

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

ESTUDO DE FRACTALIDADE VIA RELAÇÕES DE
ESCALA DE ESPÉCIES VEGETAIS EM ÁREAS DE
IGAPÓ NO MUNICÍPIO DE COARI/AM

DENIZ DOS SANTOS MOTA

ORIENTADOR: PROF. DR. SÉRGIO ROBERTO DE PAULO

COORIENTADOR: PROF. DR. THIAGO RANGEL RODRIGUES

Cuiabá, MT
Junho/2017

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**ESTUDO DE FRACTALIDADE VIA RELAÇÕES DE
ESCALA DE ESPÉCIES VEGETAIS EM ÁREA DE
IGAPÓ NO MUNICÍPIO DE COARI/AM**

DENIZ DOS SANTOS MOTA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Física Ambiental.

ORIENTADOR: PROF. DR. SÉRGIO ROBERTO DE PAULO

COORIENTADOR: PROF. DR. THIAGO RANGEL RODRIGUES

**Cuiabá, MT
Junho/2017**

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

D722e dos Santos Mota, Deniz.
ESTUDO DE FRACTALIDADE VIA RELAÇÕES DE ESCALA DE ESPÉCIES
VEGETAIS EM ÁREA DE IGAPÓ NO MUNICÍPIO DE COARI/AM / Deniz dos
Santos Mota. -- 2017
99 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Sérgio Roberto de Paulo.
Co-orientador: Thiago Rangel Rodrigues.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física,
Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2017.
Inclui bibliografia.

1. Relações Alométricas. 2. Dimensionalidade. 3. Floresta de Igapó. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental

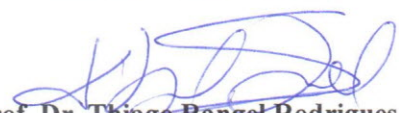
FOLHA DE APROVAÇÃO

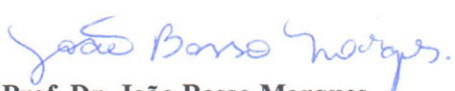
**TÍTULO: ESTUDO DE FRACTALIDADE VIA RELAÇÕES DE ESCALA
DE ESPÉCIES VEGETAIS EM ÁREA DE IGAPÓ NO
MUNICÍPIO DE COARI/AM**

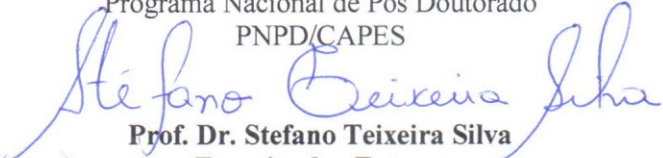
AUTOR: DENIZ DOS SANTOS MOTA

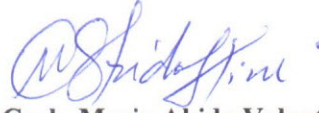
Tese de Doutorado defendida e aprovada em 06 de junho de 2017, pela comissão julgadora:


Prof. Dr. Sérgio Roberto de Paulo
Orientador
Instituto de Física - UFMT


Prof. Dr. Thiago Rangel Rodrigues
Coorientador
Programa Nacional de Pós Doutorado
PNPD/CAPES


Prof. Dr. João Basso Marques
Examinador Interno
Programa Nacional de Pós Doutorado
PNPD/CAPES


Prof. Dr. Stefano Teixeira Silva
Examinador Externo
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
de Mato Grosso – IFMT


Profa. Dra. Carla Maria Abido Valentini
Examinadora Externa
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso – IFMT

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, pela trajetória de retidão e coragem que tiveram ao longo de suas vidas. Pai, sua viagem de 30 dias de canoa a remo para Manaus, não foi em vão, foi minha grande inspiração.

AGRADECIMENTOS

- Ao Eterno por propiciar os mecanismos necessários para manutenção da vida.
- À minha esposa Andréa Baima dos Santos Mota e minha filha, Alice Baima dos Santos Mota, por entenderem, no decorrer da condução deste trabalho, minha ausência de forma sábia, acolhedora e inteligente.
- Ao meu orientador, Prof. Dr. Sérgio Roberto de Paulo, pessoa mais coerente, sábia e correta que conheci, além de exercer sua função de orientador, acreditou mais em mim que eu mesmo na condução deste trabalho, agradeço de coração toda sua imensa contribuição.
- À profa. Dra. Iramaia de Paulo pelas aulas e dicas inspiradoras, ouvir suas sugestões nos faz sentir melhor.
- Ao meu mano, Adriano Pereira Guilherme, por nossas parcerias amistosas, tanto na condução deste trabalho, como em nosso cotidiano.
- Ao meu amigo Valcileo Pinheiro da Silva, pela grande ajuda em nossas verdadeiras expedições para realização de nossas coletas, sem o qual dificilmente teríamos conseguido.
- Ao vice-reitor da UFAM, prof. Hedinaldo Narciso Lima, pela imensa ajuda e empenho dispensado em nossas liberações para realização de disciplinas em Humaitá.
- Aos meus amigos e irmãos na luta que conheci em Coari, de muitas batalhas e de bons momentos, Verena Silva Lima, Mayline Menezes da Mata, Dayane Araújo, Cléber Araújo, Maykon Layrisson e Marcelo Marques.
- À todos os professores do programa que tão receptivamente aceitaram participar do programa DINTER UFAM-UFMT.
- À CAPES pelo apoio financeiro através Programa de Doutorado Interinstitucional (DINTER), convênio UFAM (receptora) e UFMT (promotora).
- À todos que de maneira direta ou indireta contribuirão com esse trabalho.

SUMÁRIO

LISTAS DE FIGURAS.....	I
LISTAS DE TABELAS.....	IV
LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS	V
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 ALOMETRIA	6
2.2 TAMANHO E FORMA.....	8
2.3 SIMILARIDADE GEOMÉTRICA	10
2.4 TIPOS DE ALOMETRIA	11
2.5 EFEITOS DE TAMANHO E METABOLISMO	12
2.6 A LEI DE KLEIBER	13
2.7 O MODELO DE <i>WEST, BROWN E ENQUIST</i>	16
2.8 ESQUEMA DO MODELO	16
2.9 FRACTALIDADE E COMPLEXIDADE.....	22
2.10 DIMENSÃO FRACTAL D_f	24
2.11 CURVA DE VON KOCH	26
2.12 TRIÂNGULO DE SIERPINSKI	26
2.13 CONJUNTO DE CANTOR.....	27
2.14 TAPETE DE SIERPINSKI.....	28
2.15 MÉTODO <i>BOX - COUNTING</i>	29
3. BIOMA AMAZÔNICO	30
3.1 FLORESTA DE TERRA FIRME.....	31

3.2	FLORESTA DE VÁRZEA.....	33
3.3	FLORESTA DE IGAPÓ.....	35
4.0	MATERIAL E MÉTODOS	37
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO MUNICÍPIO	37
4.2	LOCAL DE COLETA	39
4.3	ESPÉCIES COLETADAS	46
4.3.1	O BACURIZEIRO - <i>Platonia insignis</i>	46
4.3.2	GOIABA ARAÇA BOI- <i>EUGENIA STIPITATA MC VAUGH</i>	47
4.3.3	JOÃO MOLE- <i>NEEA CF. MOLLIS SPRUCE EX J. A.</i> <i>SCHIMIDT</i>	48
4.3.4	MUCURÃO- <i>GUSTAVIA AUGUSTA MEMBRILLO</i>	49
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
6.	CONCLUSÕES	74
6.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	75
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Evolução do cavalo em 50 milhões de anos, modificações nas pernas produziram aumento progressivo no tamanho.	9
Figura 2 Taxa metabólica em função da massa de animais em repouso. Conhecida como curva do Rato ao Elefante.	15
Figura 3 (A) rede de distribuição de alimentos em mamíferos, (B) vascularização de plantas, (C) esquema para o modelo de WBE e (d) são os parâmetros que descrevem o modelo..	17
Figura 4 Distribuição de tamanho de galhos para três espécies: <i>Cryptomeria</i> sp. (círculo), <i>Picea</i> sp. (estrela) e <i>Betula</i> sp. (quadrado), o expoente calculado para as três espécies respectivamente foram, -2,13, -2,03 e -2,05.	22
Figura 5 Benoit Mandelbrot, precursor da geometria fractal.....	23
Figura 6 Fractais na natureza. Na esquerda uma couve flor e a direita galhos de uma árvore, a propriedade de auto similaridade pode ser observada nesses casos.	23
Figura 7 Conjuntos de Mandelbrot. Obtidos pela interação de um processo matemático	24
Figura 8 Seguimento de reta utilizado na descrição de D_f	24
Figura 9 Quadrado utilizado na descrição de D_f	25
Figura 10 Cubo utilizado na descrição de D_f	25
Figura 11 Processo de iteração da curva de Koch	26
Figura 12 Processo de iteração para formação do Triângulo de Sierpinski....	27
Figura 13 Processo de iteração para formação do conjunto de Cantor.....	27
Figura 14 Processo de iteração para formação do Tapete de Sierpinski.....	28
Figura 15 Procedimento prático para obtenção de D_f via método de <i>box counting</i>	29
Figura 16 Bioma amazônico, à esquerda área banhada pelo rio Negro.....	30
Figura 17 Perfil topográfico da região amazônica. Denotando os principais ecossistemas existentes.	31
Figura 18 Floresta densa de terra firme	32
Figura 19 Floresta de terra firme área de baixio	33
Figura 20 Floresta de várzea	34
Figura 21 Floresta de Igapó. À esquerda inundação por águas do rio Negro,	

á direita por águas claras	35
Figura 22 Localização do município de Coari	38
Figura 23 Base petrolífera de Urucu	38
Figura 24 Localização da Ilha da Botija	39
Figura 25 Comunidade Ilha da Botija I.....	39
Figura 26 Comunidade Ilha da Botija II	40
Figura 27 Margens do igarapé na Ilha da Botija em período de seca. A cor mais escura nos troncos das árvores denota a altura de subida das águas em decorrência das enchentes	40
Figura 28 Margens do igarapé na Ilha da Botija em período de cheia	41
Figura 29 Esquema representativo da área de coleta de espessuras das árvores	41
Figura 30 Delimitação da área de coleta em período de seca	42
Figura 31 Delimitação da área de coleta em período de cheia.....	43
Figura 32 Medição e marcação das espécies	43
Figura 33 Modelo ramificado proposto por <i>West, Brown e Enquist</i>	44
Figura 34 Modelo idealizado para uma árvore perfeitamente fractal	44
Figura 35 Rotulagem dos galhos.....	45
Figura 36 Rotulagem de galhos em estrutura similar ao de coníferas	45
Figura 37 Galho do Bacurizeiro, à direita uma amostra foliar.....	47
Figura 38 Galho do araçazeiro utilizado na coleta. À direita uma amostra foliar.....	48
Figura 39 Galho do João Mole - <i>Neea cf. mollis</i> Spruce ex J .A. Schmidt utilizado na coleta. À direita uma amostra foliar.	49
Figura 40 Galho do Mucurão - <i>Gustavia augusta</i> - Membrillo utilizado na coleta. À direita uma amostra foliar.....	50
Figura 41 Distribuição de frequência das espessuras de troncos da área delimitada, com curva submetida a um ajuste alométrico com expoente - 1,5261.....	52
Figura 42 Distribuição de frequência de espessuras de troncos da área de estudo.	53
Figura 43 Distribuição de frequência das espessuras de galhos da espécie Bacurizeiro - <i>Platonia insignis</i>	54
Figura 44 Distribuição de frequência das espessuras de galhos da espécie João Mole - <i>Neea cf. mollis spruceex j. a. schmidt</i>	54

Figura 45 Distribuição de frequência das espessuras de galhos da espécie Goiaba Araça- <i>Eugenia stipitata mcvaugh</i>	55
Figura 46 Distribuição de frequência das espessuras de galhos da espécie Mucurão - <i>gustavia augusta – membrillo</i>	55
Figura 47 Distribuição de frequência das espessuras de galhos da espécie Bacurizeiro - <i>Platonia insignis</i> , com curva submetida a um ajuste alométrico, com expoente -2,11.....	58
Figura 48 Distribuição de frequência das espessuras de galhos da espécie João Mole - <i>Neea cf. mollis spruce ex j .a. schmidt.</i> , com curva submetida a um ajuste alométrico, com expoente -1,97.....	59
Figura 49 Distribuição de frequência das espessuras de galhos da espécie Goiaba Araça - <i>Eugenia Stipitata mcvaugh</i> , com curva submetida a um ajuste alométrico, com expoente -2,78.....	59
Figura 50 Distribuição de frequência das espessuras de galhos da espécie Mucurão - <i>Gustavia augusta – Membrillo</i> , com curva submetida a um ajuste alométrico, com expoente -2,77.....	60
Figura 51 Gráfico comparativo das distribuições de frequências de espessuras de galhos e troncos das quatro espécies e da área delimitada, todas submetidas ajustes alométricos.	61
Figura 52 Distribuição frequência do fator de escala gama para a espécie Goiaba Araça - <i>Eugenia stipitata mcvaugh</i>	64
Figura 53 Distribuição de frequência do fator de escala gama para a espécie Mucurão - <i>Gustavia augusta – membrillo</i>	65
Figura 54 Distribuição de frequência do fator de escala gama para a espécie Mucurão - <i>Gustavia augusta – membrillo</i>	65
Figura 55 Distribuição de frequência do fator de escala gama para a espécie Bacurizeiro - <i>Platonia insignis</i>	66
Figura 56 Distribuição de frequência do fator de escala beta para a espécie João Mole - <i>Neea cf. mollis spruceex j .a. schmidt</i>	66
Figura 57 Distribuição de frequência do fator de escala beta para a espécie Goiaba Araça - <i>Eugenia stipitata mcvaugh</i>	67
Figura 58 Distribuição de frequência do fator de escala beta para a espécie Mucurão - <i>Gustavia augusta – membrillo</i>	68
Figura 59 Distribuição de frequência do fator de escala beta para a espécie Bacurizeiro - <i>Platonia Insignis</i>	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Relações alométricas para variáveis do sistema circulatório de mamíferos.....	20
Tabela 2 Estatística descritiva dos dados de espessuras de troncos coletados da área delimitada	51
Tabela 3 Características biométricas das espécies utilizadas.....	53
Tabela 4 Estatística descritiva das espessuras de galhos das espécies, Bacurizeiro - <i>Platoniainsignis</i> , João Mole - <i>Neea cf. mollisSpruceex J .A. Schmidt</i> , Goiaba Araça - <i>Eugenia StipitataMcvaughe</i> Mucurão - <i>Gustavia augusta</i> – <i>Membrillo</i>	56
Tabela 5 Expoente de escala obtidos via ajuste alométrico para os diâmetros dos galhos das espécies, Bacurizeiro - <i>Platoniainsignis</i> , João Mole - <i>Neea cf. mollisSpruceex J .A. Schmid</i> , Goiaba Araça - <i>Eugenia StipitataMcvaugh</i> , Mucurão - <i>Gustavia augusta</i> – <i>Membrillo</i> e para os diâmetro dos troncos da área de estudo.	57
Tabela 6 Estatística descritiva da relação de escala γ das espécies, Bacurizeiro - <i>Platoniainsignis</i> , João Mole - <i>Neea cf. mollisSpruceex J .A. Schmidt</i> , Goiaba Araça - <i>Eugenia StipitataMcvaughe</i> Mucurão - <i>Gustavia augusta</i> – <i>Membrillo</i>	63
Tabela 7 Estatística descritiva relação de escala γ das espécies, Bacurizeiro - <i>Platoniainsignis</i> , João Mole - <i>Neea cf. mollisSpruceex J .A. Schmidt</i> , Goiaba Araça - <i>Eugenia StipitataMcvaughe</i> Mucurão - <i>Gustavia augusta</i> – <i>Membrillo</i>	63
Tabela 8 Estatística Parâmetros utilizados no cálculo de dimensionalidade da espécie Bacurizeiro - <i>Platoniainsignis</i>	71
Tabela 9 Parâmetros utilizados no cálculo de dimensionalidade da espécie Bacurizeiro - João Mole - <i>Neea cf. mollisSpruceex J .A. Schmidt</i>	71
Tabela 10 Parâmetros utilizados no cálculo de dimensionalidade da espécie Mucurão - <i>Gustavia augusta</i> – <i>Membrillo</i>	72
Tabela 11 Parâmetros utilizados no cálculo de dimensionalidade da espécie Goiaba Araça - <i>Eugenia StipitataMcvaugh</i>	72

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

k	Nível de ramificação da estrutura da planta.
$k + 1$	Nível de ramificação seguinte da estrutura da planta.
l_k	Comprimento do galho ou caule em dado nível de ramificação da planta.
l_{k+1}	Comprimento do galho em um nível seguinte de ramificação da planta.
γ_k	Razão entre os comprimentos dos galhos ou caule em um dado nível de ramificação.
β_k	Razão entre os diâmetros dos galhos ou caule em um dado nível de ramificação.
r_k	Raio do galho ou caule em dado nível de ramificação da planta.
r_{k+1}	Raio do galho ou caule em dado nível seguinte de ramificação da planta.
D_f	Dimensão fractal.
DAP	Diâmetro a altura do peito.
B	Taxa Metabólica
u_k	Velocidade média do fluido em cada nível.
V_b	Volume total de fluido na rede.
$C.V$	Coeficiente de Variabilidade

RESUMO

MOTA, D.S. **Estudo de Fractalidade Via Relações de Escala de Espécies Vegetais em Áreas de Igapó no Município de Coari/AM.** 2017. 99p. Tese (Doutorado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2017.

A floresta amazônica e seus diferentes ecossistemas, dentre os quais, terra firme, várzea e igapó, têm sido alvo de intensos estudos no que diz respeito ao seu papel de sumidouro de dióxido carbono e principalmente, dos fatores que favorecem essa vegetação, que por sua vez, indicam uma estreita relação entre os processos de retroalimentação e a intensificação das mudanças climáticas. As florestas de igapó, que permanentemente ou boa parte do ano ficam submersas, são conhecidas também por sua hostilidade e difícil acesso. Neste trabalho objetivou-se estudar a fractalidade via relações de escala de espécies vegetais em área de igapó no município de Coari/AM. Para isto, medidas de diâmetro a altura do peito (DAP), diâmetros e espessuras de galhos e troncos foram aferidas e analisadas com distribuições de frequências de espessuras de galhos e troncos. Estudos relacionados à ciência da complexidade em ecossistemas permite descrição próxima às condições reais do fenômeno, inferindo considerações globais da estrutura, dinâmica e metabolismo de uma floresta a partir de medidas locais, como as de um ramo de uma árvore. A fractalidade descrita pelos fatores de escala β e γ das estruturas das espécies está condizente com valores previstos em sua maioria. Os expoentes alométricos obtidos das distribuições de frequências diferenciam do previsto para o modelo, denotando não haver universalidade de expoente. Possivelmente distribuições de frequências para um número maior de espécies podem indicar um expoente estatístico mais próximo do previsto pela teoria.

Palavras-chave: Relações Alométricas, Dimensionalidade, Floresta de Igapó.

ABSTRACT

MOTA, D.S. Fractality Study Via Vegetable Species Scale Relations in Igapó Areas in the Municipality of Coari / AM . 2017. 99p. Thesis (Doctorate in Environmental Physics); Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso.

The amazon forest and your different ecosystems - firm land, *várzea* and *igapó* - have been being target of intense studies concerning their dioxide carbon drain role and mostly on the factors that indicate a narrow relationship among feedback processes and the intensification of the climatic changes. Igapó woods, that permanently or good part of year are submerged, also are well-known for its hostility and difficult access. This nowadays makes the full knowledge of its biological diversity unfeasible, mainly concerning its woody biomass and the stock and sequestration of carbon above of the soil. In this work it was defined an area of 147,5 m², in a typical vegetation of igapó, in Coari-AM municipal district, it was performed measurements of the branches and trunks diameters(DAP), besides of branches lengths and total height of the trees. With these values frequency branches thicknesses distribution histograms were built for four vegetable species, Bacurizeiro - *Platonia insignis*, João Mole - *Neea cf. Mollis* Spruce former J. A. Schmidt, Goiaba Araça - *Eugenia Stipitata mcvaugh* and Mucurão – *Gustavia augusta* – Membrillo. Exponents fitting with these distributions were accomplished, revealing significant results, against the hypothesis of scale exponent universality, but it evidenced a standard structural growth for the vegetation in the studied area. The species structure characterization via West's, Brown and Enquist Model enabled fractal investigation with frequencies scale factors distributions of β e γ . This analysis were in agreement with dimension fractal values obtained by means of the method of *Box Counting*, that showed low dimensionality.

Keywords: Allometric relationships, Dimensionality, Igapó Forest.

1. INTRODUÇÃO

Na biologia é remoto o estudo de mudanças morfológicas e fisiológicas que ocorrem com alterações no tamanho de seres vivos. Muitos destes estudos foram importantes por refletirem aspectos evolutivos e/ou adaptativos de espécies, mas não somente por confirmarem a hereditariedade das mudanças de uma população de seres vivos de uma geração para outra, como também, pela presunção de aspectos relativos a otimização dos processos físicos responsáveis pela complexidade intrínseca de sistemas biológicos.

Adaptações morfológicas, por serem caracterizadas pelas mudanças na estrutura externa, foram as mais evidentes, podendo-se afirmar que são influenciadas pela necessidade de defesa e proteção, inerentes a quase todos os organismos. Adaptações fisiológicas são influenciadas pela necessidade de adequação ao ambiente em condições adversas, ocasionando ou não mudanças anatômicas. Devido à grande diversidade de ecossistemas, que envolvem diferentes condições de temperatura, altitude e salinidade, os ajustes funcionais, no caso das adaptações fisiológicas, passaram por refinamentos excepcionais que tiveram ações diretas nos processos metabólicos, beneficiando o aparecimento de animais maiores com estruturas de maior complexidade no que se refere, por exemplo, ao sistema de transporte e distribuição de nutrientes para as células, presente nas plantas e mamíferos.

Um dos ramos de merecido destaque no estudo do metabolismo e suas relações com tamanho e diferentes formas de organismos é a alometria, caracterizada pela grande aplicabilidade e abrangência, podendo ser utilizada na descrição morfológica e fisiológica de animais e vegetais. Por ter como essência uma lei de potência, seu expoente pode revelar importantes características estruturais, assegurando uma aproximação promissora entre a Biologia e a Física, combinando a teoria biológica com os princípios físicos já estabelecidos.

Na natureza, as relações alométricas refletem a eficiência das funções corporais dos organismos e a otimização dos processos de distribuição de nutrientes. Em um estudo realizado por três pesquisadores do *Santa Fe Institute*, *West, Brown e Enquist*, motivados pela maneira como revela-se na natureza os diferentes sistemas de transportes de nutrientes, como o sistema vascular de mamíferos e o de plantas, mas perceptível também em muitas outras estruturas naturais, como nuvens, árvores, venação de folhas e bacias hidrográficas,

propuseram um modelo baseado no padrão auto - similar da rede de distribuição de nutrientes dos organismos, tendo como resultado a confirmação de um expoente metabólico universal característico, obtido por Max Kleiber, fato desencadeador de um grande número de pesquisas nesta área. Benoit Mandelbrod cunhou o nome de *fractais* a estas estruturas, que possuem como característica a auto similaridade e dimensão fracionária. A fractalidade destas estruturas possui uma estreita relação com a auto similaridade e a dimensionalidade. Neste mesmo artigo afirma-se que, um dos desdobramentos dessa investigação é que o entendimento dado ao padrão fractal das ramificações do sistema vascular, pode ser dado ao sistema hierárquico de troncos e galhos de árvores em uma floresta, do ponto de vista do volume de fluido transportado, ambas conformações são equivalentes, consistindo em uma das hipóteses do nosso trabalho a ser testado para espécies de áreas de igapó, juntamente com a afirmação que a dinâmica de crescimento de galhos em um ramo possui similaridade com o crescimento de árvores na floresta, possivelmente possuindo universalidade do expoente de crescimento de espessuras de galhos e de troncos na floresta.

Muitos estudos que são desenvolvidos em florestas tropicais estão focados no conhecimento da biomassa, acima e abaixo do solo, na quantificação do balanço de carbono e no papel das florestas mediante a tendência de mudanças climáticas globais ocasionadas pela emissão de gases de efeito estufa. Atividades antrópicas, o intenso desmatamento de florestas e alguns fenômenos naturais estão modificando o equilíbrio dos gases de efeito estufa presentes na atmosfera, com reflexo direto no aumento da temperatura média da terra e em eventos extremos relacionados com a temperatura.

Uma das consequências do cenário de mudanças climáticas para as florestas com a alteração da temperatura, é a intensificação dos regimes de estiagem, na Floresta Amazônica. Este fato acarretaria em aumento de regiões com maior taxa de mortalidade de árvores onde as taxas de natalidade não poderiam recompensar, descaracterizando a funcionalidade do bioma e favorecendo o processo de savanização. Este evento aliado às mudanças no uso de solo da Amazônia com desmatamentos, queimadas e formação de pastos, considerando a imensa e expressiva cobertura vegetal da Floresta Amazônica e sua capacidade em sequestrar carbono, acarretaria em condições negativas em vista dos serviços ambientais que são executados por essa floresta.

Um questionamento que surge nesta temática é, em relação ao saldo de carbono: a Amazônia é uma fonte emissora de gás carbônico, ou atua como sumidouro? Há certa dualidade na resposta, durante o dia a floresta atua como sumidouro, absorvendo carbono durante o processo de fotossíntese e estocando o excesso em forma de biomassa, a noite a floresta produz dióxido de carbono, esse saldo pode tornar-se negativo, mediante a diminuição da produtividade florestal e com a severidade das secas provocadas com o aumento da temperatura média. Pesquisas indicam que essa dinâmica tem saldo positivo e representativo quando se considera a imensa cobertura vegetal proporcionada pela Floresta Amazônica, somente no Brasil são cerca de 3 milhões de km^2 .

Apesar do avanço nítido de pesquisas que retratam a importância da Amazônia na mitigação dos efeitos relacionados à intensificação do efeito estufa, com revelações importantes em outras vertentes, como a floresta sendo responsável por boa parte das chuvas que ocorrem na região, e também em outras, por meio dos corredores de umidade na direção sudeste do país, e outros serviços que são essenciais na manutenção do equilíbrio do planeta, são escassos no Brasil pesquisas na área florestal, e em sua maioria realizado por estrangeiros. Um dos maiores interesses nas pesquisas que envolvem estudos desenvolvidos em florestas é criar modelos de crescimento e produção que envolvam a mortalidade, o recrutamento e os componentes de incremento.

Relações de escala e estudos de dimensionalidade em florestas podem relacionar características estruturais de uma espécie com as demais de uma floresta onde a mesma está contida, fornecendo características da estrutura e da dinâmica, até então não totalmente estabelecido, mas com parâmetros já obtidos. Em florestas de monocultura como a de eucalipto, é comum o uso de técnicas geométricas de espaçamento para acelerar o crescimento/estabilidade. Em um ambiente como o da floresta amazônica onde a estabilidade do ecossistema é alcançada com a diversidade e a disposição aleatória de espécies vegetais, fato característico das florestas naturais que as tornam menos produtivas mas, estáveis, será visto que é possível encontrar certa regularidade tanto na disposição geométrica quanto no crescimento, esta ideia combinada com o conhecimento de espécies nativas tem potencial promissor na otimização de técnicas de manejo e reflorestamento, sendo um assunto amplamente debatido mediante aos já

reconhecidos serviços ambientais que são executados pelas florestas e que são de relevância crucial para o equilíbrio do clima do planeta.

1.1 OBJETIVOS:

Nesta tese pretende-se utilizar o modelo proposto por *West, Brown e Enquist (WBE)* em quatro espécies vegetais pertencentes à área de igapó, na Floresta Amazônica, especificamente na Ilha da Botija, localizada no Município de Coari/AM. Os objetivos do trabalho são os seguintes:

Geral:

Caracterizar a estrutura e a fractalidade de quatro espécies vegetais e de uma área delimitada, pertencentes a floresta de igapó na floresta Amazônica.

Específicos:

1. Descrever a distribuição de espessuras dos troncos da área de estudo e de espessuras dos galhos de quatro espécies, via histogramas de distribuição de frequências.
2. Investigar possíveis universalidades entre os expoentes obtidos, via ajustes de potência, das distribuições de frequências de espessuras de galhos e de troncos da área de estudo.
3. Calcular os fatores de escala beta (β) e gama (γ) das espécies coletadas.
4. Estimar qualitativamente a fractalidade (auto similaridade) da estrutura das espécies utilizando histogramas de distribuição de frequência dos fatores de escala beta (β) e gama (γ).
5. Caracterizar a dimensionalidade das espécies via método *Box Counting*.

A apresentação do modelo (*WBE*), sua conexão com o cálculo do expoente metabólico, teoria fractal, com o crescimento e forma dos organismos e sua vinculação com esta tese, bem como, uma descrição da Floresta Amazônica diferenciando seus diferentes tipos de biomas, serão apresentados nos capítulos dois e três deste trabalho.

Os procedimentos metodológicos detalhados adotados na condução do trabalho e a descrição do local de coleta e das espécies vegetais estudadas estão dispostos no capítulo 4. No capítulo 5, será realizada uma profunda análise dos resultados obtidos com auxílio da estatística descritiva, estando estes dispostos em histogramas e tabelas. E finalmente no capítulo 6 faremos nossas considerações finais, além disso, propostas de futuros trabalhos que podem ser desenvolvidos, a partir desta temática, serão sugeridos.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ALOMETRIA

O ciclo de vida de um organismo vegetal ou animal é constituído de vários estágios, este processo contínuo de desenvolvimento pode ser avaliado a partir de características estruturais e fisiológicas que auxiliam na separação e identificação destas etapas. A intensidade destes processos de mudanças varia entre os estágios ontogenéticos, permitindo que características biométricas individuais possam ser utilizadas para estima-la, tais como diâmetro da copa, diâmetro a altura do peito (DAP) e diâmetro dos galhos ou área foliar, quando se trata de plantas. Ou área superficial, massa, tamanho de ossos ou músculos, quando estamos nos referindo a animais.

Uma relação alométrica pode ser observada em diferentes partes de plantas ou animais, essas relações podem sofrer mudanças na ontogenia devido as variações por exemplo, nas propriedades mecânicas do caule, na longevidade e no histórico de uso das plantas (BEGON *et al.*, 1990).

Alometria é um ramo da Biologia que se preocupa com problemas de escala, surgindo quando uma variável pode ser explicada por outra através de uma lei de potência na forma:

$$y(x)=ax^b \quad (2.0)$$

onde $y(x)$ é uma variável dependente e costuma ser um parâmetro biológico de interesse, a é uma constante de escala, x uma variável independente e b o expoente de escala ou expoente alométrico.

Como já citado, esse conceito se estende a outros organismos. De um modo prático, quando um organismo muda de tamanho, as relações entre seus componentes necessitam de ajustes funcionais de modo a permitir seu pleno funcionamento, ajustes estruturais e anatômicos acarretam em modificações similares, essa similaridade é caracterizada por uma relação alométrica. Um exemplo é o aumento do tamanho entre espécies de aves que está associado com um decréscimo do tempo dedicado a chocar ovos, por unidade de peso corporal, caracterizando uma relação alométrica ontogenética pelo fato de ocorrer durante o desenvolvimento do organismo.

Quando nos referimos aos vegetais, conforme crescem, em razão de fatores ambientais como ação da força gravitacional e ventos (WALLER, 1986), as plantas acumulam uma quantidade crescente de biomassa para sustentação, ao mesmo tempo investem no aumento da área do tecido fotossintético. O balanço entre esses investimentos reflete estratégias adaptativas das plantas podendo ser evidenciado através do estudo da relação entre tamanho e forma nas plantas, denominado alometria (NIKLAS, 1994). As relações alométricas presentes nas plantas incluem estimativas de biomassa, acima do solo: folhas, galhos e frutos, abaixo do solo: raízes, ou sobre o solo: materiais vegetais mortos, estas informações são transformadas em dados de inventários florestais com estimativas de estoque de carbono e biomassa.

Para CHAVE et al., (2004), o sucesso do modelo alométrico a ser escolhido é proporcional ao número de parâmetros utilizados, como: Diâmetro, altura e densidade da madeira. Em linhas gerais, estudos envolvendo florestas, emissão e/ou captação de dióxido de carbono tem recebido merecida atenção da comunidade científica, com pesquisas em andamento que confirmam o papel de produtor, mas também de sumidouro de gás carbônico, das florestas (SILVEIRA et al., 2008). Muitos dos estudos nesta área se concentram na captação de carbono de longa residência, que é a biomassa lenhosa de troncos e galhos (MALHI et al., 2004). A utilização da alometria nestes casos se justifica por ser um método de análise não destrutivo. Também é alvo das relações alométricas estudos sobre competição e variação na morfologia das estruturas, relacionando características de parâmetros biométricos, tais como, medidas de comprimento e diâmetros de galhos, tamanho da copa, altura total da árvore, número de ramificações e área foliar, podendo ser aplicados em florestas ou ambientes fragmentados, que são uma das principais ameaças aos ecossistemas, que causam alterações em parâmetros genéticos, estruturais e espaciais que podem levar a extinção de espécies (SILVA et al., 2007).

2.2 TAMANHO E FORMA

Quando nos referimos ao tamanho dos seres vivos, uma característica é notória, organismos de tamanho maior apareceram tardiamente na escala evolutiva. Observações paleontológicas comprovam que os maiores organismos vivos de hoje, são maiores que os organismos da época em que os mesmos começaram a evoluir, fato observado em espécies terrestres como cavalos, mas também em espécies marinhas. Os primeiros organismos eram microscópicos, e possivelmente surgiram na forma de seres unicelulares heterótrofos ainda em um ambiente sem oxigênio, alimentavam-se de matéria orgânica e produziam dióxido de carbono e álcool, característica dos organismos fermentadores, apesar deste grande intervalo de tempo, uma grande parte deles continuam pequenos. Nos últimos milhões de anos, organismos cada vez maiores foram catalogados, caracterizando uma tendência de aumento nas dimensões dos seres vivos em sua história de vida, Figura 1, organismos que apresentam um porte maior possuem algumas proezas que podem agir de forma facilitadora como explorar uma diversidade maior de recursos. Tendo mais recursos é grande a probabilidade de gerar um número maior de descendentes e que também obtenha vantagens na competição por recursos e território, permitindo uma melhor habilidade para resistir por exemplo a escassez de comida e possíveis secas (BROWN & LOMOLINO 1998). Uma desvantagem seria a exigência de uma maior estabilidade ambiental devido à grande quantidade de recursos externos que terá que consumir continuamente para manter-se (GREENEWALT, 1977). Um fato que não pode ser ignorado é que em todos os momentos de perturbações ambientais repentinas que ocorreram na história da terra, os organismos menores sempre tiveram maior sucesso no quesito sobrevivência, fato que explica o porquê da extinção em massa de dinossauros que ocorreu 65 milhões de anos. Uma característica desse crescimento observado na escala evolutiva, foi que ele não se deu com o aumento no tamanho das células que compõem as espécies, e sim com o aumento de número e variedade, fato que em futuros capítulos, será utilizado para justificar certas afirmações do modelo que serão conduzidas neste trabalho.

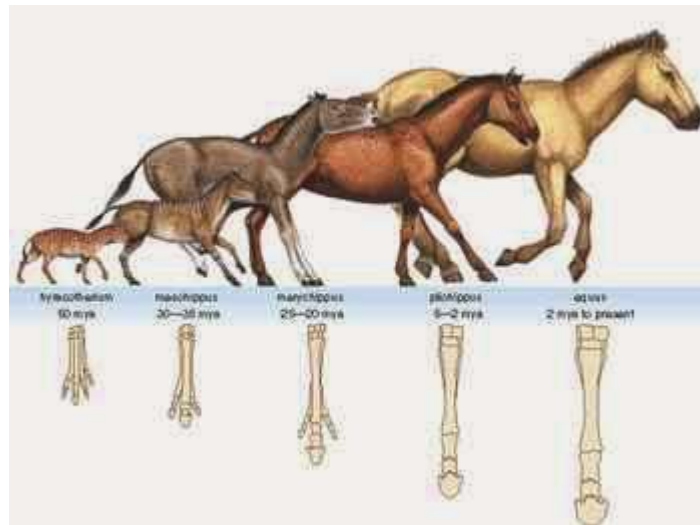


Figura 1: Evolução do cavalo em 50 milhões de anos, modificações nas pernas produziram aumento progressivo no tamanho.

Fonte: <https://sites.google.com/site/equipelagosulcmv/hipismo---historias-historias/o-cavalo>

Com exceção dos organismos unicelulares que não formam tecidos, mas podem constituir-se em colônias, devido à diferença irrisória de tamanho, pode-se afirmar que as células são semelhantes em todas as dimensões, de pulgas até baleias, da ordem de $10^{-4}m$ e $10^{-5}m$ (BIEWENER, 1990). Animais de grande porte necessitam realizar mais funções, em sua constituição, cada célula agrupa-se a outras semelhantes no que diz respeito a sua função e estrutura, formando grupos, que implicam em especialização celular e no agrupamento de células em tecidos que formam os órgãos, com funções e estruturas específicas. Deste modo, um aumento no tamanho requer um aumento na complexidade destas funções, no sentido de uma maior variedade de tipos e especialização destas células (MCMAHON *et al.*, 1984).

O limite máximo de tamanho em organismos é muito superior quando se trata de animais aquáticos, devido à, de certa forma, ‘vantagem’ da sustentação na água, por esse motivo, o animal com maior massa em toda história da terra é a baleia azul, com mais de 100 toneladas. Entre os animais com modo de vida totalmente terrestre, o animal com maior massa foi o *Baluchitherium*, um parente já extinto do rinoceronte, com massa da ordem de 30 toneladas, com mais de 4m de altura e 5m de comprimento, que viveu na Ásia cerca de 30 milhões de anos atrás. Entre os vegetais, o destaque são as Sequoias gigantes que possuem mais de

100 m de altura e um diâmetro do tronco de até 15 m, podem ter a massa equivalente a 10 baleias azuis.

Tomando como limite inferior e superior as massas da bactéria do gênero micoplasma, que possui um tamanho menor que o apresentado por outras bactérias, cerca de $1\mu\text{m}$ e da baleia azul, o quociente entre essas massas é da ordem de 10^{21} , ou seja, 21 ordens de magnitude separam o tamanho dos seres vivos, para uma ideia mais clara deste valor. Se multiplicarmos esse valor pela massa de um elefante, teremos uma estimativa da massa da terra (WEST et al., 1999).

2.3 A SIMILARIDADE GEOMÉTRICA

A similaridade geométrica pode ser chamada de relação alométrica em uma forma trivial. Duas formas geométricas podem ser consideradas similarmente iguais se todas as dimensões lineares de um deles forem iguais as dimensões do outro multiplicada por um fator constante. Se ambos forem formados pelo mesmo material, teremos que se um for duas vezes a altura do outro, sua superfície será quatro vezes maior e sua massa oito vezes maior, ou seja, obedecerão às seguintes relações alométricas para comprimento, área e volume:

$$L \approx M^{1/3} \quad (2.1)$$

$$L^2 \approx A \approx M^{2/3} \quad (2.2)$$

$$L^3 \approx V \approx M^1 \quad (2.3)$$

Se organismos biológicos fossem exatamente similares, os expoentes alométricos seriam múltiplos de 1/3, no entanto, outras restrições de caráter fisiológico, estão presentes além da geométrica.

Uma pergunta pertinente para o que estamos tratando seria: Porque as relações alométricas ocorrem?

Se as relações na natureza conservassem uma similaridade geométrica, todas as áreas da superfície de organismos aumentariam com o quadrado do comprimento e todos os volumes e massa aumentariam com o cubo deste. Este aumento no tamanho, proporcionaria decréscimos nas razões comprimento/área, comprimento/volume e na mais importante, área/volume. Pode-se afirmar que as funções corporais de organismos dependem da eficiência dessas razões. Uma

mudança de tamanho isométrico em um organismo poderia levar a uma mudança na eficiência do organismo. Por exemplo, a transferência de calor, água e nutrientes dentro de um organismo, ou entre ele e seu ambiente, acontece ao longo de uma superfície. A quantidade de calor produzido depende do volume do órgão ou organismo envolvido. Consequentemente, mudanças nas razões área/volume, provenientes de mudanças de tamanho baseados em pressupostos puramente geométricos levariam a mudanças na eficiência da transferência por unidade de volume. Assim, para que a eficiência seja mantida nestes processos, terá que ser feito por meio de relações alométricas (Begon et al.,1990).

2.4 TIPOS DE ALOMETRIA

O conceito de alometria pode ser dividido em quatro subgrupos (GOULD, 1966):

Alometria ontogenética: refere-se a mudanças de proporção ocorrendo durante o desenvolvimento de certo organismo.

Alometria filogenética: refere-se à análise das razões de crescimento entre linhagens distintas, de certa forma refletindo características evolutivas de organismos.

Alometria intraespecífica: Este termo refere-se a comparações de características entre indivíduos em um mesmo estágio ontogenético de uma dada espécie ou população.

Alometria interespecífica; refere-se ao mesmo conjunto de fenótipos analisados em comparações entre espécies, normalmente próximas filogeneticamente, sendo muito importante nos estudos das histórias de vida.

As histórias de vida que a seleção natural favoreceu, não foram selecionadas de uma grande gama de possibilidades, mas restritas a filogenia ou posição taxonômica que o organismo ocupa. Um exemplo são os albatrozes, da ordem procellariiformes, em que o tamanho da ninhada é de apenas um filhote. Estas aves estão preparadas morfológicamente para terem um único filhote em cada estação reprodutiva (ASHMOLE, 1971). Uma ave pode produzir uma ninhada maior, mas está limitada, a menos que houvesse mudanças concomitantes nos processos de desenvolvimento do evento reprodutivo. Permitindo-se afirmar que os albatrozes são prisioneiros do passado evolutivo, como todos os outros organismos, suas histórias de vida podem evoluir para um número limitado de opções, estando então confinados a uma gama limitada de habitats.

2.5 EFEITOS DE TAMANHO E METABOLISMO

Um elemento importante na restrição filogenética é o tamanho corporal. Determinados grupos de organismos estão confinados a certas faixas de tamanho, por exemplo, os insetos não podem exceder um determinado tamanho por causa da sua dependência da respiração traqueal para troca de gases do exterior para seu interior do corpo. Mamíferos, apresentam tamanho maior, os de tamanho de menor apresentam uma grande superfície corporal, em relação a massa, dissipando rapidamente o calor que o animal poderia produzir.

Uma das áreas onde os resultados obtidos via relações alométricas foram bastante promissores, foi no estudo do metabolismo. Este consiste na soma dos processos químicos e físicos que ocorrem em um organismo vivo. Desde o século *XVII* sabe-se que a taxa metabólica segue uma relação alométrica com a massa de um organismo. Por meio de análises realizadas pelo fisiologista alemão Max Rubner, muitos pesquisadores desta época reconheciam que a atividade metabólica de organismos era limitada pela área da superfície corporal de organismos vivos (RUBNER, 1883).

Max Rubner (1883) mediu a taxa metabólica basal, taxa em que a variação da massa é constante, de cães de tamanhos distintos, notando que a taxa metabólica específica, taxa metabólica por unidade de massa corporal, era maior em cães menores e menor em cães maiores. Supondo que isso poderia ser atribuído ao fato de um animal menor ter uma superfície corporal maior em relação a massa, quando comparado a um animal maior. Como cães têm temperatura corporal constante eles devem produzir calor metabólico na mesma proporção que o perdem na superfície. Ao medir a produção de calor por metro quadrado de superfície corporal, Rubner encontrou valores em torno de 1000 kcal/m^2 por dia em cães grandes e pequenos, fornecendo apoio para sua teoria de que a taxa metabólica basal deveria ser governada pela razão superfície/volume:

$$S/V \approx M^{2/3} \quad (2.4)$$

Necessário para manter o animal aquecido. Dessa forma concluiu que animais homeotermos tendem a perder calor para o ambiente, e essa perda é proporcional à

superfície do animal. Animais considerados pequenos, com grandes áreas superficiais em relação ao volume, tendem a perder calor mais rapidamente, sendo necessário um aumento no processo metabólico, a fim de que possam manter a temperatura constante. Esta conclusão ficou conhecida como a lei da superfície de Rubner, vigorando por 50 anos.

2.6 A LEI DE KLEIBER

Em 1932, um químico agrícola suíço que trabalhava na universidade da Califórnia em Davis, coletou todos os dados existentes possíveis até então sobre ritmo metabólico de mamíferos em repouso, de rato (15g) a gado (700 kg), com estes valores encontrou uma relação alométrica, porém, não com o expoente $2/3$, como esperado pela lei de superfície de Rubner, e sim um valor próximo de 0,75. A relação obtida foi:

$$B \sim M^{0,74} \quad (2.5)$$

Kleiber publicou o artigo “*Body size and metabolism*”, com o logaritmo da massa corporal de mamíferos contra o logaritmo da sua taxa metabólica basal (KLEIBER, 1932), encontrando a seguinte relação alométrica:

$$B = 3,52m^{0,74} \quad (2.6)$$

Onde B é a taxa metabólica basal dada em *Watts*.

Dois anos depois novas espécies foram incluídas nesta análise de Kleiber, construindo a famosa curva do rato ao elefante, mostrada na Figura 2. Em 1961, Kleiber considerou que a relação mais viável para a taxa metabólica basal para mamíferos seria:

$$B = 70 * M^{0,75} \text{ kcal/dia} \quad (2.7)$$

Com M dado em quilogramas. As dificuldades experimentais na condução destes experimentos e a variabilidade das condições em que a taxa metabólica basal é medida, implica na não distinção entre os expoentes 0,75, 0,74 ou 0,76. O que realmente importa neste resultado é que difere e muito do resultado obtido por Rubner 0,67. A metodologia adotada por Kleiber difere do padrão de Rubner, neste o expoente $2/3$ surge de atributos puramente geométricos, com o numerador relacionado com a dimensão de área ($2d$) e denominador relacionado

com a dimensão de volume ($3d$). Uma das consequências da lei de Kleiber é o fato da taxa metabólica específica diminuir com a massa:

$$B_{\text{específico}} = \frac{B}{m} \approx \frac{m^{\frac{3}{4}}}{m} \approx m^{-0,25} \quad (2.8)$$

Em outros termos, quanto maior o organismo, menos energia por unidade de massa ele precisa para sobreviver. Quando comparado com um organismo de menor massa, nas devidas proporções, ele comerá menos, resultado que reflete a eficiência de organismos maiores, por exemplo: Em média um elefante necessita em repouso de $0,4W$ por quilograma, uma pessoa apenas $1,2W$ por quilograma, enquanto um rato $9W$ por quilograma. Sintetizando, este expoente descreve de forma bastante satisfatória a variação da taxa metabólica com o tamanho para um grande espectro de seres vivos, desde microrganismos unicelulares até grandes mamíferos, cobrindo cerca de 21 ordens de grandeza, em relação a massa corporal.

Um outro exemplo interessante da lei de Kleiber pode ser verificado na mudança de taxa metabólica que ocorre com bebês logo após o nascimento. Enquanto o feto está no interior do corpo da mãe, o estado metabólico se comporta como de uma pessoa adulta, com massa em torno de 70 kg , tendo uma taxa metabólica específica de aproximadamente $70 \cdot 70^{-0,25}$, em torno de $24\text{ kcal}/(\text{dia} \cdot \text{kg})$, imediatamente ao nascer, mantém o mesmo ritmo metabólico. Em um período aproximado de 36 h , a atividade energética das mitocôndrias das suas células e todo o aparato circulatório e respiratório aumentam até um ponto em que ficam de acordo com a lei de Kleiber, para um bebê de 3 kg seria $70 \cdot 3^{-0,25}$, em torno de $53\text{ kcal}/(\text{dia} \cdot \text{kg})$, mais que duplicando sua taxa metabólica específica (VILLAR RAÚL, et al., 2014).

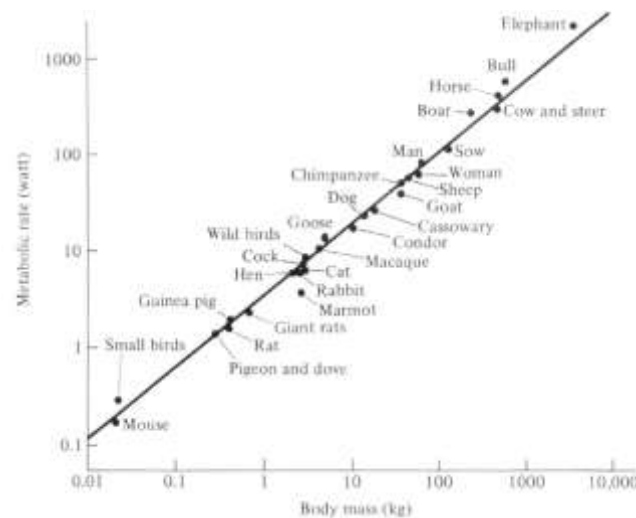


Figura 2: Taxa metabólica em função da massa de animais em repouso. Conhecida como curva do Rato ao Elefante. Fonte: (SHIMIDT & NIELSEN, 1984).

Essa é conhecida como uma das mais importantes generalizações no estudo do metabolismo de organismos, descreve de modo simples regularidades que são encontradas na natureza, e que são conhecidas por sua complexidade, o significado estatístico desta relação com amplo espectro de abrangência, é notório, mas é falho quando se trata de propriedades individuais dos organismos (HEMMINGSEN, 1960). Por um bom tempo, o expoente 0,75 da taxa metabólica permaneceu sem uma explicação plausível, foi somente em 1997 que *West, Brown e Enquist*, um físico e dois biólogos respectivamente, propuseram um modelo baseado na geometria fractal da rede de distribuição de nutrientes em um organismo (quando trata-se de mamífero, seria o sistema circulatório) e na minimização da energia para levar esses nutrientes a todas as partes do organismo. A ideia é que a abrangência da lei de Kleiber está na forma como a rede de nutrientes se organizam nos organismos.

2.7 O MODELO DE WEST, BROWN E ENQUIST

As hipóteses fundamentais do modelo que serão apresentadas foram motivadas pela maneira como acontece a distribuição de nutrientes em diferentes sistemas biológicos, como o sistema cardiovascular de mamíferos e o sistema vascular de plantas. Vale lembrar que os mecanismos de bombeamento para se levar estes nutrientes, nestes casos citados como exemplo, são bem distintos. No caso de mamíferos o bombeamento dar-se á pelo coração, em plantas, gradientes de concentração e pressão de vapor são os responsáveis por esta ação. As afirmações do modelo, são em tese uma razoável afirmação de características universais que as redes de transporte de nutrientes devem satisfazer e que são as bases para entendimento de questões fundamentais do metabolismo em função da massa (WEST *et al.*, 1997). As hipóteses formuladas por *West, Brown e Enquist* são as seguintes:

1. A rede de distribuição e transporte de nutrientes em um organismo tem padrão de ramificação do tipo fractal e preenche todo o volume do organismo, e o volume de serviço preenchido a cada etapa de ramificação é preservado.
2. As ramificações finais em que são executadas as trocas diretas de nutrientes com as células, que no caso do sistema circulatório de mamíferos são os capilares e no sistema vascular das plantas são os pecíolos, possuem dimensões fixas, equivalente a afirmarmos que grandezas relacionadas a última ramificação, como comprimentos e espessuras são invariantes em relação a massa do organismo.
3. A energia gasta para distribuir os nutrientes no organismo é a menor possível, equivalente a afirmarmos que a impedância total à passagem de nutrientes é minimizada.

Apesar de parecer óbvia, a primeira afirmação do modelo é justificada pelo fato de que todas as células precisam receber alimentos, acarretando que a rede de nutrientes tem que chegar a todas as partes do corpo, com padrão fractal, ou seja, permitindo aumento da superfície de troca sem aumento do volume do órgão. A frente dedicaremos uma sessão para este tópico.

A segunda hipótese, por meio de observações experimentais, comprova-se que em mamíferos, dimensões e medidas relativas aos capilares, são invariantes

em relação a massa do organismo, ou seja, o tamanho dos seres vivos muda pelo fato de variar o número de células e não o tamanho das células que os compõem, tanto os receptores de oxigênio como os glóbulos de sangue.

E por último, a terceira e essencial hipótese pode ser justificada com o fato de que se o transporte de nutrientes para as células gastasse energia em excesso, esse processo deixaria de ser efetivo, inviabilizando a existência de organismos maiores e mais complexos. É notório que essa hipótese restringe a rede fractal dentre diversas possibilidades, por possibilitar aumento na área de superfície de troca sem aumento de volume, resultando na eficiência da distribuição de nutrientes para os organismos.

2.8 ESQUEMA DO MODELO

O modelo é similar ao esquema do sistema cardiovascular, conforme Figura 3. A rede de nutrientes é composta por $N+1$ gerações de tubos que se ramificam, o tamanho dos tubos decrescem de maneira regular até tubos menores que são os capilares, cujas dimensões finais são as mesmas das hemácias.

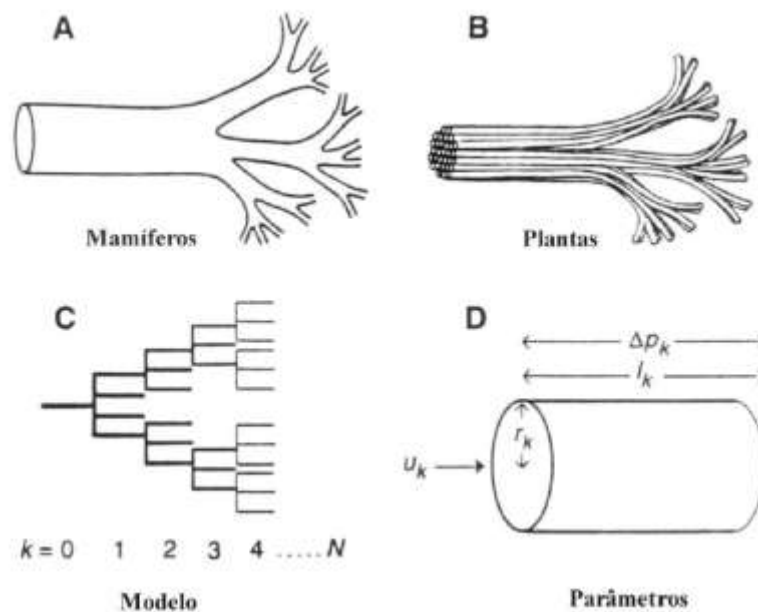


Figura 3: (A) rede de distribuição de alimentos em mamíferos, (B) vascularização de plantas, (C) esquema para o modelo de WBE e (d) são os parâmetros que descrevem o modelo.

Fonte: (WEST *et al.*, 1997).

Cada nível de ramificação é descrito por um nível k . Neste nível, a velocidade média do fluido transportado é u_k , os tubos possuem comprimento l_k , e raio r_k , estando estes submetidos a uma diferença de pressão Δp_k . Com $k=0$ o

valor correspondente a aorta e $k=N$ os capilares, a cada passagem de um nível $k-1$ para um nível k , o número de vasos será dado por:

$$N_k = n_0 \cdot n_1 \dots n_k = \prod_{j=0}^k n_j \quad (2.9)$$

A ramificação da rede é descrita pelos fatores de escala γ_k e β_k , dados pelas seguintes razões:

$$\gamma_k = \frac{l_{k+1}}{l_k} \quad \text{e} \quad (2.10)$$

$$\beta_k = \frac{r_{k+1}}{r_k} \quad (2.11)$$

onde l_{k+1} é o comprimento do tubo ramificado após mudança de um nível k para o nível $k+1$ e l_k o comprimento do tubo no nível k antes do processo de ramificação. O mesmo entendimento pode ser utilizado na interpretação do fator β_k , que relaciona os valores dos raios dos tubos ramificados.

O volume da taxa de fluxo pelo tubo é dado por:

$$\dot{Q}_k = \pi r_k^2 \bar{u}_k \quad (2.12)$$

onde $\bar{u}_k$ é a velocidade média do fluxo. Considerando a eq. (2.9) e que o fluido é conservado, a vazão total será a mesma em todos os níveis da rede, dada por:

$$\dot{Q}_0 = N_k \pi r_k^2 \bar{u}_k = N_k \dot{Q}_k = N_c \pi r_c^2 \bar{u}_c. \quad (2.13)$$

Considerando agora a suposição 2 do modelo, que afirma que as grandezas relacionadas aos capilares são invariantes, implica que r_c e $\bar{u}_c$ não variam com a massa. Resultando que:

$$\dot{Q}_0 \sim N_c \quad (2.14)$$

Este fluido transportado nos tubos leva oxigênio e nutrientes para todas as células do organismo, permitindo afirmar que a taxa metabólica B é proporcional a vazão do fluido $\dot{Q}_0$. Por tanto,

$$B \sim N_c \sim M^b \quad (2.15)$$

Onde B é o metabolismo, M a massa e b o expoente metabólico. Predizendo que o número total de vasos deverá escalar com B .

Para caracterizar a ramificação da rede, os fatores de escala γ_k , β_k e n_k devem ser convencionados a auto similaridade fractal da rede, ou seja, $\gamma_k = \gamma$,

$\beta_k = \beta$ e $n_k = n$, todos independentes de k . Sendo $N_c = n^N$, o número de gerações de ramificações relaciona-se com o tamanho conforme equação a seguir,

$$N = \frac{b \ln(\frac{M}{M_0})}{\ln n}. \quad (2.16)$$

Onde M_0 é uma escala de normalização. Assumindo que as unidades capilares são invariantes, consequentemente teremos, $(\gamma\beta^2)^{-N} \propto M$, usando esta relação na eq. 2.16, teremos:

$$b = -\frac{\ln n}{\ln(\gamma\beta^2)} \quad (2.17)$$

Para esta auto similaridade fractal, o número de ramificações deverá aumentar na proporção geométrica de $N_k \sim n^k$, já que seu tamanho geométrico cresce do nível 0 até o nível n . O volume total V_b de fluido na rede é dado por:

$$V_b = \sum_{k=0}^N N_k V_k = \sum_{k=0}^N \pi r_k^2 l_k n^k \quad (2.18)$$

Uma ramificação com padrão fractal é uma estrutura que garante que as células de um organismo sejam supridas com nutrientes, a rede ramifica-se até um grupo de células, essa ramificação produz um volume de serviço que supre cada capilaridade, o volume de suprimento para a rede total pode ser aproximado pela soma de esferas cujo diâmetro é típico de um tubo no nível k , isto é, $\frac{4}{3} \pi r (\frac{l_{k+1}}{2})^3 N_{k+1}$, esta aproximação pode ser feita considerando $r_k \ll l_k$ e um número de ramificações N grande, a estimativa do valor do volume não depende especificamente de um nível específico, embora possa ser considerada mais precisa para um nível k , a condição que o volume fractal seja preservado de uma geração para outra pode então ser expressa como:

$$\frac{4}{3} \pi (\frac{l_k}{2})^3 N_k \approx \frac{4}{3} \pi (\frac{l_{k+1}}{2})^3 N_{k+1} \quad (2.19)$$

Resultando em:

$$\gamma_k^3 = \frac{N_K}{N_{k+1}} = 1/n \text{ e} \quad (2.20)$$

$$\gamma = n^{-1/3} \quad (2.21)$$

este resultado é independente de k , é uma propriedade geral para o sistema fractal que está sendo considerado.

Se considerarmos o modelo de tubo rígido, onde na ramificação a área de uma seção transversal do tubo pai é igual a área da seção transversal dos tubos filhos, teremos,

$$\pi r_k^2 = n \pi r_{k+1}^2 \quad (2.22)$$

onde obtemos,

$$\beta_k = n^{-1/2} = \beta \quad (2.23)$$

Independente de k . Quando este resultado é combinado com o valor encontrado para γ e substituindo na eq. 2.17, teremos $b=3/4$, então $B \sim M^{3/4}$. O valor de b pode ser obtido também via minimização da impedância hidrodinâmica considerando a terceira hipótese do modelo, utilizando os multiplicadores de Lagrange (WEST *et al.*, 1997).

Além deste resultado para o expoente metabólico, outros interessantes podem ser obtidos, como que o número total de capilares N_c cresce com $M^{3/4}$, o volume dos alveolus pulmonares $V_A \approx V^{1/4}$ e o volume de serviço de cada capilaridade escala com $M^{1/4}$ (WEST *et al.*, 1997). Também se demonstra com o modelo que a pressão arterial e a velocidade do sangue na aorta são independentes da massa e que o raio da aorta é proporcional a $M^{3/8}$. Abaixo temos uma Tabela 1 com alguns valores observados e outros previstos com modelo.

Tabela 1. Relações alométricas para variáveis do sistema circulatório de mamíferos. Fonte (WEST *et al.*, 2000).

Variável cardiovascular	Expoente via modelo	Expoente observado
Raio da aorta	0,375	0,36
Volume de sangue	1	1
Número de capilares	0,75	Não há dados
Velocidade do sangue na aorta	0	0,07
Densidade de Capilares	-1/12	-0,083
Taxa metabólica	0,75	0,75
Pressão arterial	0	0,03

Uma consequência que não condiz é o fato da velocidade em todos os dutos ser a mesma, da aorta aos capilares, obviamente não é de se esperar que se cumpra nos capilares, por serem mais estreitos, e para que a troca de nutrientes com as células seja eficaz, a velocidade é reduzida a alguns milímetros por segundo, enquanto na aorta é da ordem de dezenas de centímetros por segundo. Esta diferença possivelmente aparece pelo fato do modelo não levar em conta a viscosidade no movimento do sangue e o fato do caráter pulsativo do fluxo sanguíneo (VILLAR RAÚL, et al., 2014). (KOZLOWSKI & KONARZEWSKI, 2004) criticaram severamente este modelo e não concordaram com o expoente universal. (ZIANIS & MENCUCCINI, 2004) e (PILLI *et al.*, 2006) simularam diferentes expoentes e aplicaram sobre o modelo original em diferentes tipos florestais concluindo que este modelo é confiável, porém, sem o expoente universal.

Em um outro trabalho publicado em 2009, intitulado: *Teoria quantitativa geral para estrutura e dinâmica de uma floresta*, West, Brown e Enquist, utilizaram relações alométricas de escala com base no metabolismo e na biomecânica para quantificar como as árvores utilizam recursos, preenchem espaços e crescem. Uma das hipóteses testadas neste trabalho é a seguinte:

Propriedades geométricas e dinâmicas de árvores em uma floresta e de galhos em uma árvore, escalam de modo similar, de modo que uma floresta inteira pode ser descrita matematicamente e se comportar estruturalmente e funcionalmente como uma versão reduzida da ramificação da maior árvore contida nesta floresta.

Equivalente a afirmarmos que um número considerável de árvores com troncos de espessuras grandes e pequenas são semelhantes aos galhos de espessuras grandes e pequenos de um ramo da maior árvore desta floresta (WEST *et al.*, 2009), estas hipóteses foram confirmadas via comparação dos expoentes dos gráficos de distribuição de frequência de espessuras de galhos e espessuras de troncos de uma área delimitada da floresta. Os resultados obtidos dos expoentes para as três espécies distintas giraram em torno de -2, conforme Figura 4.

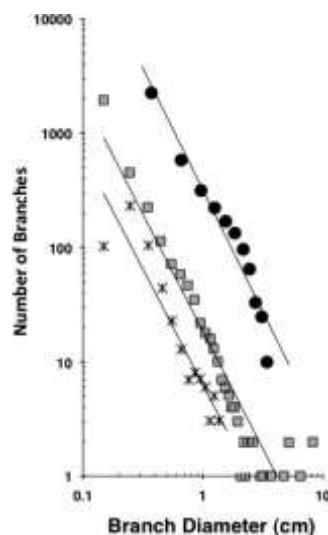


Figura 4: Distribuição de tamanho de galhos para três espécies: *Cryptomeria sp.* (círculo), *Picea sp.* (estrela) e *Betula sp.* (quadrado), o expoente calculado para as três espécies respectivamente foram, -2,13, -2,03 e -2,05. **Fonte:** (WEST *et al.*, 2009).

Até então, neste trabalho, citamos por diversas vezes a palavra fractal, muitas vezes levando o leitor a compreender que se trata de um padrão ou uma estrutura que tem por função tornar eficiente os processos estruturais e fisiológicos da natureza. Na seção seguinte iniciaremos uma breve discussão sobre as estruturas ditas como fractais, definindo, exemplificando e explicitando o modo como estas estruturas estão presentes nos processos naturais.

2.9 FRACTALIDADE E COMPLEXIDADE

Na natureza podemos notar que a matéria se apresenta de diferentes formas e estruturas, com os mais diversos graus de aleatoriedade e complexidade que podemos imaginar, são exemplos: rochas, montanhas, costas litorâneas, nuvens, sistema de venação de folhas, bacias hidrográficas e árvores. Todas estas estruturas possuem em comum o fato de não serem descritos, em sua totalidade, pela geometria euclidiana. Nesta podemos idealizar objetos com dimensão zero, uma dimensão, duas dimensões e três dimensões, configurando objetos com dimensão inteira.

A palavra fractal foi utilizada pela primeira vez para definir certas estruturas por Benoit Mandelbrot (1975), matemático polonês, Figura 5, que difundiu amplamente a geometria fractal, ficando conhecido como o pai da geometria fractal. Mandelbrot percebeu a impossibilidade, em muitos casos, de

descrever as reais formas da natureza, Figura 6, utilizando somente os pressupostos da geometria euclidiana, propondo a geometria fractal para descrever objetos reais.

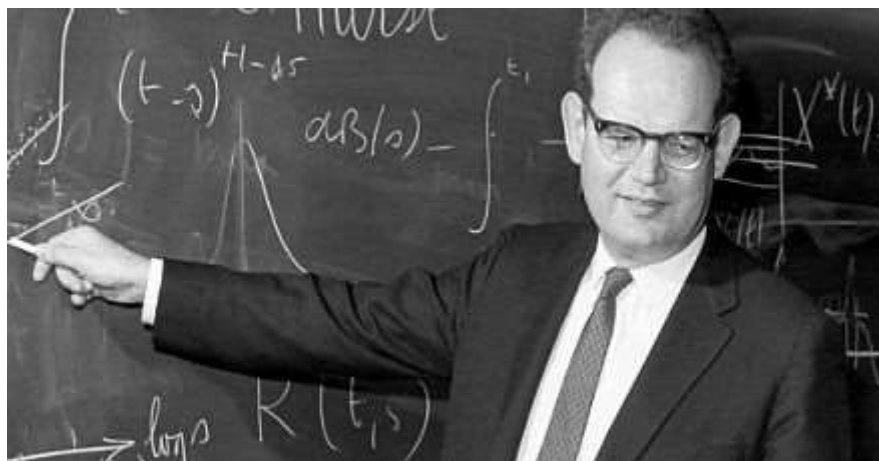


Figura 5: Benoit Mandelbrot, precursor da geometria fractal. **Fonte:** <http://forward.com/culture/166094/benoit-mandelbrot-influenced-art-and-mathematics/>.

Ao realizar uma consulta em um dicionário em latim resultou no adjetivo fractus, do verbo frangere, que significa quebrar, fracionar. Em um de seus livros, Mandelbrot afirma o seguinte: “*Nuvens não são esferas, montanhas não são cones, linhas costeiras não são círculos, cascas de árvores não são suaves e nem mesmo a luz caminha em linha reta*” (MANDELBROT, 1982), referindo-se aos fractais na natureza e a não validade dos pressupostos euclidianos em sua descrição.



Figura 6: Fractais na natureza. Na esquerda uma couve flor e a direita galhos de uma árvore, a propriedade de auto similaridade pode ser observada nesses casos. **Fonte:** http://lounge.obviousmag.org/por_tras_do_espelho/assets_c/2012/07/brocolifractal18148.html. & http://lounge.obviousmag.org/por_tras_do_espelho/assets_c/2012/07/arvore-fractal-18142.html.

Um fractal é um objeto auto similar sob diferentes graus de ampliação que são descritos por números não inteiros que variam entre a dimensão topológica e a euclidiana. Estes valores são o que definimos de dimensão fractal D_f do objeto (FUSELER *et al.*, 2007). Fractais podem também ser obtidos da iteração de processos matemáticos ou de um processo de construção geométrica. Mandelbrot construiu um dos primeiros fractais obtidos a partir da iteração de um algoritmo de simples construção utilizando seguinte relação de recorrência:

$$Z_{n+1} = Z_n^2 + c \quad (2.24)$$

$$Z_0 = 0$$

Esse processo repetido infinitamente gerou o fractal, Figura 7:

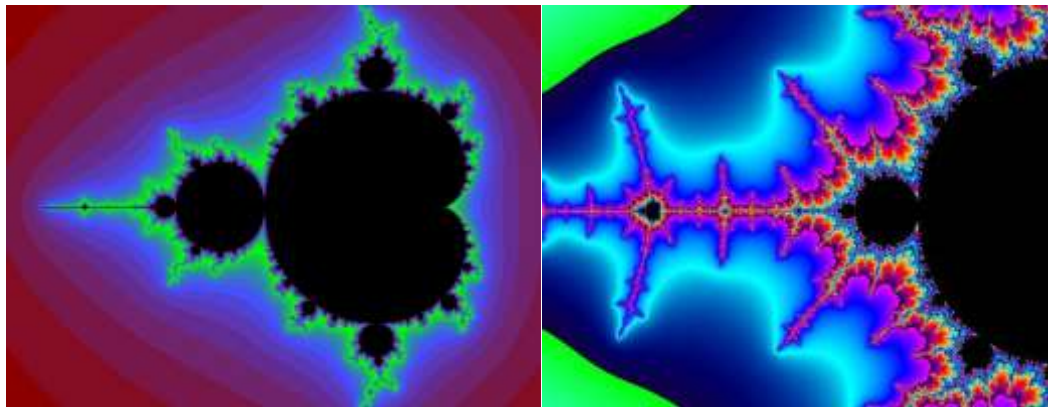


Figura 7: Conjuntos de Mandelbrot. Obtidos pela interação de um processo matemático. Fonte: http://lounge.obviousmag.org/por_tras_do_espelho/assets_c/2012/07/arvore-fractal-18142.html

A auto similaridade é vista quando uma pequena porção destas estruturas é idêntica a uma réplica do todo. A complexidade vem da impossibilidade de sua representação integral, pois possui detalhes e saliências infinitas, a dimensão não inteira é relacionada ao grau de irregularidade, refletindo o quão densamente ele ocupa o espaço métrico em que ele existe.

2.10 DIMENSÃO FRACTAL D_f

Uma compreensão de D_f pode ser dada determinando a dimensão de objetos com auto similaridade. Considere um seguimento dividido em quatro partes iguais, Figura 8 de modo que cada parte seja igual ao seguimento original multiplicada por um fator de escala $\frac{1}{4}$, nos levando a concluir que o seguimento de reta é invariante mediante o fator de escala escolhido.



Figura 8: Seguimento de reta utilizado na descrição de D_f .

Para este caso podemos utilizar a expressão $k=1/\varepsilon$ onde k é o número de divisões que se pretende fazer e ε um fator de redução ou tamanho de cada seguimento.

Estendendo esta ideia para um quadrado que forma um plano, Figura 9, resulta em 16 partes iguais ou 4^2 , a expressão fica $k=1/\varepsilon^2$.

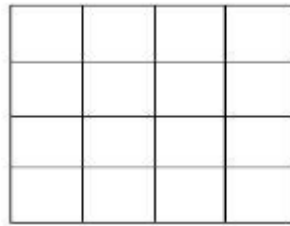


Figura 9: Quadrado utilizado descrição de D_f .

Para um cubo que forma um volume resulta em 64 partes iguais ou 4^3 , Figura 10, a expressão fica $k=1/\varepsilon^3$.

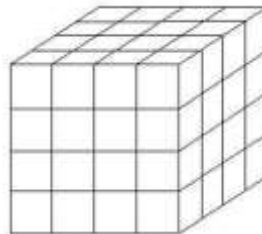


Figura 10: Cubo utilizado descrição de D_f .

Independentemente do número de divisões, sendo k o número de parte iguais e ε um fator de escala ou tamanho do seguimento, podemos fazer a generalização, $k=1/\varepsilon^D$, onde D é a dimensão. Onde para uma reta $D=1$, plano, $D=2$ e um cubo $D=3$. Desta generalização tem-se:

$$K = \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^D \quad (2.25)$$

aplicando o logaritmo dos dois lados da equação, teremos:

$$D = \frac{\log k}{\log\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)} \quad (2.26)$$

Reescrevendo na forma,

$$D_f = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log k(\varepsilon)}{\log\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)} \quad (2.27)$$

Onde D é a dimensão fractal ou dimensão de *Hausdorff – Besicovitch*. Como aplicação vamos calcular a dimensão fractal de objetos clássicos da literatura, começaremos com o cálculo da curva de Koch.

2.11 CURVA DE VON KOCH

Construída pelo matemático sueco Helge Von Koch, em 1904. O processo de geração da curva inicia-se com uma reta, esta é dividida em três partes iguais, o segmento do meio destas partes é substituído por um triângulo equilátero sem sua base, este processo é repetido indefinidamente a cada novo seguimento de reta formado. Conforme visto na Figura 11.

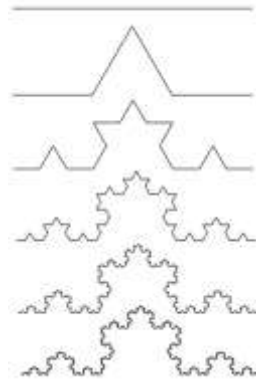


Figura 11: Processo de iteração da curva de Koch. Fonte: <https://ojovemarquiteto.wordpress.com/2010/05/31/ron-eglash-e-os-fractais-africanos/>.

Para o cálculo de D_f , o fator de escala será $\varepsilon=1/3$, gerando quatro seguimentos de tamanhos iguais, $k=4$. Substituindo na Eq. 2.26, teremos:

$$D = \frac{\log 4}{\log\left(\frac{1}{\frac{1}{3}}\right)} \approx 1,26$$

2.12 TRIÂNGULO DE SIERPINSKI

Para construí-lo iniciamos com um triângulo equilátero, próximo passo é inscrever outro triângulo equilátero com vértice no terço médio de cada lado do triângulo equilátero inicial, depois remove-se o novo triângulo formando-se outros

três triângulos. Repetindo esse procedimento a partir dos triângulos gerados. As etapas podem ser observadas na Figura 12.

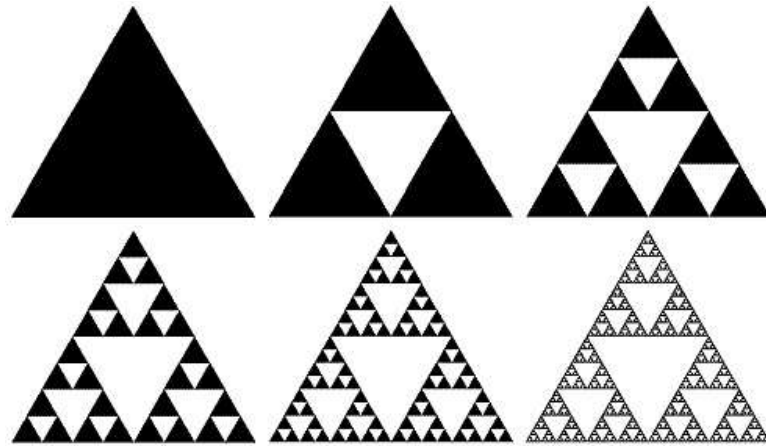


Figura 12: Processo de iteração para formação do Triângulo de Sierpinski.

Fonte: <http://math.bu.edu/DYSYS/chaos-game/node2.html>.

Para o cálculo de D_f , o fator de escala será $\varepsilon=1/2$, gerando três triângulos de tamanhos iguais, $k=3$. Substituindo na Eq. 2.26, teremos:

$$D = \frac{\log 3}{\log \left(\frac{1}{\frac{1}{2}} \right)} \approx 1,59$$

2.13 CONJUNTO DE CANTOR

O processo para se obter o conjunto de Cantor é a partir de uma reta, remover um terço central, restarão dois segmentos de tamanho $1/3$ do original, remove-se novamente $1/3$ central dos segmentos gerados, repete-se nos segmentos gerados os procedimentos a partir segundo passo, as etapas de forma resumida encontram-se na Figura 13.



Figura 13: Processo de iteração para formação do conjunto de Cantor.

Fonte: <https://transversos.wordpress.com/tag/conjunto-de-mandelbrot/>.

Para o cálculo de D_f , o fator de escala será $\varepsilon=1/3$, gerando dois seguimentos de tamanhos iguais, $k=2$. Substituindo na Eq. 2.26, teremos:

$$D = \frac{\log 2}{\log\left(\frac{1}{\frac{1}{3}}\right)} \approx 0,63$$

2.14 TAPETE DE SIERPINSKI

Este fractal é obtido a partir de um quadrado de tamanho de lado l . As etapas de iteração são as seguintes, divide-se o quadrado em nove quadrados de tamanhos iguais, e depois elimina-se o quadro central de cada central formado, aplica-se este processo nos 8 quadrados restantes, e repete-se esse processo sucessivamente. As etapas de iteração deste fractal podem ser vistas na Figura 14.

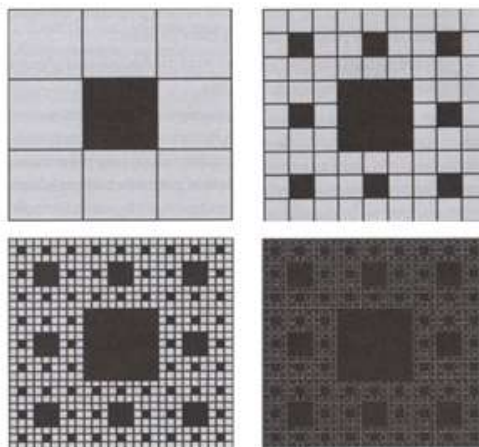


Figura 14: Processo de iteração para formação do Tapete de Sierpinski.

Fonte: <http://matematicadorenato.blogspot.com.br/2016/04/fractais-tapete-de-sierpinski.html>

Para o cálculo de D_f , o fator de escala será $N=1/3$, gerando oito quadrados de tamanhos iguais, $k=8$. Substituindo na Eq.2.26, teremos:

$$D = \frac{\log 8}{\log\left(\frac{1}{\frac{1}{3}}\right)} \approx 1,89$$

2.15 MÉTODO DE BOX – COUNTING

Uma das maneiras para se calcular a dimensão fractal de estruturas naturais é utilizando o método de contagem de caixas chamado *Box – Counting*. O procedimento consiste na sobreposição de um objeto fractal por grades quadradas, conta-se quantos quadrados $N(\varepsilon)$ contêm pelo menos um ponto da forma fractal analisada, diminui-se de forma progressiva o tamanho dos quadrados de modo a aumentar o número de quadrados que interceptam o objeto fractal (PEITGEN, 1993). Este procedimento pode ser visualizado na Figura 15. A dimensão fractal resultante é calculada pela inclinação da reta do gráfico log-log de $N(\varepsilon)$ x ε (SILVA, 2002).

Para duas iterações a equação para cálculo de D_f seria,

$$D_f = \frac{\log(n_2) - \log(n_1)}{\log\left(\frac{1}{\varepsilon_1}\right) - \log\left(\frac{1}{\varepsilon_2}\right)} \quad (2.28)$$

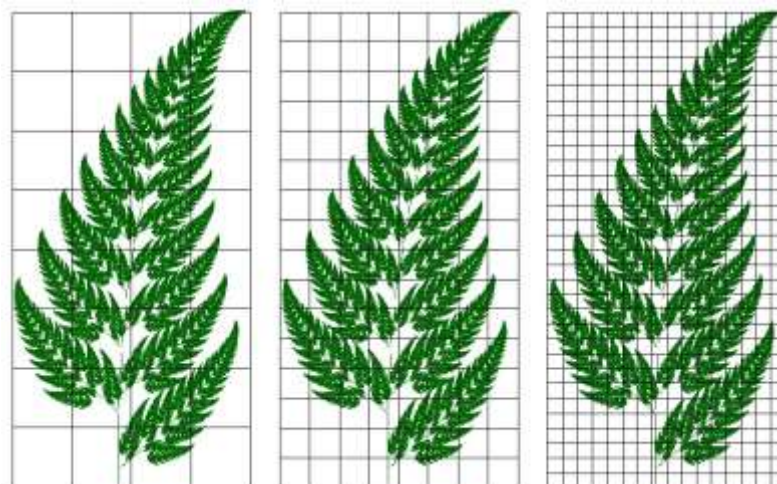


Figura 15: Procedimento prático para obtenção de D_f via método de *box counting*.

Fonte: <http://www.theomparticle.com/HomogeneityAndFractality.html> [Website, cited May 2016].

O método é amplamente utilizado para estimar a dimensão de uma variedade de objetos fractais. A técnica não se limita a estimar as dimensões dos objetos no plano, como a curva de um litoral, podendo ser estendido para sondar a dimensionalidade de objetos em espaços multidimensionais.

3. BIOMA AMAZÔNICO

Considerada a maior floresta tropical do planeta, a Floresta Amazônica se estende por uma área de 5 milhões de km^2 , uma abrangência geográfica de dimensões continentais dos quais aproximadamente 3 milhões de km^2 encontram-se no território brasileiro compreendendo quase que metade do território. Apresenta temperaturas anuais altas, as médias dos meses mais quentes estão entre 24 e $30^{\circ}C$ e dos meses mais frios 18 e $24^{\circ}C$. As chuvas são distribuídas ao longo de todo o ano, os meses mais chuvosos entre novembro e março e de seca de maio a setembro, e os meses de abril e outubro são considerados de transição entre uma estação e outra, com precipitação anual de 2300 mm (HOREL et al., 1989).



Figura 16: Bioma amazônico, à esquerda área banhada pelo rio Negro.

Fonte: <http://www.naturezaeconservacao.eco.br/2016/01/floresta-amazonica-caminha-para-se.html>.

À direita área de floresta de igapó.

Fonte: http://obotanicoaprendiznaterradosespantos.blogspot.com.br/201011_01_archive.html.

Considera-se a diversidade desse bioma a maior do planeta. Em cada hectare de floresta podemos afirmar que existem aproximadamente 300 espécies de árvores com mais de 10 cm de diâmetro à altura do peito (DAP), representando um número maior do que todas as espécies de árvores da Europa inteira (RIBEIRO, 1990). A maior bacia hidrográfica do planeta encontra-se na região amazônica, formada pelo rio Amazonas, o mais extenso rio do mundo e que nasce na cordilheira dos Andes, a mais de 4 mil metros de altitude, e seus milhares de afluentes que são resultado direto da pluviosidade que atinge a depressão topográfica regional (AB' SABER, 2003).

Distintos ecossistemas estão compreendidos neste bioma, como florestas densas de terra firme, várzea, igapó, campos alagados, savanas, refúgios montanhosos e formações pioneiras. Neste capítulo iremos nos ater aos principais ecossistemas encontrados em nossa área de estudo, dividindo os ecossistemas em dois tipos: Os que sofrem ações periódicas dos rios, chamados de florestas de várzea e igapós e os considerados de terra firme, Figura 17 (LISBOA et al., 1991).

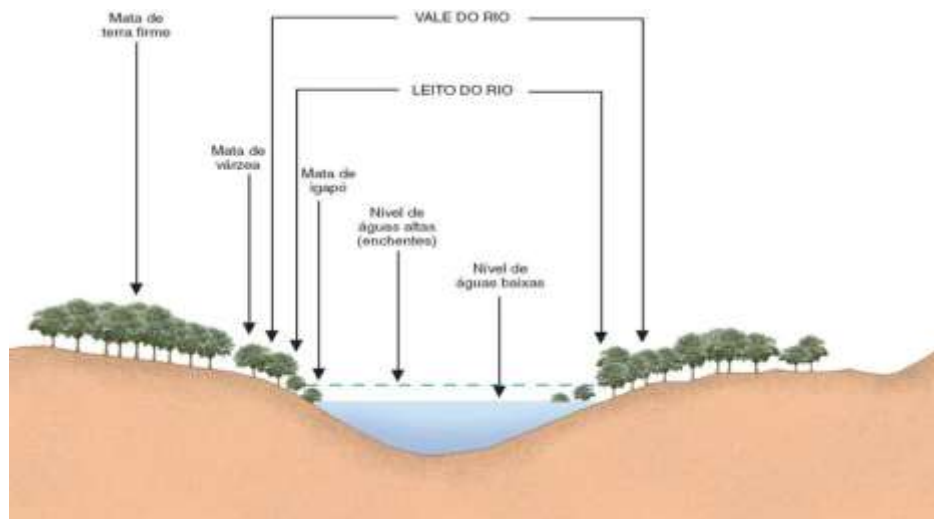


Figura 17: Perfil topográfico da região amazônica. Denotando os principais ecossistemas existentes. Fonte: <http://www.naturezaeconservacao.eco.br/2016/01/floresta-amazonica-caminha-para-se.html>.

3.1 FLORESTA DE TERRA FIRME

A Floresta de Terra Firme é aquela que se eleva acima da planície de aluvião, as terras altas, em cota superior ao nível das enchentes, onde são predominantes as espécies vegetais nobres, as chamadas de lei, com alta densidade (PANDOLFO, 1973). A vegetação dessas áreas é bastante diversificada, abrangendo em torno de 334 milhões de hectares, concentrando uma riqueza imensa de madeiras ainda praticamente inexploradas (LOUREIRO, et al., 1979). Os solos das florestas de terra firme são constituídos por latossolos que, juntamente com os podzólicos vermelhos, constituem os solos mais representativos da região. A vegetação destes solos é a floresta pluvial densa, que se estende principalmente nas partes Norte, Sul e Leste da bacia Amazônica (FALESI, 1984). Um estudo com um número razoável de espécies desses ecossistemas revelou que o processo de especiação mais comum é o simpátrico, quer dizer, sem que houvesse uma separação geográfica, este processo que engloba várias espécies, ocorreu possivelmente pela deriva continental que isolou

os grupos de espécies em continentes distintos. Uma etapa posterior seria no nível continental, com elevação dos Andes e o isolamento da costa atlântica e pacífica, somado a isto os climas mais secos no Nordeste, isolando as florestas amazônica e atlântica (PRANCE, 1972).

Na distribuição da floresta de terra firme podemos encontrar os seguintes ecossistemas: Floresta Tropical Úmida de Terra Firme sobre solos argilosos, também chamado de Floresta Densa e a Floresta de Baixo.

As florestas densas situam-se em áreas altas, com solo argiloso, bem drenado retendo água e nutrientes, porém, pobre em nutrientes, essas condições influenciam nas estratégias vegetais favorecendo árvores de dossel com grandes copas que captam energia. Nessas áreas, Figura 18, concentram-se boa parte do recurso madeireiro da região amazônica, possuindo uma grande extensão com cerca de 300 milhões de hectares e uma diversidade florística que supera a de qualquer outro ambiente natural (LISBOA et al., 1991).



Figura 18: Floresta densa de terra firme. À direita, <http://docplayer.com.br/6855003-Dominios-morfoclimaticos-biomas-brasileiros.html> & À esquerda. Fonte: http://terrapulsante.blogspot.com.br/2012_05_01_archive.html.

As chamadas áreas de baixo, Figura 19, de terra firme são encontradas em locais de baixo relevo, próximos aos igarapés, representando condições similares aos das florestas inundáveis (RANZANI, 1980).



Figura 19: Floresta de terra firme área de baixio.

Fonte: <http://eco-financas.org.br/2014/02/sem-copa-verde/>

Possuem menor biomassa quando comparadas com áreas de floresta densa que denotam grandes quantidades de árvores de dossel. Variando de 25-30 m (NASCIMENTO & LAURANCE, 2002). A bacia hidrográfica desses locais retira lentamente a argila resultando em solos arenosos, pouco férteis e instáveis, por esta razão as raízes de árvores escoras e tabulares são comuns nestes ecossistemas, apesar da localização e o solo não é completamente encharcado o ano todo.

3.2 FLORESTA DE VÁRZEA

Essas áreas compreendem regiões que são periodicamente inundadas com grandes faixas de terras de até 100 km de extensão, formadas pela deposição de sedimentos dos rios de águas brancas, também chamadas de águas barrentas, em geral o rio Solimões, Madeira ou Amazonas, esses leitos instáveis podendo apresentar o fenômeno de terras caídas, Figura 20. A flutuação sazonal do nível das águas leva ao transbordamento lateral ocasionando inundações de extensas planícies conhecidas como florestas inundáveis, ocupando o equivalente a 200.000 km² (PREIG, 1993).



Figura 20: Floresta de várzea. Arquivo pessoal.

Devido a deposição de matéria orgânica submersa combinado com a alta temperatura e ação de fungos e bactérias, essas regiões são mais férteis que as regiões de floresta de terra firme (RIBEIRO, 1990). Quando comparadas com áreas de igapó, as árvores de várzea possuem uma concentração média de nutrientes quatro vezes superior, com uma produtividade acima do solo equivalendo praticamente ao dobro das florestas de igapó (FURCH, 1997), se estabelecendo em locais onde a altura do nível dos rios é inferior a 7m e o tempo médio de inundação de 228 dias (PIEIDADE et al., 2002). Apresentando uma área de alta diversidade florística, com menor diversidade do que a terra firme, possuindo fauna e flora adaptadas às condições hidrológicas sazonais (KALLIOLA, et al., 1993), muitas das espécies que são encontradas nestas áreas são consideradas provenientes de florestas de terra firme, que ao longo do tempo desenvolveram mecanismos de tolerâncias aos períodos de inundação (KUBITZKI, 1989).

A dinâmica de enchentes e vazantes aliadas as fortes chuvas, características das regiões de clima tropical, produzem erosões e deposição de sedimentos induzindo certa instabilidade nestas áreas, gerando e mantendo uma grande diversidade biológica (JUNK, 1989).

O regime de cheias e vazantes possui papel imprescindível na descrição e formação das áreas de várzea, as enchentes são altamente influenciadas por variações climáticas relacionadas aos índices elNiño Oscilação Sul, (ENOS), por

anomalias no índice de oscilação sul e na temperatura da superfície do mar (SCHÖGART, et al., 2005). Por ser um fenômeno previsível, condições fisiológicas e metabólicas das espécies dessas regiões se ajustam para benefícios e/ou desvantagens que são decorrentes das mudanças de cheias dos rios.

3.3 FLORESTAS DE IGAPÓ

As florestas de igapó representam uma área de aproximadamente 15.000 km², com árvores mais espaçadas, com até 30m de altura, podendo estar contidas em pequenas porções de áreas de várzea ou terra firme, sustentadas por pulsos de inundação (RIZZINI, et al., 1988). Na superfície das águas é comum e conhecidas grandes folhas das vitória-régias, Figura 21.



Figura 21: Floresta de Igapó. À esquerda inundação por águas do rio Negro, e à direita por águas claras. Fonte: <http://geoconceicao.blogspot.com.br/2010/05/bioma-floresta-amazonica.html>.

Por um longo período de até 240 dias ou de forma permanente, ficam submersas, sendo inundadas por rios de águas negras ou claras com pH ácido, que por terem suas origens em regiões de baixo relevo não transportam tanto material particulado. Como os rios de águas brancas que dão origem as florestas de várzea, depositando poucos sedimentos e nutrientes, isto deve-se ao fato de serem banhadas por rios que drenam os escudos da Guiana e do Brasil Central, (JUNK, 1989). Esses solos com drenagem insuficiente são arenosos, pobres em nutrientes, com bastante espécies endêmicas e com aspecto pantanoso, implicam em maiores dificuldades para árvores crescerem e produzirem frutos, muitas vezes com intervalos de anos para produção de frutos, aumentando o tempo para alcançarem a maturidade. As condições físico-químicas causadas pela periodicidade das inundações, induz resposta da biota por meio de adaptações fisiológicas,

morfológicas e comportamentais, construindo um ambiente em função das estratégias de adaptação (JUNK, 1989).

A dinâmica de enchentes e vazantes, características físicas, topográficas, bem como a proximidade das áreas de terra firme, limitam e condicionam a produtividade e a diversidade biológica das áreas de igapó, mas não a existência destas florestas, ainda que, condicionada a um tempo mínimo de vazante (FERREIRA, 2000).

4. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos o local onde as coletas foram conduzidas e os métodos e procedimentos utilizados em todas as etapas, bem como uma descrição das espécies vegetais coletadas.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MUNICÍPIO

O município de Coari localiza-se na parte central do estado do Amazonas, Figura 22, possuindo altitude de *40m* acima do nível do mar, o clima é equatorial quente e úmido, correspondendo à classificação de Köppen ao tipo Ami (PEEL et al., 2007), com precipitação pluvial anual igual ou superior a 2.000 mm e com médias anuais de temperatura e umidade relativa de 27°C e 84%(INMET, 2010), respectivamente.

Em 1932, Coari foi elevada à categoria de cidade e atualmente possui o segundo maior produto interno bruto do Amazonas. É a quarta cidade mais rica da região norte do país, com população estimada em 83.929 habitantes (IBGE, 2016), ocupando uma área de 57.230 *km*², Figura 23. Essa posição deve-se à extração de petróleo e gás da base petrolífera de Urucu, que possui uma produção média de petróleo de mais de 50 mil barris e 10,36 mil metros cúbicos de gás natural por dia (PETROBRÁS, 2013).

A zona urbana está localizada próxima ao Rio Solimões entre os Lagos Coari e Mamiá, situado nas coordenadas 4° 6' 22'' de latitude Sul e a 63° 3' 21'' de longitude a oeste, na região conhecida como Médio Solimões, esta compreende os municípios de Anamã, Anori, Coari, Beruri, Codajás e Caapiranga, distante cerca de 463 *km*, por via fluvial, da capital do estado, Manaus.

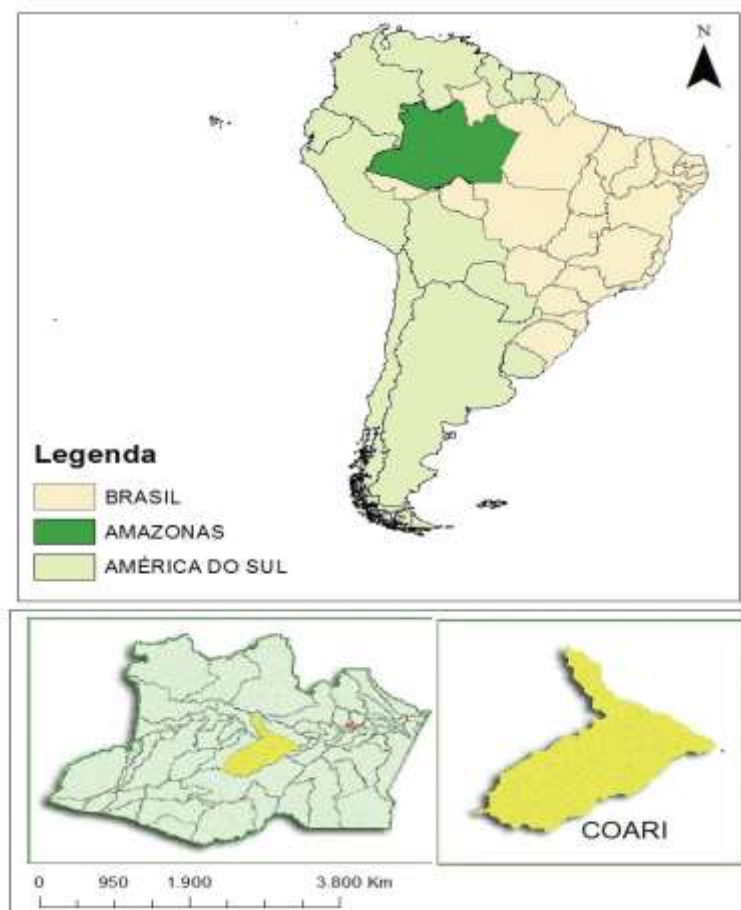


Figura 22: Localização do município de Coari. Arquivo pessoal.



Figura 23: Base petrolífera de Urucu. Fonte: <http://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2015/04/30-da-producao-em-gasoduto-no-am-fica-sem-uso-e-volta-para-terra.html>

4.2 LOCAL DE COLETA

A comunidade da ilha da Botija, Figuras 24, 25 e 26, encontra-se distante cerca de 35km de Coari, sede do município, nas coordenadas 3° 57' 59" Sul e 62° 53' 22" oeste, situada em uma área de várzea alta, de alagação total pouco frequente, com área parcialmente desmatada nas margens do rio Solimões onde se concentram aproximadamente 154 moradores e extensão aproximada de 30 km. A vegetação da ilha é típica de uma área inundável, com áreas de várzea e igapó, vários lagos e igarapés de águas clara ou negra.

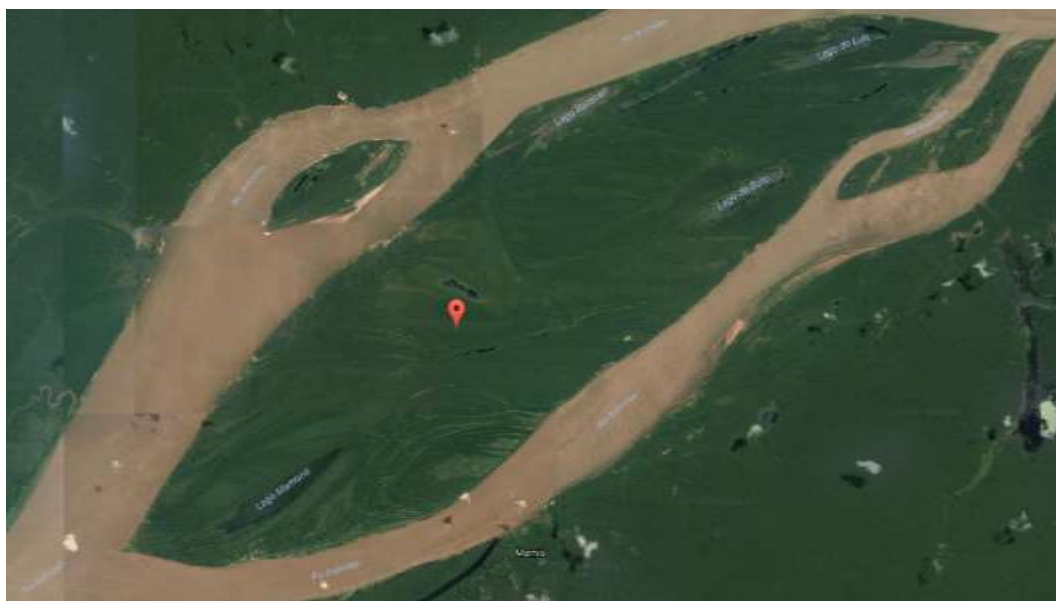


Figura 24: Localização da Ilha da Botija. Fonte: Google Maps.



Figura 25: Comunidade Ilha da Botija I. Fonte: Própria.



Figura 26: Comunidade Ilha da Botija II. Fonte: Própria.

A coleta foi realizada com espécies típicas de áreas de igapó que ficam as margens de um igarapé, Figuras 27 e 28, que são estreitos cursos de rios, após o período de cheia dos rios, em etapas que foram realizadas nos meses de agosto, setembro e outubro. Uma área foi delimitada com espécies de diferentes tamanhos, sendo escolhida por visualmente representarem o bioma local, quando nos referimos ao seu representativo número de espécies distribuídos as margens do igarapé.



Figura 27: Margens do igarapé na Ilha da Botija em período de seca. A cor mais escura nos troncos das árvores denota a altura de subida das águas em decorrência das enchentes. Arquivo pessoal.



Figura 28: Margens do igarapé na Ilha da Botija em período de cheia. Arquivo pessoal.

Nestas etapas os procedimentos conduzidos foram os seguintes:

1. Uma área de $147,5 \text{ m}^2$ foi delimitada com auxílio de uma fita de contenção, conforme a Figura 30, cujas dimensões estão descritas na Figura 29, Figura 31 corresponde ao local em período de cheia. Na área foram medidos todos os diâmetros dos troncos de espécies com altura $h \geq 50 \text{ cm}$, medidas um pouco antes da primeira ramificação, e DAP (diâmetro a altura do peito) das espécies com altura $h \geq 130 \text{ cm}$. As medições foram feitas com o auxílio de um paquímetro digital, marca *Caliper* com faixa de medição $0 - 150 \text{ mm}$ e precisão de $0,01 \text{ mm}$, e uma fita métrica com faixa de medição de $0 - 150 \text{ cm}$.

Para evitar repetições de valores, marcações nas espécies foram feitas com um pequeno pedaço de fita adesiva, Figura 32.

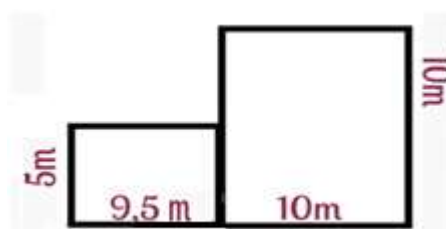


Figura 29: Esquema representativo da área de coleta de espessuras das árvores. Arquivo pessoal.

2. Na segunda etapa, quatro espécies vegetais de diferentes tamanhos, pertencentes à área delimitada, foram escolhidas para medição dos DAP, copa, altura, diâmetro e comprimento dos galhos. Duas espécies, João Mole - *Neea cf. Mollis Spruceex J.A. Schmidt* e Bacuri - *Platonia Insignis*, foram medidas de forma integral, devido apresentarem altura menor, quando comparadas com as outras duas espécies, o Mucurão - *Gustavia augusta* - Membrillo e a Goiaba Araça - *Eugenia Stipitata Mcvaugh*, por apresentarem maior tamanho e uma quantidade maior de ramos, foi escolhido um galho visualmente representativo, segundo o princípio da auto similaridade. Os critérios utilizados na escolha foram a abundância das espécies, condições de acesso e logicamente as condições das espécies. Esta etapa foi a mais demorada pelo volume de trabalho e cuidado redobrado tomado, devido à distinção criteriosa feita para identificação de ramificação ou apenas uma derivação de um galho.



Figura 30: Delimitação da área de coleta em período de seca. Arquivo pessoal.

Esta metodologia foi desenvolvida em nosso grupo de pesquisa de Física e Meio Ambiente. Embora a utilização da medida de DAP já implementada por outros grupos de pesquisa (WEST *et al.*, 2009).



Figura 31: Delimitação da área de coleta em período de cheia. Arquivo pessoal.



Figura 32: Medição e marcação das espécies. Arquivo pessoal.

As medidas de espessuras de galhos e a distinção de quando ramificação ou apenas uma derivação de galho, considerado galho irmão, bem como a rotulação dos mesmos, foram realizadas conforme se segue.

É impossível, na natureza, observar espécies de árvores com alto padrão simétrico no modo como galhos ramificam com molde exatamente idêntico ao modelo idealizado por *West, Brown e Enquist*, já visto no capítulo 2 desta tese, onde visivelmente tem-se ramificações em tubos menores, em comprimento e espessura, a partir de um tubo “central” o tronco, ditos como fractais perfeitos por

apresentarem auto similaridades e fatores de escalas constantes no padrão repetitivo de crescimento, visto nas Figuras 33 e 34.

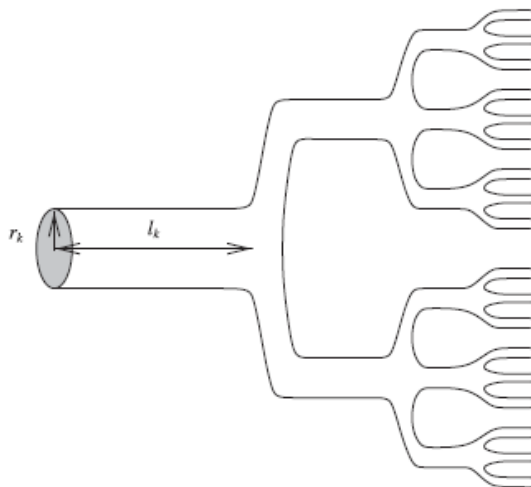


Figura 33: Modelo ramificado proposto por *West, Brown e Enquist*. Fonte: (RAMPAL et al., 2006).

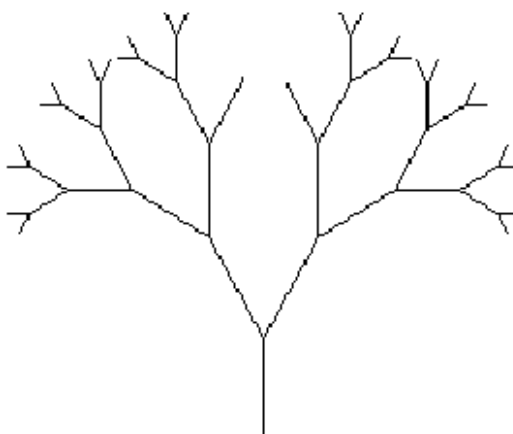


Figura 34: Modelo idealizado para uma árvore perfeitamente fractal. Arquivo pessoal

Tendo em vista a maneira assimétrica e não perfeitamente fractal, de como se apresentam as estruturas das árvores na natureza, influenciado por inúmeros fatores ambientais, como mudanças estruturais decorridas pela otimização na captação de energia no processo de fotossíntese ou em decorrência de fortes ventos ou enchentes, que interferem no padrão de crescimento, foram adotadas duas metodologias para a realização das medidas nesta etapa. Na descrição, foi realizado um esclarecimento de como as medições foram conduzidas.

- A) Para permitir a reconstrução da estrutura de galhos das espécies trabalhadas para posterior análise, ainda que sem detalhes específicos dos ângulos dos galhos ramificados, uma vez que não foram medidos, com

seus valores de espessuras e comprimentos, estas foram rotuladas por meio de índices, a partir do caule, um exemplo pode ser visto na Figura 35.

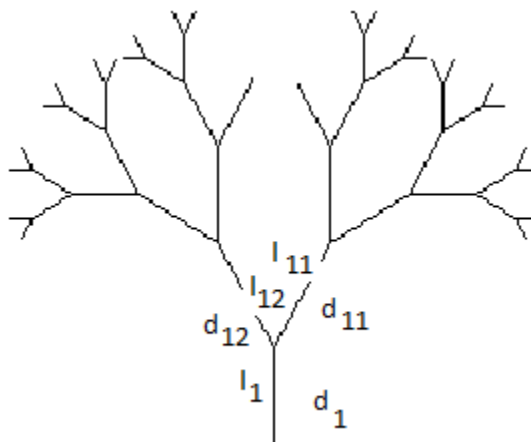


Figura 35: Rotulagem dos galhos. Arquivo pessoal.

Na Figura 35, d e l , são respectivamente o diâmetro e o comprimento. Na construção, significa que o caule d_1 de comprimento l_1 , bifurcou dando origem aos galhos com diâmetros d_{11} e d_{12} com comprimentos l_{11} e l_{12} . Este esquema de rotulagem foi feito para toda a espécie ou em todo o galho considerado representativo que apresentou aspecto de estrutura vegetal simpodial.

- B) Outra configuração de estrutura nas espécies trabalhadas foram as que apresentaram aspectos similares à estrutura monopodial, espécie como um todo, ou o galho, quando notavelmente se tem um tronco principal, sem ou com poucas ramificações, apenas galhos que derivam deste tronco principal na estrutura de sequenciamento. Figura 36.

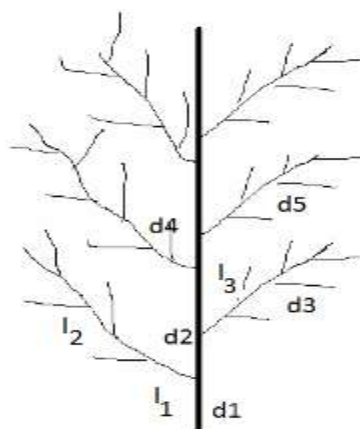


Figura 36: Rotulagem de galhos em estrutura similar ao de coníferas. Arquivo pessoal.

A dinâmica de sequenciamento no caso (B) é análogo ao caso (A), com a diferença que neste caso não há galhos “filhos” bifurcados e sim “irmãos”, onde deve-se levar em conta todo o comprimento do galho. Nestas análises, a dificuldade foi diferenciar quando temos uma estrutura do tipo (A) ou do tipo (B), nem sempre trivial. Como parâmetro de distinção foi utilizado a seguinte regra, quando o ângulo entre os galhos é formado pela notável contribuição de ambos, tendo um aspecto semelhante ao da Figura 35, será bifurcação ou uma ramificação. Quando notado a contribuição apenas de um galho para a formação do ângulo, como visto na Figura 36, não se considera uma ramificação. Na coleta as espécies apresentaram estes dois aspectos concomitantemente.

4.3 ESPÉCIES COLETADAS

Na área delimitada foram escolhidas para medições as espécies, Bacurizeiro (*Platonia insignis*), João Mole - *Neea cf. mollis* Spruce ex J. A. Schmidt, Goiaba Araça - (*Eugenia Stipitata* Mcvaugh) e o Mucurão - *Gustavia Augusta* - *Membrillo*. A seguir uma descrição destas espécies.

4.3.1 O BACURIZEIRO- *Platonia insignis*

O bacurizeiro é uma espécie frutífera da família *Clusiaceae*, Figura 37, considerada uma planta arbórea de regiões tipicamente tropicais, sendo encontrado nos Estados do Amazonas, Pará, Maranhão, Piauí, Goiás e Mato Grosso, (Ferreira et al., 1987). É promissor sua utilização nas indústrias de alimentos e madeireira, podendo seu fruto também ser consumido de modo *in natura*. A casca do fruto representa praticamente 70% do peso do fruto, vindo a seguir as sementes, cuja participação varia de 13% a 26%. A polpa é o componente que se apresenta em menor proporção, somente cerca de 10% a 18% do peso do fruto (CALZAVARA, 1970).

O bacurizeiro é considerado uma árvore de grande porte, com altura variando entre 15 e 30 m. Quando cortada exsuda um líquido viscoso de tonalidade amarela, com galhos crescendo numa posição entre 50 e 60° em relação ao caule (MORAES et al., 1994).



Figura 37: Galho do Bacurizeiro, à direita uma amostra foliar. Arquivo pessoal.

A lâmina foliar do bacurizeiro é simétrica e elíptica, possuindo base e ápice agudos com textura coriácea e coloração verde brilhante. O pecíolo é curto e achatado, a venação foliar é pinada com nervuras laterais divergindo da central em diversos ângulos, unidas entre si por um arco curvado, caracterizando uma venação foliar camptódroma e fortemente broquidódroma (MOURÃO et al., 1995).

4.3.2 GOIABA ARAÇA BOI - *Eugenia stipitata mcvaugh*

A Goiaba Araça-boi, Figura 38, é nativa da Amazônia de tamanho relativamente pequeno, cerca de 3 a 5 m de altura, pertencente à família *Myrtaceae* com maior parte das espécies fazendo parte de um grupo com importante interesse econômico (MALUF et al., 2005). Considerado um arbusto densamente folhoso e ramificado, com folhas elípticas de tonalidade verde escuro (CAVALCANTE, et al., 1996).

É uma espécie bastante produtiva, floresce e frutifica até quatro vezes ao ano, com dois picos de floração, na estação seca, de julho a setembro e o outro mais acentuado na estação chuvosa, de janeiro a março. O fruto é uma baga que varia de 30 a 800 g, com peso médio de 200g, que exala um aroma relativamente agradável quando maduro. O pericarpo do fruto do araçazeiro possui tonalidade

amarela e textura aveludada e fino. A polpa é bastante ácida, dificilmente se consome de forma *in natura*, no entanto possui grande potencial em doces, geleias, sucos e compotas.



Figura 38: Galho do araçazeiro utilizado na coleta. À direita uma amostra foliar. Arquivo pessoal.

Galhos e caule possuem aspecto escamoso, em placas bem finas, de cor castanho avermelhada, de aspecto similar à goiabeira domesticada, com folhas simples e opostas sem pelos e textura semelhante ao couro, estrutura simpodial e ramificações dicotômicas, em sua maioria, com copa bem preenchida em formato arredondado (ANDERSEN, 1988).

4.3.3 JOÃO MOLE - *Neea cf. mollis spruce ex. J.A. schmidt*

A espécie João Mole, trata-se de um arbusto pertencente à família *Nyctaginaceae*, que compreende em torno de 30 gêneros e cerca de 300 espécies nas regiões tropicais e subtropicais, está incluída na ordem *Caryophyllales* (CRONQUIST, 1968, 1981, 1988). Esta família é caracterizada pela presença do antocarpó, que se forma pelo espessamento da parte basal das sépalas unidas, encerrando o fruto verdadeiro que normalmente é membranáceo. O antocarpó como autapomorfia sustenta o monofiletismo da família (RODMAN, 1990). As folhas desta espécie são simples possuindo formato elíptico, com base simétrica e

ápice agudo, ver Figura 39. Em relação a venação foliar, nervuras secundárias divergem da primária mais espessa, em ângulos relativamente bem definidos, com estrutura de caule simpodial com ramificações dicotômicas.



Figura 39: Galho do João Mole –*Neea cf. mollis* Spruce ex J .A. Schmidt utilizado na coleta. À direita uma amostra foliar. Arquivo pessoal.

4.3.4 MUCURÃO - *Gustavia augusta* - membrillo

Esta espécie é encontrada na Costa Rica, Colômbia, Venezuela, Guianas, Peru, Suriname e no Brasil. Também conhecida como pau fedorento, geniperana, jeniparana, jandiparana, janiparandiba, japuaranduba, general e membrillo. Pertencente à família *Lecythidaceae* que abrange cerca de 300 espécies. No Brasil, são diferentes gêneros encontrados de *Lecythidaceae*, sendo muitas delas apreciadas no comércio madeireiro devido às suas características dendrológicas (PROCÓPIO & SECCO, 2008).

Caracteriza-se por árvores medindo de 20 - 40 m de altura, tronco com cerne nas cores branco amarelado e bege amarelado claro com brilho moderado,

ambientou-se muito bem em florestas úmidas com sombra ou meia sombra. Propaga-se por meio de sementes, o formato do fruto lembra uma panela com tampa, com meses de floração em março, abril e maio. Muitas espécies pertencentes a esta família têm boa aceitação no mercado madeireiro, com tamanho comercial variando de 9 a 16m e diâmetro de 50 a 75cm. As folhas, simples e alternadas, tem aspecto similar a uma espátula, elíptico e oblongo no ápice e com base longa e atenuada. As espécies que se distribuem ao longo da região estudada caracterizam-se também por apresentares as ramificações próximas ao tronco “suaves”, quando nos referimos aos ângulos em que estes acontecem.



Figura 40: Galho do Mucurão - *Gustavia augusta*- *Membrillo* utilizado na coleta. À direita uma amostra foliar. Arquivo pessoal.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Iniciou-se as análises com o estudo da área de floresta delimitada que continha diferentes espécies de árvores e arbustos, a caracterização foi realizada via distribuição de frequência de espessuras de troncos, e pode ser observada nas Figuras 41 e 42. Realizou-se o ajuste alométrico da distribuição de frequência da Figura 42, para posterior comparação do expoente da função de crescimento obtida.

A distribuição de frequência consiste na repartição de indivíduos dentro de $(K+1)$ classes de tamanho, com cada classe individual de ordem K contendo Δn_k indivíduos de tamanhos similares, que em nosso estudo, são os valores coletados dos raios dos troncos da área delimitada. A Tabela 2 contém dados da estatística descritiva de medidas de dispersão dos valores coletados.

Tabela 2 Estatística descritiva dos dados de espessuras de troncos coletados da área delimitada.

Média	1,8
Desvio Padrão	1,42
Coefficiente de Variabilidade (%)	78

O alto valor do coeficiente de variabilidade, índice que relaciona o percentual do desvio padrão em relação à média dos dados, evidencia uma dispersão considerável dos valores do conjunto, indicando uma amostra heterogênea, tendo em vista ser maior que o parâmetro de 20%, que será utilizado como base. A classificação do coeficiente de variabilidade é intrínseca a cada processo, dados de espessuras de troncos e galhos em nossas análises, incluem valores que são muitos maiores, quando comparados com a maioria dos valores que são observados, afetando fortemente a representatividade do coeficiente de variabilidade, por esta razão, valores abaixo de 20% serão considerados baixos, entre (20 e 25)% média variabilidade, ou seja média dispersão dos dados, e acima de 25% alta variabilidade.

No tratamento de dados das espessuras de troncos da área de estudo, 13 valores de raio acima de 6,0 cm, que destoavam muito em relação à média influenciando fortemente os valores do coeficiente de variabilidade, foram retirados para os cálculos dos parâmetros da Tabela 2.

A distribuição de frequência, Figura 42, é assimétrica positiva com maior frequência de baixos valores de espessuras dos troncos, concentrados no intervalo aproximado de 0,7 - 2,33 cm, evidenciando uma área com quantidade considerável de árvores e arbustos com baixos valores de espessura de tronco, possuindo um leve aumento na frequência de distribuição no intervalo de 28 – 29,5 cm, modificando a tendência gradativa de diminuição da frequência da espessura. O expoente de escala -1,5261 obtido com o ajuste alométrico, Figura 41, evidencia relação inversa no crescimento, com o aumento da espessura tem-se diminuição na frequência, ou seja, a quantidade de troncos na floresta cresce inversamente proporcional a espessura dos troncos.

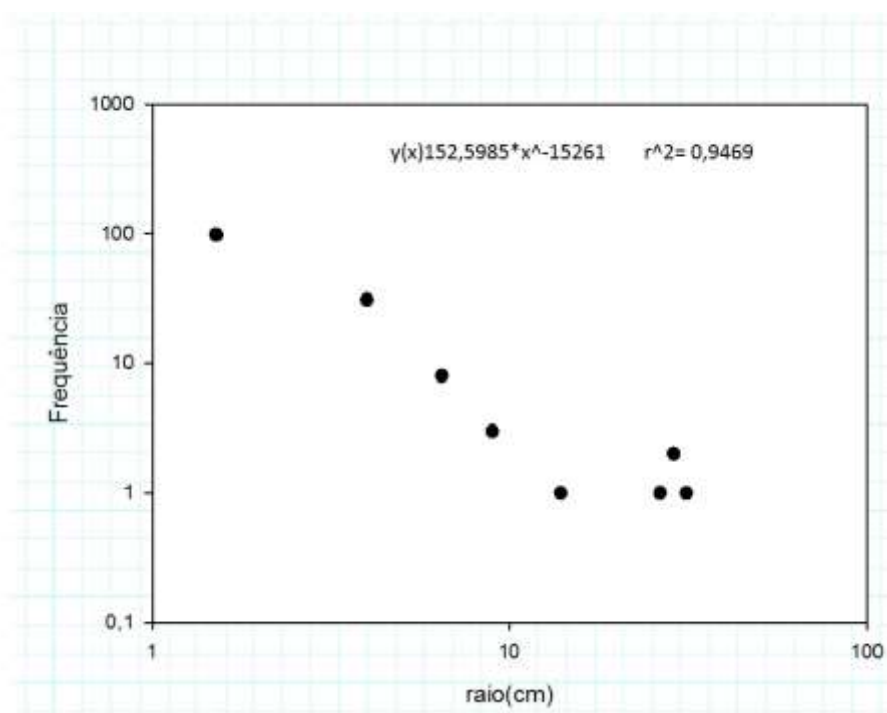


Figura 41: Distribuição de frequência das espessuras de troncos da área delimitada, com curva submetida a um ajuste alométrico com expoente -1,5261.

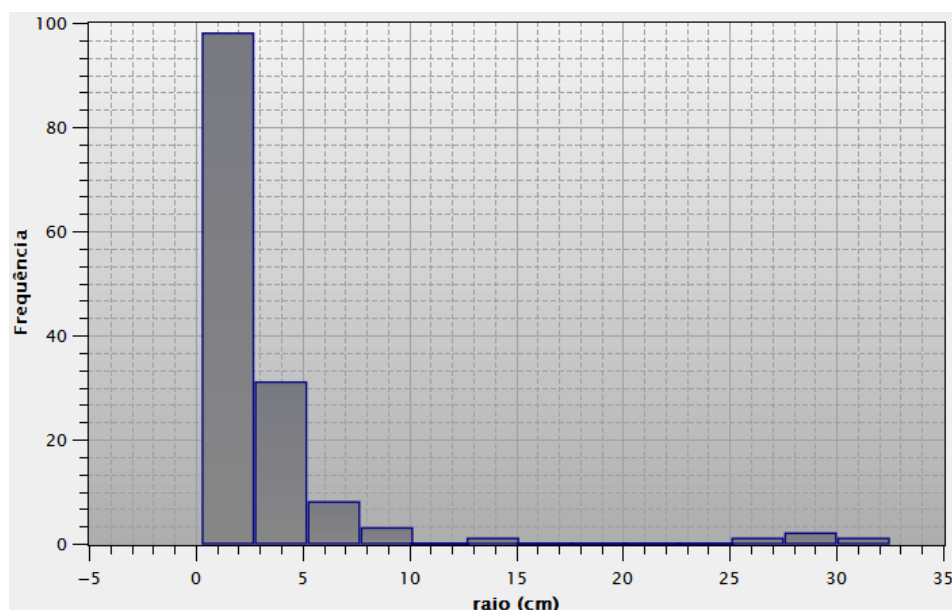


Figura 42: Distribuição de frequência de espessuras de troncos da área de estudo.

Na área delimitada foram selecionadas quatro espécies para medições de DAP, altura, copa e diâmetros e comprimentos de galhos. A saber, Bacurizeiro - *Platonia insignis*, João Mole - *Neea cf. mollis spruceex J. A. schmidt*, Goiaba Araça - *Eugenia stipitata mcvaugh* e o Mucurão - *Gustavia augusta – membrillo*. Espécies que já foram devidamente caracterizadas no que tange as suas principais características em materiais e métodos no capítulo 4. A Tabela 3 contém informações individuais de características biométricas destas espécies.

Tabela 3 Características biométricas das espécies utilizadas.

Espécies	Bacurizeiro - <i>Platonia insignis</i>	João Mole - <i>Neea cf. mollis</i> <i>Spruce ex j.a.</i> <i>schmidt</i>	Goiaba Araça - <i>Eugenia</i> <i>stipitata</i> <i>mcvaugh</i>	Mucurão - <i>Gustavia</i> <i>augusta –</i> <i>membrillo</i>
Altura (cm)	550,3	233	570	945
Copa (cm)	206	137	260	254
DAP (cm)	3,18	1,33	2,4	32

Distribuições de frequências de espessuras de galhos destas foram representadas nas Figuras 43, 44, 45 e 46.

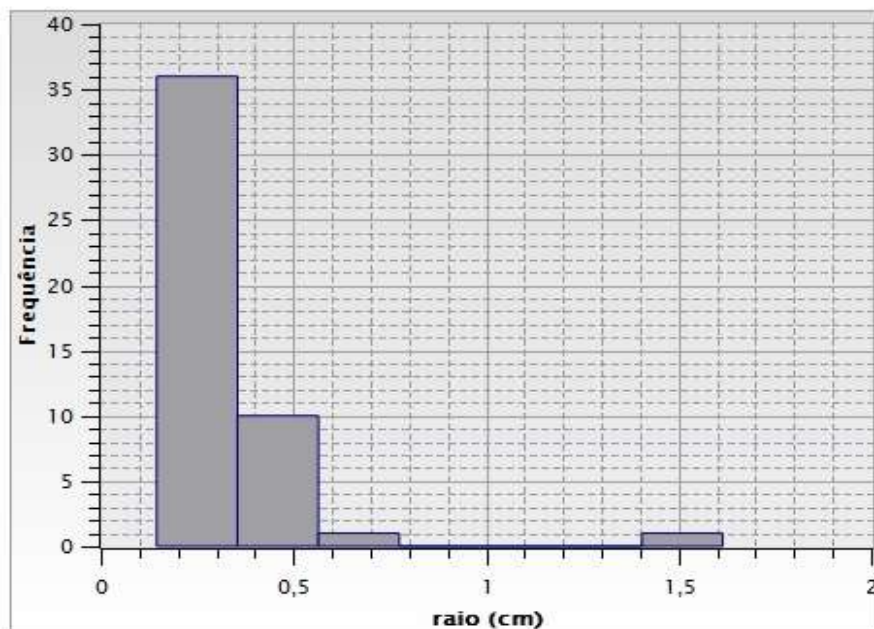


Figura 43: Distribuição de frequência das espessuras de galhos da espécie Bacurizeiro - *Platonina insignis*.

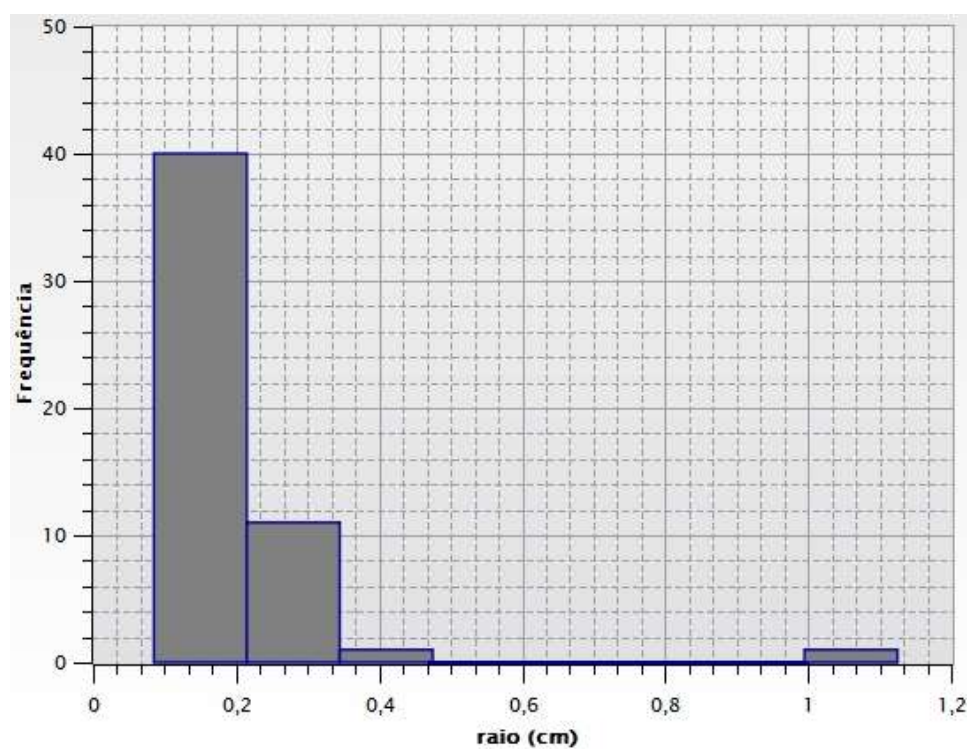


Figura 44: Distribuição de frequência das espessuras de galhos da espécie João Mole - *Neea cf. mollis spruceex j. a. schmidt*.

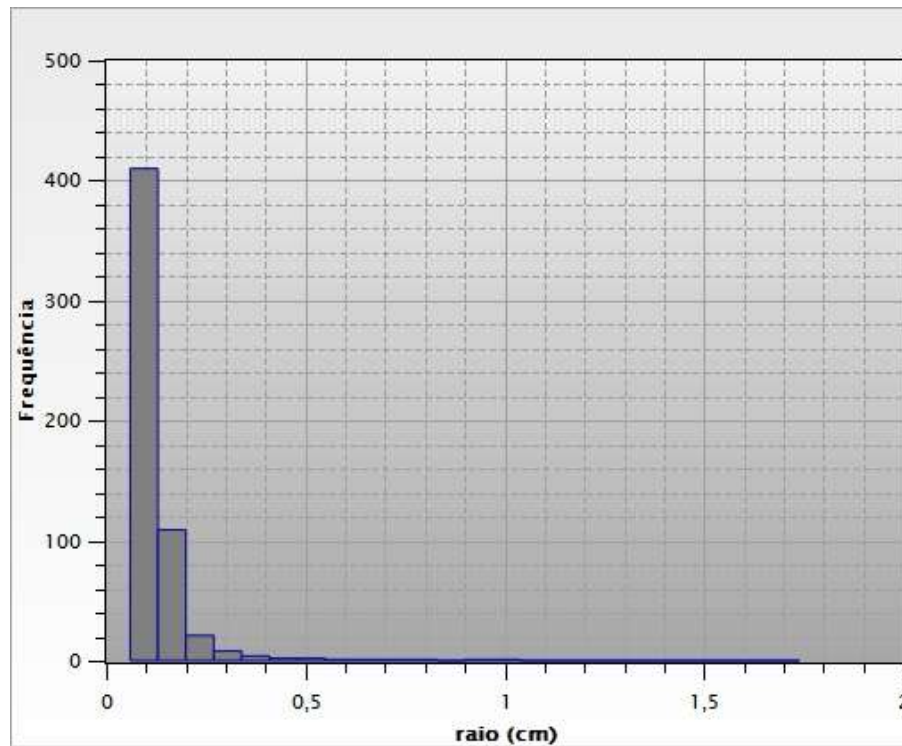


Figura 45: Distribuição de frequência das espessuras de galhos da espécie Goiaba Araça- *Eugenia stipitata mcvaugh*.

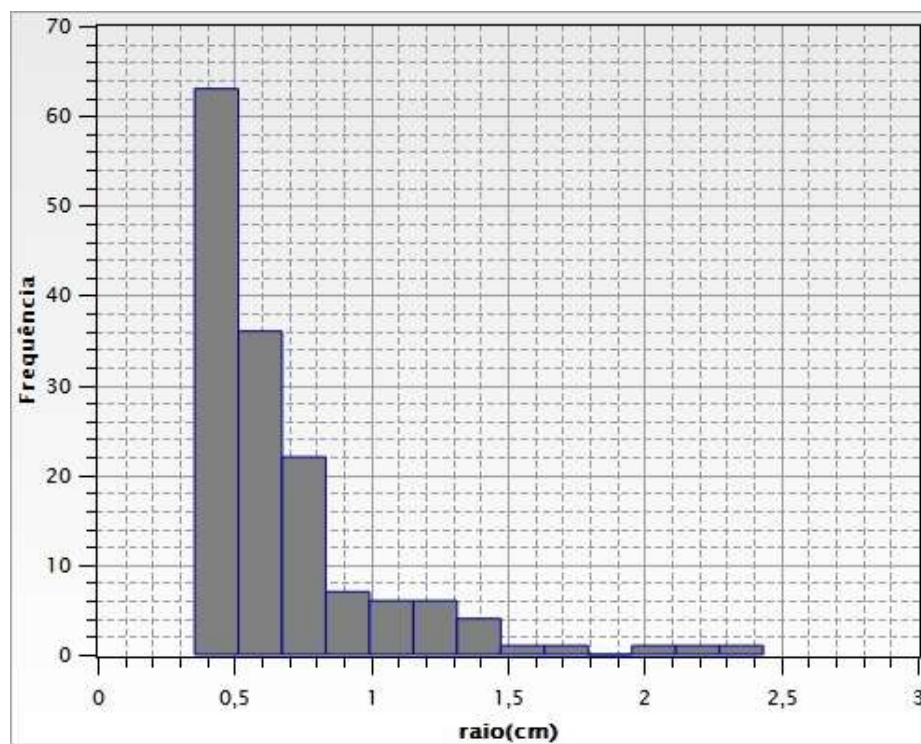


Figura 46: Distribuição de frequência das espessuras de galhos da espécie Mucurão - *gustavia augusta - membrillo*.

As distribuições de frequências de espessuras de galhos das espécies são similares as espessuras dos troncos da área de estudo, com dominância em números de galhos de baixa espessura, concentrados nos primeiros intervalos das distribuições, denotando semelhanças na disposição geométrica de ambos na floresta.

Os dados da estatística descritiva das espessuras de galhos coletadas estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 Estatística descritiva dos dados de espessuras de galhos das espécies, Bacurizeiro - *Platonia insignis*, João Mole - *Neea cf. mollis spruce ex j .a. schmidt*, Goiaba Araça - *Eugenia stipitata mcvaugh* e Mucurão - *Gustavia augusta – membrillo*

Estatística descritiva	Bacurizeiro - <i>Platonia Insignis</i>	João Mole - <i>Neea cf. mollis spruce ex j .a. schmidt</i>	Goiaba Araça - <i>Eugenia stipitata mcvaugh</i>	Mucurão - <i>Gustavia augusta – membrillo</i>
Média de espessuras de galhos	0,29	0,13	0,9	0,32
Desvio Padrão	0,22	0,02	0,49	0,11
Coefficiente de Variabilidade (%)	76	15	54	34

Análogo aos valores de coeficiente de variabilidade encontrados na frequência de distribuições de espessuras de troncos, estes, em sua maioria, evidenciam dispersão considerável, com valores superiores ao utilizado como padrão de 20%, a exceção é a espécie João Mole - *Neea cf. mollis spruce ex j .a. schmidt*, sendo a amostra mais homogênea com alta representatividade da média dos dados, Possivelmente isto aconteceu por ser a menor das espécies e neste estágio é notável a proporcionalidade no crescimento entre espessuras do tronco e de galhos.

Lembrando que um dos objetivos deste trabalho é testar o modelo de West, Brown e Enquist, acerca do trabalho intitulado “Teoria quantitativa geral para estrutura e dinâmica de uma floresta”. Neste, afirma-se que as propriedades geométricas e dinâmicas de árvores em uma floresta e de galhos em uma árvore,

escalam de modo similar, de maneira que uma floresta inteira pode ser descrita matematicamente e se comportar estruturalmente e funcionalmente como uma versão reduzida da ramificação da maior árvore contida nesta floresta. A metodologia adotada foi similar nesta tese, com a diferença que escolhemos quatro árvores de distintos tamanhos para fazermos as devidas comparações com o expoente da área de estudo. Realizou-se ajustes alométricos para as quatro distribuições de espessuras de galhos das espécies. Podendo ser observados nas Figuras 47, 48, 49 e 50, os valores dos expoentes do ajuste alométrico para as distribuições de frequências das espécies e também da distribuição de troncos da área de estudo foram calculados, podendo ser visualizados na Tabela 5.

Tabela 5 Expoente de escala obtidos via ajuste alométrico para os diâmetros dos galhos das espécies, Bacurizeiro - *Platonia insignis*, João Mole - *Neea cf. mollis spruce j .a. schmid*, Goiaba Araça - *Eugenia stipitata mcvaugh*, Mucurão - *Gustavia augusta – membrillo* e para os diâmetro dos troncos da área de estudo.

Espécies e área delimitada	Bacurizeiro - <i>Platonia insignis</i>	João Mole - <i>Neea cf. mollis Spruce ex J. A. Schmidt</i>	Goiaba Araça - <i>Eugenia Stipitata mcvaugh</i>	Mucurão - <i>Gustavia augusta – membrillo</i>	Distribuição de espessuras dos troncos da área delimitada
Expoentes	-2,11	-1,97	-2,78	-2,77	-1,5261

O expoente de escala reflete os vínculos geométricos de uma relação denotando o índice de aumento relativo entre duas escalas, sendo considerado um parâmetro chave, haja vista ser sensível a mudanças no contínuo e em possíveis erros experimentais. Uma das hipóteses de *West, Brown e Enquist* consiste em uma possível universalidade do expoente de escala em relação as variações relacionadas com o tamanho.

Na análise do expoente de escala, se negativo, significa que o parâmetro y decresce ao passo que o parâmetro x aumenta, um exemplo clássico desta relação é o ritmo cardíaco que diminui com o aumento tamanho dos mamíferos. Se expoente for zero, o parâmetro y não depende do parâmetro x , a relação observada será constante, se for positivo, porém menor que um, estamos diante de uma situação em que o parâmetro y aumenta com x , porém, em um ritmo menor que o proporcional, um exemplo disso é a relação entre metabolismo e a massa nos mamíferos representado pelo expoente 0,75. Casos em que o expoente é igual a 1,

o parâmetro y é estritamente proporcional ao parâmetro x . Situações que o parâmetro y aumenta mais rapidamente que o parâmetro x , o expoente será maior que um, caso observado na relação de crescimento entre a massa do esqueleto de um mamífero e a massa corpórea, ou seja, a massa do esqueleto dos mamíferos cresce mais rapidamente que sua massa.

Os expoentes calculados, de acordo com a Tabela 5 foram todos negativos, significa que a frequência do número de galhos e de troncos da área delimitada, diminui com o aumento das espessuras dos galhos e de troncos.

Valores dos expoentes obtidos destoam em sua maioria do previsto por WBE, que possui valor em torno de -2, caracterizando a não universalidade do expoente de alométrico nas condições em que foi executado.

Os expoentes correspondentes das espécies Bacurizeiro - *Platonia insignis* e João Mole - *Neea cf. mollis spruce j. a. schmidt*, -2,11 e -1,97, Figuras 47 e 48, respectivamente, foram os mais promissores com a teoria, caracterizando-se pelo crescimento do número de galhos inversamente proporcional ao quadrado das espessuras dos galhos, que é um elemento indicativo de como se distribuem e preenchem espaço na floresta.

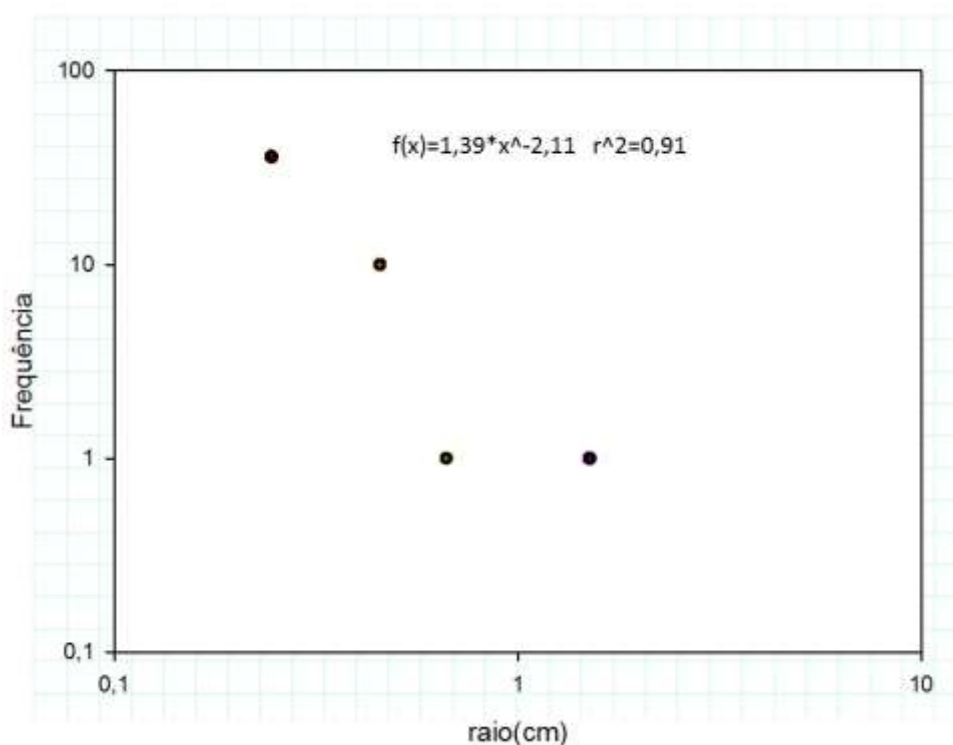


Figura 47: Distribuição de frequência das espessuras de galhos da espécie Bacurizeiro - *Platonia insignis*, com curva submetida a um ajuste alométrico, com expoente -2,11.

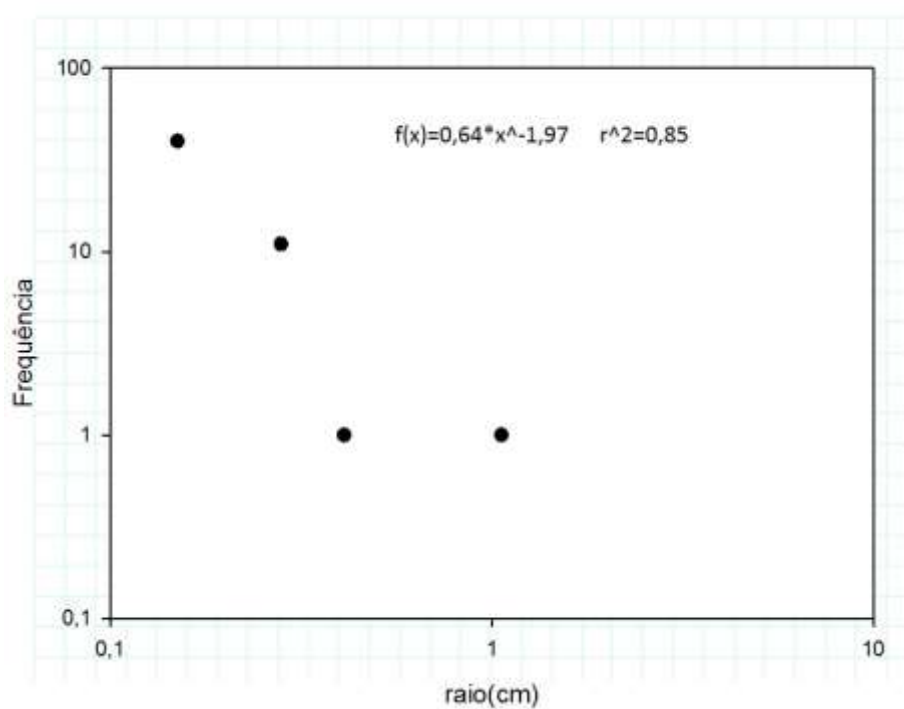


Figura 48: Distribuição de frequência das espessuras de galhos da espécie João Mole - *Neea cf. mollis spruce ex j. a. schmidt.*, com curva submetida a um ajuste alométrico, com expoente -1,97.

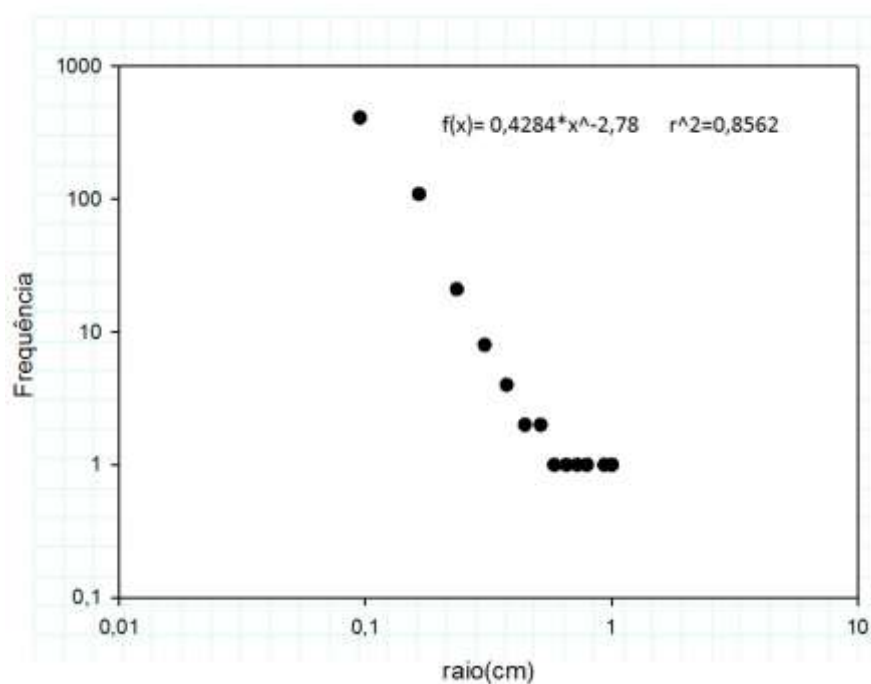


Figura 49: Distribuição de frequência das espessuras de galhos da espécie Goiaba Araça - *Eugenia Stipitata mcvaugh*, com curva submetida a um ajuste alométrico, com expoente -2,78.

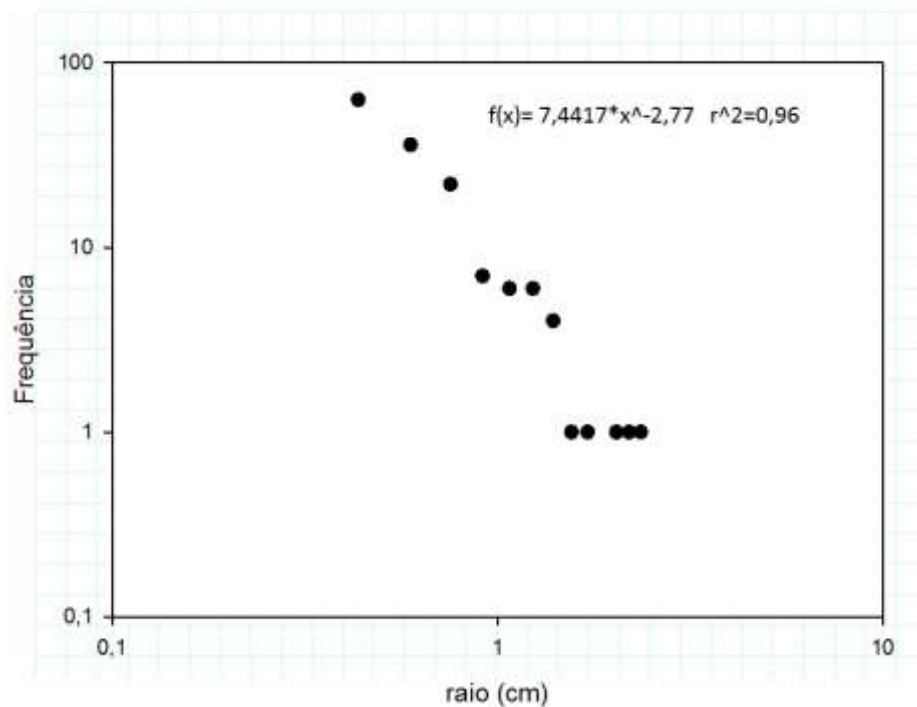


Figura 50: Distribuição de frequência das espessuras de galhos da espécie Mucurão - *Gustavia augusta* – membrillo, com curva submetida a um ajuste alométrico, com expoente -2,77.

Em suma, é notável uma diferença significativa do ponto de vista numérico destes expoentes encontrados no padrão como escalam, visto na Figura 51, que faz um comparativo das curvas ajustadas. A similaridade está no fato de possuírem uma relação de crescimento inversa entre a frequência e a espessura de galhos e troncos, visto no padrão de inclinação das curvas. Evidenciando o crescimento da floresta inversamente proporcional a espessuras de galhos e de troncos das árvores.

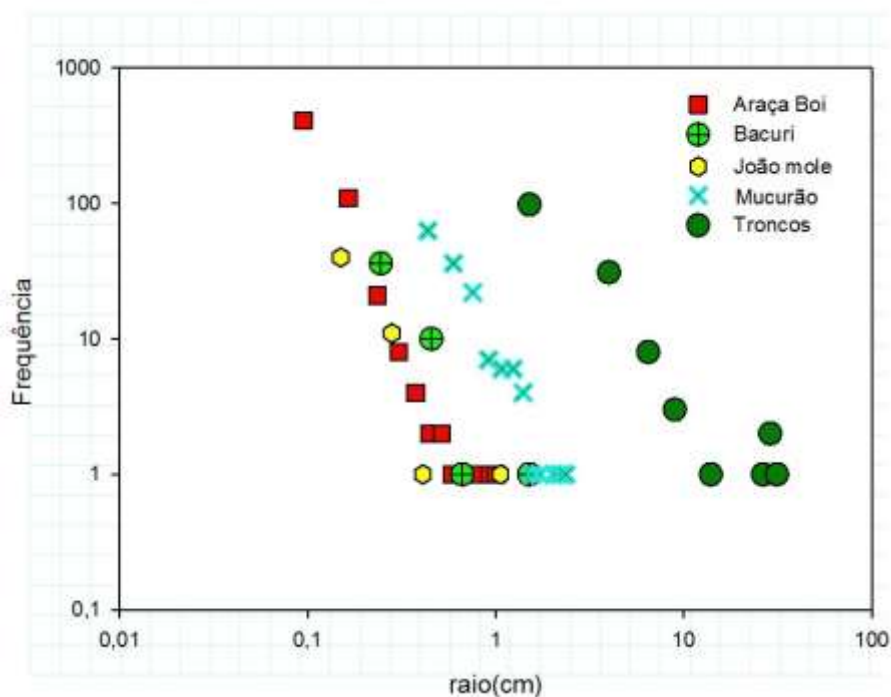


Figura 51: Gráfico comparativo das distribuições de frequências de espessuras de galhos e troncos das quatro espécies e da área delimitada, todas submetidas ajustes alométricos.

Uma discussão pertinente pode ser feita em relação ao expoente alométrico obtido para a distribuição de frequência dos troncos de $-1,5261$. O expoente observado na teoria é próximo do valor de -2 , sendo verificado em uma floresta similar à florestas de terra firme, ou seja, obtido para uma floresta com características distintas das áreas de igapó, no qual consiste em um ambiente fragmentado e sem a homogeneidade de troncos distribuídos. Esta diferença pode ser um possível indicador de mudanças em estratégias de adaptação e utilização de recursos das espécies em um ambiente que boa parte do ano fica de forma submersa.

Em relação aos expoentes de espessuras de galhos com a frequência, um outro ponto de vista seria a análise desses expoentes para uma amostra maior de espécies, a tal ponto de verificarmos a abrangência estatística significativa desses expoentes.

A estimativa de fractalidade foi verificada via método *Box Counting* e análise dos fatores de escala β e γ . A regularidade no crescimento das estruturas fez-se via análise das distribuições de frequências dos fatores de escala β e γ . Esses parâmetros relacionam os valores de diâmetro e comprimento de galhos, antes e após uma ramificação, refletindo o quão a estrutura de uma árvore é auto similar.

Na análise de uma estrutura perfeitamente fractal com auto grau de auto similaridade e bem ramificado, permitindo uma ocupação considerável de volume na dimensão que são inseridos, seria inviável esta estratégia, uma vez que as relações β e γ seriam sempre as mesmas. Mencionamos no capítulo 4, em material e métodos, a não perfeita estrutura auto similar das árvores, por esta razão apresentam estatisticamente, certa fractalidade, como todas as estruturas naturais. Deste modo, justifica-se a análise das distribuições de frequências das relações β e γ , aliados aos dados da estatística descritiva apresentados nas Tabelas 6 e 7, para caracterizar qualitativamente a fractalidade destas espécies.

Em relação a análise do histograma de frequência de distribuição dos valores de β e γ , quanto mais pronunciado em torno da média for a distribuição, mais homogêneo serão os valores, indicando alta representatividade da média dos dados, ou seja, maior será o número de valores similares concentrados. Equivalente a afirmarmos que maior seria a fractalidade da árvore, que é sua capacidade de ocupar o volume que está inserido por meio de ramificações mediante aos fatores de escala similares, consideração feita pela suposição de ser a estrutura que menos demandaria energia na distribuição de nutrientes na planta.

Os valores de coeficiente de variabilidade são uma medida útil para avaliação em termos relativos do grau de concentração desses valores nos intervalos de distribuição. Quanto menor este valor, menor também será a dispersão em torno da média, mais homogênea será a distribuição. Grandes valores de coeficiente de variabilidade indicam uma amostra heterogênea com pequena representatividade da média e menos fractalidade.

Na análise da distribuição do fator de escala β , é visto na Tabela 6 que as espécies Goiaba Araça - *Eugenia stipitata mcvaugh* e Bacuri - *Platonia insignis* apresentaram, respectivamente baixa e média variabilidade dos dados em relação à média, refletindo na homogeneidade dos fatores de escala β e na auto similaridade no crescimento dos diâmetros. As espécies João Mole - *Neea cf. mollis spruce ex j .a. schmidt* e Mucurão - *Gustavia augusta – membrillo* evidenciaram altos valores de variabilidade, refletindo na heterogeneidade dos dados e em auto similaridade menos intensa.

No cálculo dos valores de dispersão para o Araçazeiro, por serem muito destoantes proporcionalmente aos demais, foram retirados quatro valores de gama acima de 1. Para a espécie João Mole - *Neea cf. mollis spruce ex j .a. schmidt*, no

cálculo C.V, foram retirados dois valores acima de 5. Por não ter diferença razoável, para espécie Mucurão - *Gustavia augusta* – *membrillo*, todos os valores disponíveis foram utilizados.

Tabela 6 Estatística descritiva para relação de escala β para as espécies, Bacurizeiro - *Platonia insignis*, João Mole - *Neea cf. mollis spruce ex j .a. schmidt*, Goiaba Araça - *Eugenia stipitata mcvaugh* e Mucurão - *Gustavia augusta* – *membrillo*.

Estatística descritiva dos fatores de esca la β	Bacurizeiro - <i>Platonia insignis</i>	João Mole - <i>Neea cf. mollis spruce ex j .a. schmidt</i>	Goiaba Araça - <i>Eugenia stipitata mcvaugh</i>	Mucurão - <i>Gustavia augusta</i> – <i>membrillo</i>
Média da relação	0,27	0,44	0,276	0,603
Desvio Padrão	0,07	0,14	0,05	0,48
Coefficiente de Variabilidade (%)	25	32	18	80

Tabela 7 Estatística descritiva relação de escala γ das espécies, Bacurizeiro - *Platonia insignis*, João Mole - *Neea cf. mollis spruce ex j .a. schmidt*, Goiaba Araça - *Eugenia stipitata mcvaugh* e Mucurão - *Gustavia augusta* – *membrillo*.

Estatística descritiva dos fatores de escala Beta	Bacurizeiro - <i>Platonia insignis</i>	João Mole - <i>Neea cf. mollis spruce ex j .a. schmidt</i>	Goiaba Araça - <i>Eugenia stipitata mcvaugh</i>	Mucurão - <i>Gustavia augusta</i> – <i>membrillo</i>
Média	0,16	0,49	0,26	0,78
Desvio Padrão	0,054	0,43	0,17	0,6
Coefficiente de Variabilidade (C.V) (%)	34	88	65	77

A análise do fator de escala γ da espécie Goiaba Araça - *Eugenia stipitata mcvaugh*, Figura 52, denota uma concentração destes valores no intervalo de 0 a 0,7, com abrupta queda da frequência de distribuição para valores superiores a 1.

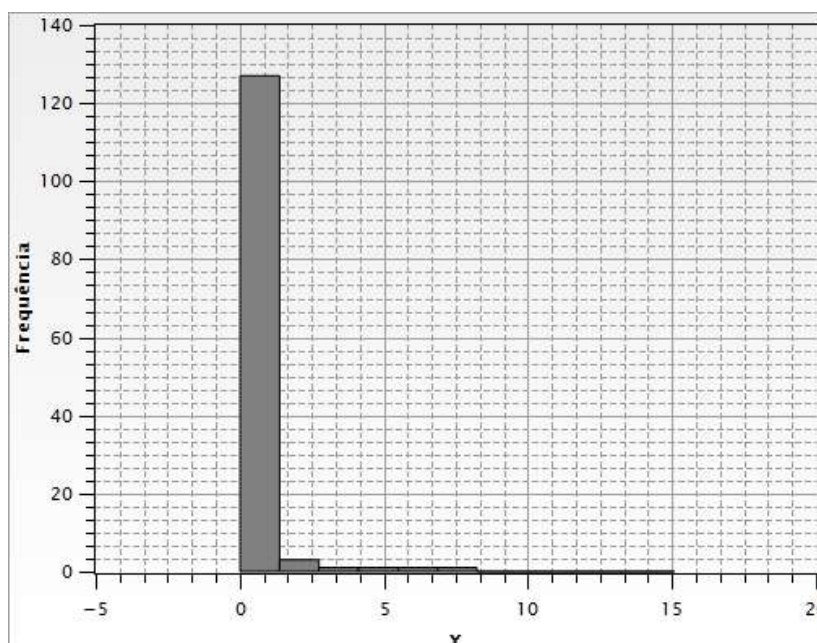


Figura 52: Distribuição frequência do fator de escala gama para a espécie Goiaba Araça - *Eugenia stipitata mcvaugh*.

Esses valores destoantes significam que o galho ramificado possui um comprimento maior que o galho anterior a ramificação “galho pai”, caracterizando um crescimento diferencial entre ramos superiores e inferiores, fato também observado nas espécies Mucurão - *Gustavia augusta – membrillo*, Figura 53, e João Mole - *Neea cf. mollis spruceex j. a. schmidt*, Figura 54.

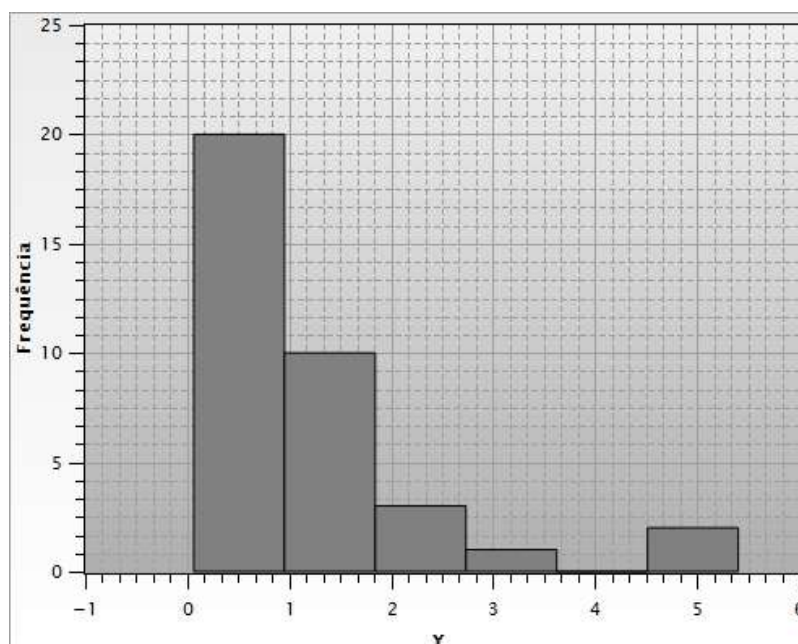


Figura 53: Distribuição de frequência do fator de escala gama para a espécie Mucurão - *Gustavia augusta membrillo*.

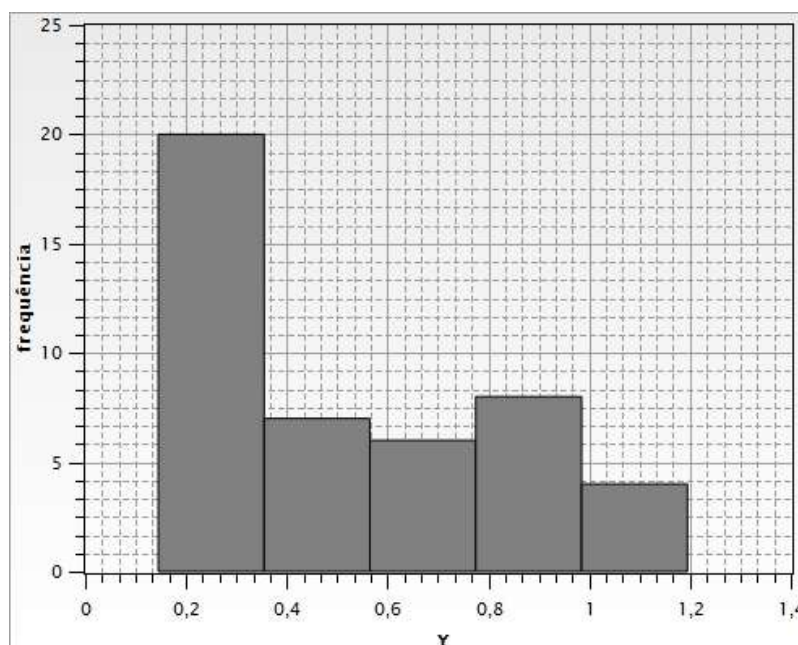


Figura 54: Distribuição de frequência do fator de escala gama para a espécie João Mole - *Neea cf. mollis spruce ex j .a. schmidt*.

A espécie Bacurizeiro - *Platonia insignis*, apresentou variabilidade nos valores de γ menor quando comparado com a variabilidade nos dados das outras espécies, denotando auto similaridade razoável no padrão de crescimento dos galhos. Sendo a única a apresentar galhos ramificados com comprimentos inferiores ao do “galho pai”, Figura 55.

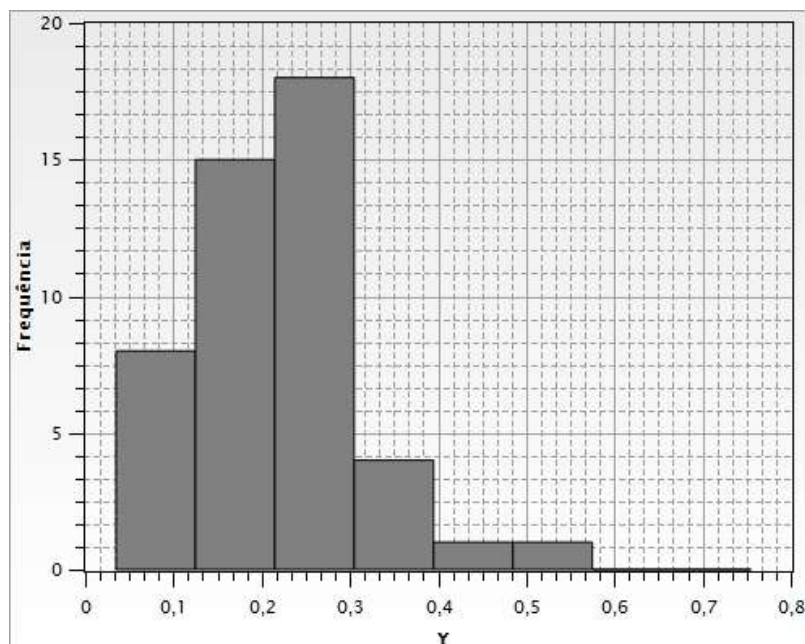


Figura 55: Distribuição de frequência do fator de escala gama para a espécie Bacurizeiro - *Platonia insignis*.

A espécie João Mole - *Neea cf. mollis spruce ex j .a. schmidt*, foi a única que apresentou valores de diâmetro do galho ramificado superiores aos diâmetro do galho (pai), Figura 56.

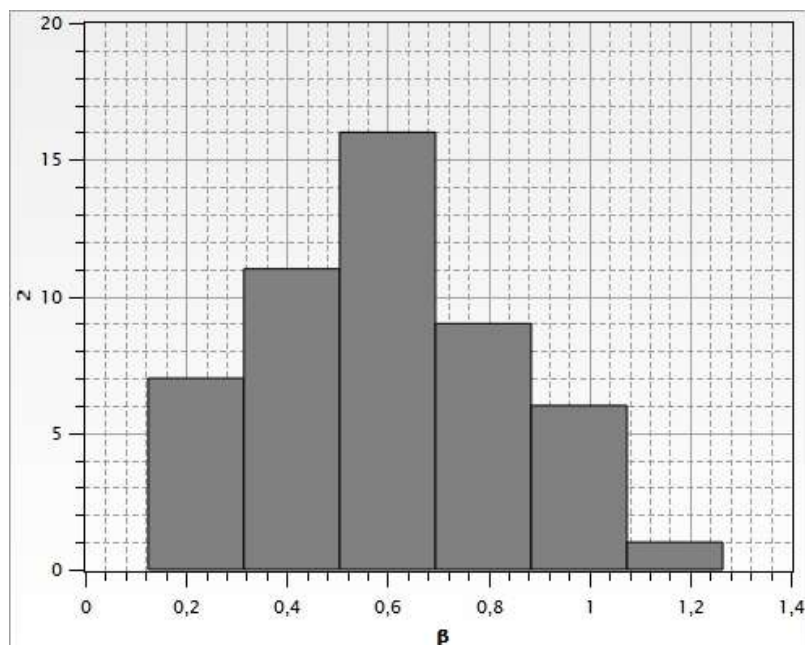


Figura 56: Distribuição de frequência do fator de escala beta para a espécie João Mole - *Neea cf. mollis spruce ex j .a. schmidt*.

Uma análise a ser feita a partir das distribuições de frequência dos fatores β e γ é em relação aos seus valores previstos pelo modelo. Em uma espécie com ramificações dicotômicas em sua maioria, conforme equação 2.21 e 2.23, os valores previstos para β e γ no modelo para uma estrutura fractal ideal, serão 0,707 e 0,79, respectivamente.

Para a distribuição de frequência β na espécie Goiaba Araça - *Eugenia stipitata mcvaugh*, Figura 57, espécie que apresentou ramificações em suas maioria dicotômicas e estrutura do tipo simpodial. O pico da distribuição com maior intensidade de valores concentrados está próximo de 0,4, evidenciando um valor não condizente com a teoria. Para relação γ , Figura 52, o valor é mais significativo, com valores próximos de 0,9.

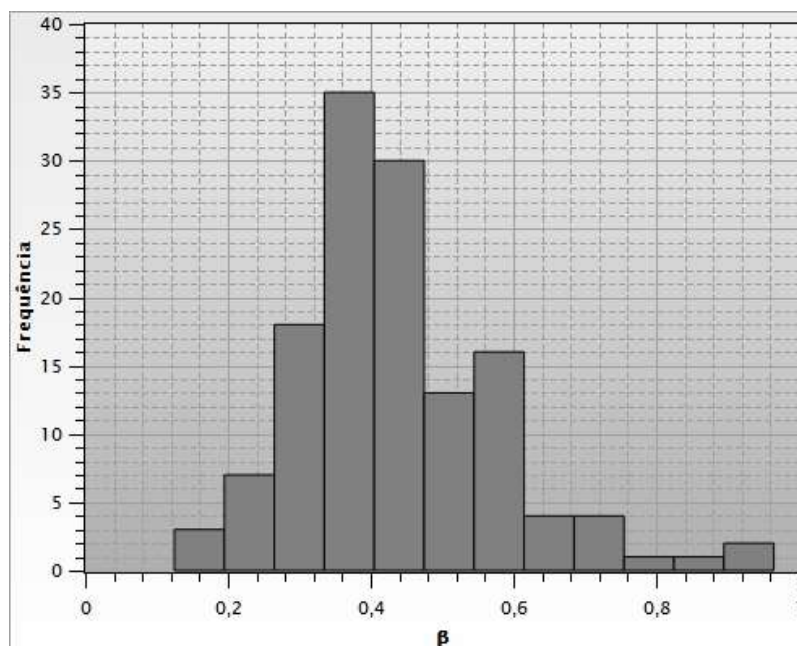


Figura 57: Distribuição de frequência do fator de escala beta para a espécie Goiaba Araça - *Eugenia stipitata mcvaugh*.

A análise para a espécie Mucurão - *Gustavia augusta* – *membrillo* denotou maior concordância com a teoria, com valores concentrados no pico de maior intensidade da distribuição, Figura 58, situando-se em intervalos próximos de 0,7. Nota-se que o valor de coeficiente de variabilidade para essa distribuição é fortemente afetado por valores em outros picos de intensidade considerável. Para valores de γ , Figura 53, menos significativo de 0,5.

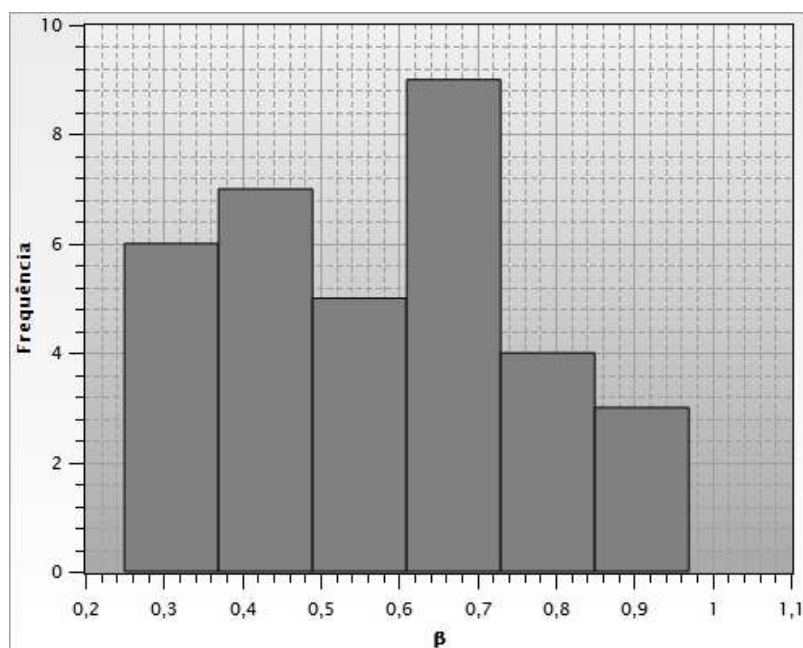


Figura 58: Distribuição de frequência do fator de escala beta para a espécie Mucurão - *Gustavia augusta* – *membrillo*.

A comparação do valor previsto para a espécie Bacurizeiro - *Platonia insignis*, por ter ramificações em sua maioria de estrutura monopodial, no cálculo de β e γ via modelo, utilizou-se para o n nas equações 2.21 e 2.23, considerando o número de galhos derivados da espécie, que são 47. Resultando em $\beta \approx 0,3$ e $\gamma \approx 0,14$. A distribuição de frequência, Figura 59, evidencia boa concordância com a teoria, apresentando em seu pico principal valores próximos ao previsto pelo modelo. Além de ser a mais promissora, do ponto de vista da análise de dispersão dos valores de β e γ . Em relação a γ apresentou resultado relativamente significativo de valores próximos de 0,2, visto na Figura 55.

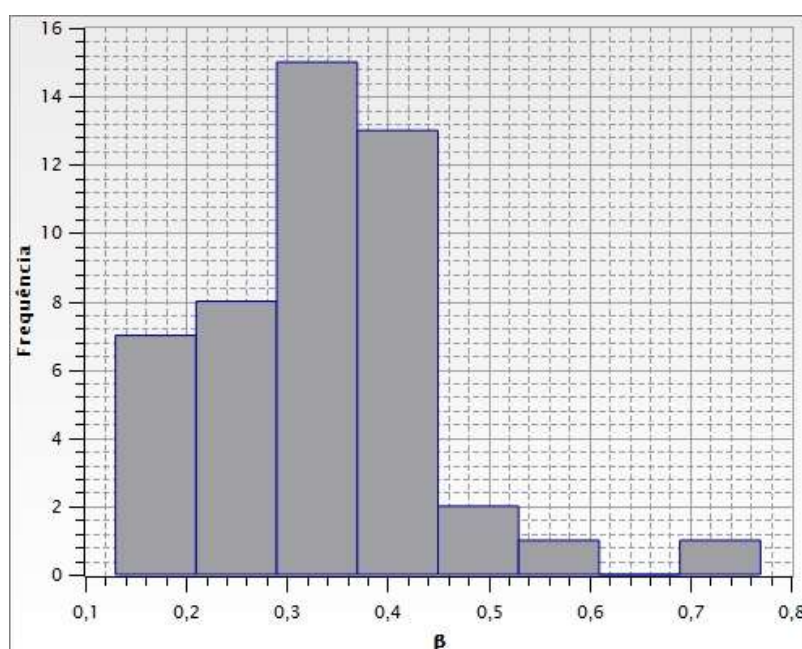


Figura 59: Distribuição de frequência do fator de escala beta para a espécie Bacurizeiro - *Platonia Insignis*.

A espécie João Mole - *Neea cf. mollis spruce ex J .A. schmidt* apresentou concordância para β , conforme Figura 56, valor aproximado de 0,7. Para γ , Figura 54, valor não significativo de 0,3.

A fractalidade destas espécies pode ser estimada de modo qualitativo como a combinação dos valores de $C.V$ dos fatores de escala β e γ , que refletem a capacidade das espécies em preencher espaço com ramificações que são descritas pelos fatores de escala de crescimento. Em uma sequência decrescente de fractalidade, segundo as imposições feitas, seria o Bacurizeiro - *Platonia insignis*, Goiaba Araça - *Eugenia stipitata mcvaugh*, João Mole - *Neea cf. mollis spruce ex j .a. schmidt* e Mucurão - *Gustavia augusta – membrillo*.

Um parâmetro a ser mensurado a seguir, a dimensão fractal, também pode ser combinado com as análises dos fatores de escala β e γ , de modo a refinar a estimativa de fractalidade resultante.

A dimensionalidade das espécies que foram estudadas neste trabalho foi verificada via cálculo da dimensão fractal, etapa realizada pelo método *Box Counting*. Um cuidado especial deve ser tomado na interpretação do resultado obtido por este método, uma vez que vários valores de dimensão não inteiros podem ser obtidos, por terem essa característica denotam uma estrutura fractal podendo levar a uma escolha arbitrária deste resultado. Levando esta afirmação em conta, antes mesmo de obter este valor, não há dúvida que as quatro espécies estudadas, possuem, estatisticamente, estrutura geométrica do tipo fractal.

A utilização de somente o valor da dimensionalidade limita a descrição destas estruturas, por isso, tão importante quanto o valor da dimensionalidade a ser obtido, é observar nas etapas da implementação do programa que calcula a dimensionalidade, quantas caixas sobrepõem partes da estrutura da espécie a cada aumento do números de caixas realizado a cada iteração. Isto reforça a ideia de preenchimento destas estruturas no espaço em que estão inseridos, não levando em conta a regularidade no crescimento em espessuras e diâmetros inerentes às estruturas fractais.

O cálculo da dimensionalidade das espécies foi verificado com um programa escrito na linguagem *R*, cujo arquivo de entrada são os níveis (k) da estrutura da árvore, diâmetros e comprimentos de galhos. O arquivo de saída contém o número de divisões ($1/\varepsilon$) de cada dimensão da caixa que contém a planta, o número de caixas que contém pelo menos uma parte da estrutura da planta e por ultimo a dimensionalidade obtida com esses parâmetros citados. As Tabelas 8 - 11 contém estas informações citadas para as quatro espécies:

Tabela 8 Parâmetros utilizados no cálculo de dimensionalidade da espécie Bacurizeiro - *Platonia insignis*.

Bacurizeiro - <i>Platonia insignis</i>		
Nº de Caixas	Caixas que interceptam a estrutura	Dimensão Fractal D_f
8	64	2
16	156	1,82
24	268	1,76
32	385	1,71
40	506	1,69

Tabela 9 Parâmetros utilizados no cálculo de dimensionalidade da espécie Bacurizeiro - João Mole - *Neea cf. mollis spruceex j .a. schmidt*.

João Mole - <i>Neea cf. mollis spruceex j .a. schmidt</i>		
Nº de Caixas	Caixas que interceptam a estrutura	Dimensão Fractal D_f
8	66	2,01
16	183	1,88
24	354	1,85
32	643	1,86
40	1126	1,90

Tabela 10 Parâmetros utilizados no cálculo de dimensionalidade da espécie Mucurão - *Gustavia augusta* – *membrillo*.

Mucurão - <i>Gustavia Augusta</i> – <i>membrillo</i>		
Nº de Caixas	Caixas que interceptam a estrutura	Dimensão Fractal D_f
8	56	1,93
16	132	1,71
24	198	1,66
32	275	1,62
40	350	1,58

Tabela 11 Parâmetros utilizados no cálculo de dimensionalidade da espécie Goiaba Araça - *eugenia stipitata mcvaugh*.

Goiaba Araça - <i>Eugenia stipitata mcvaugh</i>		
Nº de Caixas	Caixas que interceptam a estrutura	Dimensão Fractal D_f
8	44	1,81
16	121	1,73
24	188	1,65
32	275	1,62
40	373	1,61

A análise de preenchimento com a aplicação do método *Box Counting* pode ser verificada na quantidade de caixas que interceptam a estrutura, combinado com os valores de dimensionalidade correspondentes nas Tabelas 8 – 11, esses valores somados a cada iteração foram os seguintes, Bacurizeiro - *Platonia insignis* (1379, $D_f=1,69$), João Mole - *Neea cf. mollis spruce ex j .a. schmidt* (2372, $D_f=1,90$), Mucurão - *Gustavia augusta* – *membrillo* (1011,

$D_f=1,58$) e Goiaba Araça - *Eugenia stipitata mcvaugh* (1001, $D_f=1,61$). Quando comparado com a análise de fractalidade via histogramas de distribuição de frequência dos fatores de escala de crescimento em espessuras e comprimentos β e γ , a baixa fractalidade nas espécies Mucurão - *Gustavia augusta – membrillo* e Goiaba Araça - *Eugenia stipitata mcvaugh* é intensificada com os valores de preenchimento e D_f obtidos. A espécie Bacurizeiro - *Platonia insignis*, a mais promissora do ponto de vista de regularidade no crescimento, não obteve resultado tão satisfatório na análise de preenchimento, nesta a mais promissora foi a espécie João Mole - *Neea cf. mollis spruce ex j .a. schmidt*, obtendo o maior valor de dimensionalidade e preenchimento quando comparado com as outras espécies.

O valor de dimensionalidade mais alto para a espécie João Mole - *Neea cf. mollis spruce ex j .a. Schmidt*, mesmo sendo a menor em tamanho das espécies e com galhos de pequena espessura, é justificado pelo seu preenchimento efetivo na dimensão do espaço que ocupa ser maior, a espessura pequena de galhos é compensada pela quantidade mais intensa de galhos ramificados. A espécie Mucurão - *Gustavia augusta – membrillo*, apesar de ser a maior em tamanho e com galhos de espessura maior, é menos ramificado, acarretando em um preenchimento efetivo menor, característico de espécies com grandes folhas. A espécie Goiaba Araça - *Eugenia stipitata mcvaugh*, em nossas expectativas teria a maior dimensionalidade, visivelmente mais ramificada que as outras espécies. Devido à dificuldade operacional em calcular a dimensionalidade utilizando todo o ramo, um galho do ramo foi utilizado, possivelmente ele não foi representativo da espécie, acarretando em um valor não condizente para a espécie.

Uma análise comparativa entre os valores de expoente alométrico da distribuição de frequência de galhos e dimensionalidade não nos permite afirmar que exista uma correlação entre essas duas variáveis. Foi constatado que a dimensionalidade do João Mole - *Neea cf. mollis spruce ex j .a. Schmidt* é de 1,90 para 40 divisões, diferindo dos valores correspondentes para as outras espécies que estão em torno de 1,6. Contudo, quando se analisa o expoente alométrico do João Mole - *Neea cf. mollis spruce ex j .a. schmidt*, não se observa que essa quantidade se diferencia estatisticamente dos expoentes das outras espécies. O mesmo pode ser visto aos valores observados de β e γ .

6. CONCLUSÕES

Os expoentes de alométricos de galhos e de troncos, mensurados com metodologia semelhante à utilizada pelos autores do modelo em florestas, foram distintos, evidenciando a não universalidade de crescimento dos expoentes em florestas de igapó.

O expoente de distribuição de tamanho de troncos, -1,5261, possivelmente difere do previsto -,2, por tratar-se de um ambiente absolutamente distinto das condições previstas pela teoria.

Possivelmente medidas futuras da distribuição de frequência de espessuras de galhos com um número maior de espécies podem indicar um expoente estatisticamente mais próximo que o previsto pela teoria.

Valores de β e γ observados nas distribuições de frequências dos fatores de escala para a espécie Bacurizeiro - *Platonia insignis*, com característica de estrutura monopodial, evidenciam expressiva concordância com valores previstos, denotando fractalidade e regularidade acentuada no crescimento de galhos e espessuras.

Estruturas de espécies com ramificações dicotômicas em sua maioria, denotaram significativa concordância de valores previstos com observados nos picos das distribuições de frequência do fator β , exceto a espécie Araça - *Eugenia Stipitata mcvaugh*.

Valores de dimensionalidade das estruturas das espécies foram similares, exceto para a espécie João Mole - *Neea cf. mollis spruce ex j .a. schmidt*, não sendo observado correlação entre a dimensão fractal e expoentes alométricos de galhos das espécies, nem com o fator de escala β .

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como perspectivas de futuros trabalhos pretendemos verificar as possíveis influências do regime de cheia na fractalidade de espécies, com a realização de aferições no período de cheia e estiagem, incluindo a estimativa de absorção e captação de carbono acima do solo, uma vez encontrado um expoente de

crescimento comum entre espécie e o bioma local, pode-se iniciar a implementação de um modelo de estimativa de captação de carbono por meio de uma espécie, que poderá possivelmente ser generalizado para uma parcela do ecossistema onde a espécie está inserida.

Uma análise via cálculo de entropias em multiescalas dos dados de espessuras de troncos e galhos, pode ser realizada, esta técnica permite quantificar em qual escala ocorre maior perda de informação de auto similaridade, possivelmente ajudaria no embasamento dos expoentes de escala.

Outra extensão desse trabalho seria um estudo de fractalidade em áreas de terra firme, em espécies representativas desse bioma, bem como, inserir possíveis relações entre a dimensionalidade das folhas e da estrutura de galhos e troncos, outro trabalho interessante seria a análise de dimensionalidade das Embaubeiras, espécies com auto endemismo em áreas de várzea e de degradação.

Finalmente, podemos também estender esta ideia para modelagem de bacias hidrográficas, imagens de satélite auxiliariam na estimativa de dimensionalidade por meio de fatores de escala, possibilitando comparações de expoentes de escala do ecossistema como um todo, verificando se há universalidades nesses expoentes.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB' SABER, A. N. Os domínios de natureza no Brasil. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.

ANDERSEN, O. As frutas silvestres brasileiras. Rio de Janeiro: Globo, 1988.

ASHMOLE, N.P.1971. Seabird ecology and the marine environment, in avian Biology Vol1, ed. D.S. Farner, J. R. King, and K. C. Parkes, pp. 223-286. New York: Academic Press.

AYRES, J.M.1995. As matas de várzea do Mamirauá: Médio Rio Solimões. 2ed. Brasília, DF: CNPq; Tefé, AM: Sociedade Civil Mamirauá 124p.

BEGON, M. ;HARPER, J.L. TOWNSEND, C.R. 1990. Ecology Individuals, populations and communities. Cambridge, Blackwell, Scientific Publications.

BIEWENER, A. A. "Biomechanics of mammalian terrestrial locomotion". *Science* 250 (1990) 1097.

BROWN, J. H. & LOMOLINO, M. V. 1998. Biogeography, 2ª ed. Sinauer Associates, Inc., Sunderland, MA.

CALZAVARA, B.B.G. Fruteiras: abieiro, abricoeiro, bacurizeiro, cupuaçuzeiro. Belém: IPEAN. v. 1, n2, 84p. 1970 (Série Culturas da Amazônia)

CAVALCANTE, P.B. Frutas comestíveis da Amazônia. Belém: CNPq/ Museu Paraense Emílio Goeldi, 6. ed, 1996. 279 p.

CHAVE, J. CONDIT, R.; AGUILAR, S.; HERNANDEZ, A.; LAO, S.; PEREZ, R. 2004. *Error Propagation and Scaling for Tropical Forest Biomass Estimates. Philosophical Transactions of the Royal Society London B*, 359: 409-420.

CRONQUIST, A. 1968. The evolution and classification of flowering plants. Houghton Mifflin. Boston.

CRONQUIST, A. 1981. An integrated system of classification of flowering plants. Columbia University Press. New York.

CRONQUIST, A. 1988. The evolution and classification of flowering plants. Ed. 2. The New York Botanical Garden. New York.

ETIENNE, RAMPAL S., M. EMILE F. APOL, AND H. A. N. OLFF. "Demystifying the West, Brown & Enquist model of the allometry of metabolism." *Functional Ecology* 20.2 (2006): 394-399.

FALESI, I.C. 1984. Estado atual de conhecimento dos solos da Amazônia Brasileira. In: SIMPÓSIO DO TRÓPICO UMIDO, Belém, 1984, pg. 168-191 (Embrapa- CPATU, Documentos, 36).

FERREIRA, F.R.; FERREIRA, S.A. do N.; CARVALHO, J.D.U. de. Espécies frutíferas pouco exploradas, com potencial econômico e social para o Brasil. *Rev. Bras. Frutic.*, v.9, p.11-22, 1987.

FERREIRA, L. V. 2000. Effects of flooding duration on species richness, floristic composition and forest structure in river margin habitat in Amazonian blackwater floodplain forest: implications for future design of protected areas. *Biodiversity and Conservation*, 9:1 – 14.

FURCH, K. 1997. Chemistry of várzea and igapó soils and nutrient inventory of their floodplain forests. In: JUNK, W. J. (ed.). *The Central Amazon floodplains. Ecology of a Pulsing System*. Berlin. p. 47-64.

G.B. WEST, J.H. BROWN AND B.J. ENQUIST, *Science* 276, 122 (1997).

GOULD, S. J. Allometry and size in ontogeny and phylogeny. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, v. 41, n. 4, p. 587–640, 1966.

GREENEWALT, C. H. "The energetics of locomotion -Is small size really disadvantageous?". *Proc. of the Amer. Philosophical Society* 121 (1977) 100.

GREIG, N. 1993. Predispersal seed predation on five Pier species in tropical rainforest oecologia 93:412-420.

HEMMINGSEN, A. M. "Energy metabolism as related to body size and respiratory

HOLBROOCK, N. M. & PUTZ, F. E. 1989. Influence of neighbors on tree form: effects of lateral shade prevention of sway on the allometry of *Liquidambar styraciflua* (sweet gum). *American Journal of Botany*, 76: 1740-1749.

HOREL, J.D.; HAHMANN, A.N.; GEISLER, J.E. An investigation of the annual cycle of convective activity over the tropical Americas. *Journal of Climate*, 2(11), 1388 - 1403, 1989;

J. W. FUSELER, C.F. MILLETE, J.M. DAVIS, W. CARVER, Fractal and image analysis of morphological changes in the actincytoskeleton of neonatal cardiac fibroblasts in response to mechanical stretch. *Microcirculation* 13(2007) 133-433. Doi: 10.1017/S14319276070700225.

JUNK, W.J (1989) Flood Tolerance and Tree distribution in central Amazonian floodplains *Tropical forest* 47-64.

KALLIOLA, R.; PUHAKKA, M.; DANJOY, W. Amazonia peruana: vegetación húmeda a tropical en el llanos andinos. Finlandia: Gummerus Printing, 1993. 265p.

KLEIBER, M. Body size and metabolism. *Hilgardia*, v. 6, p. 315–351, 1932.

KOZLOWSKI J, KONARZEWSKI M Is West, Brown and Enquist's model of allometric scaling mathematically correct and biologically relevant?. *Funct. Ecol.* 18, 283–289. 2004 [doi:10.1111/j.0269-8463.2004.00830.x](https://doi.org/10.1111/j.0269-8463.2004.00830.x).

KUBITZKI, K. 1989. The ecogeographical differentiation of Amazonian inundation forests. *Plant Systematics and Evolution*, 162: 285–304.

LISBOA, P. L. B.; TEREZO, E. F. M.; SILVA, J. C. A. 1991. Madeiras Amazônicas: considerações sobre exploração, extinção de espécies e conservação. *Boletim Museu Paraense Emílio Goldi, Sér. Bot.* 7(2).

LOUREIRO, A. A.; SILVA, M. F.; ALENCAR, J. C. Essências madeireiras da Amazônia. Manaus - Amazonas: INPA, 1979. 186p.

RUBNER, M., Über den Einfluss der Körpergrösse auf Stoff-und Kraftwechsel, *Zeitschrift für Biologie (Munich)* 19 (1883) 535–562.

MALHI, Y; WRIGHT, J.; *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Biol. Sci.* 359, 311 (2004).

MALUF, A. M.; Pisciotano-Ereio, W. A. 2005. Secagem e armazenamento de sementes de cambuci. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 40 (7): 707-714.

MANDELBROT BB. *The fractal geometry of nature*. New York: WH Freeman; 1982.

MCMAHON, T. & BONNER, J. T. “Tamaño y Vida”. *Scientific American*, 1983.

MOURÃO, K. S. M., BELTRATI, C. M.. "Morfologia dos frutos, sementes e plântulas de *Platoniainsignis* Mart.(Clusiaceae). III. Germinação e plântulas." *Acta Amazônica, Manaus* 25.1/2 (1995): 47-53.

NASCIMENTO, H.E.M. & LAURANCE, W.F. 2002. Total aboveground biomass in central Amazonian rainforest: a landscape-scale study. *Forest Ecology and Management*, 168: 311-321.

NIKLAS, K. J. *Plant allometry: the scaling of form and process*. Chicago: The University of Chicago Press, 1994.

PANDOLFO, C. A realidade da amazônica: Amazônia Brasileira – O meio físico, os recursos naturais. Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia – SUDAM, 1973. 43 p.

PEITGEN, H.; HARMUT, J.; SAUPE, D., Chaos and Fractals: NewFrontiers of Science, Springer, New York, 1993.

PIEIDADE, M.T.F.; WITTMANN, F.; SCHÖNGART, J., PAROLIN, P. (Org.). *Central Amazonian Floodplain Forests: Ecophysiology, Biodiversity and Sustainable Management*. 1ed. Heidelberg: Springer Ecological Studies, p. 301-312.

PRANCE, G.T. Distribution patterns of lowland Neotropical species with relation to history, dispersal and ecology, with special reference to Chrysobalanaceae, Caryocaraceae and Lecythidaceae. In: LARSEN, K. & HOLM-NIELSEN, L.B. Tropical botany; London, Academic Press, 1979, p.59-87.

PROCÓPIO, L.C. SECCO, R.S. 2008. A importância da identificação botânica nos inventários florestais: o exemplo do “tauari” (*Couratari* spp. e *Cariniana* spp. – Lecythidaceae) em duas áreas manejadas no Estado do Pará. *Acta Amazonica* 38(1): 31-44. Rankin-de-Merona, J.M. & Ackerly, D.D. 198

PROCÓPIO, L.C. 2010. Auto-ecologia de espécies de *Couratari* (Lecythidaceae): uma abordagem para o manejo e conservação. Tese de doutorado. INPA. Manaus. 143p.

RANZANI, G. 1980. Identificação e caracterização de alguns solos da Estação Experimental de Silvicultura Tropical do INPA. *Acta Amazonica*, 10(1): 7-41.

RIBEIRO, B. G. Amazônia urgente: 5 séculos de história e ecologia. Belo Horizonte – MG: Itatiaia, 1990. 272p.

RIZZINI, C. T.; FILHO, A. F. C.; HOUAISS, A. Ecossistemas brasileiros. Rio de Janeiro: Index, 1988. 200p.

RODMAN, J.E., OLIVER, M.K., NAKAMURA, R.R., McCLAMMER Jr., J.V. & BLEDSOE, A.H. 1984. A taxonomic analysis and revised classification of Centrospermae. *Syst. Bot.* 9(3): 293-323.

SCHMIDT – NIELSEN K. (1984) *Scaling: Why is Animal Size so Important?*, Cambridge University Press.

SCHÖNGART, J.; PIEDADE, M. T. F.; WITTMANN, F.; JUNK, W. J.; WORBES, M.. Wood growth patterns of *Macaranga acaciifolia* (Benth.) Benth. (Fabaceae) in Amazonian black-water and white-water floodplain forests. *Oecologia*, 145: 454–461, 2005.

SILVA, F. E. Análise da Integridade Estrutural de Compósitos Através da Caracterização Fractal de Sinais de Emissão Acústica. 2002. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

SILVA, F. M. R.; THEY, N. H.; TROIAN, V. R. R.; KINDLE, A. Densidade populacional e relações alométricas de *Psychotria leiocarpa* Cham. & Schltdt. (Rubiaceae) em paisagem fragmentada no Morro Santana, Porto Alegre, RS. *Revista Brasileira de Biociências*, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 486-488, jul. 2007.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. 2008. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. *Revista Floresta*. V.38, n.1.185-205.

VILLAR RAÚL, LÓPEZ. LÓPEZ CAYETANO, CUSSÓ FERNANDO, *Fundamentos Físicos de los Procesos Biológicos*, 1^o edição, Madri Ed. Club Universitario, Vol, 1, 422, 2014.

WALLER, D. M. *The dynamics of growth and form*. In: CRAWLEY, M. J. (Ed.). *Plant ecology*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1986. p. 291-320.

WEST GB, ENQUIST BJ, BROWN JH (2009) A general quantitative theory of forest structure and dynamics. *Proc Natl Acad Sci USA*.

WEST, G. B., BROWN, J. H. & ENQUIST, B. J. “The Origin of Universal Scaling

WEST, GEOFFREY B., JAMES H. BROWN, AND BRIAN J. ENQUIST. "The fourth dimension of life: fractal geometry and allometric scaling of organisms." *science* 284.5420 (1999): 1677-1679.

West. Oxford University Press, 2000.