de modelos matemáticos para estimativa dos distintos componentes de uva do Japão (*Hovenia dulcis* Thund). **Ambiência**, Guarapuava, v.3, n.3, p.325-336, set/dez. 2007.

VISMARA, E. de S. **Mensuração da biomassa e construção de modelos para construção de equações de biomassa.** 2009. 103p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

## CAPÍTULO II

### AJUSTE DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTIMATIVA DO CARBONO EM UMA FLORESTA OMBRÓFILA MISTA MONTANA

#### RESUMO

Com o advento do Protocolo de Quioto, em 1997, surgem novas possibilidades de agregar valores às florestas tropicais, como a comercialização de créditos de carbono, criando a necessidade do desenvolvimento de metodologias de quantificação do carbono fixado nas florestas. Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo ajustar e selecionar equações para a estimativa do conteúdo de carbono fixado na biomassa florestal acima do solo em uma Floresta Ombrófila Mista Montana, localizada no município de General Carneiro, Paraná. A base de dados foi composta pelas medidas dendrométricas dap (diâmetro a altura do peito – 1,3m), ht (altura total) e hm (altura do ponto de inversão morfológica) e pelas determinações da biomassa e dos teores de carbono de 91 árvores, apresentados de forma total ou nos compartimentos: madeira do fuste, casca do fuste, galhos, folhagem e miscelânea. Foram ajustados 20 modelos de equações, além da aplicação do método *stepwise* para a escolha das variáveis a compor as equações de regressão, para estimar a quantidade de carbono fixado na árvore total e nos compartimentos madeira do fuste, casca do fuste, galhos, folhagem e miscelânea. Os resultados dos ajustes para o carbono total e para o carbono da madeira do fuste foram satisfatórios, com elevado coeficiente de determinação ajustado e baixo erro padrão da estimativa. Já para os compartimentos casca do fuste, galhos, folhagem e miscelânea houve maior dificuldade em ajustar curvas de regressão aos dados, produzindo equações com menor precisão nas estimativas. O método *stepwise* mostrou-se eficiente e forneceu as melhores equações para os compartimentos galhos e miscelânea. Uso da técnica de estimativas com o uso de equações de regressão pode ser uma boa alternativa como método indireto de quantificação de carbono fixado em florestas naturais.

Palavras-chave: Floresta com araucária; equações; *stepwise*.

## ABSTRACT

Luis Carlos Ratuchne. Adjust of the mathematical models to carbon estimate in a Mixed Ombrophilous Montane Forest.

With the advent of the Kyoto Protocol in 1997, new opportunities to add value to tropical forests, as the sale of carbon credits, creating the need to develop methodologies to quantify the fixed carbon in forests. In this sense, the present study aimed to adjust and select equations for estimating the content of fixed carbon in forest biomass above ground in a Mixed Ombrophilous Montane Forest, located in the General Carneiro city, Paraná. The database was composed of measures dendrometric dap (diameter at breast height - 1.3 m) ht (total height) and hm (height of the morphology inversion point) and the determinations of biomass and carbon content of 91 trees submitted, presented in whole or in compartments: the stem wood, stem bark, branches, leaves and miscellaneous. 20 were fitted equation models, besides the application of the stepwise method to select the variables composing the regression equations to estimate how much carbon is stored in total tree and compartments wooden stem, stem bark, branches, foliage and miscellaneous. The results of adjustments to the total carbon and carbon from the wood of the stem were satisfactory, with high determination coefficient and low standard error of the estimate. As for the compartments of the stem bark, branches, leaves and miscellaneous greater difficulties in adjusting the regression curves to the data, producing equations with less precision in estimates. The stepwise method was efficient and provided the best equations for the compartments branches and miscellaneous. Using the technique estimates using regression equations may be a good alternative to the indirect method of quantification of fixed carbon in natural forests.

Keywords: Araucaria forest; Equations; *Stepwise*.



## **1. INTRODUÇÃO**

O aumento da produção de energia e de alimentos, decorrentes das atividades humanas, ocasionou um acúmulo da ordem de 3 bilhões de toneladas de carbono por ano, na forma de CO<sub>2</sub>, na atmosfera terrestre (IPCC, 2006). A elevação da concentração do CO<sub>2</sub> na atmosfera, bem como de outros gases responsáveis pelo efeito estufa, ameaçam a humanidade com o aquecimento global, que poderá causar um aumento da temperatura média do planeta entre 3 a 5°C nos próximos 100 anos (RENNER, 2004).

O acúmulo de CO<sub>2</sub> na atmosfera é decorrente, principalmente, de duas atividades humanas: a queima de combustíveis fósseis (gás natural, carvão, petróleo) e a destruição e queima das florestas. Desta forma, o controle do aumento das emissões do dióxido de carbono torna-se, imprescindível, em função das possíveis conseqüências que possam ocorrer no ambiente terrestre (WATZLAWICK *et al.*, 2006).

As florestas naturais têm importância significativa no equilíbrio do ciclo do carbono, pois estocam grande quantidade de carbono fixado na biomassa acima e abaixo do solo. Por acumular na estrutura carbônica das árvores elementos poluentes nocivos à qualidade de vida, cresce a cada dia o interesse pelos estudos de biomassa e conteúdo de carbono em florestas.

Conhecer a capacidade de absorção do carbono das diversas tipologias naturais, bem como o estoque de carbono fixado na biomassa florestal, pode fornecer informações importantes para a tomada de decisões quando ao manejo, a proteção e a valoração das florestas naturais.

Neste sentido, o objetivo do presente trabalho foi ajustar e selecionar equações de regressão para a estimativa do conteúdo de carbono fixado na biomassa de uma Floresta Ombrófila Mista Montana, localizada no município de General Carneiro, Paraná.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Estudos com o carbono florestal**

A quantificação do carbono fixado também está diretamente ligada a questões que envolvem o clima e o manejo florestal, uma vez que as informações obtidas no inventário florestal são as bases de pesquisas relacionadas ao uso dos recursos naturais e nas decisões sobre o uso eficiente da terra. Devido ao potencial de fixação de carbono na biomassa das florestas naturais e ao crescente interesse global por este assunto, faz-se necessário o desenvolvimento

de metodologias de quantificação do conteúdo de carbono fixado na biomassa florestal, facilitando o planejamento, o manejo e a valorização destas tipologias florestais.

Watzlawick *et al.* (2004) afirmam que os trabalhos com o carbono em florestas naturais são escassos, devido, principalmente, à complexidade destes ecossistemas. No entanto, isso não invalida a importância destas tipologias florestais no processo de fixação de carbono.

Para Sanquetta (2002) os estudos com a biomassa e o carbono florestal podem ser realizados por determinações ou estimativas. O autor distingue determinação de estimativa, sendo a determinação uma medição real feita diretamente na biomassa e a estimativa é feita utilizando relações quantitativas ou matemáticas, como razões ou regressões.

Em estudos feitos em pequenas áreas, todas as árvores podem ser derrubadas e pesadas. Em áreas maiores não é possível a pesagem de todas as árvores, portanto, equações para estimativa podem ser ajustadas, correlacionando a biomassa e o carbono com variáveis de fácil medição, como o diâmetro à altura do peito (dap), a área basal, a altura total da árvore ou a altura comercial (MARTINELLI *et al.*, 1994).

Para o ajuste das equações de regressão, podem-se utilizar modelos matemáticos previamente formulados. Outra forma de obtenção das equações de regressão é a técnica *stepwise* ou regressão passo a passo. Segundo Téo (2009), o procedimento *stepwise* é uma tentativa de alcançar a melhor equação de regressão por meio da inserção de variáveis.

A primeira variável independente a ser inserida no modelo matemático é a que apresenta o maior coeficiente de correlação com a variável dependente. A inserção das demais variáveis é determinada pelo coeficiente de correlação parcial como medida da importância das variáveis que ainda não participam do modelo. Após a inserção de cada variável, o procedimento *stepwise* examina a significância das variáveis que já faziam parte do modelo matemático por meio do valor de “F” parcial. Se a variável apresenta valor de “F” estatisticamente significativo em um determinado nível de probabilidade, essa variável é mantida, caso contrário é eliminada. O procedimento se repete avaliando os coeficientes de correlação parcial e valores de “F” parcial para todas as variáveis independentes. De acordo com Draper e Smith (1981), o *stepwise* é o melhor procedimento de seleção de variáveis para compor equações de regressão.

A capacidade de fixação de carbono das florestas naturais varia entre biomas. Watzlawick (2003) encontrou, em média, 104 toneladas por hectare de carbono fixado em uma Floresta Ombrófila Mista Montana. Já Resende *et al.* (2001), em determinações da quantidade de carbono na biomassa acima do solo em uma Floresta de Terra Firme e em uma Floresta Alagável na Floresta Amazônica, encontraram, respectivamente, 72,29 ton.ha<sup>-1</sup> e 61,61 ton.ha<sup>-1</sup>.

Brun (2004) quantificou os teores de carbono na biomassa acima do solo em duas fases sucessionais da Floresta Estacional Decidual, em Santa Tereza, RS. Para o capoeirão, este autor encontrou um estoque de carbono de 41,81 ton.ha<sup>-1</sup>. Já para a floresta secundária, o estoque de carbono quantificado foi de 65,47 ton.ha<sup>-1</sup>. Pode-se observar que o estoque de carbono na floresta secundária é significativamente superior ao do capoeirão, devido a maior produção de biomassa desse estágio sucessional.

Em uma Floresta Ombrófila Densa, Silveira (2008) estimou o estoque de carbono na biomassa arbórea acima do solo por equações de regressão ajustadas para área em estudo e por fatores de expansão, também conhecido como método da derivação do volume em biomassa e carbono. Nos dois métodos as estimativas do estoque de carbono foram similares, 64,48 ton.ha<sup>-1</sup> com as equações de regressão e 65,98 ton.ha<sup>-1</sup> com o método da derivação do volume. O autor apontou que o método dos fatores de expansão apresenta estimativas bastante precisas e tem sido utilizado em estimativas do conteúdo de carbono em florestas do Canadá, dos Estados Unidos da América, da Rússia e da China.

Britez *et al.* (2006) destacaram a existência de poucos estudos avaliando a biomassa e o carbono em ecossistemas tropicais. Mas, com o advento do Protocolo de Quioto em 1997, novas possibilidades de comercialização de créditos de carbono e de compensação das emissões de gás carbônico dos países industrializados podem agregar novos valores às florestas tropicais (YU, 2004).

Silveira (2008) estimou o valor monetário de uma Floresta Ombrófila Densa pela fixação do CO<sub>2</sub>. Segundo uma das estimativas do autor, a floresta em estudo valeria US\$ 2.837,16 ha<sup>-1</sup>, já que teria removido da atmosfera cerca de 236,43 ton.ha<sup>-1</sup> de CO<sub>2</sub>. De acordo com este autor, a dinâmica econômica global relacionada com a agroindústria torna mais lucrativa a derrubada das florestas, tornando difícil conservar grandes áreas de florestas tropicais.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

A área em estudo localiza-se entre as coordenadas 26° 20' 35" e 26° 26' 13" Latitude Sul, e 51° 19' 49" e 51° 25' 29" Longitude Oeste, no município de General Carneiro, no estado do Paraná. A propriedade pertence às Indústrias Pedro N. Pizzatto Ltda e possui uma área de 4.210,75 hectares, e a sede está localizada nas coordenadas UTM 464478 E e 7079977 N, Fuso 22J, Datum SAD 69 Brasil.

Conforme classificação de Köppen, o clima da região é classificado como Subtropical Úmido Mesotérmico (Cfb), com verões amenos e invernos com severas geadas. Não possui

estações secas e a precipitação anual média é de 1.830 mm. A temperatura média dos meses mais quentes é 22°C e dos meses mais frios é igual a 18°C (PARANÁ, 1987).

O substrato geológico da região é formado pelo derrame de Trapp da formação da Serra Geral (MAACK, 1981). Na região ocorre uma associação dos solos Neossolo Regolítico Húmico típico, de textura argilosa, álico, de relevo suave ondulado, e do solo Nitossolo Vermelho Distroférrico típico, de textura argilosa e relevo suave ondulado, ambos os solos tem como substratos rochas eruptivas (EMBRAPA, 2008). A topografia possui predominância da característica montanhosa, mas apresenta ainda relevos ondulado e plano (MAACK, 1981).

A vegetação natural da área corresponde ao bioma da Floresta Ombrófila Mista ou Floresta com Araucária (IBGE, 1992), tipologia florestal que cobria originalmente cerca de 80.000 km<sup>2</sup> do território paranaense (CARVALHO, 1994). Contudo, o fragmento florestal encontra-se bastante antropizado e em diversos estágios sucessionais (WATZLAWICK, 2003).

A base de dados utilizada no ajuste das equações para estimativas do conteúdo de carbono foi obtida do trabalho de Watzlawick (2003), a qual possui as medidas dendrométricas do diâmetro a altura do peito (1,3 m) (dap), altura total (ht) e altura do ponto de inversão morfológica (hm), a determinação da biomassa e dos teores de carbono de 91 árvores da Floresta Ombrófila Mista Montana, pertencentes a 38 espécies de 19 famílias. A Tabela 1 caracteriza as espécies presentes na base de dados e as medidas dendrométricas.

**Tabela 1:** Relação das espécies presentes na base de dados em estudo e suas variáveis dendrométricas (WATZLAWICK, 2003; CALDEIRA, 2003).

NOME CIENTÍFICO	NOME VULGAR	FAMÍLIA	N	DAP		HM		HT	
				MÍN.	MAX.	MÍN.	MAX.	MIN.	MAX.
<i>Allophylus edulis</i> (A. St.-Hil. et al.) Radlk	Chal-chal	<i>Sapindaceae</i>	3	7,03	44,60	2,41	4,36	7,37	19,30
<i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol.) Kuntze	Pinheiro-do-Paraná	<i>Araucariaceae</i>	4	45,60	105,68	5,10	27,45	12,70	30,10
<i>Calyptanthes concinna</i> DC.	Guamirim-ferro	<i>Myrtaceae</i>	2	8,79	20,69	4,00	4,29	8,03	10,55
<i>Campomanesia xanthocarpa</i> O. Berg	Guabiroba	<i>Myrtaceae</i>	3	14,77	81,96	3,8	9,00	11,10	23,31
<i>Casearia decandra</i> Jacq.	Café-do-mato	<i>Salicaceae</i>	3	9,55	17,86	3,68	5,16	8,37	12,20
<i>Clethra scabra</i> Pers.	Carne-de-vaca	<i>Clethraceae</i>	1	28,49	28,49	7,33	7,33	12,95	12,95
<i>Cupania vernalis</i> Cambess.	Miguel-pintado-graúdo	<i>Sapindaceae</i>	3	32,63	56,66	3,61	9,70	14,90	20,00
<i>Drimys cf. angustifolia</i> Miers	Cataia	<i>Winteraceae</i>	1	25,02	25,02	2,30	2,30	15,27	25,27
<i>Ilex dumosa</i> Reissek	Caúna-miúda	<i>Aquifoliaceae</i>	4	10,35	26,90	4,20	6,80	7,30	12,30
<i>Ilex microdonta</i> Reissek	Congonha	<i>Aquifoliaceae</i>	3	11,08	13,94	2,60	4,87	8,79	10,13
<i>Ilex paraguariensis</i> A. St. – Hil.	Erva-mate	<i>Aquifoliaceae</i>	4	5,41	23,68	5,10	7,40	6,40	13,10

Continuação.

NOME CIENTÍFICO	NOME VULGAR	FAMÍLIA	N	DAP		HM		HT	
				MÍN.	MÁX.	MÍN.	MAX.	MIN.	MAX.
<i>Ilex microdonta</i> Reissek	Congonha	<i>Aquifoliaceae</i>	3	11,08	13,94	2,60	4,87	8,79	10,13
<i>Ilex paraguariensis</i> A. St. – Hil.	Erva-mate	<i>Aquifoliaceae</i>	4	5,41	23,68	5,10	7,40	6,40	13,10
<i>Ilex theezans</i> Mart.	Caúna-graúda	<i>Aquifoliaceae</i>	1	24,06	24,06	9,30	9,30	14,84	14,84
<i>Lamanonia ternata</i> Vell.	Guaperê	<i>Cunoniaceae</i>	1	38,67	38,67	8,00	8,00	15,34	15,34
<i>Lithraea brasiliensis</i> Marchand	Bugre	<i>Anacardiaceae</i>	3	7,00	17,57	3,50	4,00	9,60	11,20
<i>Matayba elaeagnoides</i> Radlk.	Miguel-pintado-miúdo	<i>Sapindaceae</i>	2	20,34	22,73	5,23	5,60	12,60	13,30
<i>Mimosa scabrella</i> Benth.	Bracatinga	<i>Mimosaceae</i>	3	22,73	35,52	4,70	7,90	12,70	16,22
<i>Myrcia sp.</i>	Guamirim	<i>Myrtaceae</i>	3	6,59	27,57	2,45	4,65	7,54	9,06
<i>Myrsine ferruginea</i> (Ruiz & Pav.) Mez	Copororoquina	<i>Myrsinaceae</i>	6	10,66	37,08	2,10	13,00	10,80	18,20
<i>Myrsine umbellata</i> Mart.	Copororoca	<i>Myrsinaceae</i>	4	6,27	27,37	3,07	8,10	5,62	15,80
<i>Nectandra megapotamica</i> (Spreng.) Mez.	Canela-imbuia	<i>Lauraceae</i>	3	15,53	63,66	5,13	7,25	14,40	17,00
<i>Ocotea porosa</i> (Ness & Mart. Ex Ness) L. Barroso	Imbuia	<i>Lauraceae</i>	3	14,96	85,94	5,80	8,80	10,15	26,20
<i>Ocotea puberula</i> (A. Rich.) Ness	Canela-guaicá	<i>Lauraceae</i>	3	17,28	43,64	6,58	13,00	14,60	19,60
<i>Ocotea pulchell</i> Mart.	Canela-lageana	<i>Lauraceae</i>	2	11,94	47,43	4,50	5,40	11,15	19,20
<i>Persea major</i> (Ness) Kopp.	Pau-de-andrade	<i>Lauraceae</i>	1	40,01	40,01	4,93	4,93	15,20	15,20
<i>Piptocarpha angustifolia</i> Dusén	Vassourão-branco	<i>Asteraceae</i>	3	16,39	22,35	4,00	12,38	13,90	17,00
<i>Prunus brasiliensis</i> (Cham. & Schlechtr.) D. Dietr.	Pessegueiro-bravo	<i>Rosaceae</i>	1	33,87	33,87	8,84	8,84	17,00	17,00
<i>Quillaja brasiliensis</i> (A. St.-Hil. et Tul.) Mart.	Pau-sabão	<i>Rosaceae</i>	1	52,68	52,68	3,20	3,20	13,40	13,40
<i>Sapium glandulatum</i> (Vell.) Pax.	Leiteiro	<i>Euphorbiaceae</i>	3	14,90	27,85	10,30	13,96	12,80	18,60
<i>Schinus terebinthifolius</i> Raddi	Aroeira	<i>Anacardiaceae</i>	1	8,59	8,59	2,30	2,30	7,20	7,20
<i>Sebastiania brasiliensis</i> Spreng	Branquilha-miúdo	<i>Euphorbiaceae</i>	1	10,19	10,19	8,08	8,08	13,40	13,40
<i>Sebastiania commersoniana</i> (Baill.) L.B. Sm. & Downs	Branquilha	<i>Euphorbiaceae</i>	1	21,42	21,42	11,67	11,67	16,90	16,90
<i>Sloanea lasiocoma</i> K. Schum.	Sapopema	<i>Elaeocarpaceae</i>	1	31,61	31,61	6,00	6,00	10,60	10,60
<i>Styrax leprosus</i> Hook & Arn.	Maria-mole-graúda	<i>Styracaceae</i>	4	9,68	26,58	2,39	7,42	7,50	14,85
<i>Symplocos celastrina</i> Mart. ex Miq.	Maria-mole-branca	<i>Symplocaceae</i>	1	12,10	12,10	5,40	5,40	12,50	12,50
<i>Symplocos uniflora</i> (Pohl) Benth.	Sete-sangria	<i>Symplocaceae</i>	4	10,98	21,96	5,75	6,23	10,13	11,60
<i>Vernonia discolor</i> (Spreng.) Less	Vassourão-preto	<i>Asteraceae</i>	1	25,46	25,46	6,00	6,00	13,20	13,20
<i>Xylosma sp.</i>	Sucará	<i>Salicaceae</i>	1	17,35	17,35	2,05	2,05	11,30	11,30

Onde: N = número de indivíduos da mesma espécie; DAP = diâmetro a altura do peito (cm); HT = altura total (m); HM= altura do ponto de inversão morfológica (m).

De acordo com Watzlawick (2003), a determinação dos teores de carbono orgânico na biomassa florestal foram obtidos pelo método WALKLEY-BLACK, com calor externo, proposto por Tedesco *et al.* (1995). O conteúdo de carbono de cada compartimento foi obtido multiplicando-se o peso da biomassa pelo teor de carbono. A Tabela 2 caracteriza os teores de carbono e o conteúdo de biomassa da base de dados.

**Tabela 2:** Teores de carbono e conteúdo de biomassa da base de dados (WATZLAWICK, 2003).

Componentes	Teor de Carbono (%)			Conteúdo de Biomassa (kg/árvore)		
	Mínimo	Máximo	Médio	Mínimo	Máximo	Médio
Madeira do Fuste	36,52	46,51	41,75	4,38	3007,56	163,96
Casca do Fuste	29,51	51,42	38,54	0,29	2119,79	39,98
Galhos	30,01	44,41	40,85	2,30	2590,73	176,79
Folhagem	30,01	48,21	42,49	0,12	86,62	7,04
Miscelânea	30,01	42,66	38,79	0,01	78,53	3,98

A base de dados é bastante heterogênea, com grande amplitude de dados. O dap das árvores varia de 5,41 cm a 105,68 cm, a altura total de 6,4 m a 30,1 m, a altura do ponto de inversão morfológica de 2,05 m a 27,45 m e o carbono total varia de 3,43 kg/árvore a 2504,21 kg/árvore.

No ajuste das equações de regressão para estimar o conteúdo de carbono das árvores utilizou-se como variável dependente a quantidade total de carbono de cada árvore e de seus compartimentos: madeira do fuste, casca do fuste, galhos, folhagem e miscelânea, e como variáveis independentes utilizou-se o diâmetro a altura do peito (a 1,3m) (dap), em centímetros, a altura total da árvore (ht) e a altura do ponto de inversão morfológica (hm), em metros.

A base de dados foi dividida em base de ajuste e base de validação. As 91 árvores foram dispostas em uma tabela de frequências, com 9 classes de dap, sendo selecionadas ao acaso 9 árvores para compor a base de validação, distribuídas de acordo com frequência relativa de cada classe. O número de classes foi calculado com a fórmula:

Número de classes =  $2,5 * \sqrt[4]{n}$ , onde  $n$  é o número de elementos da amostra (KOEHLER, 2004).

Os modelos matemáticos utilizados para ajuste das equações de regressão estão apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3:** Modelos matemáticos para ajuste de equações de regressão.

<b>Modelos Matemáticos de Equações de Regressão</b>	
1	$P = a.dap^b$
2	$P = a + b.dap + c.dap^2$
3	$P = a + b.dap + c.(dap^2.h)$
4	$P = a + b.dap + c.dap^2 + d.(dap^2.h)$
5	$P = a + b.dap^2 + c.(dap^2.h)$
6	$P = a + b.dap + c.h$
7	$P = a.dap^b.h^c$
8	$P = a + b.dap$
9	$P = a + b.dap^2$
10	$P = a + b.dap^3$
11	$P = a + b.dap^2.h$
12	$\ln P = a + b.\ln dap$
13	$\ln P = a + b.\ln dap^2$
14	$\ln P = a + b.\ln dap^3$
15	$\ln P = a + b.\ln (dap^2.h)$
16	$P = a + b.dap + c.dap^2 + d.dap^3$
17	$P = a + b.dap + c.dap^2 + d.dap^3 + e.dap^4$
18	$P = a + b.dap + c.dap^2 + d.dap^3 + e.dap^4 + f.dap^5$
19	$\ln P = a + b.\ln h$
20	$P = a + b.dap^2 + c.h^2 + d.(dap^2.h)$
21	<i>Stepwise</i>

Onde: a, b, c, d, e, f = coeficientes estimados por regressão; dap = diâmetro a altura do peito (1,3 m) da árvore; ln = logaritmo natural; P = quantidade de carbono estocado e h = altura total ou altura do ponto de inversão morfológica.

O ajuste das equações de regressão foi feito pelo método dos mínimos quadrados, utilizando o pacote Microsoft Office Excel 2003<sup>®</sup>. Para o método *Stepwise* utilizou-se o software estatístico SPSS<sup>®</sup>.

Com o objetivo de observar o relacionamento de cada variável independente utilizada nos modelos de regressão com a quantidade de carbono estocada nos diversos compartimentos das árvores da área em estudo, foi elaborada uma matriz de correlação simples.

Para a escolha das melhores equações de regressão foram adotados os seguintes critérios estatísticos: maior coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ), menor erro padrão da estimativa ( $S_{yx}\%$ ), maior estatística F e melhor distribuição gráfica dos resíduos.

A distribuição gráfica dos resíduos foi feita utilizando a base de validação, composta por 9 árvores independentes dos dados utilizados no ajuste, cobrindo assim toda a amplitude de diâmetros das árvores em estudo. O objetivo da análise da distribuição gráfica dos resíduos foi auxiliar na escolha dos melhores modelos e de identificar possíveis tendências no ajuste.

A correção da discrepância logarítmica, presente nas estimativas das equações de modelos logarítmicos linearizados, foi feita multiplicando-se a quantidade do nutriente estimado pela expressão conhecida como índice de Meyer (IM):  $IM = e^{0,5 \cdot S^2_{yx}}$ , onde  $e$  = base dos logaritmos neperianos e  $S^2_{yx}$  = quadrado do erro padrão da estimativa (ORELLANA e KOEHLER, 2008; MACHADO *et al.*, 2008).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Matriz de correlação simples

A matriz de correlação simples mostrou que os compartimentos que apresentaram mais variáveis independentes com alta correlação simples foram a madeira do fuste e o carbono total da árvore, resultados similares aos encontrados por Urbano (2007), em um trabalho com biomassa e carbono em bracatingais nativos, e por Silveira (2008), em um trabalho com biomassa e carbono na Floresta Ombrófila Densa. O maior coeficiente de correlação simples foi observado entre a variável independente  $dap^2 \cdot ht$  e a quantidade de carbono armazenada na madeira do fuste, que foi de 0,99.

As variáveis independentes  $dap$ ,  $ht$  e  $hm$  não apresentaram alta correlação com nenhuma variável dependente, no entanto, quando modificadas para  $dap^2$ ,  $dap^3$ ,  $dap^4$  e  $dap^5$  ou combinadas em  $dap^2 \cdot ht$  e  $dap^2 \cdot hm$  apresentam alta correlação com o carbono do fuste, da casca e o carbono total. Este aumento do coeficiente de correlação simples para variáveis modificadas ou combinadas também foi verificado nos trabalhos de Urbano (2007) e Silveira (2008).

Para o carbono dos compartimentos galhos, folhagem e miscelânea as variáveis independentes não apresentaram forte coeficiente de correlação, mesmo nas variáveis combinadas. Isto demonstra a dificuldade que as variáveis independentes apresentaram para explicar a quantidade de carbono estocada nestes compartimentos.

Urbano (2007) encontrou maiores coeficientes de correlação simples para o carbono dos compartimentos galhos e folhagem, mas utilizou variáveis relacionadas com a altura da copa, diâmetro da copa e altura do fuste, variáveis não utilizadas no presente trabalho. Silveira (2008) também encontrou os mais baixos coeficientes de correlação simples para os compartimentos folhas e miscelânea, inferiores a 0,715 para a folhagem e a 0,398 para a miscelânea.

A Tabela 4 apresenta os coeficientes de correção simples entre as variáveis dependentes e independentes da base de dados.



**Tabela 4:** Tabela de correlação entre as variáveis dependentes e independentes dos modelos de regressão.

Variáveis Independentes	Variáveis Dependentes (Quantidade de Carbono no Compartimento)					
	Madeira do Fuste	Casca do Fuste	Galhos	Folhagem	Miscelânea	Total
dap	0,850	0,573	0,799	0,788	0,740	0,889
ht	0,730	0,503	0,653	0,676	0,599	0,752
hm	0,642	0,655	0,182	0,523	0,227	0,556
dap <sup>2</sup>	0,964	0,732	0,783	0,833	0,769	0,978
dap <sup>3</sup>	0,989	0,829	0,693	0,819	0,708	0,978
dap <sup>4</sup>	0,981	0,887	0,597	0,796	0,626	0,950
dap <sup>5</sup>	0,964	0,925	0,515	0,775	0,547	0,917
dap <sup>2</sup> ht	0,990	0,819	0,711	0,836	0,718	0,984
dap <sup>2</sup> hm	0,952	0,968	0,424	0,785	0,449	0,885
ln dap	0,636	0,378	0,676	0,641	0,579	0,683
ln dap <sup>2</sup> ht	0,646	0,389	0,676	0,646	0,580	0,691
ln dap <sup>2</sup> hm	0,673	0,439	0,614	0,651	0,545	0,692
ln dap <sup>2</sup>	0,636	0,378	0,676	0,641	0,579	0,683
ln dap <sup>3</sup>	0,636	0,378	0,676	0,641	0,579	0,683
ht <sup>2</sup>	0,845	0,632	0,689	0,754	0,654	0,856
hm <sup>2</sup>	0,773	0,873	0,167	0,621	0,209	0,668
ln ht	0,604	0,382	0,585	0,583	0,515	0,631
ln hm	0,459	0,393	0,185	0,381	0,224	0,401

Onde: dap = diâmetro a altura do peito (1,3 m) da árvore; ln = logaritmo natural; ht = altura total; hm = altura do ponto de inversão morfológica.

As baixas correlações podem estar relacionadas com a grande heterogeneidade de espécies presente na base de dados, característica das florestas naturais tropicais, apresentando indivíduos com as mais variadas formas e alturas.

#### 4.2. Ajuste de equações para estimativa do conteúdo de carbono

O ajuste das equações de regressão para estimativa do carbono estocado na biomassa acima do solo mostrou que os resultados podem ser muito distintos entre os diversos compartimentos. A Tabela 5 apresenta os resultados do ajuste das cinco equações selecionadas para cada compartimento para estimativa do conteúdo de carbono fixado na biomassa acima do solo das espécies arbóreas de uma Floresta Ombrófila Mista Montana.

**Tabela 5:** Equações ajustadas e selecionadas para a estimativa do conteúdo de C.

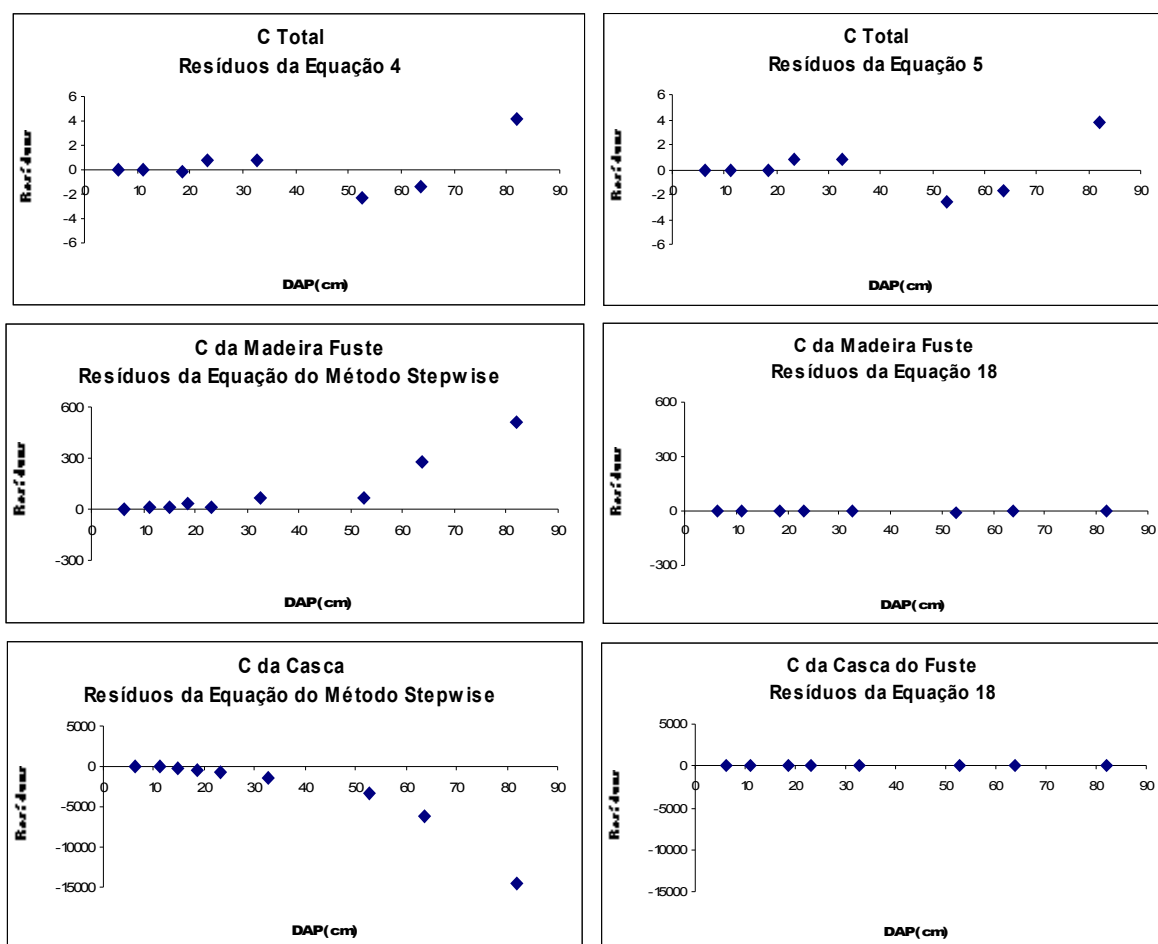
EQUAÇÕES	ESTATÍSTICAS		
	R <sup>2</sup> aj	S <sub>yx</sub> %	F
<b>C total</b>			
5 C = 1,343 + 0,088.dap <sup>2</sup> + 0,005.(dap <sup>2</sup> .ht)	0,975	37,57	1550,46
4 C = - 7,293 + 0,867.dap + 0,061.dap <sup>2</sup> + 0,005.(dap <sup>2</sup> .ht)	0,974	37,78	1022,31
20 C = 1,752 + 0,088.dap <sup>2</sup> -0,004.ht <sup>2</sup> + 0,005.(dap <sup>2</sup> .ht)	0,974	37,81	1020,57
18 C = 93,050 - 17,839.dap + 1,225.dap <sup>2</sup> - 0,027.dap <sup>3</sup> + 2,896E-04.dap <sup>4</sup> - 1,07E-06.dap <sup>5</sup>	0,974	38,17	600,99
16 C = -9,579 + 1,120.dap + 0,098.dap <sup>2</sup> + 0,001.dap <sup>3</sup>	0,974	38,19	1000,09
<b>C da madeira do fuste</b>			
<i>Stepwise:</i> C = -28,551 + 0,001.dap <sup>3</sup> -0,249.hm <sup>2</sup> + 1,276.dap + 0,002.(dap <sup>2</sup> .hm) + 5,438.hm	0,994	21,32	2449,27
18 C = 1,706 + 0,466.dap + 0,018.dap <sup>2</sup> + 0,002.dap <sup>3</sup> -0,00004.dap <sup>4</sup> + (2,71E-07).dap <sup>5</sup>	0,991	25,59	1698,86
17 C = 18,804 -3,510.dap + 0,267.dap <sup>2</sup> -0,004.dap <sup>3</sup> + 3,02E-05.dap <sup>4</sup>	0,991	25,62	2118,98
4 C = -19,656 + 3,003.dap -0,115.dap <sup>2</sup> + 0,007.(dap <sup>2</sup> .ht)	0,985	32,97	1695,21
5 C = 10,177 -0,022.dap <sup>2</sup> + 0,005.(dap <sup>2</sup> .ht)	0,983	34,81	2277,19
<b>C da casca do fuste</b>			
<i>Stepwise:</i> C = -0,452 + 0,003.(dap <sup>2</sup> .hm)	0,986	64,06	2700,39
18 C = -11,165 + 3,32.dap -0,306.dap <sup>2</sup> + 0,012.dap <sup>3</sup> -0,0002.dap <sup>4</sup> + (9,93E-07).dap <sup>5</sup>	0,985	66,40	1005,02
3 C = 10,592 -0,756.dap + 0,003.(dap <sup>2</sup> .hm)	0,978	78,79	1729,41
4 C = 0,263.dap -0,020.dap <sup>2</sup> + 0,003.(dap <sup>2</sup> .hm)	0,971	67,16	1653,66
5 C = -0,014.dap <sup>2</sup> + 0,003.(dap <sup>2</sup> .hm)	0,971	69,19	2334,80
<b>C dos galhos</b>			
<i>Stepwise:</i> C = -7,89 + 1,629.dap -0,208.hm <sup>2</sup> + 0,005.(dap <sup>2</sup> .ht) -0,005.(dap <sup>2</sup> .hm)	0,876	68,90	142,37
20 C = 0,122.dap <sup>2</sup> -0,291.hm <sup>2</sup> -0,003.(dap <sup>2</sup> .hm)	0,872	72,39	206,47
4 C = 24,696 - 2,951.dap + 0,173.dap <sup>2</sup> - 0,004.(dap <sup>2</sup> .hm)	0,860	70,66	164,21
5 C = 0,119.dap <sup>2</sup> -0,003.(dap <sup>2</sup> .hm)	0,859	76,42	273,37
17 C = 3,558.dap -0,281.dap <sup>2</sup> + 0,009.dap <sup>3</sup> -6,46E-05.dap <sup>4</sup>	0,834	84,01	113,00
<b>C da folhagem</b>			
3 C = 0,080.dap + 0,00009.(dap <sup>2</sup> .ht)	0,812	89,12	184,32
9 C = 0,359 + 0,003.dap <sup>2</sup>	0,784	87,31	283,68
5 C = 0,080 + 0,004.dap <sup>2</sup> -3,929E-05.(dap <sup>2</sup> .ht)	0,783	87,36	142,12
2 C = -0,154 + 0,034.dap + 0,003.dap <sup>2</sup>	0,782	87,62	141,05
4 C = 0,645 -0,057.dap + 0,006.dap <sup>2</sup> -8,198E-05.(dap <sup>2</sup> .ht)	0,781	87,81	93,85
<b>C da miscelânea</b>			
<i>Stepwise:</i> C = -0,019 + 0,001.dap <sup>2</sup> + 0,00004.dap <sup>3</sup>	0,873	96,79	170,05
4 C = 1,647 -0,190.dap + 0,006.dap <sup>2</sup> - 0,0001.(dap <sup>2</sup> .hm)	0,872	96,53	169,70
18 C = 0,047.dap -0,003.dap <sup>2</sup> + 3,89E-05.dap <sup>3</sup> + 1,96E-06.dap <sup>4</sup> -1,90E-08.dap <sup>5</sup>	0,864	100,57	107,72
17 C = 0,148.dap -0,014.dap <sup>2</sup> 3,964E-04.dap <sup>3</sup> -2,55E-06.dap <sup>4</sup>	0,861	101,80	130,73
20 C = 0,003.dap <sup>2</sup> -0,013.hm <sup>2</sup> -4,731E-05.(dap <sup>2</sup> .hm)	0,804	123,24	111,08

Onde: C = peso do carbono estocado (kg/árvore); dap = diâmetro a altura do peito (1,3 m) árvore; ln = logaritmo natural; ht = altura total e hm= altura do ponto de inversão morfológica.

Para o carbono total, as equações apresentaram boas estatísticas, similares às encontradas por Resende *et al.* (2001), que encontrou equações com R<sup>2</sup> = 98,64% e S<sub>yx</sub> = 25,66% para a estimativa do carbono total estocado no Cerrado, e por Urbano (2007), que ajustou equações com R<sup>2</sup> = 0,959 e S<sub>yx</sub> = 21,75% para a estimativa do carbono total fixado em

bracatingais nativos. Resende *et al.* (2001) considerou as equações satisfatórias para estimativa do carbono arbóreo estocado no Cerrado e citou a grande variabilidade natural existente na estrutura da vegetação e na forma dos troncos das espécies arbóreas existentes no cerrado, características também presentes na Floresta Ombrófila Mista em estudo, além do grande número de espécies florestais.

Observou-se, ainda, que as cinco equações selecionadas para a estimativa do C total apresentam somente as variáveis independentes ht e dap, estando ausente a variável hm em ambas. Este fato pode ser explicado por ht e dap apresentarem maior coeficiente de correlação simples que hm, 0,752 e 0,889 a 0,556, respectivamente, o que pode ser observado na Tabela 4. A distribuição gráfica dos resíduos da validação das equações ajustadas, apresentada na Figura 1, mostra que as duas melhores equações possuem comportamento bastante similar, no entanto ambas apresentaram leve tendência em subestimar o C total em árvores com dap maior.



**Figura 1:** Distribuição gráfica dos resíduos da validação das equações selecionadas para estimativa do carbono total, da madeira do fuste e da casca do fuste.

No ajuste das equações para a estimativa do carbono da madeira do fuste, a equação com melhores estatísticas foi obtida pelo método *stepwise*. A equação apresentou apenas as variáveis independentes  $dap$  e  $hm$  e suas variações  $dap^3$ ,  $hm^2$ ,  $dap^2 \cdot hm$ , não figurando a variável  $ht$ . No entanto, apesar destas variáveis não apresentarem os maiores coeficientes de correlação simples, como pode ser observado na Tabela 4, foram selecionadas pelo método *stepwise*, pois o critério para inserção ou exclusão das variáveis na equação, utilizado por este método, leva em consideração a estatística F (TÉO, 2009).

Urbano (2007) encontrou a melhor equação para a estimativa do conteúdo de C no fuste da bracatinga pelo método *forward*, com estatísticas muito similares às do presente trabalho. Soares e Oliveira (2002) ajustaram uma equação para a estimativa do carbono do fuste de eucalipto, em Viçosa – MG, e obtiveram as estatísticas  $R^2 = 98,82\%$  e  $CV = 16,30\%$ . Hoppe (2003) ajustou equação para a estimativa do carbono em plátanos, e para a madeira encontrou uma equação com  $R^2_{aj} = 0,960$  e  $S_{yx} = 7,3\%$ . Brun (2007) ajustou equações para a estimativa do carbono em sete espécies presentes em uma Floresta Estacional Decidual em fase sucessional secundária. A autora ajustou equações individualmente para cada espécie e para a madeira encontrou equações com coeficientes de determinação variando de 0,823 a 0,999.

Os autores acima referenciados consideraram satisfatórios estes resultados, o que sugere que as equações ajustadas para estimar o C do fuste no presente trabalho apresentaram bons resultados, pois estes são similares aos encontrados por estes autores em uma única espécie plantada e aos encontrados por Urbano (2007) em bracatingas.

Apesar da equação obtida pelo método *stepwise* apresentar melhores estatísticas, a equação 18 apresentou melhor distribuição gráfica dos resíduos, o que pode ser observado na Figura 1. Pois, a equação *stepwise* apresentou maiores resíduos absolutos e tendência em subestimar o C do fuste, principalmente em árvores com  $dap$  maiores, fatos não observados para a equação 18. Neste sentido, deve-se descartar a equação *stepwise* para estimativa do conteúdo de carbono na madeira do fuste e considerar a equação  $C = 1,706 + 0,466 \cdot dap + 0,018 \cdot dap^2 + 0,002 \cdot dap^3 - 0,00004 \cdot dap^4 + (2,71E-07) \cdot dap^5$ , que apresenta estatísticas similares e melhor distribuição gráfica dos resíduos da validação.

As equações selecionadas para a estimativa do carbono da casca do fuste apresentaram bom coeficiente de determinação ajustado, mas relativamente elevado erro padrão da estimativa, como pode ser observado na Tabela 5, sugerindo que as equações não apresentaram boa precisão nas estimativas.

Brun (2007), em equações ajustadas para a estimativa do carbono da casca de sete espécies naturais da Floresta Estacional Decidual, encontrou coeficientes de determinação

similares aos do presente trabalho, variando de 0,8894 a 0,9925, dependendo da espécie. Hoppe (2003), no ajuste de equações para a estimativa do C em plátanos, encontrou uma equação para a casca,  $C = -4046,149524 + 1579,889272 \cdot (\text{dap}^2 \cdot \text{ht})$ , com  $R^2_{aj} = 0,63$  e  $S_{yx} = 17,3\%$ , a qual considerou significativa. No entanto, o coeficiente de determinação ajustado é expressivamente menor que o encontrado no presente trabalho, sugerindo que os presentes resultados podem ser considerados satisfatórios, pois a base de dados do presente trabalho possui uma grande variedade de espécies e que as características das cascas podem ser muito diversificadas.

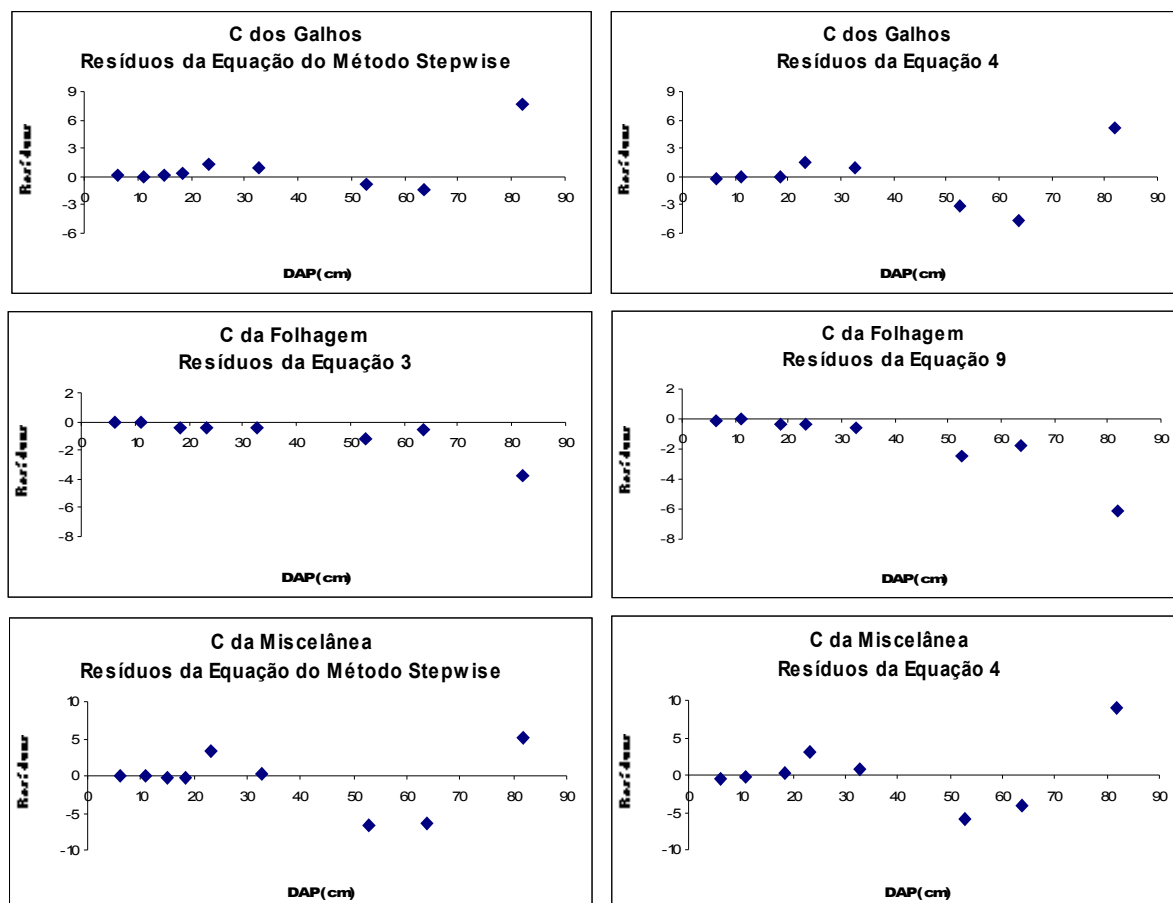
A equação obtida pelo método *stepwise* apresentou estatísticas similares a equação 18, no entanto, a distribuição gráfica dos resíduos da validação mostra que a primeira deve ser descartada, pois além de apresentar resíduos absolutos maiores que a equação 18, apresenta tendência em superestimar o C da casca do fuste na medida que aumenta o dap.

Assim, a equação 18 ( $C = -11,165 + 3,320 \cdot \text{dap} - 0,306 \cdot \text{dap}^2 + 0,012 \cdot \text{dap}^3 - 0,0002 \cdot \text{dap}^4 + (9,93E-07) \cdot \text{dap}^5$ ) foi a melhor equação ajustada para a estimativa do C da casca do fuste. Observou-se que apresenta apenas a variável independente dap e suas variações. No entanto, o coeficiente de correlação simples entre dap e a variável dependente C da casca do fuste foi baixo, 0,573 apenas. Já para a variável modificada  $\text{dap}^5$ , ele foi maior, 0,925, mas menor que do  $\text{dap}^2 \cdot \text{hm}$ , que foi igual a 0,968 e não figurou na equação. Isso mostra que variáveis independentes com baixo coeficiente de correlação simples, quando agrupadas em uma equação podem apresentar estatísticas mais satisfatórias.

Para a estimativa do C dos galhos, as equações selecionadas apresentaram estatísticas similares. Urbano (2007) encontrou pelo método *forward* uma equação mais precisa para a estimativa do carbono estocado nos galhos de bracatingas,  $R^2_{aj} = 0,916$  e  $S_{yx} = 39,32\%$ , já Soares e Oliveira (2002) encontraram uma equação com coeficiente de determinação similar ao encontrado no presente trabalho,  $R^2_{aj} = 88,27\%$ , mas com  $CV = 39,37\%$ , para a estimativa do C dos galhos de eucalipto. Hoppe (2003), no ajuste de equações para a estimativa do C em plátanos, encontrou uma equação para os galhos com  $R^2_{aj}$  pouco menor que o do presente trabalho, 0,82, mas com erro padrão da estimativa menor,  $S_{yx} = 17,1\%$ , e considerou estes resultados significativos. Brun (2007) encontrou equações com  $R^2_{aj}$  variando de 0,7587 a 0,9982 para o carbono dos galhos vivos de sete espécies em uma Floresta Estacional Decidual. Os resultados encontrados por estes e outros autores sugerem que as equações ajustadas para a estimativa do carbono estocado nos galhos são mais precisas em trabalhos com uma única espécie.

A distribuição gráfica dos resíduos da validação mostra que as duas melhores equações selecionadas para a estimativa do C dos galhos apresentaram comportamento

similar, com tendência em aumentar os resíduos absolutos em árvores com dap mais elevado, como pode ser observado na Figura 2. Como ambas não apresentaram diferenças significativas na distribuição dos resíduos, a equação com melhores estatísticas é a equação recomendada para este componente, ou seja, a equação obtida pelo método *stepwise*,  $C = -7,885 + 1,629.dap - 0,208.hm^2 + 0,005.(dap^2.ht) - 0,005.(dap^2.hm)$ .



**Figura 2:** Distribuição gráfica dos resíduos da validação das equações selecionadas para estimativa do carbono dos galhos, da folhagem e da miscelânea.

Para a folhagem, a maioria das equações ajustadas não apresentou bons resultados, com baixo coeficiente de determinação ajustado e alto erro padrão da estimativa, assim como os resultados encontrados por Urbano (2007) e Soares e Oliveira (2002). O primeiro autor ajustou equações para estimativa do carbono estocado na folhagem de bracatinga e as equações apresentaram  $R^2_{aj} = 0,795$  e  $S_{yx}\% = 42,57\%$ . Este autor considerou as equações de baixa precisão e atribuiu os resultados à baixa correlação das variáveis utilizadas nas equações, fato também observado no presente trabalho.

Soares e Oliveira (2002) ajustaram equações para a estimativa do carbono fixado em eucalipto e para a folhagem a equação apresentou  $R^2 = 85,40\%$  e  $CV = 57,33\%$ . Os autores

consideraram a equação ajustada de baixa precisão e atribuíram os resultados ao fato de que fatores não alométricos afetam a quantidade de folhagem nas árvores, como a estação do ano, a inclinação do terreno e o tamanho da copa. Em ambos os trabalhos, os autores não recomendaram a utilização das equações ajustadas, devido aos baixos níveis de precisão nas estimativas.

Já Brun (2007), no ajuste de equações para a estimativa do carbono em espécies nativas da Floresta Estacional Decidual, também encontrou os resultados menos significativos nas equações ajustadas para a folhagem da maioria das espécies.

Os resultados menos expressivos encontrados nas equações ajustadas para estimativa do carbono estocado na folhagem das árvores no presente trabalho, bem como os resultados dos trabalhos de outros autores, mostram que as variáveis independentes *dap*, *hm* e *ht* têm dificuldade em explicar o carbono estocado neste compartimento.

A análise gráfica da distribuição dos resíduos mostrou que as duas melhores equações apresentaram tendência em superestimar o carbono fixado na folhagem e os resíduos tendem a aumentar seu valor absoluto, a medida que aumenta o *dap*, mas não diferem significativamente uma da outra. Assim, a melhor equação ajustada para a estimativa do carbono estocado na folhagem é a equação 3 ( $C = 0,080 \cdot \text{dap} + 0,00009 \cdot (\text{dap}^2 \cdot \text{ht})$ ).

No ajuste das equações para a estimativa do C da miscelânea, as equações não apresentam estatísticas expressivas, com baixo coeficiente de determinação ajustado e erro padrão da estimativa acima de 96%. De certa forma, estes resultados já eram esperados, pois na Tabela 4 foi observado que não houve alta correlação simples entre nenhuma das variáveis independentes e o conteúdo de carbono da miscelânea.

As estatísticas pouco satisfatórias das equações ajustadas para a estimativa do C da miscelânea podem ser explicadas pela grande diversidade de espécies presente na base de dados, bem como das características singulares de cada uma delas, dificultando as variáveis independentes em explicar o carbono fixado neste compartimento. E, pelo fato de que as estruturas vegetais classificadas como miscelânea podem não apresentar padrões alométricos, tendo pouca relação com as variáveis altura e diâmetro.

No entanto, apesar da baixa precisão nas estimativas, as equações ajustadas para a estimativa do C estocado na miscelânea podem fornecer informações relevantes para estudos sobre a fixação e estoque de carbono florestal na área em estudo. Assim, a melhor equação ajustada foi a obtida pelo método *stepwise*,  $C = - 0,019 + 0,001 \cdot \text{dap}^2 + 0,00004 \cdot \text{dap}^3$ .

## 5. CONCLUSÕES

- O ajuste das equações de regressão forneceu melhores resultados para o carbono total e para o carbono da madeira do fuste, resultados satisfatórios e similares aos encontrados por outros autores em trabalhos com apenas uma espécie;
- Para os compartimentos casca do fuste, galhos, folhagem e miscelânea as equações ajustadas não forneceram estatísticas satisfatórias, denotando imprecisão nas estimativas;
- Os resultados insatisfatórios para as equações ajustadas para os componentes casca do fuste, galhos, folhagem e miscelânea devem estar associados ao grande número de espécies presentes na base de dados;
- O método *stepwise* mostrou-se uma ferramenta eficiente para escolha das variáveis que devem compor as equações de regressão, fornecendo as melhores equações para a estimativa do carbono estocado nos componentes galhos e miscelânea;
- O uso de equações de regressão para a estimativa do conteúdo de carbono na biomassa florestal da área em estudo pode ser uma boa alternativa como método indireto de quantificação.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRITZ, R. M. de; BORG, M.; TIEPOLO, G.; FERRETI, A.; CALMON, M.; HIGA, R.

**Estoque e incremento de carbono em florestas e povoamentos de espécies arbóreas com ênfase na floresta atlântica do sul do Brasil.** Colombo: Embrapa, 2006. 165p.

BRUN, E. J. **Biomassa e nutrientes na floresta estacional decidual, em Santa Tereza, RS.** 2004. 136p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

BRUN, F. G. K. **Dinâmica do carbono orgânico em espécies arbóreas de uma floresta estacional decidual no Rio Grande do Sul.** 2007. 106p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.



CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira**. Brasília: EMBRAPA-CNPQ; EMBRAPA-SPI, 1994. 640p.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. New York: J. Wiley & Sons, 1981. 2 ed. 709p.

EMBRAPA. Empresa brasileira de pesquisa agropecuária. **Mapa de solos do estado do Paraná: legenda atualizada**. Rio de Janeiro, 2008. 74p.

HOPPE, J. M.. **Biomassa e nutrientes em *Pnatanus x acerifolia* (Aiton) Willd. estabelecido no município de Dom Feliciano - RS**. 2003. 143p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE, 1992. 92p.

IBGE. **Mapas temáticos**. Disponível em: < [http://www.ibge.gov.br/mapas\\_ibge/tem.php](http://www.ibge.gov.br/mapas_ibge/tem.php)>. Acesso em: 18 jan. 2010.

IPCC. **Guidliness for National Greenhouse Gás Inventories**. Kanagawa: IGES, 2006. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>>. Acesso em: 19 jan 2009.

KOEHLER, H. S. **Estatística experimental**. Curitiba: UFPR, 2004. 124p.

MAACK, R. **Geografia Física do Estado do Paraná**. Rio de Janeiro: José Olympio, 1981. 442p.

MACHADO, S. A.; AGUIAR, L. P.; FIGUEIREDO FILHO, A.; KOEHLER, H. S. Modelagem do volume do povoamento para *Mimosa scabrella* Benth. na região metropolitana de Curitiba. **Revista Árvore**. Viçosa, v.32, n.3, p.465-478, 2008.

MARTINELLI, L. A.; MOREIRA, M. Z.; BROWN, I. F.; VICTORIA, R. L. Incertezas associadas às estimativas de biomassa em florestas tropicais: o exemplo de uma floresta

situada no estado de Rondônia. In: **Seminário Emissão x Seqüestro de CO<sub>2</sub>**. Rio de Janeiro: Companhia Vale do Rio Doce, 1994. 221p.

ORELLANA, R.; KOEHLER, A. B. Relações morfométricas de *Ocotea odorífera* (Vell.) Rohwer. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**. Curitiba, v.6, n.2, p.229-237, abr./jun. 2008.

PARANÁ. Secretaria do Estado de Agricultura e Abastecimento, Instituto de Terras, Cartografia e Florestas. **Atlas do estado do Paraná**. Curitiba, 1987. 73p.

RENNER, R. M. **Seqüestro de carbono e a viabilização de novos reflorestamentos no Brasil**. 2004. 147p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

RESENDE, D; MERLIN, S; SANTOS, M. **Seqüestro de carbono: uma experiência concreta**. Palmas: Instituto Ecologia, 2001. 178p.

SANQUETTA, C. R. Metodologias para determinação de biomassa florestal. In: ; SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M. A. B.; GOMES, F. dos S. **As florestas e o carbono**. Curitiba: UFPR, 2002. 264p.

SILVEIRA, P. **Métodos indiretos de estimativa do conteúdo de biomassa e do estoque de carbono em um fragmento de floresta ombrófila densa**. 2008. 129p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

SOARES, C. P. B.; OLIVEIRA, M. L. R de. Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v.26, n.5, p.533-539, 2002.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.

TÉO, S. J. **Quantificação e modelagem do conteúdo de nutrientes na biomassa aérea da bracatinga (*Mimosa scrabella* Bentham)**. 2009. 157p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

URBANO, E. **Quantificação e estimativa da biomassa aérea e do carbono fixado em árvores de bracatingais nativos da região metropolitana de Curitiba**. 2007. 160p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

WATZLAWICK, L. F. **Estimativa de biomassa e carbono em floresta ombrófila mista e plantações florestais a partir de dados de imagens do satélite Ikonos II**. 2003. 120p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; SANQUETTA, C. R.; CALDEIRA, M. V. W. Teores de carbono em espécies da floresta ombrófila mista. In: SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M. A. B. **Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas**. Curitiba: AM Impressos, 2004. 205p.

WATZLAWICK, L. F.; KOEHLER, H. S.; KIRCHNER, F. F. Estimativa de biomassa e carbono em plantios de *Pinus taeda* L. utilizando imagens do satélite IKONOS II. **Ciência e Natura**, Santa Maria, n.28, p.45-60, 2006.

YU, C. M. **Seqüestro florestal de carbono no Brasil: dimensões políticas, socioeconômicas e ecológicas**. São Paulo: Annablume, 2004. 280p.

### CAPÍTULO III

## MODELAGEM DO CONTEÚDO DE NUTRIENTES DA BIOMASSA ACIMA DO SOLO NA FLORESTA OMBRÓFILA MISTA MONTANA

### RESUMO

Os processos que envolvem a ciclagem dos nutrientes em florestas, tais como a quantidade de nutrientes estocada na biomassa, fornecem informações importantes para a continuidade e a manutenção da produção de uma floresta e seu manejo. Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo ajustar e selecionar equações de regressão para estimar o conteúdo de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Mn, Cu, Zn e Fe) estocados na biomassa acima do solo em uma Floresta Ombrófila Mista Montana, localizada no município de General Carneiro, Paraná, considerando seus diversos componentes e a biomassa total. A base de dados utilizada no ajuste das equações era composta pelas determinações de biomassa e dos teores de nutrientes de 85 árvores de 38 espécies e 19 famílias, bem como as medidas dendrométricas diâmetro a altura do peito (dap), altura total (ht) e altura do ponto de inversão morfológica (hm) das árvores. Foram utilizados 20 modelos matemáticos e o método *stepwise* para ajustar as equações de regressão para estimar o conteúdo total dos nutrientes da árvore e dos componentes: madeira do fuste, casca do fuste, galhos, folhagem e miscelânea. Para o ajuste das equações de regressão utilizou-se o método dos mínimos quadrados e para a seleção das melhores equações observaram-se as estatísticas coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ), erro padrão da estimativa em percentagem ( $S_{yx}\%$ ), estatística F e análise gráfica da distribuição dos resíduos. O ajuste das equações apresentou resultados satisfatórios em alguns casos e de menor expressão em outros, dependendo do componente da biomassa e do nutriente analisado. Para a maioria dos nutrientes, as equações com melhores estatísticas foram obtidas para o componente casca do fuste. Já os piores resultados foram obtidos para os componentes folhagem e miscelânea, em todos os nutrientes. O modelo matemático que apresentou melhores resultados foi o  $P = a + b.dap + c.dap^2 + d.dap^3 + e.dap^4 + f.dap^5$  e o método *stepwise* se mostrou eficiente na escolha das variáveis independentes a compor as equações de regressão, fornecendo as melhores equações de regressão para diversos componentes. O ajuste de equações de regressão para a estimativa do conteúdo de nutrientes na biomassa acima do solo da Floresta Ombrófila Mista mostrou ser uma boa metodologia alternativa como método indireto de quantificação.

Palavras-chave: Equações de regressão; Floresta com araucária; *stepwise*.

## ABSTRACT

Luis Carlos Ratuchne. Modeling contents of nutrients of the Biomass above of the ground in a Mixed Ombrophilous Montane Forest.

The processes involving the cycling of nutrients in forests, such as the amount of nutrients stored in biomass, provides important information for the continuity and maintenance of the production of a forest and its management. In this sense, the present study was to select and adjust the regression equations to estimate the content of macronutrients (N, P, K, Ca, Mg and S) and micronutrients (B, Mn, Cu, Zn and Fe) stored in the biomass above ground in a Mixed Ombrophilous Montane Forest, located in the General Carneiro city, Paraná, considering its different components and total biomass. The database used in the setting of the equations was made by the determinations of biomass and nutrient content of 85 trees of 38 species and 19 families, as well as measures dendrometric diameter at breast height (dap), total height (ht) and height of the morphological inversion point (hm) of trees. 20 were used mathematical models and the stepwise method to adjust the regression equations to estimate the total content of nutrients and tree components: stem wood, stem bark, branches, leaves and miscellaneous. For adjustment of the regression equations used the least squares method and of selecting the best fitting observed statistics adjusted coefficient of determination ( $R^2_{aj}$ ), standard error of estimate in percentage ( $S_{yx}\%$ ), F statistics and analysis graphical distribution of waste. Adjustment of the equations showed satisfactory results in some cases and smaller ones in others, depending on the component of biomass and nutrient analysis. For most nutrients, the equations with better statistics were obtained for the bark of the stem component. The worst results were obtained for the foliage and miscellaneous components in all nutrients. The mathematical model with better results was  $P = a + b.dap + c.dap^2 + d.dap^3 + e.dap^4 + f.dap^5$  and stepwise method was efficient in the selection of independent variables to compose the regression equations, providing the best regression equations for various components. The fit of regression equations to estimate the nutrient content in above-ground biomass of Ombrophilous Montane Forest proved to be a good alternative approach to the indirect method of quantification.

Keywords: Equations of Regression; Araucaria forest; *Stepwise*.

## 1. INTRODUÇÃO

Os fatores que merecem especial destaque quando se conduz uma floresta estão relacionados com a ciclagem de nutrientes (HOPPE, 2003). A continuidade e a sustentabilidade da produtividade de uma floresta estão relacionadas com os nutrientes nelas contidos, bem como os seus mais variados fluxos e transformações (TÉO, 2009). Neste sentido, conhecer as relações entre a quantidade de nutrientes que é exportada e a biodisponibilidade deles na floresta são de suma importância.

Quantificar os nutrientes estocados em uma floresta natural é uma tarefa bastante onerosa, demanda amostragens, derrubadas, análises químicas e inferências. No entanto, diversos autores vêm desenvolvendo e aprimorando metodologias que busquem facilitar e agilizar os procedimentos de quantificação dos nutrientes em florestas. Dos quais podemos citar os trabalhos de Silva (1996), com equações para a estimativa do estoque de nutrientes em *Eucalyptus grandis*, Hoppe (2003), no ajuste de equações para a estimativa do conteúdo de nutrientes em *Platanus x acerifolia*, Téó (2009), no ajuste de equações para a estimativa do conteúdo de nutrientes em *Mimosa scabrella*, dentre outros.

Neste sentido, a estimativa do conteúdo de macro e micronutrientes em função de variáveis de fácil obtenção, como o diâmetro e a altura total da árvore, por meio de modelos matemáticos tem se mostrado uma ferramenta útil e confiável para o conhecimento do estoque de nutrientes florestais, subsidiando informações que podem ser utilizadas em todo o manejo florestal.

O presente trabalho teve como objetivo ajustar e selecionar equações matemáticas capazes de estimar o conteúdo de macro e micronutrientes em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista Montana, em seus diversos compartimentos da biomassa aérea.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Nutrientes das plantas

A análise refinada do tecido de muitas espécies de plantas mostra a presença de praticamente toda a tabela periódica dos elementos, fato sabido desde o início do século XX (MALAVOLTA, 1980). No entanto, a presença do elemento na planta não significa que ele possui importante função ou sugere sua essencialidade, pois as plantas absorvem do solo elementos essenciais, benéficos ou que podem até mesmo trazer a sua morte (MALAVOLTA *et al.*, 1997).

Um elemento é considerado essencial quando participa de algum composto ou alguma reação, sem a qual a planta não vive, ou quando na ausência do elemento a planta não completa o seu ciclo de vida e o elemento não pode ser substituído por nenhum outro. Os elementos considerados essenciais estão subdivididos em macronutrientes e micronutrientes, de acordo com a concentração que aparecem na matéria seca. Os macronutrientes estão em maior concentração na matéria seca e são: nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S). Já os micronutrientes apresentam-se em menores concentrações na matéria seca e são: boro (B), cloro (Cl), cobalto (Co), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo), níquel (Ni), selênio (Se), silício (Si) e zinco (Zn) (MALAVOLTA *et al.*, 1997).

Segundo Larcher (1986), as concentrações dos nutrientes na biomassa vegetal variam com a espécie, fase de desenvolvimento, estado nutricional, condições edafoclimáticas e com a parte do vegetal considerada. Segundo Caldeira (2003), influenciam na quantidade de nutrientes absorvidos pelas árvores as necessidades totais de nutrientes, a velocidade de crescimento, a eficiência no uso dos nutrientes nos processos metabólicos e a capacidade de absorção das raízes.

As florestas armazenam quantidades relativamente altas de nutrientes e o teor total está relacionado com a quantidade e com a composição florestal, que por sua vez é influenciada pela vegetação, clima, solo e pelo período de acumulação após uma perturbação na cobertura florística (CALDEIRA, 2003).

Golley *et al.* (1978) sugerem que as florestas têm uma grande massa de elementos químicos constituindo a madeira dos troncos, nos ramos e raízes, que se move de modo relativamente lento através do sistema. Por outro lado, uma massa menor, associada às partes verdes e à serrapilheira é reciclada rapidamente entre o solo e as plantas. Segundo Selle (2007), a serrapilheira é a principal fonte de matéria orgânica para o solo e a parte das plantas que fornece maiores proporções na composição da serrapilheira é as folhas.

Grande parte das reservas de nutrientes necessários à floresta estão contidos na fitomassa acima do solo. Parte dessa fitomassa morre periodicamente e ao se depositar sobre o solo é rapidamente mineralizada. Os nutrientes liberados por este meio são absorvidos pelas raízes e acumulados nos diferentes compartimentos das espécies arbóreas, garantindo assim, a manutenção dos ecossistemas florestais (HINKEL, 2002).

## 2.2. Determinação e estimativa do conteúdo de nutrientes em espécies florestais

A quantificação do teor de nutrientes nos tecidos vegetais envolve processos químicos, que normalmente são demorados e envolvem rotinas em laboratórios. Dentre os métodos de análise do tecido vegetal, podemos citar o método de digestão nitro-perclórica, o método de digestão com  $H_2O_2$  e  $H_2SO_4$  e o método de Adler e Wilcox (VACCARO *et al.*, 2004).

As determinações dos teores de nutrientes devem ser representativas para uma determinada área ou número de indivíduos e elas são realizadas a partir de amostras da biomassa (CALDEIRA, 2003; VACCARO *et al.*, 2004). Segundo Sanquetta (2002), os alvos das determinações de biomassa devem ser eleitos segundo critérios de representatividade, sem o qual as estimativas não serão fidedignas, seguindo processos de amostragem aleatória, sistemática ou mista.

As equações de volume são amplamente conhecidas no meio florestal. O volume pode ser estimado pelas relações que ele apresenta com as dimensões e a forma da árvore. Da mesma maneira que o volume, outras variáveis de difícil obtenção das espécies arbóreas, como a biomassa e o conteúdo de nutrientes, podem ser estimadas por meio de suas relações com as dimensões da árvore, como equações de regressão (TÉO, 2009).

O desempenho das estimativas das equações de regressão está diretamente relacionado com as variáveis independentes que compõe as equações. Segundo Draper e Smith (1981), a variável independente mais importante para compor um modelo de regressão é aquela que apresenta maior coeficiente de correlação simples com a variável dependente.

Outra forma de obtenção das equações de regressão é a técnica *stepwise* ou regressão passo a passo. Segundo Téó (2009), o procedimento *stepwise* é uma tentativa de alcançar a melhor equação de regressão por meio da inserção de variáveis. A primeira variável independente a ser inserida no modelo matemático é a que apresenta o maior coeficiente de correlação com a variável dependente. A inserção das demais variáveis é determinada pelo coeficiente de correlação parcial como medida da importância das variáveis que ainda não participam do modelo. Após a inserção de cada variável, o procedimento *stepwise* examina a significância das variáveis que já faziam parte do modelo matemático por meio do valor de “F” parcial. Se a variável apresenta valor de “F” estatisticamente significativo em um determinado nível de probabilidade, essa variável é mantida, caso contrário é eliminada. O procedimento se repete avaliando os coeficientes de correlação parcial e valores de “F” parcial para todas as variáveis independentes. De acordo com Draper e Smith (1981), o *stepwise* é o melhor procedimento de seleção de variáveis para compor equações de regressão.



Bellote *et al.* (1983) ajustaram modelos matemáticos polinomiais para estimar a produção e extração de macro e micronutrientes em função da idade em *Eucalyptus grandis* na cidade de Mogi-Guaçu, São Paulo. Os autores consideraram como variável dependente o conteúdo de nutrientes e como variável independente a idade da planta. Os melhores resultados encontrados pelos autores foram no ajuste das equações para estimar o conteúdo de nutrientes do fuste. Já os modelos ajustados para estimar o conteúdo de nutrientes das folhas apresentaram os piores resultados.

Silva (1996) ajustou modelos matemáticos para a estimativa do conteúdo da biomassa e de nutrientes em plantações de *Eucalyptus grandis* em diferentes idades. No ajuste das equações para a estimativa da biomassa, o autor utilizou a altura total (ht) e o diâmetro à altura do peito (dap) como variáveis independentes. Nos ajustes das equações para estimativa do conteúdo de nutrientes o autor utilizou como variável independente o conteúdo do nutriente determinado em um fragmento do compartimento da árvore, não eliminando, assim, as determinações a campo para a realização das estimativas. Esta metodologia também foi utilizada por Moro *et al.* (2007), no ajuste de equações para estimativa do conteúdo de nutrientes em *Pinus taeda* L.

Hoppe (2003) ajustou equações para estimar o estoque de nutrientes contidos na biomassa dos diferentes componentes das árvores de *Platanus x acerifolia*. Este autor utilizou equações de regressão lineares e logarítmicas compostas pelas variáveis independentes dap e ht e seus resultados foram considerados satisfatórios para alguns nutrientes e insatisfatórios para outros, dependendo do compartimento analisado.

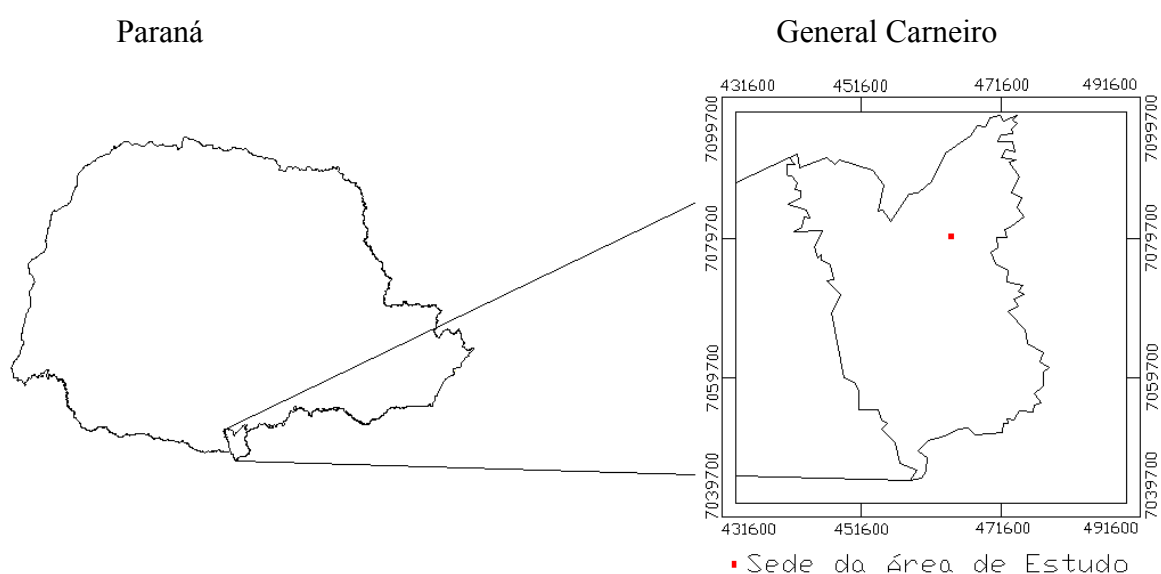
Santana *et al.* (2008) ajustaram equações para estimativa do conteúdo da biomassa e do conteúdo de nutrientes na parte aérea do eucalipto, em diferentes partes do Brasil. Os autores utilizaram como variáveis independentes das equações de regressão duas variáveis relativas à disponibilidade de água e variáveis *Dummy*, que apresentaram alta correlação com os dados.

Téo (2009) ajustou equações matemáticas para a estimativa do conteúdo de macro e micronutrientes em bracatingais nativos. O autor encontrou resultados mais expressivos para os macronutrientes. Para os micronutrientes, considerou os resultados satisfatórios apenas para o cobre e, em alguns casos, para o ferro. O autor concluiu que a inserção de variáveis relacionadas com a idade e a altura dominante melhora os resultados das estimativas e que os resultados tendem a ser melhores para compartimentos somados da biomassa.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Caracterização geral da área do estudo

A área em estudo localiza-se entre as coordenadas 26° 20' 35" e 26° 26' 13" Latitude Sul, e 51° 19' 49" e 51° 25' 29" Longitude Oeste, no município de General Carneiro, no estado do Paraná. A propriedade pertence às Indústrias Pedro N. Pizzatto Ltda e possui uma área de 4.210,75 hectares, e a sede está localizada nas coordenadas UTM 464478 E e 7079977 N, Fuso 22J, Datum SAD 69 Brasil. A Figura 1 apresenta a localização geográfica da área em estudo.



**Figura 1:** Localização geográfica da área em estudo.

Conforme classificação de Köppen, o clima da região é classificado como Subtropical Úmido Mesotérmico (Cfb), com verões amenos e invernos com severas geadas. Não possui estações secas e a precipitação anual média é de 1.831,8 mm. A temperatura média dos meses mais quentes é inferior a 22°C e dos meses mais frios é superior a 18°C (PARANÁ, 1987).

O substrato geológico da região é formado pelo derrame de Trapp da formação da Serra Geral (MAACK, 1981). Na região ocorre uma associação dos solos Neossolo Regolítico Húmico típico, de textura argilosa, álico, de relevo suave ondulado, e do solo Nitossolo Vermelho Distroférico típico, de textura argilosa e relevo suave ondulado. Ambos os solos tem como substratos rochas eruptivas (EMBRAPA, 2008). A topografia possui predominância da característica montanhosa, mas apresenta ainda relevos ondulado e plano (MAACK, 1981).

A vegetação natural da área corresponde ao bioma da Floresta Ombrófila Mista ou Floresta com Araucária (IBGE, 1992), tipologia florestal que cobria originalmente cerca de

80.000 km<sup>2</sup> do território paranaense (CARVALHO, 1994). Contudo, o fragmento florestal encontra-se bastante antropizado e em diversos estágios sucessionais.

Castella *et al.* (2001) descreveram a Floresta Ombrófila Mista Montana da região de General Carneiro – PR, em três estágios de sucessão: o inicial, intermediário e o avançado. No estágio inicial, esses autores observaram as seguintes espécies: *Casearia obliqua*, *Cedrela fissilis*, *Mimosa scabrella*, *Piptocarpha angustifolia*, *Schinus terebinthifolius*, *Zanthoxylum rhoifolium*, *Clethra scabra*, *Ocotea porosa*, *Prunus sellowii*, *Ilex paraguariensis*, *Rapanea ferruginea*, *Sapium glandulatum* e *Piptocarpha axillaris*. A floresta no estágio médio, na maior parte dos fragmentos estudados foi observada a ocorrência de *Araucaria angustifolia*, porém com baixa frequência, sendo as principais espécies observadas: *Casearia decandra*, *Cedrela fissilis*, *Clethra scabra*, *Ilex brevicuspis*, *Ilex theezans*, *Jacaranda puberula*, *Litharea brasiliensis*, *Matayba elaeagnoides*, *Mimosa scabrella*, *Ocotea porosa*, *Piptocarpha angustifolia*, *Piptocarpha axillaris*, *Prunus sellowii*, *Rapanea ferruginea*, *Rapanea umbellata*, *Sapium glandulatum*, *Sebastiania brasiliensis*, *Sloanea lasiocoma*, *Syagrus romanzoffiana*, *Symplocos celastrine*, *Tibouchina sellowiana*, *Vernonia discolor* e *Zanthoxylum rhoifolium*.

Já no estágio avançado da floresta, os autores encontraram a *Araucaria angustifolia* ocorrendo no estrato dominante juntamente com outras espécies. As principais espécies encontradas foram *Campomanesia xanthocarpa*, *Cupania vernalis*, *Ilex brevicuspis*, *Matayba elaeagnoides*, *Mimosa scabrella*, *Ocotea porosa*, *Ocotea pulchella*, *Podocarpus lambertii*, *Prunus sellowii*, *Rapanea* sp. e *Sloanea lasiocoma*.

### 3.2. Material experimental

A base de dados utilizada no ajuste das equações para estimativas da quantidade de nutrientes foi obtida dos trabalhos de Caldeira (2003). Ela possui as medidas dendrométricas diâmetro a altura do peito (1,3 m) (dap), altura total (ht) e altura do ponto de inversão morfológica (hm) e as determinações dos teores de nutrientes e da biomassa de 85 árvores da Floresta Ombrófila Mista Montana, pertencentes a 38 espécies de 19 famílias. As quantidades dos nutrientes armazenados nos diversos compartimentos das árvores foram obtidos multiplicando-se os respectivos teores pela biomassa.

A base de dados é bastante heterogênea, com grande amplitude de dados. O dap das árvores varia de 5,41 a 105,68 cm e a altura de 2,27 a 30,10 m. Já o conteúdo dos nutrientes varia de décimos a milhares de gramas para macronutrientes e de miligramas para micronutrientes. Segundo Caldeira (2003), os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Zn, Fe e Mn da biomassa foram obtidos por digestão úmida e o B por digestão seca. A Tabela 1 caracteriza

a base de dados, fornecendo os teores mínimos, máximos e médios de cada nutriente e o conteúdo de nutrientes.

**Tabela 1:** Caracterização do conteúdo de biomassa e dos teores de nutrientes da base de dados (CALDEIRA, 2003).

		Teores por Componente Arbóreo					
		Madeira do Fuste	Casca do Fuste	Galhos	Folhagem	Miscelânea	Total
Biomassa (kg.árv. <sup>-1</sup> )	Mínimo	4,38	0,29	2,30	0,30	0,01	8,52
	Máximo	3007,56	2119,79	2590,73	233,60	251,70	5930,25
	Médio	178,89	41,48	188,59	9,62	7,61	425,55
Cálcio (g.kg <sup>-1</sup> )	Mínimo	0,27	2,40	1,30	1,80	2,70	6,85
	Máximo	13,45	62,00	21,64	18,70	18,20	119,65
	Médio	2,48	19,52	7,35	9,03	7,55	43,57
Magnésio (g.kg <sup>-1</sup> )	Mínimo	0,03	0,11	0,24	1,08	0,65	2,88
	Máximo	16,00	4,10	2,78	8,00	3,85	21,20
	Médio	1,03	1,58	1,20	3,08	1,81	8,22
Enxofre (g.kg <sup>-1</sup> )	Mínimo	0,14	0,16	0,22	0,22	0,33	1,68
	Máximo	4,79	3,47	4,21	4,58	7,48	16,80
	Médio	0,89	1,45	1,17	2,02	2,06	7,25
Nitrogênio (g.kg <sup>-1</sup> )	Mínimo	0,20	0,37	0,33	0,73	0,71	1,53
	Máximo	10,77	22,11	17,20	39,88	24,38	95,82
	Médio	3,32	8,77	7,12	22,30	15,78	53,49
Fósforo (g.kg <sup>-1</sup> )	Mínimo	0,05	0,07	0,07	0,54	0,50	1,53
	Máximo	7,11	1,23	1,88	3,05	2,00	13,41
	Médio	0,36	0,41	0,55	1,33	1,13	3,50
Potássio (g.kg <sup>-1</sup> )	Mínimo	1,09	4,12	5,06	1,29	5,45	16,25
	Máximo	10,89	13,74	18,54	25,92	11,74	62,82
	Médio	6,22	7,05	7,47	9,98	7,86	37,44
Boro (mg.kg <sup>-1</sup> )	Mínimo	1,64	1,84	2,90	4,37	4,23	39,34
	Máximo	33,69	71,81	94,46	174,35	95,74	296,56
	Médio	9,92	26,17	18,43	46,36	30,99	125,49
Manganês (mg.kg <sup>-1</sup> )	Mínimo	2,00	35,00	33,00	45,00	90,80	177,80
	Máximo	850	1440	890	1460	4600	7938
	Médio	206,85	493,0	432,62	649,08	807,08	2449,87
Cobre (mg.kg <sup>-1</sup> )	Mínimo	0,46	0,84	2,30	0,60	0,76	11,90
	Máximo	44,30	19,00	20,00	40,00	27,30	81,60
	Médio	3,92	7,61	7,25	12,07	13,03	41,96
Zinco (mg.kg <sup>-1</sup> )	Mínimo	1,00	2,10	2,34	4,24	4,00	22,33
	Máximo	156,00	160,00	109,00	126,00	168,00	579,20
	Médio	26,69	37,77	25,15	27,19	42,33	149,71
Ferro (mg.kg <sup>-1</sup> )	Mínimo	6,00	28,30	24,00	11,70	29,00	372,50
	Máximo	931,00	907,00	1150,0	1210,0	5400,0	7115,0
	Médio	116,7	218,26	190,87	238,44	1376,58	1945,96

As quantificações dos nutrientes apresentam-se fracionadas em nutrientes da madeira do fuste, da folhagem, dos galhos (vivos + mortos), da casca do fuste, da miscelânea e total da árvore, permitindo o ajuste de equações para estimativa por compartimento.

### 3.3. Métodos

#### 3.3.1. Ajuste das equações para estimativa do conteúdo de nutrientes

O ajuste das equações de regressão para estimar o conteúdo dos nutrientes das árvores foi feito utilizando a base de dados obtida do trabalho de Caldeira (2003). Como variável dependente foi utilizada a quantidade de nutrientes de cada compartimento ou indivíduo, em gramas para macronutrientes e em miligramas para micronutrientes, e como variáveis independentes utilizou-se o dap, em centímetros, a altura total da árvore (ht) e a altura do ponto de inversão morfológica, em metros.

Os modelos matemáticos utilizados para ajuste das equações de regressão estão apresentados na Tabela 2:

**Tabela 2:** Modelos matemáticos para ajuste de equações de regressão.

<b>Modelos</b>	
1	$P = a \cdot \text{dap}^b$
2	$P = a + b \cdot \text{dap} + c \cdot \text{dap}^2$
3	$P = a + b \cdot \text{dap} + c \cdot (\text{dap}^2 \cdot h)$
4	$P = a + b \cdot \text{dap} + c \cdot \text{dap}^2 + d \cdot (\text{dap}^2 \cdot h)$
5	$P = a + b \cdot \text{dap}^2 + c \cdot (\text{dap}^2 \cdot h)$
6	$P = a + b \cdot \text{dap} + c \cdot h$
7	$P = a \cdot \text{dap}^b \cdot h^c$
8	$P = a + b \cdot \text{dap}$
9	$P = a + b \cdot \text{dap}^2$
10	$P = a + b \cdot \text{dap}^3$
11	$P = a + b \cdot \text{dap}^2 \cdot h$
12	$\ln P = a + b \cdot \ln \text{dap}$
13	$\ln P = a + b \cdot \ln \text{dap}^2$
14	$\ln P = a + b \cdot \ln \text{dap}^3$
15	$\ln P = a + b \cdot \ln (\text{dap}^2 \cdot h)$
16	$P = a + b \cdot \text{dap} + c \cdot \text{dap}^2 + d \cdot \text{dap}^3$
17	$P = a + b \cdot \text{dap} + c \cdot \text{dap}^2 + d \cdot \text{dap}^3 + e \cdot \text{dap}^4$
18	$P = a + b \cdot \text{dap} + c \cdot \text{dap}^2 + d \cdot \text{dap}^3 + e \cdot \text{dap}^4 + f \cdot \text{dap}^5$
19	$\ln P = a + b \cdot \ln h$
20	$P = a + b \cdot \text{dap}^2 + c \cdot h^2 + d \cdot (\text{dap}^2 \cdot h)$
21	<i>Stepwise</i>

Onde: a, b, c, d, e, f = coeficientes estimados por regressão; dap = diâmetro a altura do peito (1,3 m) da árvore; ln = logaritmo natural; P = quantidade do nutriente e h = altura total ou altura do ponto de inversão morfológica.

O ajuste das equações de regressão foi feito pelo método dos mínimos quadrados, utilizando o pacote Microsoft Office Excel 2003<sup>®</sup>. Para o método *Stepwise* utilizou-se o software estatístico SPSS<sup>®</sup>.

A base de dados foi dividida em base de ajuste e base de validação. As 85 árvores foram dispostas em uma tabela de frequências, com 8 classes de dap, sendo selecionadas ao acaso 8 árvores para compor a base de validação, distribuídas de acordo com frequência relativa de cada classe. O número de classes foi calculado com a fórmula:

Número de classes =  $2,5 * \sqrt[4]{n}$ , onde  $n$  é o número de elementos da amostra (KOEHLER, 2004).

### 3.3.2. Análises estatísticas e escolha das melhores equações

Para a escolha das melhores equações de regressão foram adotados os seguintes critérios estatísticos: maior coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ), menor erro padrão da estimativa ( $S_{yx}$ ), maior estatística F e melhor distribuição dos resíduos.

A distribuição gráfica dos resíduos foi feita utilizando a base de validação, composta por 8 árvores independentes dos dados utilizados no ajuste, cobrindo assim toda a amplitude de diâmetros das árvores em estudo. O objetivo da análise da distribuição gráfica dos resíduos foi auxiliar na escolha dos melhores modelos e de identificar possíveis tendências no ajuste.

A correção da discrepância logarítmica, presente nas estimativas das equações de modelos logarítmicos linearizados, foi feita multiplicando-se a quantidade do nutriente estimado pela expressão conhecida como índice de Meyer (IM):  $IM = e^{0,5 * S^2_{yx}}$ , onde  $e$  = base dos logaritmos neperianos e  $S^2_{yx}$  = quadrado do erro padrão da estimativa (ORELLANA e KOEHLER, 2008; MACHADO *et al.*, 2008).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para os nutrientes Ca, Mg, S, N, P, K, B, Mn, Cu, Zn e Fe, foram ajustadas as equações de regressão para estimar o conteúdo do nutriente total da árvore e dos compartimentos: madeira do fuste, casca do fuste, galhos (vivos + mortos), folhagem e miscelânea. Foram selecionadas as duas melhores equações para cada compartimento, com base nos critérios estatísticos descritos na metodologia.

## 4.1. Ajuste de equações para estimativa do conteúdo de macronutrientes

### 4.1.1. Cálcio (Ca)

Os resultados do ajuste das equações para a estimativa do conteúdo de Cálcio na biomassa acima do solo foram satisfatórios para alguns compartimentos e ruins para outros. Para o Ca total e dos compartimentos casca do fuste e galhos, as melhores equações apresentaram alto coeficiente de determinação ajustado e erro padrão da estimativa relativamente baixo, o que pode ser observado na Tabela 3.

**Tabela 3:** Resultados do ajuste de equações para estimativa do conteúdo de Ca.

EQUAÇÕES	ESTATÍSTICAS		
	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	S <sub>yx</sub> %	F
<b>Ca total</b>			
<i>Stepwise:</i> Ca = 2596,507 + 0,153.(dap <sup>2</sup> .hm) + 137,683.dap - 639,79.ln(dap <sup>2</sup> .hm)	0,976	44,45	954,85
17 Ca = 3921,319 - 659,51.dap + 34,738.dap <sup>2</sup> - 0,583.dap <sup>3</sup> + (3,38E-03).dap <sup>4</sup>	0,968	51,29	549,12
<b>Ca da madeira do fuste</b>			
18 Ca = 51,449.dap - 6,069.dap <sup>2</sup> + 0,251.dap <sup>3</sup> - (3,634E-03).dap <sup>4</sup> + (1,74E-5).dap <sup>5</sup>	0,876	99,58	117,65
17 Ca = -39,924.dap + 3,672.dap <sup>2</sup> - 0,072.dap <sup>3</sup> + (4,63E-04).dap <sup>4</sup>	0,843	113,52	109,00
<b>Ca da casca do fuste</b>			
<i>Stepwise:</i> Ca = 481,69 + 0,199.(dap <sup>2</sup> .hm) -104,34.hm - 0,022.dap <sup>3</sup> + (7,63E-7).dap <sup>5</sup>	0,996	40,04	2638,73
18 Ca = 106,539.dap -13,65.dap <sup>2</sup> + 0,592.dap <sup>3</sup> - (9,72E-03).dap <sup>4</sup> + (5,29E-5).dap <sup>5</sup>	0,982	34,65	4464,67
<b>Ca dos galhos</b>			
<i>Stepwise:</i> Ca = 638,302 -327,33.ln dap -0,074.(dap <sup>2</sup> .hm) + 2,365. dap <sup>2</sup>	0,898	57,39	206,52
18 Ca = 622,830 -109,85.dap + 7,132.dap <sup>2</sup> -0,153.dap <sup>3</sup> + 2,33E-03.dap <sup>4</sup> -(1,3E-05).dap <sup>5</sup>	0,895	58,68	122,28
<b>Ca da folhagem</b>			
17 Ca = 0,217.dap + 0,238.dap <sup>2</sup> -0,006.dap <sup>3</sup> + (4,72E-05).dap <sup>4</sup>	0,525	194,84	21,00
16 Ca = 6,011.dap -0,188.dap <sup>2</sup> + (2,31E-3).dap <sup>3</sup>	0,520	195,84	27,15
<b>Ca da miscelânea</b>			
7 Ca = 0,015.dap <sup>3,140</sup> .ht <sup>-1,503</sup>	0,480	374,88	28,73
1 Ca = 0,002.dap <sup>2,474</sup>	0,475	362,31	55,28

Onde: Ca = conteúdo de cálcio (g/árvore); dap = diâmetro a altura do peito (1,3 m) da árvore (cm); ln = logaritmo natural; ht = altura total (m) e hm = altura do ponto de inversão morfológica (m).

Em trabalhos com bracatingais nativos, Téo (2009) ajustou equações para a estimativa do conteúdo de cálcio e para o Ca total encontrou uma equação com menores R<sup>2</sup><sub>aj</sub> e S<sub>yx</sub>, 0,925 e 16,8% respectivamente. Resultados semelhantes encontraram Santana *et al.* (2008) em equações para a estimativa do conteúdo de Ca em eucalipto, cujo R<sup>2</sup> foi igual a 0,89.

Para os compartimentos madeira do fuste, casca do fuste e galhos, Téo (2009) encontrou R<sup>2</sup><sub>aj</sub> e S<sub>yx</sub>% iguais a 0,652 e 42,21%, 0,882 e 20,7% e 0,85 e 46,2%,

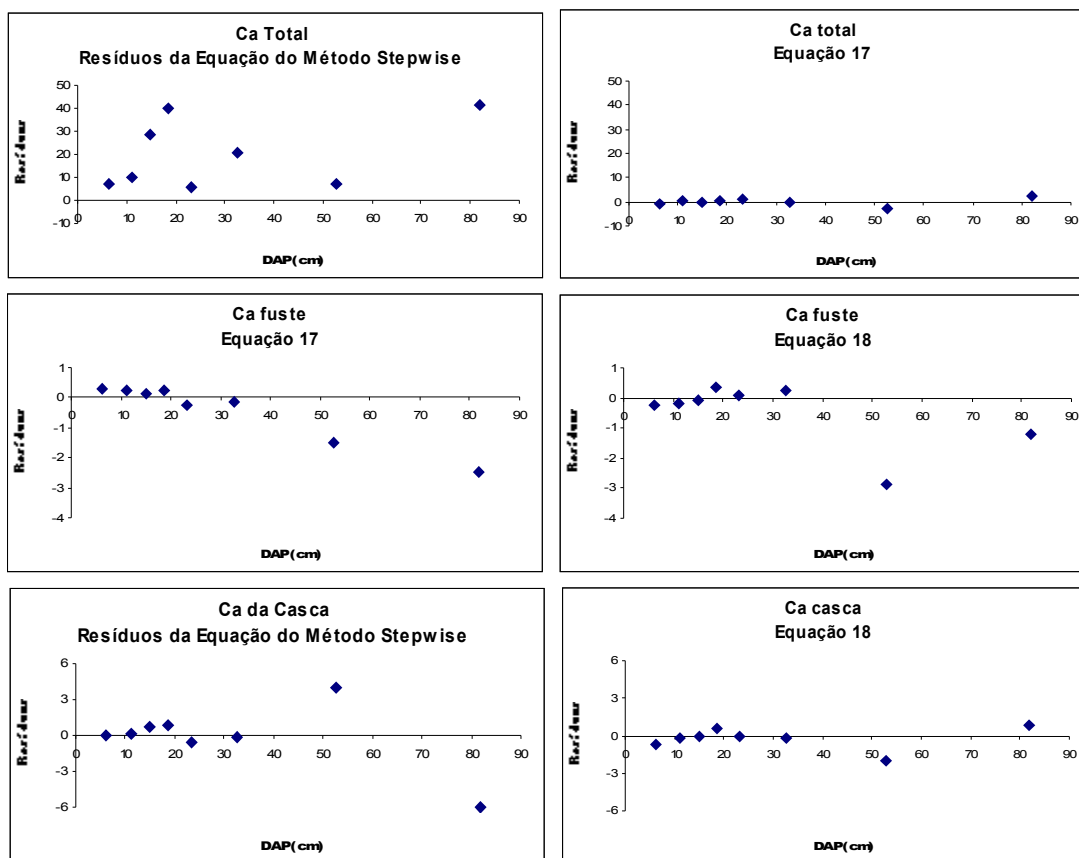
respectivamente. Os coeficientes de determinação encontrados por este autor são semelhantes aos do presente trabalho, no entanto os erros padrões das estimativas são menores.

Hoppe (2003), ajustou equações para a estimativa do conteúdo de Ca em um povoamento de plátano. Para a casca encontrou uma equação com  $R^2_{aj} = 0,71$  e  $S_{yx} = 18,2\%$ , para madeira a equação apresentou  $R^2_{aj} = 0,87$  e  $S_{yx} = 12,1\%$ , para as folhas  $R^2_{aj} = 0,70$  e  $S_{yx} = 21,3\%$  e para os galhos  $R^2_{aj} = 0,73$  e  $S_{yx} = 21\%$ .

As estatísticas de ajuste e de precisão das equações selecionadas para a estimativa do conteúdo de Ca da madeira do fuste, da folhagem e da miscelânea demonstram que estas equações apresentaram desempenho inferior, com  $R^2_{aj}$  inferior a 0,9 e  $S_{yx}$  maior que 99%, denotando menor precisão nas estimativas para estes compartimentos.

Silva (1996), em trabalhos com eucaliptos, encontrou coeficientes de determinação semelhantes ao do presente trabalho para o compartimento casca,  $R^2 = 0,986$ . Para os demais compartimentos os resultados deste autor foram mais significativos, com maior coeficiente de determinação e menor erro padrão da estimativa. O autor utilizou como variável independente das equações de regressão o teor do nutriente em um segmento da casca, fato que pode justificar os melhores resultados encontrados. No entanto, a determinação do teor do nutriente pode tornar mais onerosa a aplicação das equações de regressão a campo.

A Figura 2 apresenta a distribuição gráfica dos resíduos.

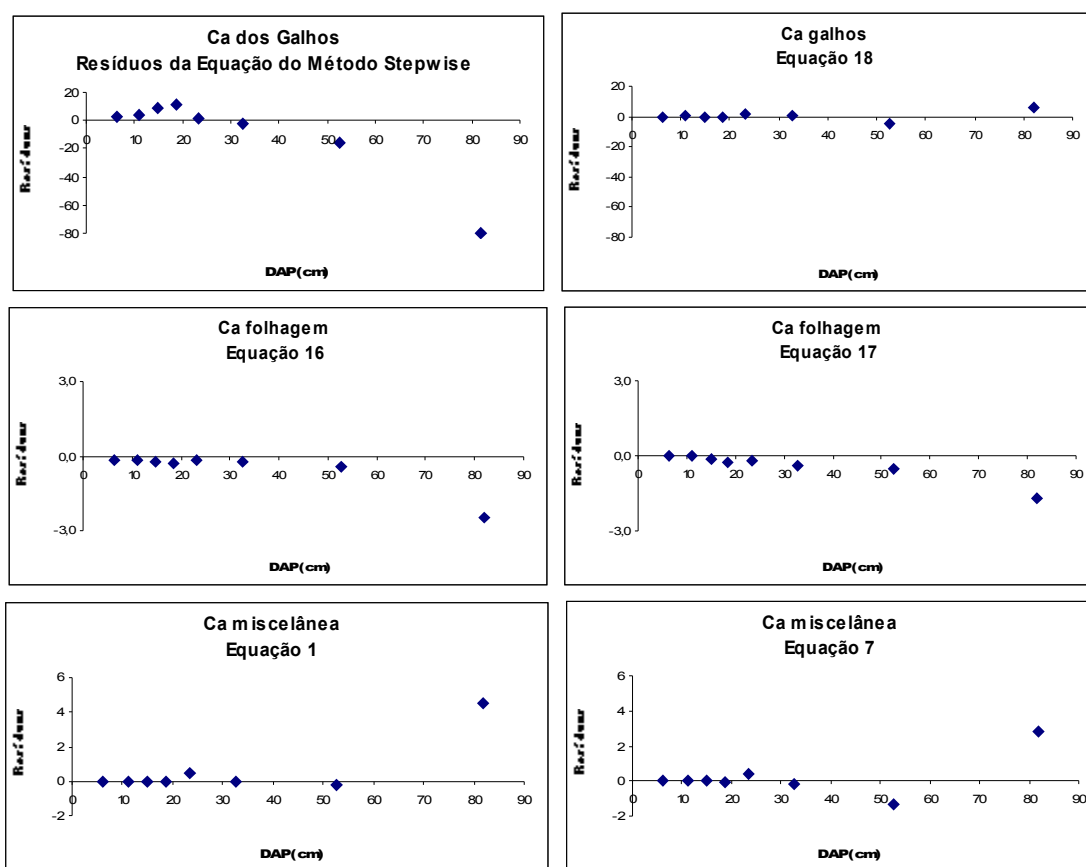


**Figura 2:** Distribuição gráfica dos resíduos das melhores equações ajustadas para estimativa



do conteúdo de Ca total e dos compartimentos madeira do fuste e casca do fuste.

A análise gráfica dos resíduos mostra diferenças significativas na distribuição dos resíduos entre as duas equações selecionadas para a estimativa do Ca total. A equação 17 apresenta melhor distribuição que a equação obtida pelo método *stepwise*. Para as demais equações não se observou diferenças significativas na distribuição dos resíduos entre as duas equações selecionadas para cada compartimento, como pode ser verificado na Figura 3. Observou-se, ainda, que para a folhagem, as equações apresentaram tendência em superestimar com maior significância o conteúdo de Ca em todas as classes de dap.



**Figura 3:** Distribuição gráfica dos resíduos das melhores equações ajustadas para estimativa do conteúdo de Ca nos compartimentos galhos, folhagem e miscelânea.

#### 4.1.2. Magnésio (Mg)

Os melhores resultados no ajuste das equações para a estimativa do conteúdo de magnésio foram obtidos para o compartimento casca do fuste e para o Mg total. Para os compartimentos folhagem e miscelânea as equações apresentaram menor precisão nas estimativas.

Para os compartimentos galhos e madeira do fuste, as equações apresentaram estatísticas medianas, ficando a utilização recomendada com ressalvas, devido a média precisão das estimativas, como pode ser observado na Tabela 4.

**Tabela 4:** Resultados do ajuste de equações para estimativa do conteúdo de Mg.

EQUAÇÕES	ESTATÍSTICAS		
	R <sup>2</sup> aj	S <sub>yx</sub> %	F
<b>Mg total</b>			
21 <i>Stepwise:</i> Mg = 59,17 + 0,036.(dap <sup>2</sup> .hm) - 29,074.hm + (3,42E-06).dap <sup>5</sup> + 0,714.dap <sup>2</sup>	0,975	52,67	553,81
18 Mg = 21,010.dap - 2,580.dap <sup>2</sup> + 0,142.dap <sup>3</sup> - 0,003.dap <sup>4</sup> + 1,44E-5.dap <sup>5</sup>	0,964	50,49	676,89
<b>Mg da madeira do fuste</b>			
21 <i>Stepwise:</i> Mg = 7,706 + 0,024.(dap <sup>2</sup> .hm) - (2,68E-5).dap <sup>4</sup>	0,948	79,46	649,09
18 Mg = 12,980.dap - 1,433.dap <sup>2</sup> + 0,065.dap <sup>3</sup> - 0,001.dap <sup>4</sup> + (5,80E-6).dap <sup>5</sup>	0,936	81,15	277,37
<b>Mg da casca do fuste</b>			
18 Mg = -274,083 + 63,436.dap - 4,788.dap <sup>2</sup> + 0,156.dap <sup>3</sup> - 0,002.dap <sup>4</sup> + 1,09E-5.dap <sup>5</sup>	0,998	29,93	8161,65
17 Mg = 566,454 - 99,788.dap + 5,336.dap <sup>2</sup> - 0,103.dap <sup>3</sup> + (6,33E-04).dap <sup>4</sup>	0,985	88,04	1164,21
<b>Mg dos galhos</b>			
2 Mg = 3,922.dap + 0,089.dap <sup>2</sup>	0,781	85,84	139,77
4 Mg = 3,132.dap + 0,135.dap <sup>2</sup> - 0,001.(dap <sup>2</sup> .ht)	0,778	86,29	92,28
<b>Mg da folhagem</b>			
15 ln Mg = -3,089 + 0,614.ln (dap <sup>2</sup> .ht)	0,440	236,56	55,13
14 ln Mg = -2,363 + 0,501.ln dap <sup>3</sup>	0,437	239,00	54,58
<b>Mg da miscelânea</b>			
7 Mg = 0,008.dap <sup>3,286</sup> .ht <sup>-2,035</sup>	0,477	396,21	27,94
1 Mg = 0,001.dap <sup>2,392</sup>	0,460	368,89	51,21

Onde: Mg = conteúdo de magnésio (g/árvore); dap = diâmetro a altura do peito (1,3 m) da árvore (cm); ln = logaritmo natural; ht = altura total (m) e hm = altura do ponto de inversão morfológica (m).

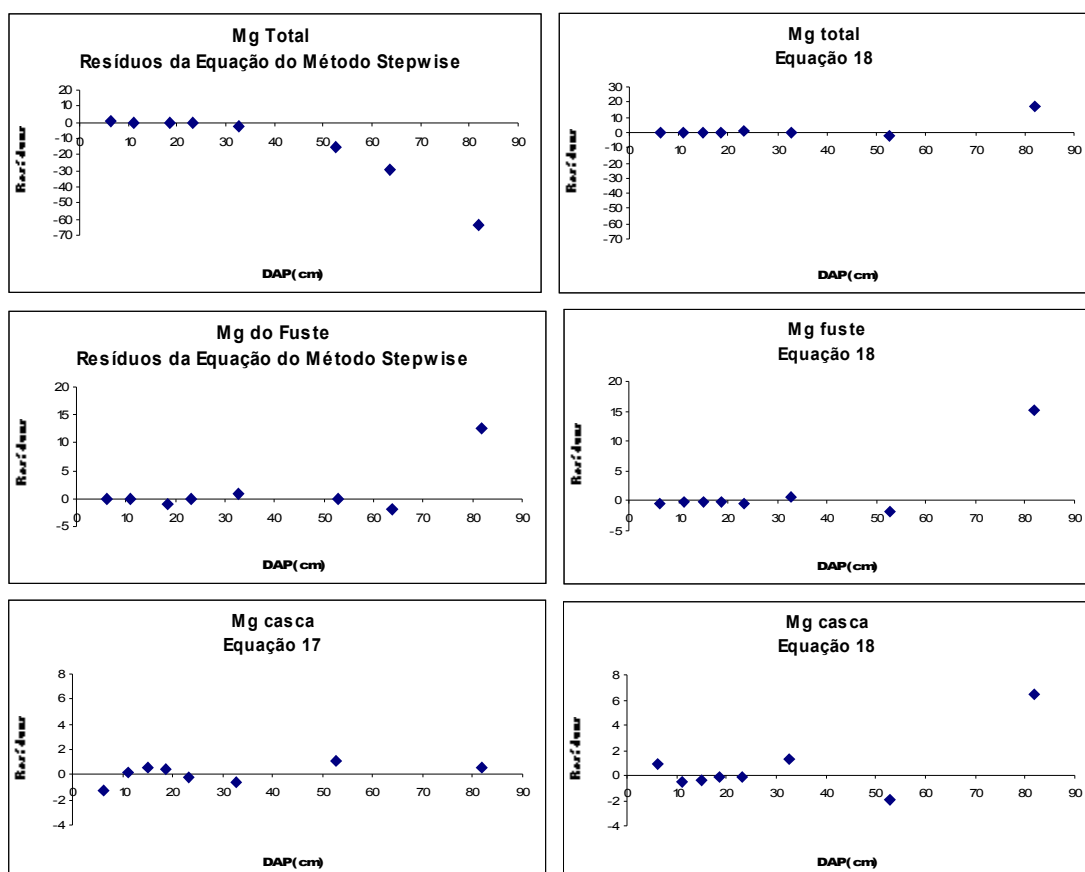
Observou-se que, com exceção do compartimento casca do fuste, houve dificuldade de ajuste das curvas de regressão aos dados, pois as equações resultantes apresentaram estimativas de menor precisão. Téó (2009) reportou que encontrou os piores resultados no ajuste de equações para estimativa do conteúdo de macronutrientes em bracingais para o Mg. Já Moro *et al.* (2007), encontrou uma equação bastante precisa para a estimativa do conteúdo de Mg no lenho do *Pinus taeda*, com R<sup>2</sup> = 0,973 e S<sub>yx</sub> = 7,94%. O autor determinou os teores do nutriente em segmentos do fuste e utilizou como variável independente na equação de regressão, o que pode explicar os melhores resultados encontrados.

Silva (1996), em trabalhos com eucaliptos, ajustou equações para a estimativa do conteúdo de Mg e obteve resultados semelhantes aos do presente trabalho para o compartimento casca, com R<sup>2</sup>aj = 0,9697, mas S<sub>yx</sub> menor e igual a 18,1%. Este autor encontrou resultados melhores para a madeira do fuste, R<sup>2</sup>aj = 0,996 e S<sub>yx</sub> = 7,82%, galhos, R<sup>2</sup>aj = 0,9887

e  $S_{yx} = 12,08\%$  e folhas,  $R^2_{aj} = 0,9744$  e  $S_{yx} = 17,77\%$ . Os melhores resultados encontrados por este autor devem estar relacionados com o fato de utilizar apenas uma espécie no ajuste das equações e por utilizar variáveis independentes relacionadas com a concentração do nutriente em um fragmento do compartimento estudado.

Hoppe (2003), em trabalhos com plátanos, encontrou equações significativas ao nível de 1% para os compartimentos folhas,  $R^2_{aj} = 0,70$  e  $S_{yx} = 21,4\%$ , galhos,  $R^2_{aj} = 0,68$  e  $S_{yx} = 20\%$ , casca,  $R^2_{aj} = 0,59$  e  $S_{yx} = 17,2\%$  e madeira,  $R^2_{aj} = 0,91$  e  $S_{yx} = 8,7\%$ . Deve-se considerar que, com exceção do componente madeira, os coeficientes de determinação ajustados foram bastante baixos, similares ou inferiores aos do presente trabalho, mas os erros padrão das estimativas foram baixos e sempre menores.

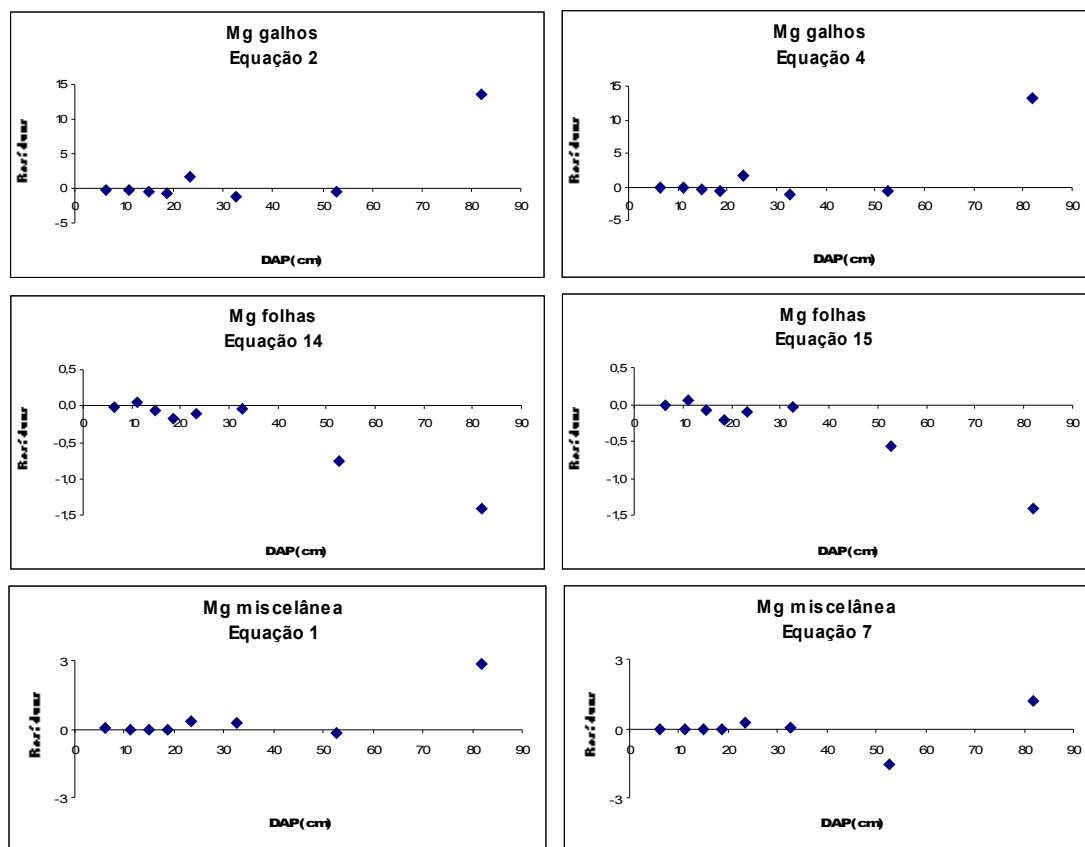
Analisando graficamente os resíduos, observou-se que, na maioria dos casos, as equações apresentaram maiores resíduos para árvores com maior dap, como pode ser observado nas Figuras 4 e 5.



**Figura 4:** Distribuição gráfica dos resíduos das melhores equações ajustadas para estimativa do conteúdo de Mg total e dos compartimentos madeira do fuste e casca do fuste.

Segundo Gomes e Garcia (1993), é desejável que os resíduos se apresentem de forma aleatória em relação ao eixo das abscissas, mas de forma contínua. Ao contrário do que se ob-

serva na maioria dos gráficos das Figuras 4 e 5, onde fica evidente o aumento do valor absoluto do resíduo para o dap maior.



**Figura 5:** Distribuição gráfica dos resíduos das melhores equações ajustadas para estimativa do conteúdo de Mg nos compartimentos galhos, folhagem e miscelânea.

Na análise comparativa entre as duas equações selecionadas para o mesmo compartimento, as diferenças mais significativas são observadas apenas para o Mg total, onde a equação 18 apresenta melhor distribuição gráfica dos resíduos que a equação obtida pelo método *stepwise*.

#### 4.1.3. Enxofre (S)

Apesar das equações selecionadas para a estimativa do conteúdo de enxofre nos compartimentos S total, madeira do fuste e galhos apresentarem bom coeficiente de determinação ajustado, acima de 0,93, apresentaram alto erro padrão da estimativa, o que denota menor precisão das estimativas. Já para o compartimento casca do fuste, a melhor equação ajustada para o compartimento casca do fuste apresentou como variável independente apenas o dap, deixando de fora ht e hm, variáveis presentes na maioria das equações. No

entanto, para este compartimento as estatísticas foram satisfatórias, como pode ser observado na Tabela 5.

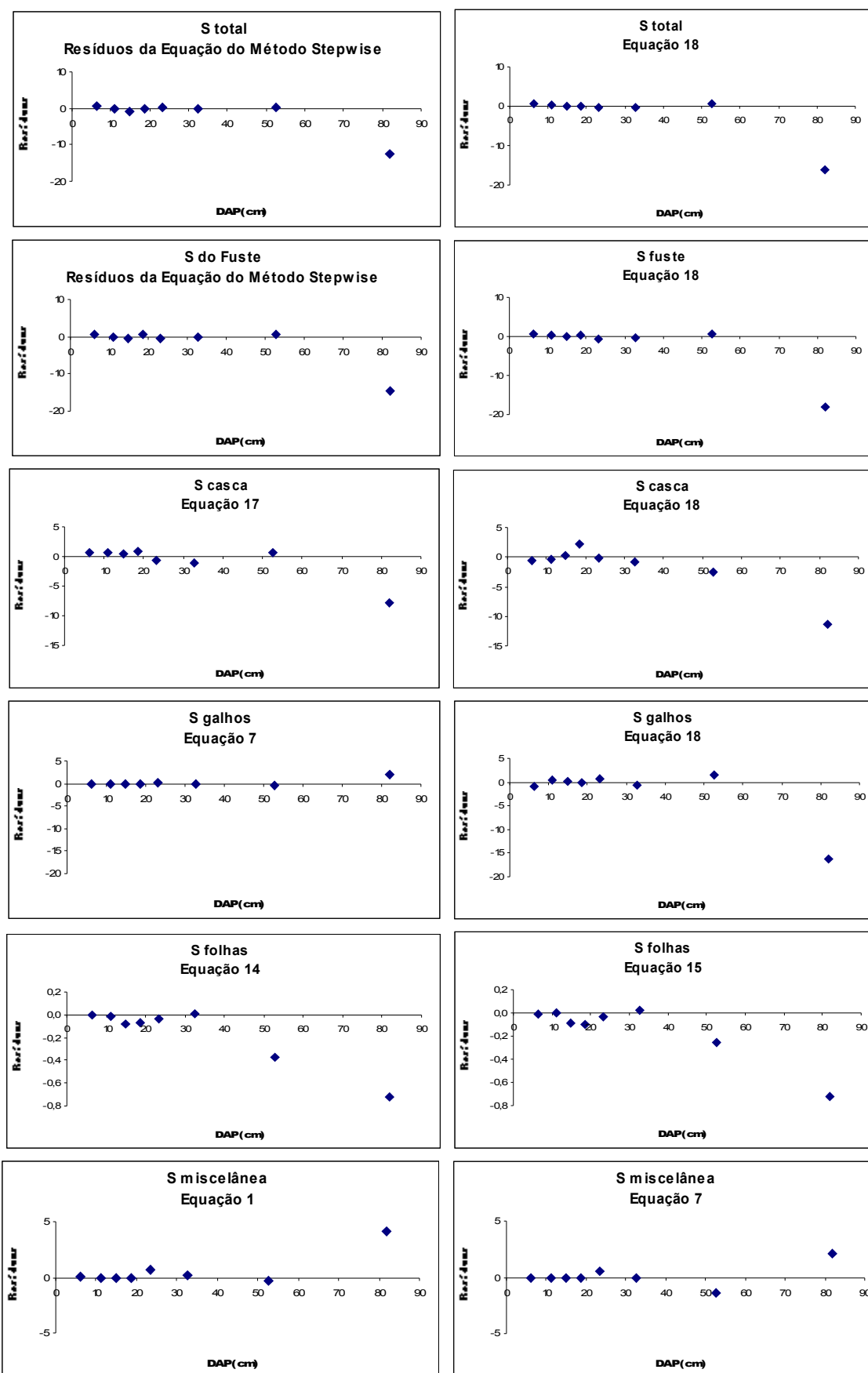
Tabela 5: Resultados do ajuste de equações para estimativa do conteúdo de S.

EQUAÇÕES	ESTATÍSTICAS		
	R <sup>2</sup> aj	S <sub>yx</sub> %	F
<b>S total</b>			
<i>Stepwise</i> : S = -2125,87 + 0,151.(dap <sup>2</sup> .ht) -0,192.(dap <sup>2</sup> .hm) -2,016.dap <sup>2</sup> + (2,62E-06).dap <sup>5</sup> + 374,601.ln (dap <sup>2</sup> .hm)	0,955	79,2	298,82
18 S = -185,82.dap + 23,898.dap <sup>2</sup> -0,926.dap <sup>3</sup> + (1,372E-02).dap <sup>4</sup> -(6,5E-5).dap <sup>5</sup>	0,918	101,41	200,62
<b>S da madeira do fuste</b>			
<i>Stepwise</i> : S = -974,18 -1,018.dap <sup>2</sup> -0,089.(dap <sup>2</sup> .hm) + 0,075.(dap <sup>2</sup> .ht) + (1,03E-6).dap <sup>5</sup> + 170,52.ln (dap <sup>2</sup> .hm)	0,935	105,67	202,77
18 S = -86,223.dap + 10,986.dap <sup>2</sup> -0,426.dap <sup>3</sup> + (6,34E-03).dap <sup>4</sup> -(3,0E-05).dap <sup>5</sup>	0,888	134,69	134,83
<b>S da casca do fuste</b>			
18 S = 6,435.dap -0,828.dap <sup>2</sup> + 0,037.dap <sup>3</sup> -(6,27E-04).dap <sup>4</sup> + 3,59E-6.dap <sup>5</sup>	0,983	30,75	5312,60
17 S = -12,418.dap + 1,182.dap <sup>2</sup> -0,030.dap <sup>3</sup> + (2,19E-04).dap <sup>4</sup>	0,973	64,85	1479,62
<b>S dos galhos</b>			
18 S = 1788,99 -402,74.dap + 29,744.dap <sup>2</sup> -0,904.dap <sup>3</sup> + (1,169E-2).dap <sup>4</sup> -(5,2E-5).dap <sup>5</sup>	0,947	102,84	258,64
7 S = 0,157.dap <sup>2,473</sup> .ht <sup>-0,669</sup>	0,691	393,51	81,43
<b>S da folhagem</b>			
15 ln S = -3,637 + 0,636.ln (dap <sup>2</sup> .ht)	0,468	332,53	61,63
14 ln S = -2,871 + 0,517.ln dap <sup>3</sup>	0,462	332,85	60,25
<b>S da miscelânea</b>			
1 S = 0,001.dap <sup>2,535</sup>	0,500	327,79	61,93
7 S = 0,002.dap <sup>3,057</sup> .ht <sup>-1,182</sup>	0,500	346,18	31,51

Onde: S = conteúdo de enxofre (g/árvore); dap = diâmetro a altura do peito (1,3 m) da árvore (cm); ln = logaritmo natural; ht = altura total (m) e hm = altura do ponto de inversão morfológica (m).

As equações selecionadas para a estimativa do S da folhagem e a da miscelânea apresentaram os resultados menos expressivos, com baixo R<sup>2</sup><sub>aj</sub> e elevado S<sub>yx</sub>(%), denotando estimativas com baixa precisão. Já Hoppe (2003), em trabalhos com plátanos, ajustou equações para a estimativa do conteúdo de enxofre e obteve equações com maior coeficiente de determinação ajustado que o presente trabalho apenas para o componente folhagem, R<sup>2</sup><sub>aj</sub> = 0,50. No entanto, o referido autor encontrou menor erro padrão da estimativa para todos os componentes, 24,2% para a folhagem, 26,8% para os galhos, 17,8% para a casca e 13,8% para a madeira. Os melhores resultados deste autor devem estar relacionados com a espécie estudada e com o fato de se tratar de apenas uma espécie.

Analisando graficamente a distribuição dos resíduos, observou-se que o maior valor absoluto de resíduo sempre foi verificado na classe de maior dap, para todos os compartimentos, como pode ser verificado na Figura 6.



**Figura 6:** Distribuição gráfica dos resíduos das melhores equações ajustadas para estimativa do conteúdo de S nos diversos compartimentos.

O maior nível de resíduos nas classes de maior dap pode ser explicado pela baixa frequência de árvores com estas características na base de dados utilizada para o ajuste das equações.

Comparando as equações selecionadas para o mesmo compartimento, observou-se que apenas para o compartimento galhos houve diferenças significativas entre a distribuição dos resíduos das duas equações, sendo que a equação 7 apresentou melhor distribuição.

#### 4.1.4. Nitrogênio (N)

Assim como para o enxofre, os melhores resultados no ajuste das equações para a estimativa do conteúdo de N foram obtidos para a casca do fuste, seguida da madeira do fuste, como pode ser observado na Tabela 6. Téó (2009) encontrou equações para estes compartimentos em bracatingais com menores  $S_{yx}(\%)$ , 22,9% para a casca do fuste e 23,7% para a madeira do fuste, mas também menores  $R^2_{aj}$ , 0,888 e 0,893, respectivamente. Para o lenho, Moro *et al.* (2007) encontram equações bastante precisas, com  $R^2 = 0,9996$  e  $S_{yx} = 10,03\%$ , em *Pinus taeda*.

**Tabela 6:** Resultados do ajuste de equações para estimativa do conteúdo de N.

EQUAÇÕES	ESTATÍSTICAS		
	R <sup>2</sup> aj	S <sub>yx</sub> %	F
<b>N total</b>			
Stepwise: N = 335,215 - 1,196.dap <sup>2</sup> - 0,251.(dap <sup>2</sup> .hm) + 0,329.(dap <sup>2</sup> .ht)	0,844	89,4	129,34
18 N = -330,43.dap + 42,644.dap <sup>2</sup> - 1,529.dap <sup>3</sup> + (2,255E-2).dap <sup>4</sup> - (1,1E-4).dap <sup>5</sup>	0,839	95,33	84,90
<b>N da madeira do fuste</b>			
Stepwise: N = -707,30 - 0,18.(dap <sup>2</sup> .hm) + 0,073.(dap <sup>2</sup> .ht) + 223,17.hm + (2,54E-6).dap <sup>5</sup> - 7,52.hm <sup>2</sup>	0,969	52,22	447,06
18 N = 1674,072 - 430,23.dap + 35,126.dap <sup>2</sup> - 1,125.dap <sup>3</sup> + (1,527E-2).dap <sup>4</sup> - (7E-5).dap <sup>5</sup>	0,959	60,84	334,39
<b>N da casca do fuste</b>			
Stepwise: N = 133,518 + 0,019.(dap <sup>2</sup> .hm) - 20,754.dap + (3,02E-06).dap <sup>5</sup> + 0,841.dap <sup>2</sup>	0,995	31,04	3133,67
18 N = -151,427 + 41,574.dap - 3,416.dap <sup>2</sup> + 0,129.dap <sup>3</sup> - 1,98E-3.dap <sup>4</sup> + (1,08E-5).dap <sup>5</sup>	0,995	31,84	3054,38
<b>N dos galhos</b>			
Stepwise: N = 85,177 - 0,166.(dap <sup>2</sup> .hm) + 0,157.(dap <sup>2</sup> .ht)	0,819	98,18	161,85
18 N = 2746,246 - 626,258.dap + 44,946.dap <sup>2</sup> - 1,26.dap <sup>3</sup> + (1,604E-2).dap <sup>4</sup> - (7,2E-5).dap <sup>5</sup>	0,763	111,98	47,47
<b>N da folhagem</b>			
7 N = 0,081.dap <sup>0,634</sup> .ht <sup>1,878</sup>	0,383	359,95	22,45
15 ln N = -0,927 + 0,596.ln (dap <sup>2</sup> .ht)	0,369	355,68	41,27
<b>N da miscelânea</b>			
1 N = 0,010.dap <sup>2,219</sup>	0,407	445,26	40,89
14 ln N = -4,593 + 0,740.ln dap <sup>3</sup>	0,407	447,83	40,89

Onde: N = conteúdo de nitrogênio (g/árvore); dap = diâmetro a altura do peito (1,3 m) da árvore (cm); ln = logaritmo natural; ht = altura total (m) e hm = altura do ponto de inversão morfológica (m).

No entanto, os resultados do presente trabalho para o componente casca do fuste podem ser considerados satisfatórios, considerada a grande diversidade de espécies e de características, tornando a base de dados bastante heterogênea.

Para o N total e dos galhos, as equações selecionadas apresentaram estatísticas de ajuste e precisão menos satisfatórias. Téo (2009) ajustou equações com  $R^2_{aj}$  e  $S_{yx}$  iguais a 0,96 e 13,6% para o N total e 0,882 e 39,8% para galhos, em bracatingais, e Santana *et al.* (2008) ajustou uma equação para o N total em *Pinus taeda* com  $R^2 = 0,99$ .

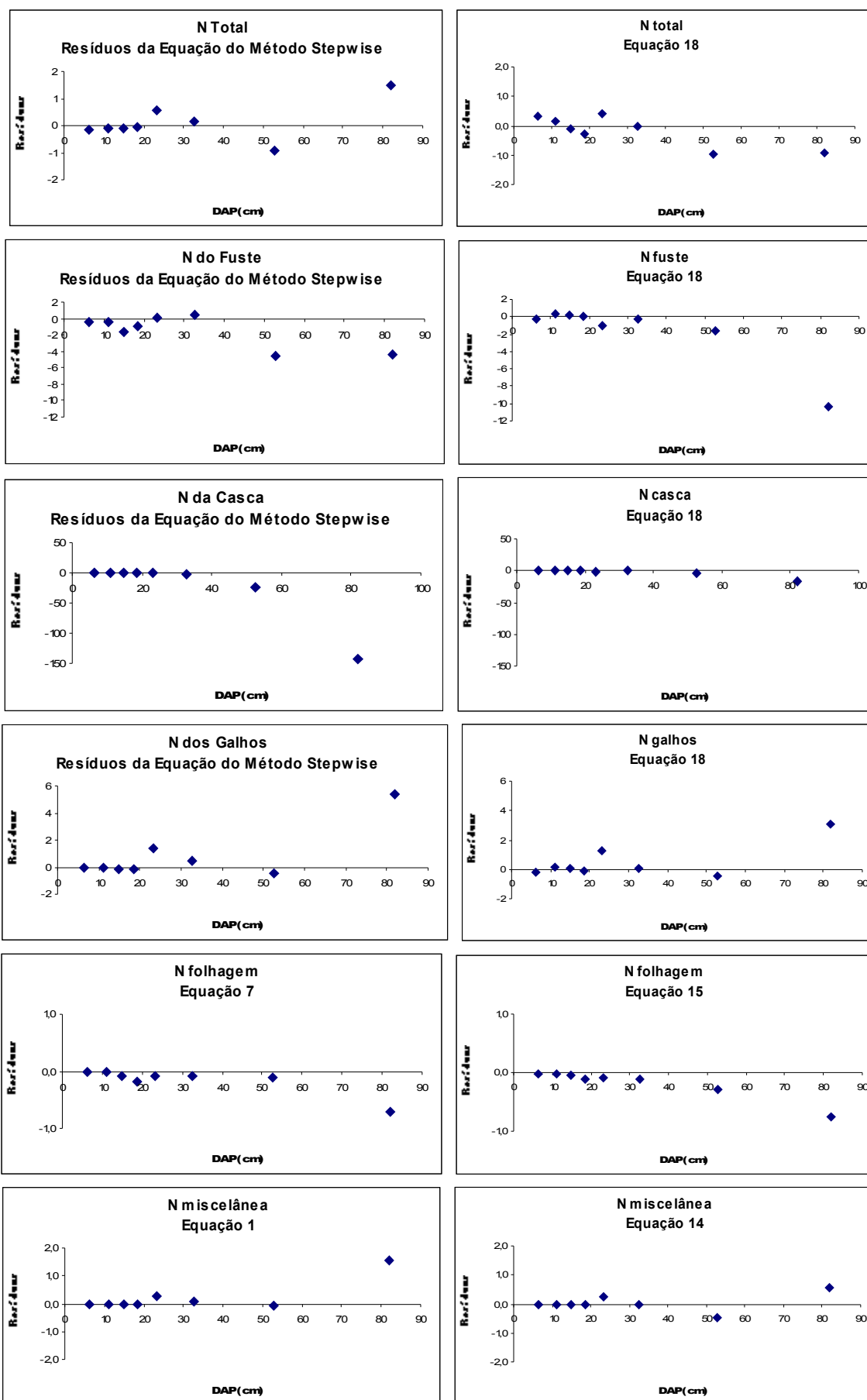
Os resultados menos satisfatórios foram obtidos para os componentes folhagem a miscelânea. Os coeficientes de determinação ajustados foram baixos e denotaram que as curvas de regressão tiveram dificuldade no ajuste aos dados e os altos erros padrão da estimativa indicam que as equações apresentaram baixa precisão nas estimativas. Já Téo (2009), para apenas uma espécie encontrou equações mais satisfatórias, com  $R^2_{aj}$  e  $S_{yx}$  iguais a 0,808 e 36,5% para folhagem, respectivamente, mostrando que a grande diversidade de espécies e características pode ter dificultado o ajuste de curvas de regressão aos dados.

Silva (1996) encontrou equações para a estimativa do conteúdo de N em eucaliptos com coeficientes de determinação similares aos do presente trabalho para a casca e madeira do fuste, mas com menores erros padrões das estimativas. Já para os demais compartimentos, este autor encontrou melhores resultados.

Hoppe (2003) encontrou coeficientes de determinação ajustados menores em equações ajustadas para a estimativa do conteúdo de N em plátanos, mas os erros padrão da estimativa também foram inferiores aos do presente trabalho para os compartimentos galhos,  $R^2_{aj} = 0,74$  e  $S_{yx} = 19,8\%$ , casca,  $R^2_{aj} = 0,67$  e  $S_{yx} = 18\%$ , e madeira,  $R^2_{aj} = 0,87$  e  $S_{yx} = 12,7\%$ . Já para a folhagem, este autor encontrou resultados mais satisfatórios, com  $R^2_{aj} = 0,78$  e  $S_{yx} = 17,4\%$ .

A análise gráfica mostrou diferenças significativas entre a distribuição gráfica dos resíduos das duas equações selecionadas para os compartimentos madeira do fuste e casca do fuste, como pode ser observado na Figura 7. Para a madeira do fuste, a equação com melhor distribuição dos resíduos foi a obtida pelo método *stepwise*, e para a casca do fuste, a equação 18. Observou-se clara tendência em superestimar o conteúdo de N da folhagem pelas equações 7 e 15, em todas as classes de dap. Nos demais compartimentos, observou-se que a maioria das equações apresentou tendência em aumentar os resíduos absolutos à medida que aumenta o dap.





**Figura 7:** Distribuição gráfica dos resíduos das melhores equações ajustadas para estimativa do conteúdo de N nos diversos compartimentos.

#### 4.1.5. Fósforo (P)

Como para todos os outros macronutrientes, os melhores resultados obtidos no ajuste das equações para a estimativa do conteúdo de fósforo foi no compartimento casca do fuste. A melhor equação foi obtida pelo método *stepwise* e apresentou apenas as variáveis independentes dap e hm, deixando de fora a ht, como pode ser observado na Tabela 7. Para este compartimento, Téó (2009) ajustou uma equação com  $R^2_{aj} = 0,88$  e  $S_{yx} = 24\%$  para a bracinga, resultados divergentes dos encontrados no presente trabalho. Silva (1996) encontrou equações para o P da casca do eucalipto com  $R^2_{aj} = 0,9809$ , resultado próximo ao do presente trabalho, mas com erro padrão da estimativa menor,  $S_{yx} = 14,25\%$ .

**Tabela 7:** Resultados do ajuste de equações para estimativa do conteúdo de P.

EQUAÇÕES	ESTATÍSTICAS		
	R <sup>2</sup> aj	S <sub>yx</sub> %	F
<b>P total</b>			
1 P = 0,160.dap <sup>1,946</sup>	0,663	157,34	144,84
14 ln P = 0,494 + 0,054.ln dap <sup>3</sup>	0,663	197,77	144,84
<b>P da madeira do fuste</b>			
1 P = 0,034.dap <sup>1,952</sup>	0,540	286,72	86,59
14 ln P = -3,392 + b.ln dap <sup>0,651</sup>	0,540	300,40	86,59
<b>P da casca do fuste</b>			
21 <i>Stepwise</i> : P = 0,546 + 0,002.(dap <sup>2</sup> .hm) - (4,83E-08).dap <sup>5</sup> + (4,20E-06).dap <sup>4</sup>	0,976	49,81	747,91
18 P = 0,959.dap - 0,113.dap <sup>2</sup> + 0,005.dap <sup>3</sup> - (7,418E-5).dap <sup>4</sup> + (3,7E-7).dap <sup>5</sup>	0,954	60,51	451,59
<b>P dos galhos</b>			
17 P = 3,985.dap - 0,249.dap <sup>2</sup> + 0,009.dap <sup>3</sup> - (5,85E-05).dap <sup>4</sup>	0,810	83,69	86,55
18 P = 35,309 - 6,970.dap + 0,614.dap <sup>2</sup> - 0,017.dap <sup>3</sup> + (2,453E-04).dap <sup>4</sup> - (1,3E-6).dap <sup>5</sup>	0,767	83,32	49,05
<b>P da folhagem</b>			
15 ln P = -3,921 + 0,625.ln (dap <sup>2</sup> .ht)	0,415	429,42	50,64
7 P = 0,010.dap <sup>0,958</sup> .ht <sup>1,244</sup>	0,412	432,72	25,52
<b>P da miscelânea</b>			
7 P = 0,006.dap <sup>3,525</sup> .ht <sup>-2,333</sup>	0,491	407,23	28,05
1 P = (3,503E-04).dap <sup>2,482</sup>	0,469	375,37	50,47

Onde: P = conteúdo de fósforo (g/árvore); dap = diâmetro a altura do peito (1,3 m) da árvore (cm); ln = logaritmo natural; ht = altura total (m) e hm = altura do ponto de inversão morfológica (m).

Observou-se que o ajuste de equações para estimativa do conteúdo do P total, da madeira do fuste, da folhagem e da miscelânea apresentou baixo coeficiente de determinação ajustado e alto erro padrão da estimativa. Observou-se, também, que para os compartimentos onde o ajuste apresentou estatísticas ruins, os melhores modelos de equações são logarítmicos ou não-lineares, o que demonstra que estes modelos apresentam melhor desempenho que os modelos lineares em algumas situações. Já para os compartimentos que apresentaram

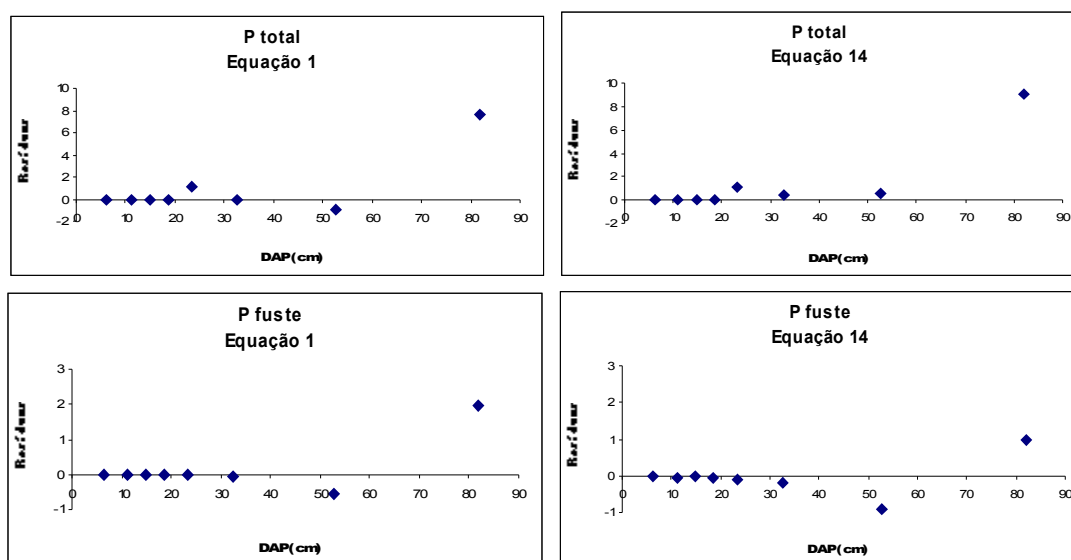
melhores estatísticas no ajuste, a casca do fuste e os galhos, os modelos lineares se destacaram, não figurando variáveis logarítmicas.

Moro *et al.* (2007) ajustaram equação para estimar o conteúdo de P na madeira do fuste de *Pinus taeda*, que apresentou  $R^2 = 0,9667$  e  $S_{yx} = 7,93\%$ , resultados expressivamente melhores que os do presente trabalho. Mas, estes autores determinaram o teor de P em fragmentos do fuste e utilizaram como variável independente da regressão. Este procedimento também foi utilizado por Silva (1996) e resultou em equações com melhores estatísticas para todos os compartimentos de eucalipto.

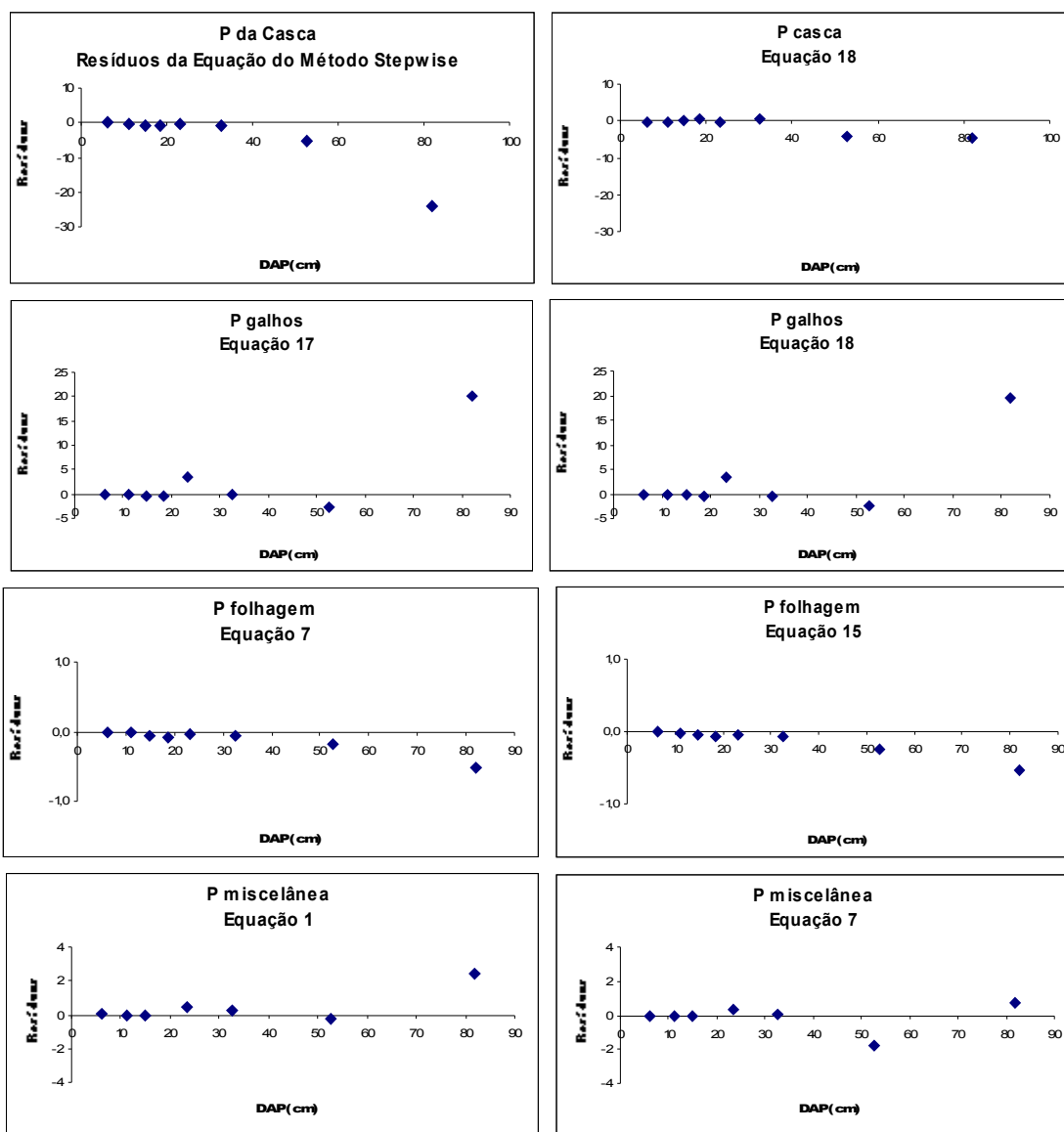
Para obter resultados melhores no ajuste de equações para a estimativa do P total em eucalipto, Santana *et al.* (2008) utilizaram variáveis independentes *dummy*, variáveis relativas a disponibilidade potencial de água, temperatura média anual, dentre outras. Mas os resultados não foram muito expressivos e a equação ajustada apresentou  $R^2 = 0,89$ .

Já Hoppe (2003), em trabalhos com plátano, ajustou equações para a estimativa do P e encontrou equações com menores  $S_{yx}$  para todos os compartimentos. Já o  $R^2_{aj}$  foi inferior nas equações para os galhos e casca, 0,74 e 0,67, respectivamente.

Graficamente, foi observada a tendência de subestimar ou superestimar, pela maioria das equações, o conteúdo de P do compartimento em árvores das classes de maior dap, como pode ser verificado nas Figuras 8 e 9.



**Figura 8:** Distribuição gráfica dos resíduos das melhores equações ajustadas para estimativa do conteúdo do P total e dos compartimentos madeira do fuste e casca do fuste.



**Figura 9:** Distribuição gráfica dos resíduos das melhores equações ajustadas para estimativa do conteúdo de P nos compartimentos casca do fuste, galhos, folhagem e miscelânea.

Contudo, comparativamente entre as duas equações selecionadas para cada compartimento, apenas foi observado diferenças na distribuição dos resíduos das equações para o P da casca do fuste, sendo que a equação 18 apresentou melhor desempenho. Para o fósforo da folhagem, os resíduos mostraram uma significativa tendência das equações 7 e 15 em superestimar o conteúdo, como pode ser observado na Figura 9.

#### 4.1.6. Potássio (K)

Assim como para os demais macronutrientes, os melhores resultados foram obtidos no ajuste das equações para a estimativa do conteúdo de K no compartimento casca do fuste, como pode ser observado na Tabela 8. Téó (2009), em trabalhos com bracatingas, ajustou

equações para estimar o K da casca e obteve equação com menor  $R^2_{aj}$ , 0,878, e menor  $S_{yx}$ , 30,5%, resultados que considerou satisfatórios. Silva (1996), em trabalhos com eucaliptos, ajustou equações para estimar o K da casca utilizando como variável independente o teor de K em um fragmento desse compartimento e encontrou equações com  $R^2_{aj} = 0,9576$  e  $S_{yx} = 21,16$ . Hoppe (2003), em ajustes de equações para a estimativa do K na casca do plátano, encontrou equações com  $R^2_{aj} = 0,72$  e  $S_{yx} = 14,6\%$ .

**Tabela 8:** Resultados do ajuste de equações para estimativa do conteúdo de K.

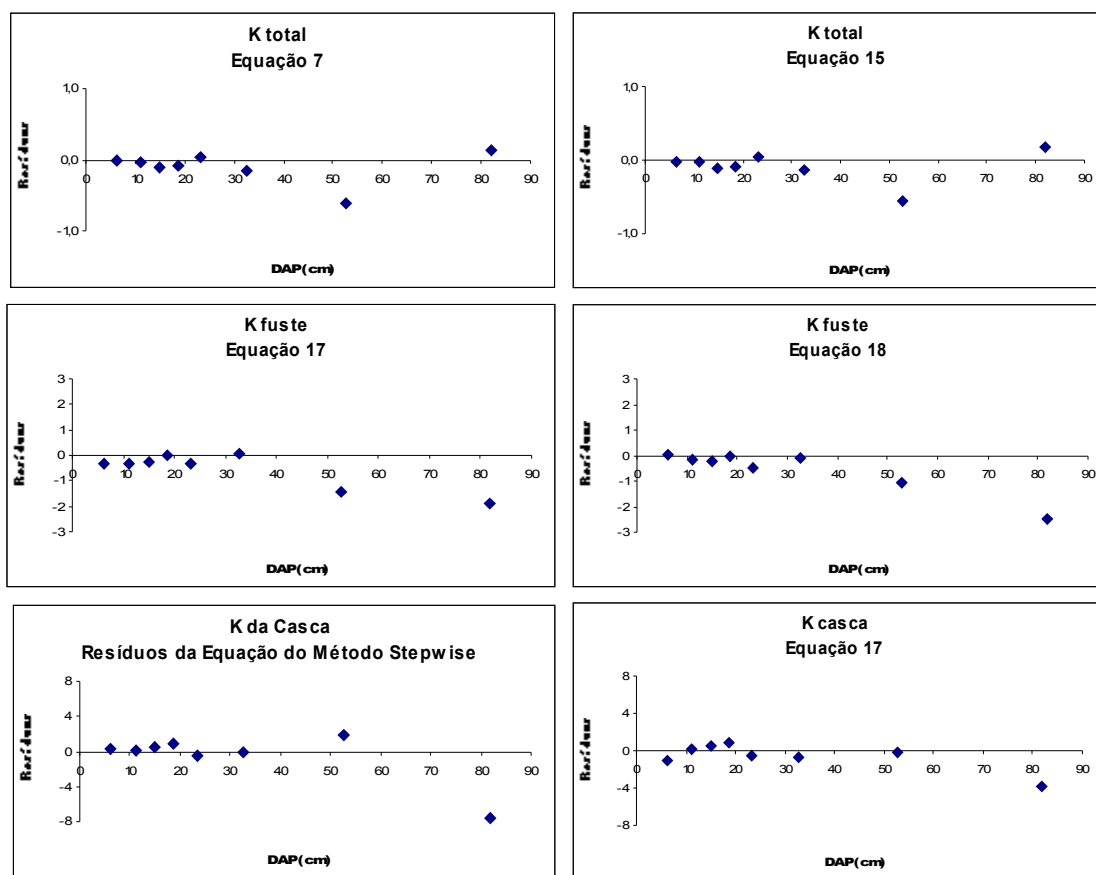
EQUAÇÕES	ESTATÍSTICAS		
	R <sup>2</sup> aj	S <sub>yx</sub> %	F
<b>K total</b>			
15 $\ln K = -0,185 + 0,827 \cdot \ln(\text{dap}^2 \cdot \text{ht})$	0,729	135,49	197,61
7 $K = 0,922 \cdot \text{dap}^{1,697} \cdot \text{ht}^{0,734}$	0,726	136,44	97,49
<b>K da madeira do fuste</b>			
17 $K = 104,995 \cdot \text{dap} - 6,104 \cdot \text{dap}^2 + 0,133 \cdot \text{dap}^3 - (6,55\text{E}-04) \cdot \text{dap}^4$	0,785	114,22	73,65
18 $K = -486,649 + 81,661 \cdot \text{dap} + 0,583 \cdot \text{dap}^2 + -0,133 \cdot \text{dap}^3 + 0,003 \cdot \text{dap}^4 - (1,6\text{E}-5) \cdot \text{dap}^5$	0,766	113,59	48,92
<b>K da casca do fuste</b>			
<i>Stepwise:</i> $K = 5,505 + 0,055 \cdot (\text{dap}^2 \cdot \text{hm}) - 0,455 \cdot \text{dap}^2 - 22,956 \cdot \text{hm} + 13,096 \cdot \text{dap}$	0,992	44,74	2331,56
17 $K = 845,829 - 149,86 \cdot \text{dap} + 8,222 \cdot \text{dap}^2 - 0,159 \cdot \text{dap}^3 + (9,91\text{E}-04) \cdot \text{dap}^4$	0,984	63,57	1146,62
<b>K dos galhos</b>			
1 $K = 0,910 \cdot \text{dap}^{2,032}$	0,630	198,66	125,20
14 $\ln K = -0,095 + 0,677 \cdot \ln \text{dap}^3$	0,630	214,81	125,20
<b>K da folhagem</b>			
15 $\ln K = -1,729 + 0,605 \cdot \ln(\text{dap}^2 \cdot \text{ht})$	0,409	477,24	49,51
14 $\ln K = -0,988 + 0,491 \cdot \ln \text{dap}^3$	0,402	477,16	48,08
<b>K da miscelânea</b>			
7 $K = 0,018 \cdot \text{dap}^{3,189} \cdot \text{ht}^{-1,582}$	0,465	403,88	30,07
1 $K = 0,003 \cdot \text{dap}^{2,482}$	0,459	375,18	57,75

Onde: K = conteúdo de potássio (g/árvore); dap = diâmetro a altura do peito (1,3 m) da árvore (cm); ln = logaritmo natural; ht = altura total (m) e hm = altura do ponto de inversão morfológica (m).

Para o K total e dos compartimentos madeira do fuste, galhos, folhagem e miscelânea as equações selecionadas não apresentaram boas estatísticas de ajuste e precisão, o que indica dificuldade no ajuste das curvas de regressão aos dados e estimativas com menor precisão. No entanto, Moro *et al.* (2007) ajustaram uma equação com melhores estatísticas em trabalhos com *Pinus taeda*, para o compartimento madeira do fuste,  $R^2 = 0,9736$  e  $S_{yx} = 13,15\%$ . Estes autores utilizaram como variáveis independentes os teores de K em segmentos ao longo do fuste. Já Santana *et al.* (2008), ajustaram uma equação para a estimativa do K total em eucalipto com  $R^2 = 0,85$  e utilizaram variáveis *dummy* e variáveis relativas à disponibilidade potencial de água e temperatura média anual. Téó (2009) ajustou equações com melhores resultados para estimar o K em todos os compartimentos de bracingais. Silva (1996) também obteve

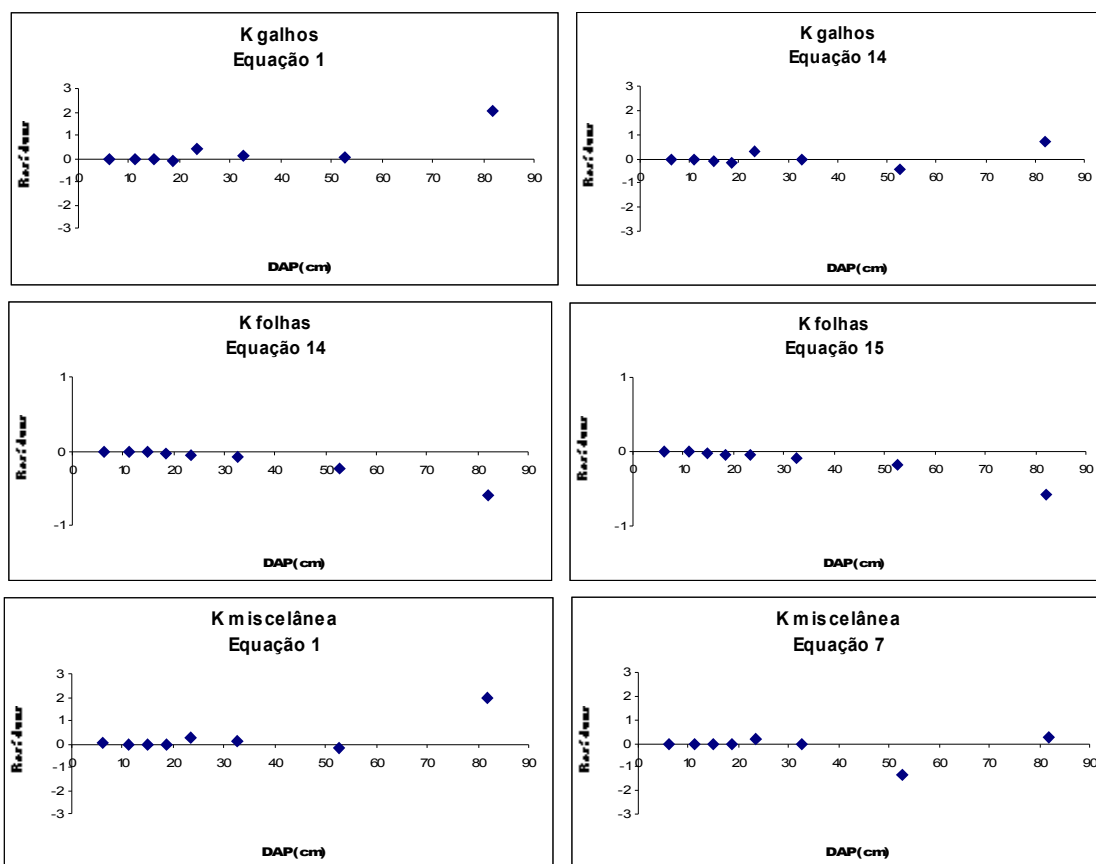
melhores resultados no ajuste das equações para todos os compartimentos em eucalipto. Hoppe (2003) também encontrou resultados mais satisfatórios para o K da madeira,  $R^2_{aj} = 0,95$  e  $S_{yx} = 7,6\%$ , dos galhos,  $R^2_{aj} = 0,79$  e  $S_{yx} = 17,7\%$  e para a folhagem,  $R^2_{aj} = 0,74$  e  $S_{yx} = 19,0\%$ . No entanto, deve-se destacar que os autores acima referenciados utilizaram em seus trabalhos apenas uma espécie, o que torna a base de dados mais homogênea e facilita o ajuste das equações.

A análise gráfica dos resíduos não mostrou diferenças significativas entre as equações selecionadas para o mesmo compartimento, como pode ser observado nas Figuras 10 e 11. No entanto, ficou clara a tendência das equações ajustadas em superestimar o conteúdo de K da folhagem, em todas as classes de dap.



**Figura 10:** Distribuição gráfica dos resíduos das melhores equações ajustadas para estimativa do conteúdo de K total e dos compartimentos madeira do fuste e casca do fuste.

Observou-se, também, a tendência da maioria das equações em superestimar ou subestimar o conteúdo de K em árvores com dap maiores. O que pode ser explicado pelo fato de estas classes diamétricas apresentarem menor frequência de indivíduos, fazendo com que as curvas de regressão tenham maior dificuldade no ajuste a estes dados.



**Figura 11:** Distribuição gráfica dos resíduos das melhores equações ajustadas para estimativa do conteúdo de K nos compartimentos galhos, folhagem e miscelânea.

## 4.2. Ajuste de equações para estimativa do conteúdo de micronutrientes

### 4.2.1. Boro (B)

Os melhores resultados no ajuste das equações para a estimativa do conteúdo de boro foram obtidos pelas equações fornecidas pelo método *stepwise*, nos compartimentos madeira do fuste, casca do fuste e galhos, merecendo destaque para o B da casca do fuste, que apresentou  $R^2_{aj} = 0,982$ . Hoppe (2003), em trabalhos com plátano, ajustou equações para estimar o B da casca e encontrou uma equação com  $R^2_{aj} = 0,59$  e  $S_{yx} = 16,7\%$ , com baixo coeficiente de determinação, mas também baixo erro padrão da estimativa.

Os piores resultados foram obtidos para o B da folhagem e da miscelânea, onde as equações apresentaram baixo coeficiente de determinação ajustado, indicando que as curvas de regressão apresentaram pouca correlação com os dados, e alto erro padrão da estimativa, indicando que as estimativas das equações têm baixa precisão, como pode ser observado na Tabela 9.

**Tabela 8:** Resultados do ajuste de equações para estimativa do conteúdo de B.

EQUAÇÕES	ESTATÍSTICAS		
	R <sup>2</sup> aj	S <sub>yx</sub> %	F
<b>B total</b>			
15 $\ln B = 0,035 + 0,888.\ln(\text{dap}^2.\text{ht})$	0,832	137,22	356,71
7 $B = 1,342.\text{dap}^{1,886}.\text{ht}^{0,656}$	0,830	135,86	176,81
<b>B da madeira do fuste</b>			
<i>Stepwise:</i> $B = 3878,93 + 9,68.\text{dap}^2 - 0,55.(\text{dap}^2.\text{ht}) + 0,001.\text{dap}^4 + 16,013.\text{ht}^2 - 828,1.\ln(\text{dap}^2.\text{ht})$	0,852	76,81	82,68
5 $B = 2,394.\text{dap}^2 - 0,032.(\text{dap}^2.\text{ht})$	0,788	99,96	146,55
<b>B da casca do fuste</b>			
<i>Stepwise:</i> $B = 125,812 + 0,126.(\text{dap}^2.\text{hm}) - 0,009.\text{dap}^3 - 3,141.\text{hm}^2$	0,982	58,59	1284,61
18 $B = 56,734.\text{dap} - 6,653.\text{dap}^2 - 0,005.\text{dap}^3 + 0,303.\text{dap}^4 + (2,80\text{E}-5).\text{dap}^5$	0,968	59,31	812,97
<b>B dos galhos</b>			
<i>Stepwise:</i> $B = -11929,24 - 542,053.\text{dap} + 0,652.(\text{dap}^2.\text{ht}) - 0,578.(\text{dap}^2.\text{hm}) + 2493,127.\ln \text{dap}^3$	0,923	70,82	213,296
18 $B = -706,97.\text{dap} + 88,281.\text{dap}^2 - 3,240.\text{dap}^3 + 0,048.\text{dap}^4 - (2,3\text{E}-4).\text{dap}^5$	0,861	97,08	102,66
<b>B da folhagem</b>			
15 $\ln B = 0,060 + 0,549.\ln(\text{dap}^2.\text{ht})$	0,326	497,42	34,37
14 $\ln B = 0,717 + 0,447.\ln \text{dap}^3$	0,323	497,31	33,85
<b>B da miscelânea</b>			
7 $B = 0,117.\text{dap}^{3,156}.\text{ht}^{-1,799}$	0,428	452,41	22,69
1 $B = 0,014.\text{dap}^{2,344}$	0,418	443,81	42,62

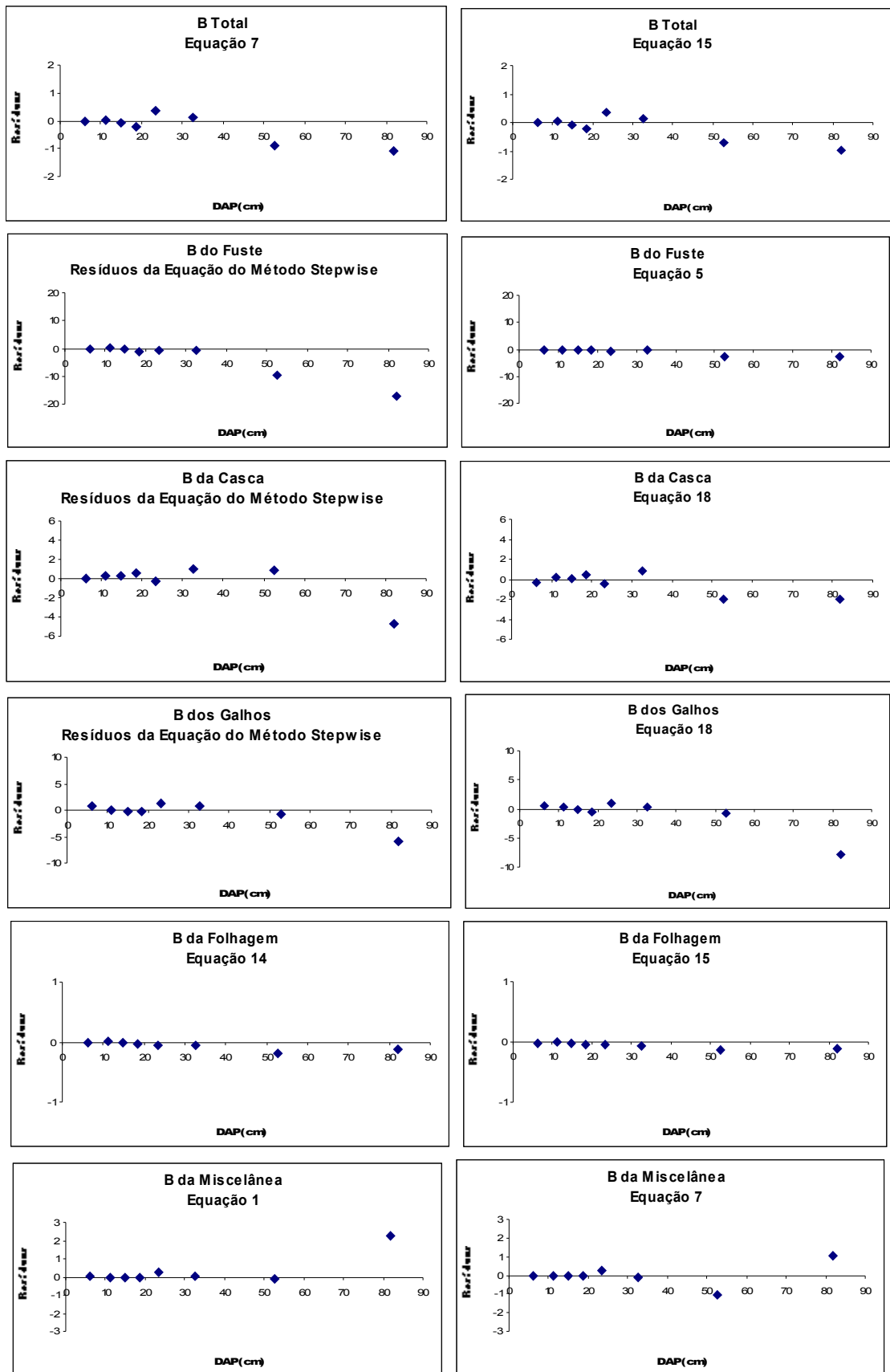
Onde: B = conteúdo de boro (mg/árvore); dap = diâmetro a altura do peito (1,3 m) da árvore (cm); ln = logaritmo natural; ht = altura total (m) e hm = altura do ponto de inversão morfológica (m).

Hoppe (2003) ajustou equações para estimar o conteúdo de boro e as equações apresentaram para a folhagem  $R^2_{aj} = 0,76$  e  $S_{yx} = 17,5\%$ , para os galhos  $R^2_{aj} = 0,64$  e  $S_{yx} = 25,3\%$  e para a madeira  $R^2_{aj} = 0,92$  e  $S_{yx} = 10,6\%$ , resultados mais satisfatórios que os encontrados no presente trabalho, principalmente considerando os baixos erros padrões da estimativa.

Para o compartimento B total, as equações ajustadas apresentaram coeficientes de determinação relativamente altos, mas elevado erro padrão da estimativa, o que indica que as estimativas das equações têm menor precisão.

Quanto à análise gráfica dos resíduos, observou-se a tendência, em praticamente todas as equações, de aumentar os resíduos absolutos à medida que aumenta o dap, como pode ser observado na Figura 12.





**Figura 12:** Distribuição gráfica dos resíduos das melhores equações ajustadas para estimativa do conteúdo de B nos diversos compartimentos.

Como a frequência das árvores vai diminuindo à medida que aumenta o dap, o que é uma característica das florestas naturais, a baixa frequência de árvores com maiores dap na base de dados utilizada no ajuste das equações pode justificar o pior ajuste das curvas de regressão a estes dados, resultando resíduos com maior amplitude.

#### 4.2.2. Manganês (Mn)

As equações selecionadas para a estimativa do conteúdo de manganês apresentaram bom coeficiente de determinação ajustado, exceto para a folhagem e miscelânea. Se comparado com os trabalhos de Téo (2009) em bracingas, pois são similares ou superiores ao encontrados pelo autor. No entanto, este mesmo autor encontrou menores erros padrão das estimativas para todos os compartimentos, o que pode ser explicado pelo fato do mesmo ter utilizado apenas uma espécie na base de dados para o ajuste das equações de regressão. A Tabela 10 traz duas equações selecionadas para a estimativa do conteúdo de Mn em cada compartimento.

**Tabela 10:** Resultados do ajuste de equações para estimativa do conteúdo de Mn.

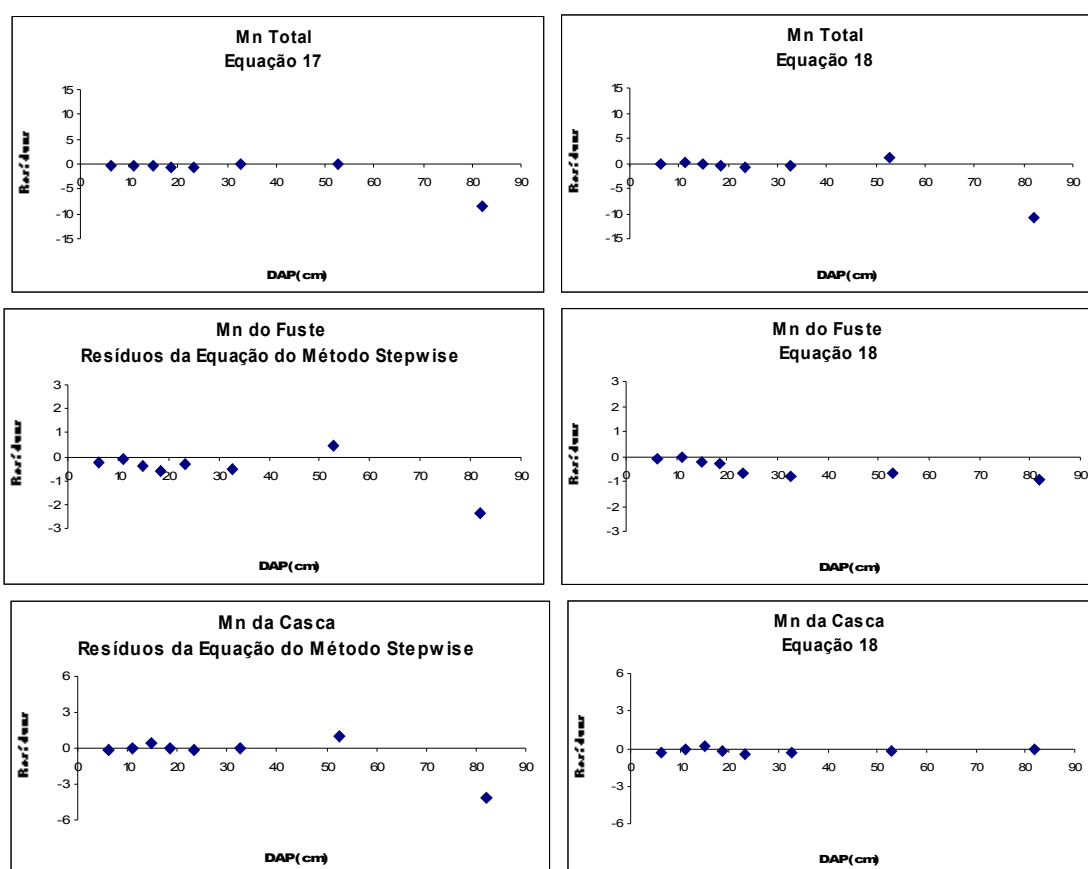
EQUAÇÕES	ESTATÍSTICAS		
	R <sup>2</sup> aj	S <sub>yx</sub> %	F
<b>Mn total</b>			
18 Mn = 91024,019 -26036,6.dap + 2352,175.dap <sup>2</sup> -71,465.dap <sup>3</sup> + 0,908.dap <sup>4</sup> -0,004.dap <sup>5</sup>	0,881	76,25	108,08
17 Mn = 5632,603.dap -236,010.dap <sup>2</sup> + 6,064.dap <sup>3</sup> -(2,64E-02).dap <sup>4</sup>	0,869	83,11	136,97
<b>Mn da madeira do fuste</b>			
<i>Stepwise:</i> Mn = 5837,27 + 3,768.(dap <sup>2</sup> .hm) - (4,04E-05).dap <sup>5</sup>	0,868	98,74	234,76
18 Mn = 609,937.dap -52,997.dap <sup>2</sup> + 4,802.dap <sup>3</sup> -0,102.dap <sup>4</sup> + (6,2E-4).dap <sup>5</sup>	0,866	100,44	107,29
<b>Mn da cascado fuste</b>			
<i>Stepwise:</i> Mn = 10103,413 + 4,405.(dap <sup>2</sup> .hm) -1,279.(dap <sup>2</sup> .ht) -1639,758.hm	0,982	74,56	1293,16
18 Mn = 1654,670.dap -203,714.dap <sup>2</sup> + 9,434.dap <sup>3</sup> -0,165.dap <sup>4</sup> + (9,5E-4).dap <sup>5</sup>	0,973	63,22	1147,99
<b>Mn dos galhos</b>			
<i>Stepwise:</i> Mn = -122875,14 + 101,668.dap <sup>2</sup> -15,602.(dap <sup>2</sup> .hm) + 20561,472.ln (dap <sup>2</sup> .hm)	0,915	67,63	191,81
18 Mn = -11602,2.dap + 1567,126.dap <sup>2</sup> -59,520.dap <sup>3</sup> + 0,893.dap <sup>4</sup> -0,004.dap <sup>5</sup>	0,909	70,17	175,39
<b>Mn da folhagem</b>			
7 Mn = 58,519.dap <sup>2,235</sup> .ht <sup>-1,323</sup>	0,375	384,15	21,67
14 ln Mn = 2,468 + 0,552.ln dap <sup>3</sup>	0,365	379,73	40,59
<b>Mn da miscelânea</b>			
7 Mn = 2,878.dap <sup>2,824</sup> .h <sup>-1,442</sup>	0,391	409,95	20,26
1 Mn = 0,514.dap <sup>2,185</sup>	0,388	384,61	38,96

Onde: Mn = conteúdo de manganês (mg/árvore); dap = diâmetro a altura do peito (1,3 m) da árvore (cm); ln = logaritmo natural; ht = altura total (m) e hm = altura do ponto de inversão morfológica (m).

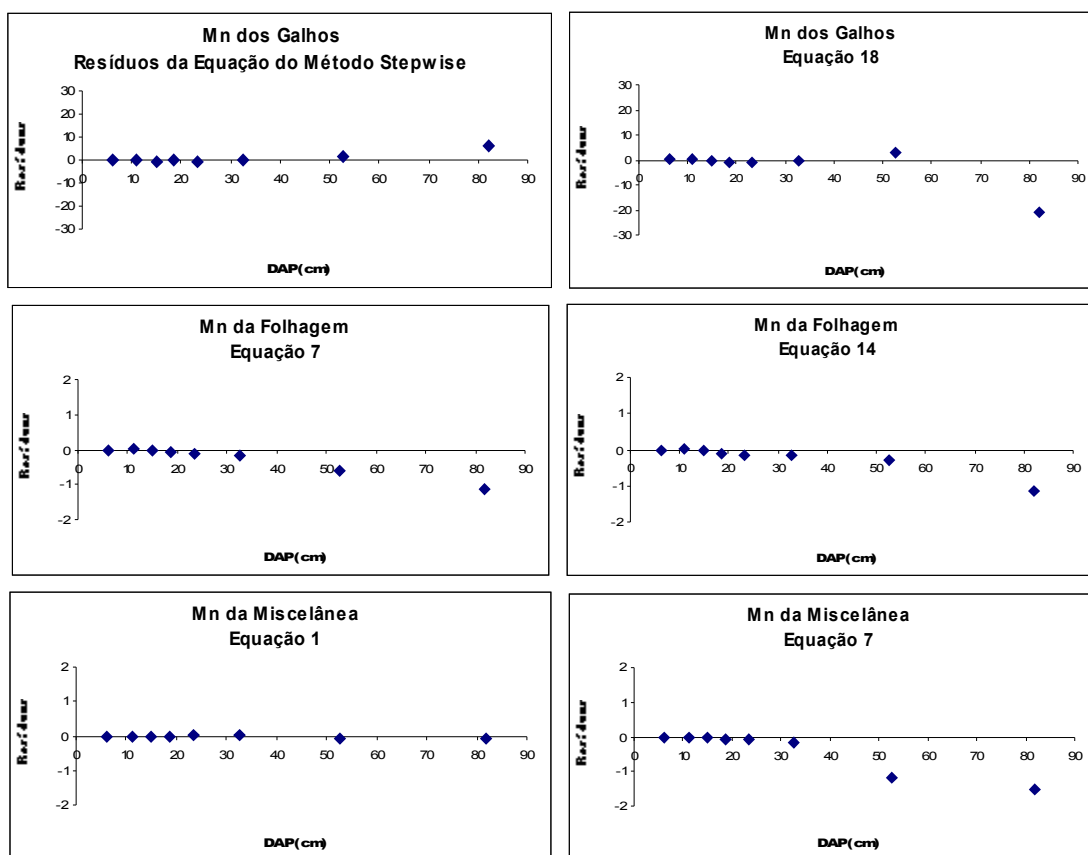
Os piores resultados no ajuste foram observados para a folhagem e para a miscelânea. Os baixos coeficientes de determinação e os altos erros padrão das estimativas sugerem que as características biológicas, das diferentes espécies presentes na base de dados, são muito heterogêneas e dificultaram o ajuste de curvas de regressão a elas.

Téo (2009) encontrou melhores resultados no ajuste das equações para estimativa do conteúdo de Mn da folhagem de bracatinga, com  $R^2_{aj}$  de 0,856 e  $S_{yx} = 39,6\%$ , mas este autor utilizou como variável independente o diâmetro da copa, dentre outras variáveis, que podem justificar estes melhores resultados, além de ser uma única espécie. Já Hoppe (2003), utilizou apenas as variáveis independentes dap e ht, mas seus resultados também foram expressivos para a madeira, com  $R^2_{aj}$  de 0,84 e  $S_{yx} = 10,7\%$ . Mas, para a folhagem, com  $R^2_{aj}$  de 0,66 e  $S_{yx} = 23,4\%$ , galhos, com  $R^2_{aj}$  de 0,43 e  $S_{yx} = 36,1\%$ , e para a casca, com  $R^2_{aj}$  de 0,50 e  $S_{yx} = 19,2\%$ , os erros padrão das estimativas foram baixos, no entanto os coeficientes de determinação foram elevados, porém o autor considerou as equações significativas.

Na análise gráfica dos resíduos, verificou-se que, como para os demais nutrientes, a distribuição dos resíduos não é homogênea ao longo do eixo do dap e os resíduos têm maiores dimensões absolutas à medida que o dap aumenta, o que pode ser verificado nas Figuras 13 e 14.



**Figura 13:** Distribuição gráfica dos resíduos das melhores equações ajustadas para estimativa do conteúdo de Mn total e dos compartimentos madeira do fuste e casca do fuste.



**Figura 14:** Distribuição gráfica dos resíduos das melhores equações ajustadas para estimativa do conteúdo de Mn nos compartimentos galhos, folhagem e miscelânea.

As melhores distribuições dos resíduos foram observadas na equação 18 para a casca do fuste e na equação 1 para a miscelânea.

#### 4.2.3. Cobre (Cu)

Para a estimativa do conteúdo de cobre, os melhores resultados foram observados para a casca do fuste. Estes resultados podem ser considerados satisfatórios, pois Téo (2009) ajustou uma equação com menor  $R^2_{aj}$ , igual a 0,915, e considerou satisfatório e Hoppe (2003), em uma equação para a casca do plátano, com  $R^2_{aj} = 0,61$  e  $S_{yx} = 16,3\%$ , considerou significativa.

Para o Cu total e dos compartimentos madeira do fuste e galhos os resultados foram intermediários, basicamente pelos altos erros padrão das estimativas, como pode ser observado na Tabela 11.

**Tabela 11:** Resultados do ajuste de equações para estimativa do conteúdo de Cu.

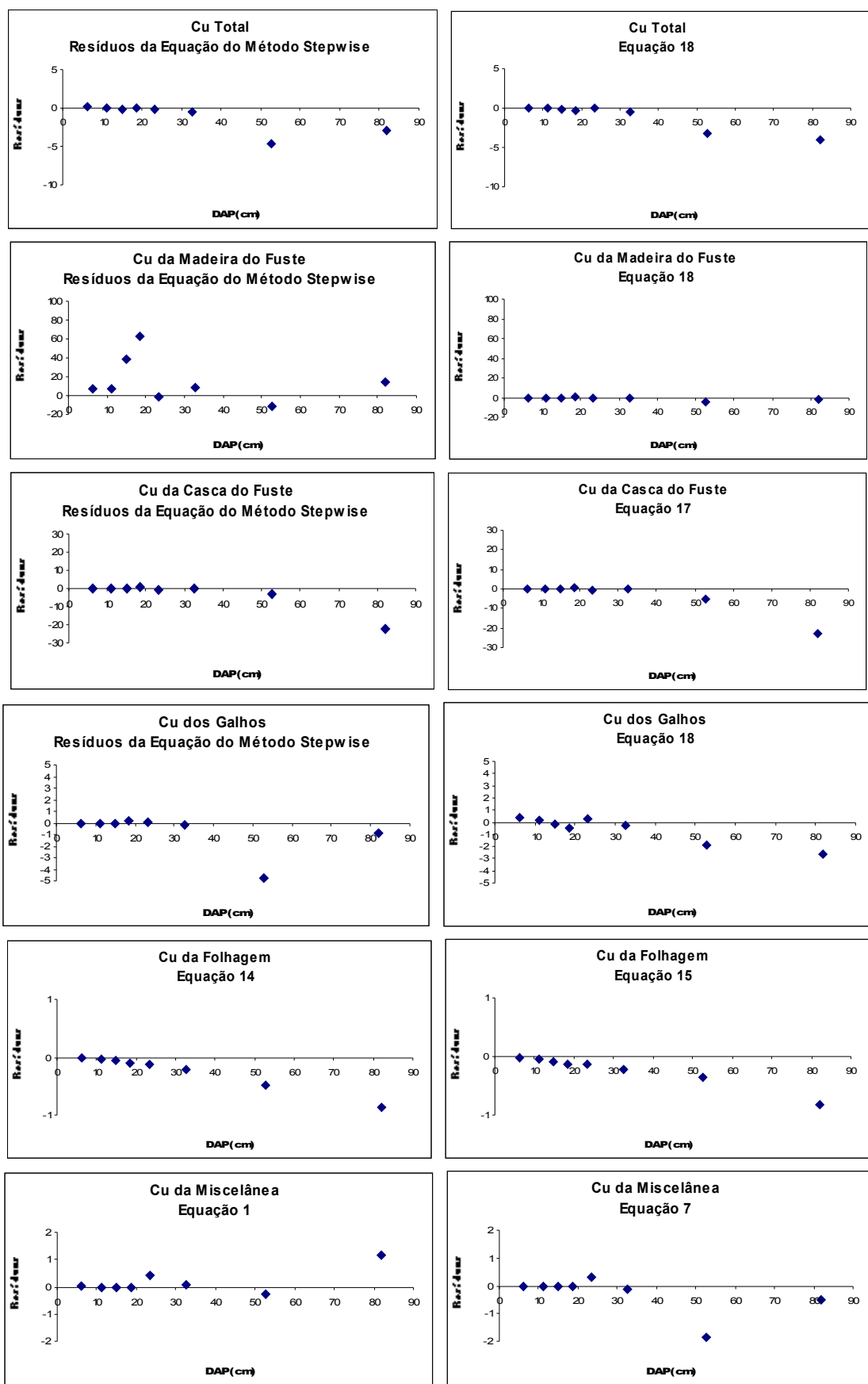
EQUAÇÕES	ESTATÍSTICAS		
	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	S <sub>yx</sub> %	F
<b>Cu total</b>			
<i>Stepwise:</i> Cu = - 568,07 + 75,298.dap - 0,169.(dap <sup>2</sup> .hm) + 0,05.dap <sup>3</sup>	0,877	69,2	169,86
18 Cu = 1111,95 - 291,8.dap + 25,88.dap <sup>2</sup> - 0,793.dap <sup>3</sup> + 0,011.dap <sup>4</sup> - (5,6E-5)dap <sup>5</sup>	0,870	71,58	97,72
<b>Cu da madeira do fuste</b>			
18 Cu = 76,458.dap - 8,336.dap <sup>2</sup> + 0,305.dap <sup>3</sup> - 0,004.dap <sup>4</sup> + (1,5E-5).dap <sup>5</sup>	0,829	92,27	78,38
<i>Stepwise:</i> Cu = 461,953 + 3,56.dap <sup>2</sup> - 0,087.(dap <sup>2</sup> .ht) - 71,672.dap + 2,445.hm <sup>2</sup>	0,818	89,11	80,81
<b>Cu da casca do fuste</b>			
<i>Stepwise:</i> Cu = 8,559 - (6,33E-05).dap <sup>4</sup> + 0,012.(dap <sup>2</sup> .ht) + (7,75E-07).dap <sup>5</sup>	0,991	33,84	2606,97
17 Cu = 78,170 - 14,376.dap + 1,005.dap <sup>2</sup> - 0,020.dap <sup>3</sup> + (1,61E-04).dap <sup>4</sup>	0,990	35,42	1829,72
<b>Cu dos galhos</b>			
<i>Stepwise:</i> Cu = - 8,517 + 2,607.dap <sup>2</sup> - 0,216.(dap <sup>2</sup> .hm) + (2,97E-06).dap <sup>5</sup>	0,878	78,38	171,05
18 Cu = - 156,16.dap + 20,326.dap <sup>2</sup> - 0,745.dap <sup>3</sup> + 0,011.dap <sup>4</sup> - (5,7E-5).dap <sup>5</sup>	0,853	89,95	95,29
<b>Cu da folhagem</b>			
14 ln Cu = - 0,806 + 0,477.ln dap <sup>3</sup>	0,341	352,13	36,78
15 ln Cu = - 0,806 + 0,715.ln (dap <sup>2</sup> .ht)	0,341	352,13	36,78
<b>Cu da miscelânea</b>			
7 Cu = 0,070.dap <sup>3,337</sup> .ht <sup>-2,162</sup>	0,485	421,32	30,18
1 Cu = 0,005.dap <sup>2,376</sup>	0,464	385,86	54,59

Onde: Cu = conteúdo de cobre (mg/árvore); dap = diâmetro a altura do peito (1,3 m) da árvore (cm); ln = logaritmo natural; ht = altura total (m) e hm = altura do ponto de inversão morfológica (m).

Já para os compartimentos folhagem e miscelânea, os resultados foram insatisfatórios, pois as equações não apresentaram estatísticas significativas. Téo (2009), em trabalhos com bracatingas, encontrou bons resultados no ajuste das equações para a estimativa do conteúdo de Cu em todos os compartimentos. No entanto, a base de dados utilizada por este autor era composta apenas pela espécie bracatinga.

Hoppe (2003), para o plátano, encontrou equações com boas estatísticas para a madeira, com R<sup>2</sup><sub>aj</sub> = 0,90 e S<sub>yx</sub> = 8,7%, mas para a folhagem e galhos as equações apresentaram baixo R<sup>2</sup><sub>aj</sub>, 0,64 e 0,59, respectivamente, e baixo S<sub>yx</sub>, 19,8% e 20,6%, respectivamente. Assim, o autor considerou significativas as equações de regressão.

Graficamente, a análise dos resíduos mostrou que para a madeira do fuste, a equação obtida pelo método *stepwise* apresentou pior distribuição de resíduos, o que pode ser visto na Figura 15.



**Figura 15:** Distribuição gráfica dos resíduos das melhores equações ajustadas para estimativa do conteúdo de Cu nos diversos compartimentos.

Foi observado, também, que as duas equações selecionadas para a folhagem apresentaram tendência em superestimar o conteúdo de Cu em todas as classes de dap. Para as demais equações, observou-se que apresentaram tendência em aumentar os resíduos absolutos a medida que aumenta o dap.

#### 4.2.4. Zinco (Zn)

Diferentemente dos demais micronutrientes, para o zinco os melhores resultados no ajuste das equações de regressão foram obtidos para a madeira do fuste, como pode ser observado na Tabela 12. Téó (2009) não encontrou bons resultados no ajuste de equações para a estimativa do conteúdo de zinco em bracatingas, especialmente para os compartimentos casca e madeira do fuste. Hoppe (2003) encontrou equações que considerou significativas para estimar o Zn da casca do plátano, com  $R^2_{aj}$  de 0,66 e  $S_{yx} = 17,8\%$ , e para a madeira, com  $R^2_{aj}$  de 0,83 e  $S_{yx} = 13,9\%$ , principalmente pelos baixos erros padrão das estimativas.

De todos os modelos de equações ajustados para estimativa do conteúdo de zinco, os dois melhores para cada compartimento estão apresentados na Tabela 12.

**Tabela 12:** Resultados do ajuste de equações para estimativa do conteúdo de Zn.

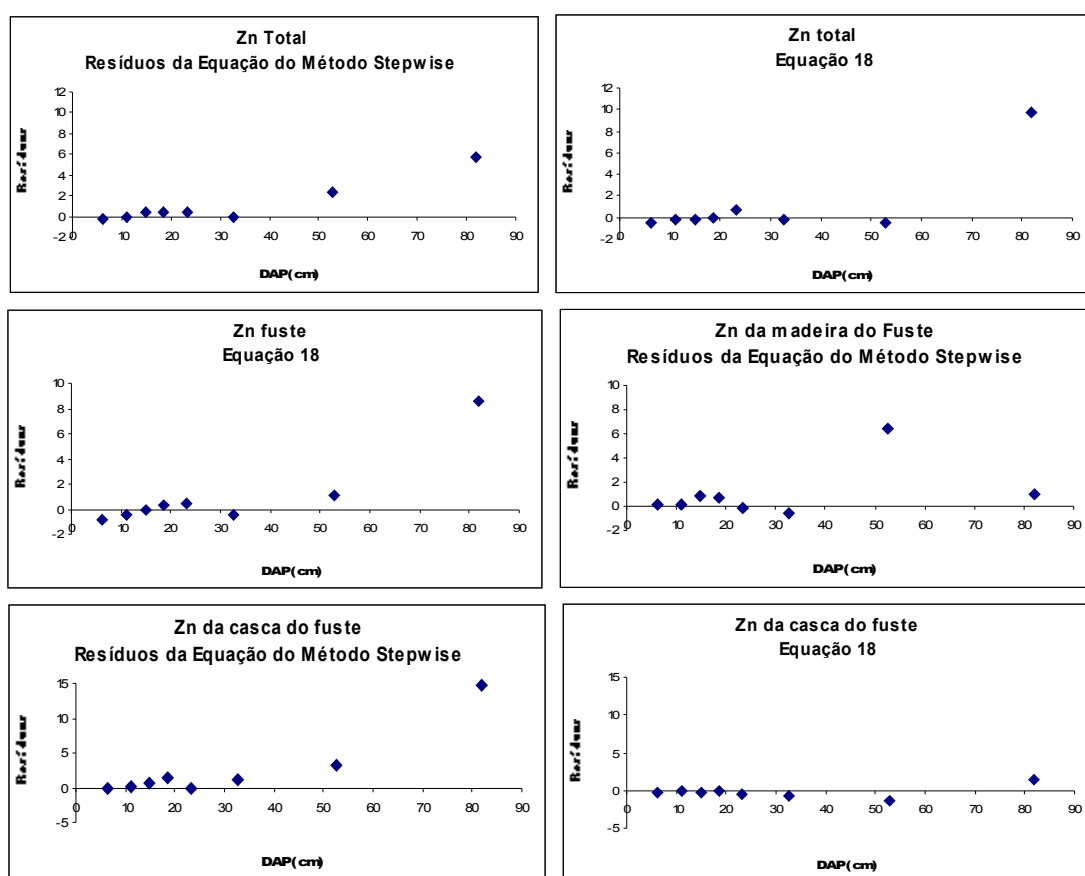
EQUAÇÕES	ESTATÍSTICAS		
	$R^2_{aj}$	$S_{yx}\%$	F
<b>Zn total</b>			
<i>Stepwise:</i> $Zn = 7685,449 + 2,596.(dap^2.hm) - 1484,992.hm - 0,206.dap^3$	0,986	58,74	1639,37
18 $Zn = 1183,751.dap - 144,381.dap^2 + 6,501.dap^3 - 0,109.dap^4 + (6,0E-4).dap^5$	0,973	55,02	1178,54
<b>Zn da madeira do fuste</b>			
<i>Stepwise:</i> $Zn = 3958,152 + 1,87.(dap^2.hm) - 990,953.hm + (6,15E-05).dap^5 - 0,007.dap^4$	0,996	39,77	4855,47
18 $Zn = 1140,933.dap - 145,544.dap^2 + 6,298.dap^3 - 0,104dap^4 + (5,7E-4).dap^5$	0,982	39,73	3999,05
<b>Zn da casca do fuste</b>			
<i>Stepwise:</i> $Zn = 246,597 + 0,204.(dap^2.hm) - 0,02.dap^3 - 5,099.hm^2$	0,972	76,57	834,51
18 $Zn = 81,956.dap - 9,436.dap^2 + 0,440.dap^3 - 0,008.dap^4 + (4,3E-5).dap^5$	0,959	75,32	542,89
<b>Zn dos galhos</b>			
17 $Zn = 42,716.dap + 0,621.dap^2 + 0,073.dap^3 - (6,75E-04).dap^4$	0,624	118,23	32,47
6 $Zn = 240,011.dap - 235,776.ht$	0,624	118,25	63,92
<b>Zn da folhagem</b>			
14 $\ln Zn = -0,370 + 0,511.\ln dap^3$	0,392	320,14	45,49
15 $\ln Zn = -0,370 + 0,767.\ln (dap^2.ht)$	0,392	320,14	45,49
<b>Zn da miscelânea</b>			
7 $Zn = 0,109.dap^{3,172}.ht^{-1,754}$	0,426	483,29	22,86
1 $Zn = 0,014.dap^{2,374}$	0,416	464,50	42,97

Onde: Zn = conteúdo de zinco (mg/árvore); dap = diâmetro a altura do peito (1,3 m) da árvore (cm); ln = logaritmo natural; ht = altura total (m) e hm = altura do ponto de inversão morfológica (m).

Para o Zn da casca do fuste e do zinco total, o coeficiente de determinação ajustado foi alto, mas o erro padrão também foi elevado, o que sugere boa correlação das variáveis, mas estimativas com baixa precisão. Já para os compartimentos galhos, folhagem e miscelânea, os resultados foram insatisfatórios, com baixo  $R^2_{aj}$  e elevado  $S_{yx}\%$ , diferentemente dos resultados encontrados por Hoppe (2003), que encontrou equações com baixos coeficientes de determinação ajustados a erros padrão das estimativas bastante baixos,  $R^2_{aj} = 0,80$  e  $S_{yx} = 18\%$  para a folhagem,  $R^2_{aj} = 0,61$  e  $S_{yx} = 24,8\%$  para os galhos.

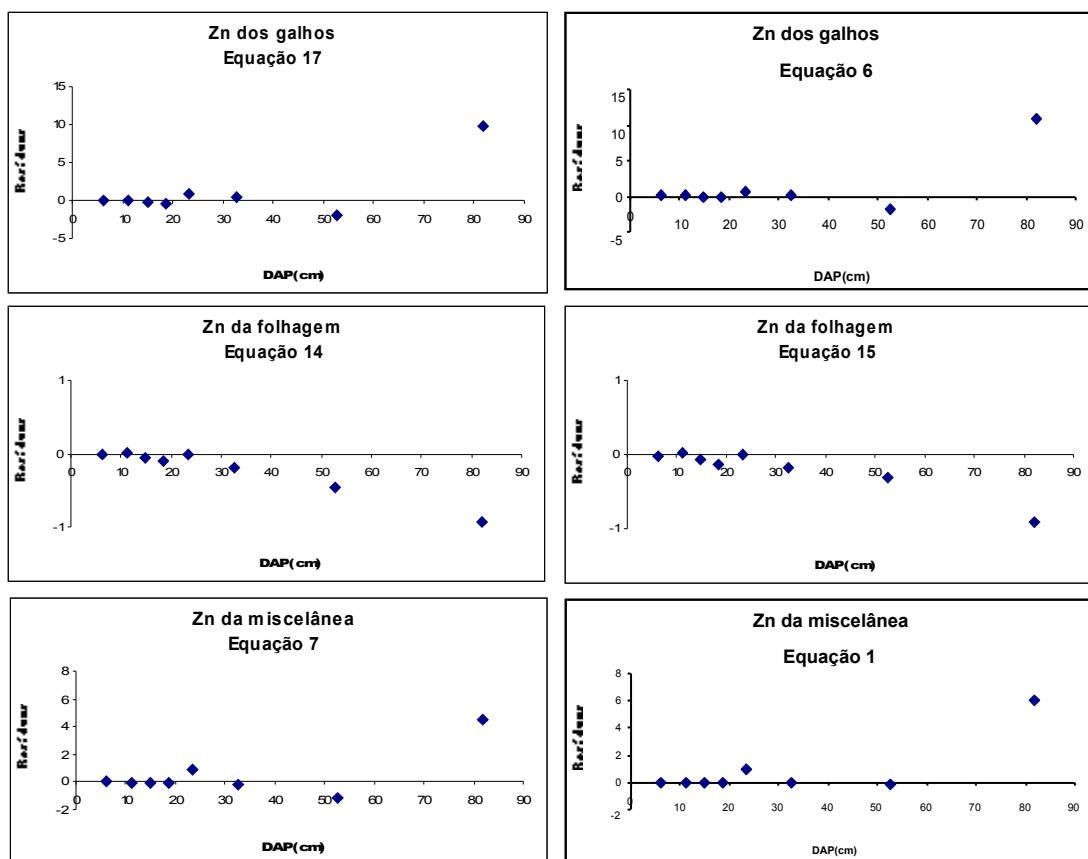
Comparando com os resultados de Téo (2009), exceto para o compartimento folhagem, os coeficientes de determinação são semelhantes ou até superiores aos encontrados por esse autor, mas os erros padrões das estimativas são significativamente maiores, indicando que as equações têm menor desempenho na precisão das estimativas.

Na análise da distribuição gráfica dos resíduos, observou-se que a equação 18 apresentou melhor distribuição dos resíduos em relação à equação obtida pelo método *stepwise*, para o compartimento casca do fuste. Para os demais compartimentos, não houve diferenças significativas entre as duas equações selecionadas, como pode ser observado nas Figuras 16 e 17.



**Figura 16:** Distribuição gráfica dos resíduos das melhores equações ajustadas para estimativa do conteúdo de Zn total e dos compartimentos madeira do fuste e casca do fuste.





**Figura 17:** Distribuição gráfica dos resíduos das melhores equações ajustadas para estimativa do conteúdo de Zn nos compartimentos galhos, folhagem e miscelânea.

Verificou-se, também, que a maioria das equações apresentaram tendência em aumentar os resíduos absolutos a medida que aumenta o dap, como pode ser observado na Figuras 16 e 17.

#### 4.2.5. Ferro (Fe)

As equações selecionadas para a estimativa do conteúdo de ferro apresentaram resultados satisfatórios para o compartimento casca do fuste, como pode ser observado na Tabela 13. Para este compartimento, Téo (2009) ajustou equações para a estimativa do conteúdo de Fe em bracatingas com  $R^2_{aj} = 0,755$  e  $S_{yx} = 28\%$  e considerou os resultados insatisfatórios, no entanto foram os melhores resultados para os diversos compartimentos da biomassa da bracatinga. Hoppe (2003), para a casca do plátano, ajustou uma equação com  $R^2_{aj} = 0,55$  e  $S_{yx} = 27,8\%$ , mas considerou satisfatória.

**Tabela 13:** Resultados do ajuste de equações para estimativa do conteúdo de Fe.

EQUAÇÕES	ESTATÍSTICAS		
	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	S <sub>yx</sub> %	F
<b>Fe total</b>			
4 Fe = 1517,312.dap -20,544.dap <sup>2</sup> + 2,349.(dap <sup>2</sup> .h)	0,736	114,66	72,81
16 Fe = 1736,731.dap -11,440.dap <sup>2</sup> + 0,563.dap <sup>3</sup>	0,733	115,25	71,82
<b>Fe da madeira do fuste</b>			
<i>Stepwise:</i> Fe = 3296,083 + 2,461.(dap <sup>2</sup> .hm) - (2,88E-05).dap <sup>5</sup>	0,741	147,54	102,45
7 Fe = 1,670.dap <sup>3,350</sup> .ht <sup>-1,652</sup>	0,428	519,20	23,41
<b>Fe da casca do fuste</b>			
<i>Stepwise:</i> Fe = -5023,02 + 1,035.(dap <sup>2</sup> .hm) -6,569.dap <sup>2</sup> -681,32.hm + 1490,814.ln (dap <sup>2</sup> .hm)	0,990	46,83	1755,54
18 Fe = 427,347.dap -48,624.dap <sup>2</sup> + 2,241.dap <sup>3</sup> -0,039.dap <sup>4</sup> + (2,2E-4).dap <sup>5</sup>	0,978	41,46	1926,56
<b>Fe dos galhos</b>			
<i>Stepwise:</i> Fe = -16988,624 + 2224,166.dap -4,708.(dap <sup>2</sup> .hm) + (9,85E-05).dap <sup>5</sup>	0,867	70,58	155,23
18 Fe = 50204,846 -11683,7.dap + 931,18.dap <sup>2</sup> -28,437.dap <sup>3</sup> + 0,37.dap <sup>4</sup> - (1,7E-3).dap <sup>5</sup>	0,830	80,55	71,11
<b>Fe da folhagem</b>			
15 ln Fe = 1,124 + 0,603.ln (dap <sup>2</sup> .ht)	0,310	430,47	32,01
14 ln Fe = 1,884 + 0,486.ln dap <sup>3</sup>	0,301	430,33	30,74
<b>Fe da miscelânea</b>			
7 Fe = 1,670.dap <sup>3,350</sup> .ht <sup>-1,652</sup>	0,428	519,20	23,41
1 Fe = 0,232.dap <sup>2,618</sup>	0,424	437,45	45,09

Onde: Fe = conteúdo de ferro (mg/árvore); dap = diâmetro a altura do peito (1,3 m) da árvore (cm); ln = logaritmo natural; ht = altura total (m) e hm = altura do ponto de inversão morfológica (m).

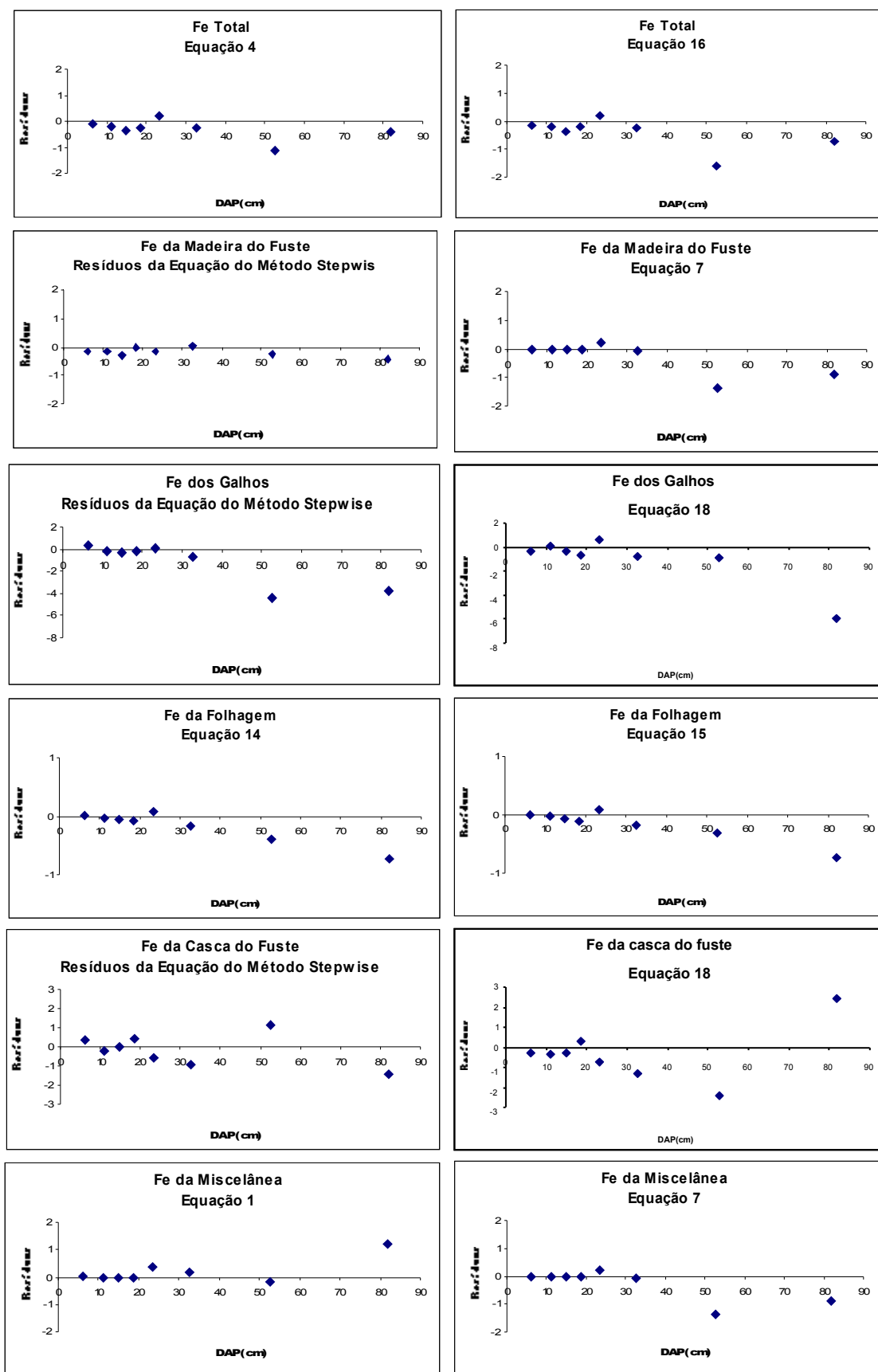
As equações ajustadas para a estimativa do conteúdo de ferro na madeira do fuste, na folhagem, na miscelânea e para o Fe total apresentaram estatísticas insatisfatórias, com baixo coeficiente de determinação ajustado e alto erro padrão nas estimativas. Resultados insatisfatórios similares foram encontrados por Téo (2009) para a folhagem, R<sup>2</sup><sub>aj</sub> = 0,331. Para os demais compartimentos, este autor encontrou resultados melhores, R<sup>2</sup><sub>aj</sub> igual a 0,861 para a madeira do fuste e 0,875 para o Fe total.

Hoppe (2003) ajustou equações com R<sup>2</sup><sub>aj</sub> = 0,71 e S<sub>yx</sub> = 22,7% para a folhagem, R<sup>2</sup><sub>aj</sub> = 0,53 e S<sub>yx</sub> = 38,4% para os galhos e R<sup>2</sup><sub>aj</sub> = 0,78 e S<sub>yx</sub> = 16,7% para a madeira. Embora os resultados sejam com baixos coeficientes de determinação ajustados, o autor considerou as equações significativas.

As equações para os demais compartimentos apresentaram melhores coeficientes de determinação ajustados e erros parão das estimativas, mas era desejável que este último fosse menor possível.

A análise gráfica dos resíduos não mostrou diferenças significativas na distribuição dos resíduos entre as duas equações selecionadas para um mesmo compartimento, o que pode

ser verificado na Figura 18. No entanto, não se pode concluir apenas com essas diferenças quais das equações são mais precisas, deve-se recorrer às demais estatísticas.



**Figura 18:** Distribuição gráfica dos resíduos das melhores equações ajustadas para estimativa do conteúdo de Fe nos diversos compartimentos.

Como para os demais nutrientes, as equações apresentaram tendência em aumentar os resíduos absolutos à medida que aumenta o dap, porém não foi observado tendência em subestimar ou superestimar o conteúdo de Fe, já que a distribuição dos resíduos está aleatória em relação ao eixo do dap.

## 5. CONCLUSÕES

- Os melhores resultados no ajuste das equações para a estimativa do conteúdo de nutrientes na biomassa arbórea acima do solo foram obtidos para o compartimento casca do fuste na maioria dos nutrientes, sendo satisfatórios para a maioria deles;
- Os compartimentos onde os ajustes apresentaram desempenhos menos expressivos foram a folhagem e a miscelânea, sendo pouco satisfatórios para todos os nutrientes estudados, o que pode ser explicado pela grande heterogeneidade do conteúdo destes nutrientes entre as espécies estudadas, dificultando o ajuste de equações de regressão aos dados;
- Para os compartimentos madeira do fuste, galhos e a árvore total os resultados foram aceitáveis em alguns casos e insatisfatórios em outros, dependendo do nutriente avaliado;
- Dos modelos de equação testados, o modelo  $P = a + b.dap + c.dap^2 + d.dap^3 + e.dap^4 + f.dap^5$  foi o que apresentou melhor desempenho;
- O método *Stepwise* se mostrou eficiente na seleção das variáveis independentes a compor as equações de regressão, produzindo bons resultados;
- O ajuste de equações de regressão pode ser uma alternativa viável como método indireto de quantificação do conteúdo de nutrientes na biomassa arbórea.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BELLOTE, A. F. J.; SARRUGE, J. R.; HAAG, H. P. OLIVEIRA, G. D. de. Absorção de macronutrientes e micronutrientes pelo *Eucalyptus grandis* (Hill, ex-Maiden) em função da idade. **Silvicultura**, São Paulo, n. 32, p. 633-643, 1983.

CALDEIRA, M. V. W. **Determinação de biomassa e nutrientes em uma floresta ombrófila mista montana em General Carneiro, Paraná.** 2003. 176p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira.** Brasília: EMBRAPA-CNPQ; EMBRAPA-SPI, 1994. 640p.

CASTELA, P. R.; BRITZ, R. M.; TIEPOLO, G.; PIRES, L. A. **Conservação do bioma floresta com araucária - relatório final: diagnóstico dos remanescentes florestais.** Curitiba: FUPEF, 2001. 121p.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis.** New York: J. Wiley & Sons, 1981. 2 ed. 709p.

EMBRAPA. Empresa brasileira de pesquisa agropecuária. **Mapa de solos do estado do Paraná: legenda atualizada.** Rio de Janeiro, 2008. 74p.

GOLLEY, F. B.; MCGINNIS, J. T.; CLEMENTS, R. G.; CHILD, G. I.; DEUVER, M. J. **Ciclagem de minerais em um sistema de floresta tropical úmida.** São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 1978. 256p.

GOMES, F. P.; GARCIA, C. H. A determinação de equações volumétricas na engenharia florestal. **IPEF Série técnica**, Piracicaba, v.9, n.26, p.1-36, mar. 1993.

HINKEL, R. **Aspectos da ciclagem de nutrientes em dois estágios sucessionais de floresta ombrófila densa no parque municipal de Lagoa do Peri, Ilha de Santa Catarina, SC.** 2002. 164p. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) – Universidade Federal de Santa Catarina, SC.

HOPPE, J. M. **Biomassa e nutrientes em *Pnatanus x acerifolia* (Aiton) Willd. estabelecido no município de Dom Feliciano - RS.** 2003. 143p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira.** Rio de Janeiro: IBGE, 1992. 92p.

KOEHLER, H. S. **Estatística experimental**. Curitiba: UFPR, 2004. 124p.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Paulo: EPU, 1986. 319p.

MAACK, R. **Geografia Física do Estado do Paraná**. Rio de Janeiro: José Olympio, 1981. 442p.

MACHADO, S. A.; AGUIAR, L. P.; FIGUEIREDO FILHO, A.; KOEHLER, H. S. Modelagem do volume do povoamento para *Mimosa scabrella* Benth. na região metropolitana de Curitiba. **Revista Árvore**. Viçosa, v.32, n.3, p.465-478, 2008.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1980. 251p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafos, 1997. 319p.

MORO, L.; REISSMANN, C. B.; SILVA, H. D. da; FERREIRA, C. A.; LAVORANTI, O. J. Modelos matemáticos para estimativa de exportação de nutrientes em povoamentos de *Pinus taeda* L. **Revista Floresta**. Curitiba, v.37, n.2, mai./ago. 2007.

ORELLANA, R.; KOEHLER, A. B. Relações morfométricas de *Ocotea odorifera* (Vell.) Rohwer. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**. Curitiba, v.6, n.2, p.229-237, abr./jun. 2008.

PARANÁ. Secretaria do Estado de Agricultura e Abastecimento, Instituto de Terras, Cartografia e Florestas. **Atlas do estado do Paraná**. Curitiba, 1987. 73p.

SANQUETTA, C. R. Metodologias para determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILIOOTTO, M. A. B.; GOMES, F. dos S. **As florestas e o carbono**. Curitiba: UFPR, 2002. 264p.

SANTANA, R. C.; BARROS, N. F. de.; NOVAIS, R. F. de ; LEITE, H. G.; COMERFORD, N. B. Alocação de nutrientes em plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.especial, p.2723-2733, 2008.

SELLE, G. L. Ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.23, n.4, p.29-39, 2007.

SILVA, H. D da. **Modelos matemáticos para a estimativa da biomassa e do conteúdo de nutrientes em plantações de *Eucalyptus grandis* Hill (ex-Maiden)**. 1996. 101p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

TÉO, S. J. **Quantificação e modelagem do conteúdo de nutrientes na biomassa aérea da bracatinga (*Mimosa scrabella* Bentham)**. 2009. 157p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

VACCARO, S.; BRUN, E. J.; SCHUMACHER, M. V.; KONIG, F. G.; KLEINPAUL, I. S.; CECONI, D. E. Comparação entre três diferentes métodos de análise de tecido vegetal. **Boletim de Pesquisas Florestais**, Colombo, n.48, p.15-28, jan/jun. 2004.