



## Modelagem do crescimento e produção de árvores individuais aplicada às florestas tropicais manejadas: uma revisão

Erica Karolina Barros de Oliveira<sup>1\*</sup>, Leonidas Soares Murta Júnior<sup>2</sup>, Evandro José Linhares Ferreira<sup>3</sup>, Quétilla Souza Barros<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Pós-doutoranda em Ciências Florestais da Universidade Federal do Acre, Rio Branco, Acre, Brasil. <sup>2</sup>Analista Ambiental, Instituto Estadual de Florestas, Regional Nordeste, Teófilo Otoni, Minas Gerais, Brasil.

<sup>3</sup>Pesquisador, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Núcleo Acre, Rio Branco, Brasil. <sup>4</sup>Doutora, bolsista de programa de capacitação institucional, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Núcleo Acre, Rio Branco, Brasil. \*[karolina.czs@gmail.com](mailto:karolina.czs@gmail.com)

Recebido em: 07/07/2023

Aceito em: 17/05/2024

Publicado em: 31/07/2024

<https://doi.org/10.29327/269504.6.1-33>

### RESUMO

Em 1969 a técnica de modelagem do crescimento e produção foi aplicada pela primeira vez por Moser e Hall para florestas multiâneas e heterogêneas. Os modelos de crescimento e produção, sobretudo em nível de árvores são uma das ferramentas que pode balizar o planejamento florestal a longo prazo, subsidiando tecnicamente a seleção de espécies para exploração ou proteção e prescrição de tratamentos silviculturais mais adequados à sustentabilidade dos ecossistemas de florestas tropicais. Entretanto, atualmente poucos trabalhos os utilizam como subsídio técnico e econômico nas decisões silviculturais referentes ao manejo florestal por desconhecerem a viabilidade operacional dessa técnica. Sendo assim, esse trabalho visa apresentar uma revisão bibliográfica sobre modelagem do crescimento e produção de árvores individuais aplicadas às florestas tropicais, destacando os principais avanços relacionados à utilização desta abordagem desde suas aplicações iniciais até os dias atuais.

**Palavras-chave:** Manejo florestal sustentável. Competição florestal. Mortalidade.

## Dynamics of growth and production of individual trees in managed tropical forests: a review

### ABSTRACT

In 1969, the growth and production modeling technique was applied for the first time by Moser and Hall to heterogeneous and multianeous forests. Growth and production models, especially at the tree level, are one of the tools that can guide long-term forest planning, technically subsidizing the selection of species for exploitation or protection and prescription of silvicultural treatments that are more appropriate for the sustainability of tropical forest ecosystems. However, currently few works use them as technical and economic subsidy in silvicultural decisions regarding management because they are unaware of the operational viability of this technique. Therefore, this work aims to present a bibliographic review on modeling the growth and production of individual trees applied to tropical forests, highlighting the main advances related to the use of this approach from its initial applications to the present day.

**Keywords:** Sustainable forest management. Forest competition. Mortality.

## INTRODUÇÃO

Um dos principais desafios das pesquisas com florestas tropicais no mundo é entender e prever a dinâmica e a produtividade desses ecossistemas, principalmente para fins de gestão dos seus recursos florestais, visando explorar alternativas sustentáveis de manejo (REIS et al., 2016; REIS et al., 2018). Acredita-se que a estrutura física desses ambientes, bem como seus processos ecossistêmicos podem permanecer relativamente estáveis ao longo do tempo, mas, que a composição de espécies pode flutuar constantemente em torno de um quase equilíbrio ou se modificar lentamente a longo prazo (NEWBERY; LINGENFELDER, 2008).

Desenvolver técnicas realistas de modelagem, que possam, ao longo do tempo, identificar e prognosticar esse dinamismo (crescimento, mortalidade, recrutamento, estrutura da floresta) é, portanto, uma demanda constante das ciências florestais, principalmente para questões de manejo das florestas tropicais (VATRAZ et al., 2018).

Comumente, algumas técnicas de modelagem são utilizadas para descrever a dinâmica do crescimento e produção de uma floresta, utilizando informações correntes para inferir cenários futuros (NASCIMENTO et al., 2014). Conforme apontado por Peng et al., (2000) o primeiro modelo de crescimento e produção para florestas heterogêneas, produzido nos moldes semelhantes aos modelos atuais, foi o trabalho de Moser e Hall (1969). Desde então muitos outros modelos foram testados, com metodologias que passaram de uma abordagem empírica para uma mais ecológica, mecanística, baseada em processos que incorporaram várias técnicas, como sistemas de equações, projeções de tabela de volume não linear, cadeia de Markov, modelos matriciais e redes neurais artificiais (PENG et al., 2000).

Entre as diferentes técnicas de modelagem utilizadas para descrever o crescimento e a produção de uma floresta, destacam-se os modelos em nível de árvores individuais (MAI). Nestes modelos, cada árvore é estudada individualmente (CAMPOS; LEITE, 2017), levando-se em conta suas características individuais, a capacidade produtiva do local e as condições de competição às quais a árvore está submetida (CASTRO et al., 2020). O MAI é constituído por um conjunto de submodelos que estimam ingresso ou recrutamento e probabilidade de mortalidade ou sobrevivência, além do crescimento em diâmetro, altura e área basal (CAMPOS; LEITE, 2017; OLIVEIRA et al., 2021).

O primeiro estudo realizado com esse tipo de modelagem foi desenvolvido por Newhman (1964), em floresta de Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.)). Com o passar

dos anos, outros estudos foram desenvolvidos buscando a evolução dos modelos em nível de árvore individual e de seus componentes ou submodelos. Contudo, a maior parte dessas pesquisas está restrita as florestas da Austrália, Canadá, Europa e Estados Unidos (MARTINS et al., 2014), sendo escassos os estudos em áreas de elevada riqueza de espécies, sobretudo em florestas tropicais.

No Brasil, a maioria das pesquisas é direcionada para florestas equiâneas (CASTRO et al., 2013; MARTINS et al., 2014; MURTA JÚNIOR et al., 2020; MIRANDA et al., 2022; TÊO et al., 2022). Alguns modelos têm abrangência apenas nos submodelos ou não contemplaram todas as árvores de uma floresta (VATRAZ et al., 2018; MIRANDA et al., 2022) e, portanto, não são considerados modelos completos.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica sobre a modelagem do crescimento e produção de árvores individuais de florestas tropicais, para subsidiar decisões técnicas sobre o manejo florestal dessas áreas.

## **METODOLOGIA**

Este estudo foi elaborado a partir de extenso levantamento bibliográfico em livros, periódicos, dissertações e teses relacionados à aplicabilidade da modelagem do crescimento e produção em nível de árvores individuais (MAI) em florestas do Brasil e do mundo. Esperamos que os apontamentos aqui apresentados possam auxiliar na tomada de decisões técnicas e silviculturais referentes ao manejo florestal sustentável em florestas tropicais, especialmente na Amazônia Legal, como por exemplo, na determinação de ciclos de corte e intensidades de colheita mais adequados, já que muitos planos de manejo não apresentam fundamentos baseados nestas técnicas.

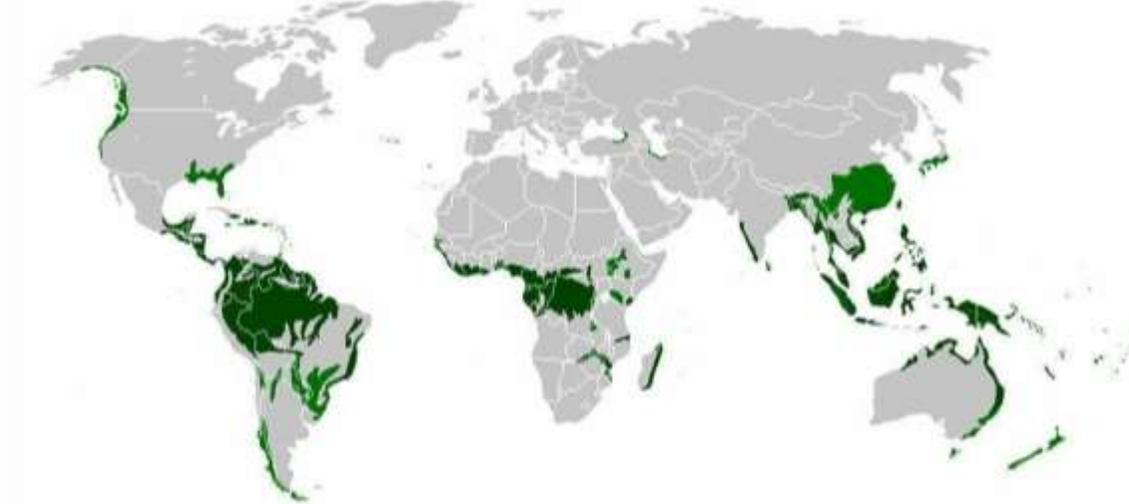
## **REFERENCIAL TEÓRICO**

### ***Florestas tropicais***

Embora ocupem somente 10% da superfície da Terra, estima-se que as florestas tropicais (Figura 1) são responsáveis por, aproximadamente, 50% de toda a biodiversidade do planeta (CORLETT, 2016) e 34% de toda a produtividade primária terrestre (BEER et al., 2010). As florestas tropicais também desempenham importante papel na manutenção do regime de chuvas, na proteção contra inundações, secas e erosões, além de atuarem na

regulação do clima, como fixadoras de gases do efeito estufa (GEE) (MASHA et al., 2017; PAN et al., 2011).

**Figura 1-** Localização das Florestas tropicais no mundo.



Fonte: Global Forest Watch, University of Maryland (2022).

Apesar da sua importância, as florestas tropicais estão sujeitas a altos níveis de distúrbios decorrentes de ações antrópicas (CUMMINGS et al., 2018), e, a conversão de suas áreas em outros usos, bem como a degradação de seus habitats, estão entre os principais responsáveis pela perda da biodiversidade destes importantes ecossistemas (NEWBOLD et al., 2014). A demanda global por produtos de origem agropecuária tem estimulado a expansão de extensas áreas de terra para implantação de pastagens e culturas agrícolas, contribuindo, conseqüentemente, para a remoção anual de milhares de hectares de florestas tropicais (HANSEN et al., 2013). Contudo, tal fato vem despertando o interesse, tanto de cientistas quanto de organizações governamentais e não governamentais, e, também da sociedade mundial, sobre a importância da conservação e do uso sustentável das florestas tropicais.

O Brasil se destaca no cenário mundial não apenas por possuir a segunda maior área florestal do mundo (SFB, 2013), representada na sua maioria por florestas tropicais, mas, principalmente, por abrigar a Floresta Amazônica, que é a maior floresta tropical do planeta (SANTIAGO et al., 2018; PHILLIPS; BRIENEN, 2017). Sendo também, o maior bioma

brasileiro em extensão (ARAGÃO et al., 2018), abrigando uma das maiores produções de madeira tropical no mundo, com potencial madeireiro estimado em 60 bilhões de m<sup>3</sup> em tora ou 04 trilhões de reais em madeira serrada (BRAZ et al., 2014).

Ao longo das últimas décadas, a cobertura original da Floresta Amazônica vem passando por várias alterações antrópicas, e, apesar de muitas controvérsias quanto a valores reais, estima-se que mais de 17% da cobertura florestal original da Amazônia brasileira já foi removida (LEITÃO et al., 2018), e isto, conseqüentemente já acarretou vários problemas ambientais, como, por exemplo, o significativo empobrecimento da biodiversidade (SILVÉRIO et al., 2015), as mudanças provavelmente irreversíveis no sistema climático global (BENNETT, 2017) e o desequilíbrio hidrológico (ARRAUT et al., 2012). Além disso, é importante destacar o impacto social decorrente destas alterações, já que na região encontram-se inseridas várias populações tradicionais como povos indígenas, seringueiros, ribeirinhos e castanheiros que dependem dos recursos da floresta para sua subsistência (BENATTI; FISCHER, 2018; FEARNSID, 2017).

Apesar da Floresta Amazônica ainda possuir grandes áreas remanescentes (FEARNSID, 2017), o desaparecimento de espécies endêmicas em áreas altamente desmatadas nas porções nordeste e sul deste bioma, já é uma realidade (MOURA et al., 2014). Portanto, é importante que ações de conservação e uso sustentável das áreas remanescentes, bem como recuperação de ambientes degradados, se tornem mais abrangentes e efetivas na região. Neste sentido, estudos que envolvam o monitoramento da dinâmica florestal são fundamentais para o fornecimento de informações que possam subsidiar pesquisas relacionadas a ecologia de populações e comunidades, mudanças ambientais, gestão de recursos naturais e conservação da biodiversidade (LINDENMAYER et al., 2012).

### ***Dinâmica de florestas tropicais***

Antes que a vegetação de um determinado local alcance uma relativa estabilidade em suas características fisiológicas, estruturais e florísticas, ocorre uma série de mudanças nas comunidades. Este processo é que se denomina de sucessão vegetal ou dinâmica (ODUM, 1976).

Estudos sobre dinâmica, apresentam relevante importância na quantificação das interações que acontecem em diversos ecossistemas (LEVIN et al., 2009), principalmente

nos ecossistemas florestais localizados nas regiões tropicais (REES et al., 2001), que têm ganhado grande destaque nas últimas décadas devido às alarmantes taxas de distúrbios nos habitats naturais (MUTHURAMKUMAR et al., 2006), os quais afetam, direcionam e modificam a dinâmica da vegetação (DENSLOW, 1980; JENTSCH et al., 2002).

No âmbito geral, os estudos da dinâmica de populações arbóreas buscam compreender e avaliar a flutuação nas taxas de crescimento, recrutamento e mortalidade (VANCLAY, 1994). Estas variáveis estão fortemente relacionadas entre si (FENNER, 1987; JENNINGS, 1997) e são extremamente importantes para o entendimento dos processos ecológicos que determinam as comunidades (CORRÊA; VAN DER BERG, 2002) e as estratégias de sobrevivência das populações vegetais (SCHIAVINI et al., 2001). Uma das maneiras mais práticas para avaliar a dinâmica em florestas tropicais é por meio da instalação e monitoramento contínuo de parcelas permanentes de inventário florestal (OLIVEIRA et al., 2019).

Historicamente, o monitoramento em florestas tropicais teve seu início a partir de 1930, com a instalação de parcelas permanentes em Budongo, Uganda (SHEIL et al., 1995) e em 1947, na Península da Malásia (MANOKARAN; SWAINE, 1994). Estas últimas de acordo com Joyas et al., (2005), foram implantadas com o objetivo de monitorar o crescimento da floresta, visando subsidiar a gestão e a exploração madeireira.

No Brasil, entre os anos de 1960 e 1980, através da coordenação e incentivo da Organização das Nações Unidas para Alimentação e a Agricultura (FAO), foram instaladas milhares de parcelas permanentes em diferentes biomas e tipologias florestais. De acordo com Silva et al., (2005) e Higuchi et al., (2007), as parcelas permanentes mais antigas no Brasil foram instaladas entre 1971 e 1985, nos estados do Pará e Amapá, sob a coordenação da Embrapa Amazônia Oriental e, entre estas, destacam-se as instaladas na Floresta Nacional do Tapajós, que são consideradas as mais antigas parcelas permanentes ainda em monitoramento no Brasil, e cujo potencial de produção madeireiro da floresta é avaliado periodicamente (ALDER et al., 2012).

As pesquisas relacionadas à dinâmica em florestas tropicais vão desde estudos básicos de biologia e ecologia das espécies arbóreas dentre esses se destacam: Hubbel et al., (1999), na Costa Rica e no Panamá. Até análises da dinâmica propriamente dita que buscam inferir sobre recrutamento, mortalidade e o crescimento da vegetação, destacando-se os trabalhos

de Uhl (1982) na Venezuela, Lieberman e Lieberman, (1987) na Costa Rica, Manokaran e Hochummen (1987) na Malásia.

Nas florestas brasileiras, destacam-se as pesquisas em áreas manejadas na Amazônia (CARVALHO, 1992; ROCHA, 2001; SILVA, 2004; D'OLIVEIRA; BRAZ, 2006; D'OLIVEIRA et al., 2017). Em diferentes fitofisionomias do bioma Cerrado, (BRANDO; DURIGAN, 2004; CARVALHO; FELFILI, 2011; OLIVEIRA et al., 2011; FRANZAK et al., 2011; VIRILLO et al., 2011; ROITMAN et al., 2007; RIBEIRO et al., 2012; SILVA, 2013; BARREIRA et al., 2000; REZENDE et al., 2006; SILVA NETO, 2011). Em áreas de Mata Atlântica (LONGHI, 1980; MELLO; LEITE, 1983; DURIGAN, 1999; PIZATTO, 1999; SCHAAF, 2001; PUCHALSKI; MANTOVANI; REIS, 2006; RIVERA, 2007), entre outros.

Para Francez et al., (2013) avaliar as mudanças na dinâmica vegetacional ao longo do tempo é de fundamental importância em áreas manejadas na Amazônia, para entender os processos e os mecanismos mantenedores da comunidade e para compreender o comportamento da vegetação frente aos impactos da extração seletiva (FRANCEZ et al., 2013). Neste contexto, quanto maior o conhecimento sobre a dinâmica e a riqueza biológica dessas florestas, mais eficientes serão as ações de manejo florestal sustentável, conservação e recuperação destes ecossistemas (SILVA et al., 2015).

### ***Manejo florestal e planejamento***

O manejo florestal sustentável (MFS) baseia-se na tomada de decisões de gerenciamento, que leva em consideração a organização, respeito, uso e a conservação da base de recursos florestais (SCHUCHOVSKI, 2014). Tais decisões podem envolver o futuro da floresta a longo prazo ou as atividades do dia a dia (BUONGIORNO; GILLESS, 1987). A priori, principalmente para os florestais, não deveria haver distinção entre os termos “Manejo Florestal, Manejo Florestal Sustentável, Manejo de Impacto Reduzido”, entre outros comuns e excessivamente apresentados nos meios de comunicação. Entretanto o uso da floresta pela sociedade nem sempre é sustentável ou visa o menor impacto à natureza, gerando casos que denotam a ausência do conhecimento da Ciência Florestal (NASCIMENTO et al., 2012).

O manejo florestal é uma prática relativamente comum em algumas florestas tropicais da África, Ásia e América Latina (D'OLIVEIRA et al., 2017). Embora não haja consenso entre alguns pesquisadores sobre a sustentabilidade do manejo que garanta a produção madeireira e a manutenção da biodiversidade (BURIVALOVA et al., 2014), diferentes estudos têm mostrado que para uma intensidade moderada de exploração (WEST et al., 2014), o uso de técnicas de impacto reduzido pode diminuir em até 50% os danos ao solo e a floresta remanescente (SIST, 2000; SIST; FERREIRA, 2007).

Na Amazônia brasileira, o manejo florestal está regulamentado atualmente, como regime legal para a extração madeireira (Decreto 5.975/2006, Instruções Normativas MMA 04 e 05/2006 e Resolução CONAMA 406/2009), utilizando a Extração de Impacto Reduzido (EIR), que tem como preceito garantir a produção madeireira de forma sustentável, econômica ecológica e social, caso seja executado como especificado nas normas vigentes. Essa sustentabilidade é apresentada na lei de gestão de florestas públicas (Lei nº 11.284/2006), que conceitua o manejo florestal como a administração da floresta para a obtenção de benefícios econômicos, sociais e ambientais, respeitando-se os mecanismos de sustentação do ecossistema, objeto do manejo (BRASIL, 2006).

De acordo com os princípios e critérios do FSC (*Forest Stewardship Council*) e as diretrizes da ITTO (*International Tropical Timber Organization*), um dos pré-requisitos do Manejo Florestal é que a colheita da produção florestal não deve exceder a taxa de regeneração da floresta. Portanto, é necessário planejar e implementar uma produção sustentada para a colheita florestal (HIGMAN et al., 2015), bem como conhecer as estratégias de regeneração das diferentes espécies arbóreas para avaliar os efeitos, a longo prazo, das alterações antropogênicas na dinâmica da floresta (CLARK; CLARK, 1999).

Em qualquer plano de manejo, o conceito de manejo florestal só estará completo se houver uma previsão razoável do quanto à floresta irá se recuperar dentro de um intervalo de tempo (BRAZ et al., 2012). Assim sendo, diferentes técnicas de modelagem florestal podem ser utilizadas como uma importante ferramenta para entender que fatores são responsáveis pelo comportamento a longo prazo das florestas tropicais. Com esse entendimento, o manejo florestal pode ser aplicado de forma inteligente para minimizar os impactos antrópicos sobre o equilíbrio das espécies existentes (KÖHLER; HUTH, 1998).

### ***Modelos de crescimento e produção florestal***

Um modelo é uma abstração ou uma representação simplificada de algum aspecto da realidade (VANCLAY, 1994), construído de acordo com objetivos específicos (SANQUETTA, 1996). Um modelo pode ser de natureza quantitativa ou qualitativa e os modelos de produção são integradores de múltiplos campos do conhecimento (WEISKITTEL et al., 2011).

Somente no início da década de 90, a modelagem do crescimento passou a ser aplicada às florestas tropicais (ADLARD et al., 1989; ALVAREZ-BUYLLA; GARCIA-BARRIOS, 1991; BOSSEL; KRIEGER, 1991; ALDER, 1992; HOWARD; VALERIO, 1992; VANCLAY, 1994; OSHO, 1996; ALBERS, 1996; ALDER; SILVA, 2000). As duas principais dificuldades encontradas pelos modeladores na época foram: falta de dados de campo para ajustar e validar um modelo de crescimento (AZEVEDO et al., 2008; VANCLAY, 1994) e, a grande riqueza de espécies ou complexidade de ambientes dos ecossistemas tropicais (LAURANCE et al., 2018; ROCHA et al., 2018).

Com o aumento de dados disponíveis de parcelas permanentes coletados a longo prazo em florestas tropicais (NAKASHIZUKA et al., 1999), e diante da necessidade de estudos de simulação no contexto de programas internacionais de proteção climática (IGBP, 1990), houve um crescente interesse em desenvolver modelos de crescimento para as florestas tropicais (LIU; ASHTON, 1999; CHAVE, 2000; PINARD; CROPPER, 2000).

Além disso, intensificou-se o interesse por modelos de crescimento para o planejamento de atividades de manejo (prescrição de intensidades de colheita e ciclos de corte adequados), muitas vezes com a cooperação de projetos europeus em desenvolvimento e institutos governamentais locais, dentre os quais destacam-se: o governo britânico na Indonésia (VAN GARDINGEN; PHILLIPS, 1999) e o alemão na Malásia (DITZER et al., 2000).

A maior parte dos estudos com modelagem de florestas tropicais foi desenvolvida nas florestas da Indonésia, Malásia e Guiana Francesa, como, por exemplo: Chave (1999b), que simulou padrões estruturais, sucessionais e espaciais em florestas manejadas na Guiana Francesa; Gourlet-Fleury e Houllier (2000), que modelaram o incremento diamétrico de uma floresta tropical de terras baixas também na Guiana Francesa; Kohler et al., (2001), que desenvolveram modelos de crescimento para espécies arbóreas em diferentes reservas

florestais da Malásia; Tietjen e Huth (2007), que modelaram a dinâmica de florestas manejadas na Malásia e no Paraguai; Huth e Ditzer (2000), que simularam diferentes cenários de exploração madeireira, para uma floresta inicialmente não perturbada em Deramakot na Malásia e Phillips (2003), que modelou os efeitos das intervenções silviculturais, sobre o crescimento e rendimento de diferentes florestas tropicais em Kalimantan na Indonésia.

Apesar da importância da modelagem do crescimento na sustentabilidade da produção madeireira, tanto do ponto de vista ambiental (REIS et al., 2018), quanto econômico (SANTANA et al., 2012), esta é uma técnica ainda negligenciada em muitos planos de manejo florestal no Brasil (REIS et al., 2018). Na Amazônia brasileira, por exemplo, poucos são os modelos de simulação que descrevem a dinâmica da floresta manejada (AZEVEDO et al., 2008). Dois modelos podem ser destacados: CAFOGROM, um modelo *cohort* (agrupamentos) e o SYMFOR, um modelo de árvore individual (ALDER; SILVA, 2000; AZEVEDO et al., 2008; PHILLIPS et al., 2004).

Realizar estimativas de crescimento e produção é algo implícito ao manejo florestal. Por isso, a modelagem do crescimento e da produção florestal é essencial para integrar as informações e desta maneira auxiliar na tomada de decisões, pois descreve a mudança em tamanho de um indivíduo ou população com o passar do tempo e é desenvolvida para realizar estimativas futuras de crescimento (MENDOZA; VANCLAY, 2008).

### ***Classificação dos modelos***

Os modelos de crescimento empregados na área florestal estão distribuídos em quatro grandes categorias (WEISKITTEL et al., 2011). Existem os modelos de crescimento e produção empíricos (*Empirical Models*); os modelos analíticos, mecanísticos ou de processos (*Based-Process Models*) (BORGES et al., 2012); os modelos mistos que combinam modelos de processo e estatísticos e os modelos de clareira também denominados de *gap models* (ZAMIN et al., 2013; WEISKITTEL et al., 2011).

Os modelos de clareiras ou *gap models* permitem descrever a sucessão florestal. Eles utilizam as funções-resposta para luz, nutrientes, água e simulam os processos de regeneração, crescimento e mortalidade (BUGMAN et al., 1996). Como exemplo de modelo de clareira, tem-se o modelo JABOWA (BOTKIN, 1993).

Os modelos mecanísticos ou de processos descrevem a circulação, transformação e acúmulo da energia em matéria (HASENAUER; MERKL; WEINGARTNER, 2001), ou seja, permitem relacionar desenvolvimento e crescimento com o ambiente e suas interações, com a preocupação de avaliar as causas do crescimento. Como exemplos de modelos mecanísticos ou de processos temos: ECOPHYS; MAESTRO; BIOMASS; PT; FOREST-BGC; FORCYTE II and 3-PG.

Já os modelos mistos mesclam características de modelos estatísticos e de processo (WEISKITTEL et al., 2011). Uma maneira de mesclar a modelagem processual com a modelagem estatística é inserir dados climáticos como covariáveis dentro de modelos biométricos tradicionais (SNOWDON et al., 1998). Outra opção para mesclar os dois métodos de modelagem é usar a primeira para prever o crescimento em biomassa e a segunda para traduzir a resposta de biomassa para algo mais prático para o manejador florestal, como volume ou número de árvores por hectare (LANDSBERG, 2003). Representam modelos robustos, mas com sensibilidade às mudanças climáticas. Ainda, os modelos híbridos minimizam o número de parâmetros necessários na modelagem, a qual pode ser realizada a partir de dados de inventário florestal tradicional (MONSERUD, 2003).

Já os modelos de crescimento e produção empíricos podem ser classificados segundo o nível de detalhamento de informações necessárias em três grandes grupos: modelos de crescimento e produção em nível de povoamento (MPP), modelos de distribuição diamétrica ou classes de tamanho (MDD) e modelos em nível de árvores individuais (MAI) (WEISKITTEL et al., 2011). A duas primeiras categorias desses modelos serão abordadas em termos de definição, enquanto a última categoria será descrita com maior detalhe.

### ***Modelos do tipo povoamento total (Whole stand models)***

Nos modelos em nível de povoamento total (MPT) as estimativas do crescimento e produção são fornecidas por unidade de área (AZEVEDO et al., 2016) sendo que o volume por área estimado ou projetado é obtido a partir de variáveis como idade, altura, área basal e índice de local (CAMPOS; LEITE, 2017).

As principais relações funcionais utilizadas no MPT referem-se principalmente aos modelos de Schumacher (1939), Buckman (1962) e Clutter (1963). Sendo o modelo de Clutter o mais difundido no Brasil, devido à sua menor complexidade, atendendo às

exigências de planejamento para produção de madeira de uso único (CAMPOS; LEITE, 2017).

### ***Modelos de distribuição diamétrica (Size class model ou Diameter class model)***

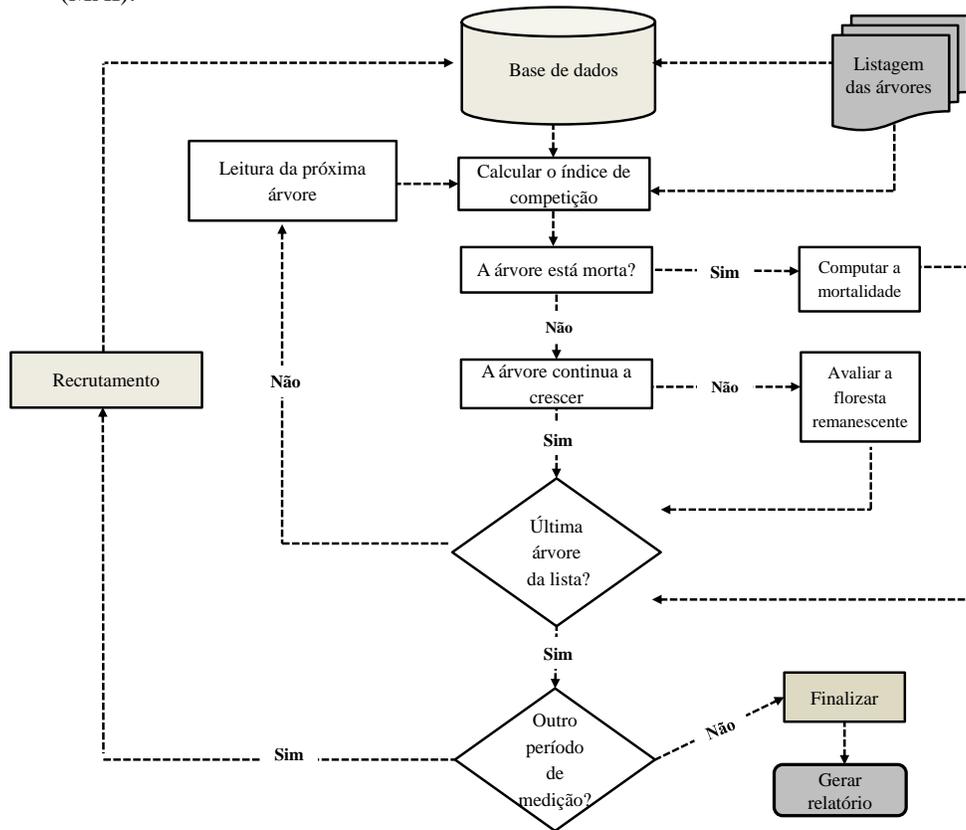
Os modelos de distribuição diamétrica (MDD) estimam o número de árvores e a produção por hectare, por classe de diâmetro, sendo assim, a produção total é obtida por meio do somatório da variável de interesse em todas as classes de diâmetro (CAMPOS; LEITE, 2017). Esses modelos se baseiam no ajuste de uma função densidade de probabilidade (*f.d.p.*) para descrever o comportamento atual e futuro da distribuição dos diâmetros em classes de amplitudes previamente definidas (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2013). Dentre as diferentes funções utilizadas para a caracterização da distribuição diamétrica de povoamentos equiâneos e florestas inequiâneas destaca-se a *f.d.p.* de Weibull (CAMPOS; LEITE, 2017; NASCIMENTO et al., 2016).

### ***Modelos em nível de árvores individuais (Individual Tree Model)***

Um modelo de crescimento e produção em nível de árvore individual é composto por três submodelos: mortalidade, crescimento (TOMÉ; BURKHART, 1989; REIS et al., 2018) e recrutamento (PRETZSCH; BIBER; DURSKY, 2002). Esses componentes da dinâmica florestal são necessários para a correta prognose do número de árvores, área basal, distribuição de diâmetros e produção (REIS et al., 2018).

Os MAI's simulam o crescimento de cada árvore em altura, diâmetro e copa, bem como a probabilidade de cada árvore viver ou não, calculando, por consequência, o crescimento em volume das árvores vivas (DAVIS; JOHNSON, 1987; CAMPOS; LEITE, 2017). Estes modelos, além de incluírem a qualidade do local, o diâmetro e altura da árvore, incluem também índices que indicam o grau de competição em que a árvore está submetida (VANCLAY, 1994). Em função do tipo de índice de competição os modelos em nível de árvores podem ser classificados em: dependente da distância, semi- independente da distância e independente da distância.

**Figura 2** - Fluxograma dos principais processos empregados na aplicação do modelo de Árvore Individual (MAI).



Fonte: Adaptado de (DAVIS; JONHSON, 1987).

Os modelos em nível de árvore têm a vantagem de gerar informações detalhadas sobre a dinâmica da estrutura das florestas (CASTRO et al., 2013; BURKHART; TOMÉ, 2012) e, portanto, se aproximam mais da complexidade de ecossistemas de florestas nativas tropicais, bem como, permitem simular diferentes intervenções de colheita florestal (REIS et al., 2018). Por outro lado, tais modelos apresentam algumas desvantagens que podem inviabilizar o seu uso. Dentre as principais desvantagens destacam-se o aumento dos custos com a coleta de dados contínuos para cada árvore (WEISKITTEL et al., 2011; BURKHART; TOMÉ, 2012); o grande número de funções envolvidas nos modelos e a falta de estudos que demonstrem sua precisão (CASTRO et al., 2013).

Newnham (1964) foi o primeiro pesquisador a desenvolver um modelo de crescimento e produção em nível de árvore para a predição do crescimento de povoamentos de Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco). A partir do estudo de Newnham,

diversos estudos já foram realizados, porém, a grande maioria se concentra nas florestas da Europa e América do Norte (CHASSOT et al., 2018). No Brasil, ainda são escassos os estudos envolvendo modelagem de árvores individuais.

Dentre os estudos que utilizaram modelos de crescimento e produção de árvores individuais, destacam-se: Hasenauer e Monserud (1996), que desenvolveram equações de crescimento para copa, diâmetro e altura, para diferentes espécies; Sterba e Monserud (1997), que desenvolveram uma equação de crescimento em área basal para *Pinus*; Tomé e Burkhardt (1989) e Pretzsch; Biber e Dursky (2002), que incluíram os submodelos de crescimento, mortalidade e ingresso em um único modelo.

A Tabela 1 apresenta também alguns estudos realizados no Brasil e no mundo com modelos de árvores individuais.

**Tabela 1** - Resumo de alguns modelos de árvores individuais e os ecossistemas aos quais foram aplicados.

<b>Modelo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Autor</b>
SYNFOR	-Originalmente desenvolvido para simular a dinâmica de floresta tropical manejada na Indonésia, mas, posteriormente, foi adaptado para as florestas da Guiana e Amazônia brasileira.	Phillips et al., (2003); Phillips et al., (2004)
TROLL	- Desenvolvido para floresta tropical da Guiana Francesa.	Chave (1999)
SELVA	- Desenvolvido para avaliar a dinâmica de florestas tropicais da Guiana Francesa.	Gourlet-Fleury (1997)
FORMIND	- Desenvolvido para floresta tropical da Malásia.	Köhler e Huth (1998)
PROGNOSIS	- Desenvolvido para florestas mistas de coníferas dos EUA.	Stage (1973);
PROGNAUS	- Desenvolvido para florestas alpinas mistas inequiâneas.	Sterba et al., (1995)
PTAEDA	- Desenvolvido para povoamentos de <i>Pinus taeda</i> .	Daniels e Burkhardt (1975)
FOREST	- Desenvolvido para florestas mistas dos EUA.	Ek e Monserud (1974)

### ***Estudos com modelagem de árvores individuais no Brasil***

Os estudos com modelagem de árvores individuais realizados no Brasil tem sido direcionados para povoamentos equiâneos (TÉO et al., 2022; MIRANDA et al., 2022; MURTA JÚNIOR et al., 2020; CASTRO et al., 2013). Alguns modelos têm abrangência apenas nos submodelos ou não contemplaram todas as árvores de uma floresta (CHASSOT et al., 2018; CUNHA et al., 2013; VATRAZ et al., 2018) e, portanto, não são considerados modelos completos.

O primeiro estudo com modelo completo em nível de árvore individual aplicado às florestas tropicais brasileiras para fins de prognose do crescimento e produção e que, incluiu submodelos de crescimento, mortalidade e recrutamento, foi desenvolvido por Phillips et al. (2004), para a Floresta Nacional (FLONA) do Tapajós, Estado do Pará. A partir deste estudo pioneiro, surgiram outros trabalhos com modelos de árvores individuais com enfoque em florestas naturais em diferentes regiões do Brasil. Na região norte, por exemplo, Oliveira (2021) desenvolveu um modelo completo de árvores individuais para Floresta Ombrófila Densa em Paragominas, Estado do Pará. Testando pela primeira vez, índices de competição independentes, dependentes e semi-independentes da distância para avaliar o grau competitivo das árvores após extração de impacto reduzido, o modelo gerado mostrou-se eficiente na prognose do crescimento, mortalidade e recrutamento.

Reis (2017), também utilizou a modelagem de árvores individuais, para floresta tropical manejada na FLONA Tapajós no Pará, utilizando redes neurais artificiais. Índices de competição semi-independentes da distância foram utilizados para avaliar o grau competitivo das árvores. A ferramenta utilizada proporcionou elevada precisão na prognose do recrutamento, no crescimento individual de árvores, na sobrevivência e na distribuição diamétrica, podendo ser utilizada para subsidiar as decisões silviculturais do manejo florestal sustentável na Amazônia.

Outro estudo na região norte do Brasil, foi realizado por Nascimento (2016), que desenvolveu um modelo completo de árvore individual independente da distância, via adoção de atributos populacionais como meio de classificação da produtividade local de diferentes ambientes perturbados em floresta tropical, em área de manejo florestal, pertencente à empresa Jari Florestal S.A., em Vitória do Jari, Estado do Amapá. O modelo proposto se comportou de forma flexível, consistente e robusta para a predição da dinâmica florestal dos diferentes tratamentos utilizados na composição, verificação e validação do simulador.

No sul do Brasil, Orellana (2014) desenvolveu dois modelos completos de árvores individuais, sendo um independente e outro dependente da distância para um fragmento de Floresta com Araucária, com o objetivo de avaliar a sucessão de grupos ecológicos, o comportamento da vegetação considerando diferentes regimes de manejo e a competição entre grupos de espécies. O desenvolvimento dos modelos pode contribuir na conservação de remanescentes de florestas de araucária manejadas.

Já na região sudeste do Brasil, Castro (2012) desenvolveu um modelo completo de árvore individual para espécies de Floresta Estacional Semidecidual (Mata Atlântica) em estágio médio de sucessão ecológica, situada no município de Viçosa, Minas Gerais. O modelo desenvolvido proporcionou estimativas precisas do crescimento e da produção, para todos os níveis de detalhamento estudados.

Muitos trabalhos com modelagem de árvore individual em florestas nativas também contemplam apenas uma espécie. Para espécies nativas destacam-se os trabalhos de Dellaflora et al., (2004) para *Nectandra megapotamica* (Spreng.) Mez., Weber (2007) para *Mimosa scabrella* Benth., Cunha et al., (2013) *Cedrela odorata* L., Curto (2015) e Chassot et al., (2018) para *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze, Santos (2019) para *Heremanthus incanus* Less. Em florestas plantadas, podem ser citados os modelos para eucalipto não desbastado (MENDES et al., 2006; SALLES, 2010; CASTRO et al., 2011); para eucalipto submetido a diferentes intensidades de desbaste (MURTA JÚNIOR et al., 2020) e para pinus (*Pinus taeda* L) (TÉO et al., 2022; MIRANDA et al., 2022).

### ***Índices de competição (IC)***

Diferentes modelos em nível de árvore incorpora a competição como uma variável para estimar o crescimento e a produção florestal (CONTRERAS et al., 2011; BÉRUBÉ-DESCHÊNES et al., 2017), além da mortalidade (PELTONIEMI; MÄKIPÄÄ, 2011) e do recrutamento (MUGASHA et al., 2016). Estes índices também podem auxiliar na identificação e diferenciação do estresse competitivo da árvore-objeto, em relação às suas competidoras (CANHAM et al., 2006), na distinção entre a competição acima e abaixo do solo (COATES et al., 2009), na separação da competição intra e inter-específica (KUNSTLER et al., 2016), na compreensão de mecanismos de competição e facilitação (interações positivas e negativas) (RÍO et al., 2013) e na identificação de mudanças nas interações competitivas ao longo do tempo (KIERMAN et al., 2008).

Diferentes estudos desenvolveram índices de competição principalmente para povoamentos equiâneos ou com poucas espécies (GLOVER; HOOL, 1979; BIGGING; DOBBERTIN, 1992, 1995; PRETZSCH, 2002; MARTINS et al., 2011; CASTRO, 2011; MURTA JÚNIOR et al., 2020). Para florestas heterogêneas e com grande riqueza de

espécies, a utilização destes índices tem sido dificultada devido à complexidade associada a esses ecossistemas (ORELLANA et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2021).

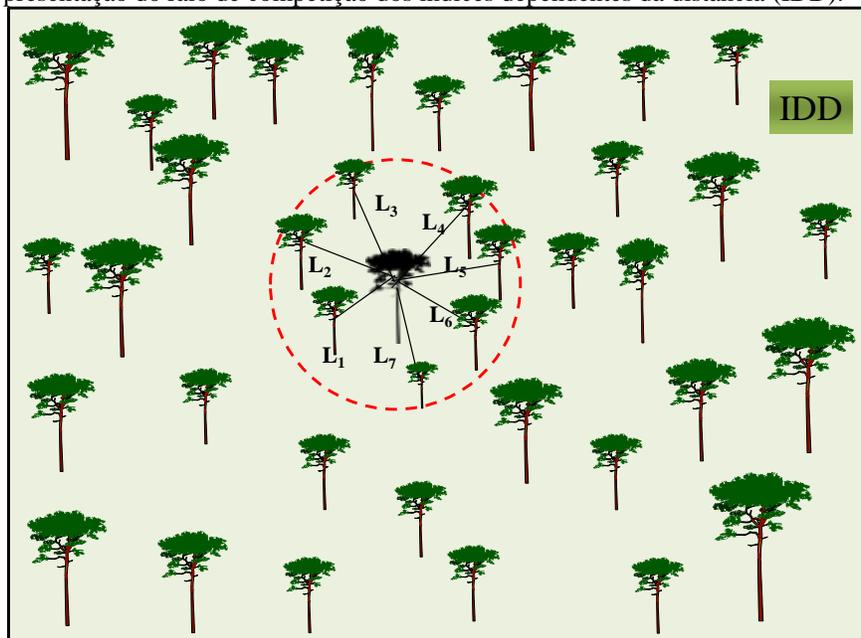
No Brasil, por exemplo, os estudos até então estão divididos entre comparações de diferentes índices e a inclusão do IC na modelagem do crescimento e produção e em alguns casos, na modelagem da mortalidade também. Alguns destes estudos focaram povoamentos de eucalipto (MARTINS et al., 2011; MURTA JÚNIOR et al., 2020) e pinus (MIRANDA et al., 2022; TÊO et al., 2022).

Pesquisas desenvolvidas na Floresta Amazônica inseriram os índices de competição como variáveis independentes em modelos de árvores individuais como, por exemplo, Vatrax et al., (2018), que desenvolveram modelos de crescimento e produção florestal para floresta manejada com a inclusão de índices de competição, Reis et al., (2018), que inseriu o índice de competição em modelos de mortalidade, Oliveira (2020) que inclui índices de competição em modelos de crescimento, mortalidade e recrutamento. Na Mata Atlântica, estudos foram conduzidos, para analisar a competição de algumas espécies, como *Araucaria angustifolia* (CHASSOT et al., 2018) e para investigar a competição existente entre grupos de indivíduos de araucárias, angiospermas heliófilas e angiospermas umbrófilas (ORELLANA, 2014). No mesmo bioma, Castro et al., (2014) analisaram a competição para um grupo de 36 espécies, já Lustosa Júnior et al., (2019) avaliaram a competição por grupo ecológico, para espécies tolerantes e intolerantes à sombra. No Cerrado, em área de mata de galeria, Roitman (2011) analisou a competição e o padrão espacial de todas as árvores amostradas.

Os índices de competição descritos na literatura são classificados em independentes da distância (IID), dependentes da distância (IDD) e semi-independentes da distância (ISI) (DANIELS et al., 1986; STAGE; LEDERMANN, 2008; LEDERMAN, 2010). O que diferencia conceitualmente cada categoria é o critério utilizado para expressar as relações entre as árvores (CASTRO et al., 2014).

Os índices dependentes da distância ou espacialmente explícitos levam em consideração as coordenadas espaciais que são atribuídas para cada árvore, as quais permitem ponderar a competição entre cada árvore (árvore objeto) e as árvores vizinhas (competidoras) pela distância (L), sendo mais complexos e minuciosos em termos de coleta de dados (HYNYNEN, 1995).

**Figura 3** - Representação do raio de competição dos índices dependentes da distância (IDD).



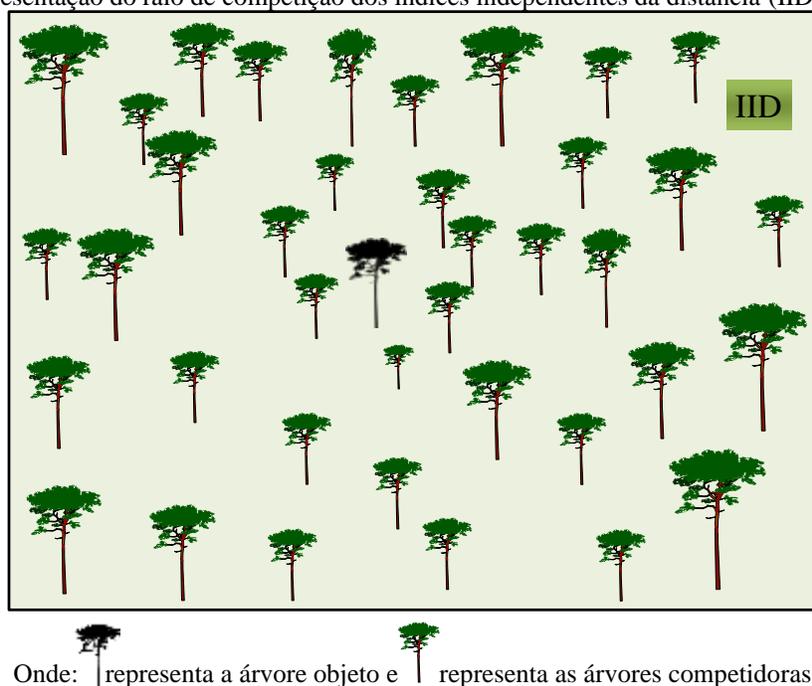
Onde:  representa a árvore objeto;  representa as árvores competidoras e  $L$  representa a distância entre a árvore objeto e suas competidoras.

A escolha das árvores vizinhas que afetam o crescimento de uma árvore-objeto é de suma importância na modelagem da competição entre árvores (WEISKITTEL et al., 2011). Para que se identifiquem as árvores competidoras, geralmente é atribuído ao redor da árvore objetivo, um raio, que pode ser fixo ou variável. Nos modelos de IC de raio fixo, uma área circular é atribuída a cada planta e as árvores contidas nesse círculo são consideradas vizinhas. O raio é fixado de forma arbitrária, mas, geralmente corresponde à área horizontal ocupada pelos indivíduos adultos (ROITMAN, 2011).

Nesses índices, à distância e distribuição das árvores que rodeiam a árvore objeto, deve ser conhecida, para uma melhor avaliação do processo de competição (VANCLAY, 1994). Para Weiskittel et al., (2011), os índices dependentes da distância podem ser agrupados em cinco classes, ou seja: relação tamanho-distância, zona de influência competitiva, índice de espaço de crescimento, visão completamente aberta e métodos de interceptação de luz. Uma grande variedade destes índices foi introduzida em estudos de crescimento e produção de árvores em florestas homogêneas na América do Norte (BIGGING; DOBBERTIN, 1992) e Europa (TOMÉ; BURKHART, 1989).

Já os índices independentes da distância ou não espacialmente explícitos, não exigem as coordenadas de cada árvore, pois, representam funções simples de variáveis em nível de povoamento e/ou dimensões da árvore-objeto em relação ao valor médio ou máximo de árvores do povoamento (BURKHART; TOMÉ, 2012). As variáveis independentes podem ser em nível de povoamento, variáveis que descrevem o potencial de crescimento da árvore individual, ou uma combinação de ambas (LAAR; AKÇA, 2007). Como índices independentes de distância destacam-se o de Glover e Hool (1979) o de BAL (*Basal Area Larger*) e suas modificações, conforme Prodan (1997).

**Figura 4** - Representação do raio de competição dos índices independentes da distância (IID).



Quanto aos índices de competição semi-independentes da distância, a sua obtenção depende dos índices de competição independentes da distância. Desta forma, os índices de competição independentes da distância são aplicados, mas, devem ser espacialmente restritos a um menor conjunto de árvores vizinhas (aquelas mais próximas), ao invés de todas as árvores da unidade amostral (STAGE; LEDERMANN, 2008; LEDERMAN, 2010; CONTRERAS et al., 2011).

Vários índices de competição dependentes e independentes da distância foram propostos, aplicados e comparados. Apesar dos avanços obtidos, não há uma confirmação,

de forma generalizada da superioridade de uma categoria em relação à outra (FOX et al., 2007), considerando que a eficácia das predições pode variar de acordo com a espécie (TONINI, 2007) e com as condições da floresta estudada (CURTO, 2015).

É possível que o agrupamento das árvores com base em características ecológicas semelhantes, bem como a utilização de ferramentas de inteligência artificial como redes neurais artificiais que permitem incluir um maior número de variáveis qualitativas no cálculo do índice de competição, ou mesmo adotar técnicas de sensoriamento remoto possibilitaria a aquisição de variáveis que são difíceis de mensurar (como os relacionados ao dossel) poderiam contribuir ainda mais para a análise das estratégias competitivas das espécies e de cada indivíduo. No entanto, cabe ao gestor florestal escolher o método que lhe for mais conveniente.

## **COSIDERAÇÕES FINAIS**

A modelagem do crescimento e produção em nível de árvore individual é uma das ferramentas que pode balizar o planejamento florestal a longo prazo, subsidiando tecnicamente a decisão sobre a intensidade de corte e ciclo de corte mais adequado à sustentabilidade da floresta. Apesar disso, essa técnica é negligenciada nos planos de manejo florestais no Brasil. Algumas razões para isto incluem: falta de conhecimento quanto a viabilidade operacional da técnica, falta de dados disponíveis para ajuste e validação dos modelos, o maior número de funções que compõem o modelo e à falta de estudos que demonstrem sua precisão.

As equações desenvolvidas a partir do ajuste de modelos de crescimento e produção em nível de árvore individual são uma alternativa no controle e gestão bem como na caracterização da dinâmica de florestas tropicais. Entretanto, devido às peculiaridades que cada sítio apresenta sua eficiência no ajuste, ou método de modelagem, sempre estará em função das necessidades do gestor florestal, já que é uma importante técnica em desenvolvimento na ciência florestal.

## **AGRADECIMENTO**

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudos à primeira autora.

## REFERÊNCIAS

ADLARD, P. G.; SPILSBURY, M. J.; WHITMORE, T. C. Current thinking on modelling the tropical moist forest. In: MOHD, W. R. W., CHAN, H. T.; APPANAH, S. (editors), **Proceedings of the seminar on growth and yield in tropical mixed/moist forest**. Forest Research Institute of Malaysia, Kuala Lumpur, Malaysia, 1989, p. 6–20.

ALBERS, H. J. Modeling ecological constraints on tropical forest management: Spatial interdependence irreversibility and uncertainty. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 30, p. 73–94, 1996.

ALDER, D. Simple methods for calculating minimum diameter and sustainable yield in mixed tropical forest. In: MILLER, F. M.; ADAM, K. L. (editors), **Wise Management of Tropical Forests**. Oxford Forestry Institute, Oxford, 1992, p. 189–200.

ALDER, D.; SILVA, J. N. M. An empirical cohort model for management of Terra Firme forests in the Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 130, p. 141–157, 2000.

ALDER, D.; SILVA, J. N. M.; CARVALHO, J. O. P.; LOPES, J. C.; RUSCHEL, A. R. The cohort-empirical modelling strategy and its application to forest management for Tapajós Forest, Pará, Brazilian Amazon. **Bois et Forêt des Tropiques**, v. 314, n. 4, p. 17–23, 2012.

ALVAREZ-BUYLLA, E. R.; GARCIA-BARRIOS, R. Seed and forest dynamics: a theoretical framework and an example from the neotropics. **American Naturalist**, v. 137, p. 133–154, 1991.

ARAGÃO, L. E. O. C.; ANDERSON, L. O.; FONSECA, M. G.; ROSAN, T. M.; VEDOVATO, L. B.; WAGNER, F. H.; SILVA, C.V.J.; SILVA JÚNIOR, C. H.L.; ARAI, E.; AGUIAR, A. P.; BARLOW, J.; BERENQUER, E.; DEETER, M. N.; DOMINGUES, L. G.; GATTI, L.; GLOOR, M.; MALHI, Y.; MARENGO, J.A.; MILLER, J.B.; PHILLIPS, O.L.; SAATCHI, S. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. **Nature Communications**, v. 9, n. 536, 2018.

ARAÚJO JR., C. A.; LEITE, H. G.; CASTRO, R. V. O.; BINOTI, D. H. B.; ALCÂNTARA, A. E. M.; BINOTI, M. L. M. S. Modelagem da distribuição diamétrica de povoamentos de eucalipto utilizando a função Gama. **Cerne**, v. 19, n. 2, p. 307–314, 2013.

ARRAUT, J. M.; NOBRE, C. A.; BARBOSA, H.; OBREGON, G.; MARENGO, J. Aerial rivers and lakes: looking at large-scale moisture transport and its relation to Amazonia and to subtropical rainfall in South America. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 25, p. 543–556, 2015.

AZEVEDO, G. B. de.; OLIVEIRA, E. K. B. de.; AZEVEDO, G. T. de O. S.; BUCHMANN, H. M.; MIGUEL, E. P.; REZENDE, A. V. Modelagem da produção em nível de povoamento e por distribuição diamétrica em plantios de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 110, p. 383–392, 2016.

AZEVEDO, C. P.; SANQUETTA, C. R.; SILVA, J. N. M.; MACHADO, S. do. A.; SOUZA, C. R.; OLIVEIRA, M. M. Simulação de estratégias de manejo florestal na Amazônia com o uso do modelo SYMFOR. **Acta Amazônica**, v. 38, n. 1, p. 51–70, 2008.

BARREIRA, S.; BOTELHO, S. A.; SCOLFORO, J. R.; MELLO, J. M. Efeito de diferentes intensidades de corte seletivo sobre a regeneração natural de cerrado. **Cerne**, v. 6, n. 1, p. 40–51, 2000.

BEER, C.; REICHSTEIN, M.; TOMELLERI, E.; CIAIS, P.; JUNG, M.; CARVALHAIS, N.; RÖDENBECK, C.; ALTAFARAIN, M.; BALDOCCHI, D.; BONAN, G. B.; BONDEAU, A.; CESCATTI, A.; LASSLOP, G.; LINDROTH, A.; LOMAS, M.; LUYSSAERT, S.; MARGOLIS, H.; OLESON, K. W.; ROUPSARD, O.; VEENENDAAL, E.; VIOVY, N.; WILLIAMS, C.; WOODWARD, I.; PAPALE, D.

Terrestrial Gross Carbon Dioxide Uptake: Global Distribution and Co-variation with Climate, **Science**, v. 329, p. 834–838, 2010.

BENATTI, J. H.; FISCHER, L. R. C. New trends in land tenure and environmental regularization laws in the Brazilian Amazon. **Regional Environmental Change**, v.18, p. 11–19, 2018.

BENNETT, L. **Deforestation and Climate Change**. The Climate Institute. Washington, DC. 2017.

BÉRUBÉ-DESCHÊNES, A.; FRANCESCHINI, T.; SCHNEIDER, R. Quantifying competition in white spruce (*Picea glauca*) plantations. **Annals of Forest Science**, v. 26, p.74, 2017.

BIGGING, G. S.; DOBBERTIN, M. A comparison of distance-dependent competition measures for height and basal area growth of individual conifer tree. **Forest Science**, v. 38, n. 3, p. 695–720, 1992.

BORGES, J. S.; NEVES, J. C. L.; LOURENÇO, H.M.; BARROS, de. N. F.; DIAS, S. C. M. Parametrização do modelo 3-PG para eucalipto na região do cerrado de Minas Gerais. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 3, p. 567–578, 2012.

BOSSEL, H.; KRIEGER, H. Simulation model of natural tropical forest dynamics. **Ecological Modelling**, v. 59, p. 37–71, 1991.

BOTKIN, D. B. **Forest Dynamics: An Ecological Model**. Oxford University Press, Oxford and New York, p. 309. 1993.

BRANDO, P. M.; DURIGAN, G. Changes in cerrado vegetation after disturbance by frost (São Paulo State, Brazil). **Plant Ecology**, v. 175, p. 205–215, 2004.

BRASIL. **Decreto. nº 5.975 de 30 de novembro de 2006**. Regulamenta os arts. 12, parte final, 15, 16, 19, 20 e 21 da Lei no 4.771, de 15 de setembro de 1965, o art. 4o, inciso III, da Lei no 6.938, de 31 de agosto de 1981, o art. 2o da Lei no 10.650, de 16 de abril de 2003, altera e acrescenta dispositivos aos Decretos nos 3.179, de 21 de setembro de 1999, e 3.420, de 20 de abril de 2000, e dá outras providências. Diário Oficial, Brasília, 30 de novembro de 2006.

BRASIL. **Instrução Normativa. nº 4, de 11 de dezembro de 2006**. Dispõe sobre a Autorização Prévia à Análise Técnica de Plano de Manejo Florestal Sustentável-APAT, e dá outras providências. Diário Oficial, Brasília, 11 de dezembro de 2006.

BRASIL. **Instrução Normativa. nº 5, de 11 de dezembro de 2006**. Dispõe sobre procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Planos de Manejo Florestal Sustentável-PMFSs nas florestas primitivas e suas formas de sucessão na Amazônia Legal, e dá outras providências. Diário Oficial, Brasília, 11 de dezembro de 2006.

BRASIL. Lei nº 11.284, de 2 de março de 2006. Institui, na estrutura do Ministério do Meio Ambiente, o Serviço Florestal Brasileiro - SFB; cria o Fundo Nacional de Desenvolvimento Florestal – FNDF. **Diário Oficial da União**, Brasília, 02 de março de 2006.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 406, de 02 de fevereiro de 2009. Estabelece parâmetros técnicos a serem adotados na elaboração, apresentação, avaliação técnica e execução de Plano de Manejo Florestal Sustentável PMFS com fins madeireiros, para florestas nativas e suas formas de sucessão no bioma Amazônia. **Diário Oficial da União**, Brasília, nº 26, p. 100, 06 de fevereiro de 2006.

BRAZ, E. M.; SCHNEIDER, P. R.; MATTOS, P. P.; SELLE, G. L.; THAINES, F.; RIBAS, L. A.; VUADEN, E. Taxa de corte sustentável para manejo das florestas tropicais. **Ciência Florestal**, v. 22, p. 137–145, 2012.

BRAZ, R. L.; NUTTO, L.; BRUNSMEIER, M.; BECKER, G.; DA SILVA, D. A.; BRAZ, R. L.; NUTTO, L.; BRUNSMEIER, M.; SILVA, D. A. Resíduos da colheita florestal e do processamento da madeira na Amazônia – uma análise da cadeia produtiva. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 5, n. 2, p. 168–181, 2014.

BUGMAN, H.; XIAODONG, Y.; SYKES, M. T.; MARTINS, P.; LINDNER, M.; DESANKER, P. V.; CUMMING, S. G. A comparison of forest gap models: model structure and behaviour. **Climate Change**, v. 34, p. 289–313, 1996.

BUONGIORNO, J.; GILLESS, J. K. **Forest management and economics**. New York, NY: Macmillan Publishing Company, 1987, 285 p.

BURIVALOVA, Z.; ŞEKERCIOĞLU, Ç. H.; KOH, L. P. Thresholds of logging intensity to maintain tropical forest biodiversity. **Current Biology**, v. 24, p. 1893–1898, 2014.

BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. Modeling forest trees and stands. Dordrecht: Springer, 2012, 457 p.  
CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa: Editora UFV, 2017. 605 p

CANHAM, C. D.; PAPAİK, M. J.; URIARTE, M.; MCWILLIAMS, W. H.; JENKINS, J. C.; TWERY, M. J. Neighborhood analyses of canopy tree competition along environmental gradients in New England Forests. **Ecological Applications**, v. 16, p. 540–554, 2006.

CARVALHO, F. A.; FELFILI, J. M. Variações temporais na comunidade arbórea de uma floresta decidual sobre afloramentos calcários no Brasil Central: composição, estrutura e diversidade florística. **Acta Botânica Brasílica**, v. 25, n. 1, p. 203–214, 2011.

CARVALHO, J. O. P. **Structure and dynamics of logged over Brazilian Amazonian rain Forest**. 1992, 215 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)-University of Oxford, Oxford. 1992.

CASTRO, R. V. O. **Modelagem do crescimento em nível de árvores individuais utilizando redes neurais e autômatos celulares**. 2011. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

CASTRO, R. V. O.; BOECHAT, C. P. S.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L.; NOGUEIRA, G. S.; MARTINS, F. B. Individual growth model for eucalyptus stands in Brazil using artificial neural network. **ISRN Forestry**, v. 2013, p. 1–12, 2013.

CASTRO, R.V.O.; SOARES, C.P.B.; LEITE, H.G.; SOUZA, A.L. de, MARTINS, F.B.; NOGUEIRA, G.S.; OLIVEIRA, M.L.R de. Validação de um modelo completo em nível de árvore individual para uma floresta estacional semidecidual. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 126, p. 1–14, 2020.

CASTRO, T. C.; CARVALHO, J. O. P. Dinâmica da população de *Manilkara huberi* (Ducke) a. Chev. durante 26 anos após a exploração florestal em uma área de terra firme na Amazônia brasileira, **Ciência Florestal**, v. 24, n. 1, p. 161–169, 2014.

CHAVE, J. Dynamique spatio-temporelle de la foret tropicale. **Annales de Physique**. v. 25, n. 6, 2000.

CHAVE, J. Study of structural, successional and spatial pattern in tropical rain forests using TROLL, a spatially explicit forest model. **Ecological Modelling**, v. 124, p. 233–254, 1999b.

CLARK, D. A.; CLARK, D. B. Assessing the growth of tropical rain forest trees: issues for forest modeling and management. **Ecological Applications**, v. 9, n. 1, p. 981–997, 1999a.

CLUTTER, J. L. Compatible growth and yield for loblolly pine. **Forest Science**, v. 9, n. 3, p. 354–371, 1963.

COATES, K. D.; CANHAM, C. D.; LEPAGE, P. T. Above-versus below-ground competitive effects and responses of a guild of temperate tree species. **Journal of Ecology**, v. 97, p. 118–130, 2009.

CONTRERAS, M. A.; AFFLECK, D.; CHUNG, W. Evaluating tree competition indices as predictors of basal area increment in western Montana forests. **Forest Ecology and Management**, v. 262, n. 11, p. 1939–1949, 2011.

CORLETT, R. T. The impacts of droughts in tropical forests. **Trends in Plant Science**, v. 21, n. 7, p. 584–593, 2016.

CORRÊA, B. S.; VAN DER BERG, E. Estudo da dinâmica da população de *Xylopia brasiliensis* Sprengel em relação a parâmetros populacionais e da comunidade em uma floresta de galeria em Itutinga, MG, Brasil. **Cerne**, v. 8, n. 1, p. 1–12, 2002.

CUMMINGS, A. R.; READ, J. M.; FRAGOSO, J. M. V. Implications of forest type and land tenure diversity for the sustainability of ecosystem services provided by northern Amazonia's multiple-use tree species. **Landscape Ecology**, v. 33, p. 423–438, 2018.

CUNHA, T. A.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R. Linear mixed model to describe the basal area increment for individual cedro (*Cedrela odorata* L.) trees in occidental Amazon, Brazil. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 3, p. 461–470, 2013.

CURTO, R. A. **Avaliação do crescimento e potencial de manejo em plantio superestocado de *Araucaria angustifolia*** (Bert.) O. Ktze. 250 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

D'OLIVEIRA, M. V. N.; BRAZ, E. M. Estudo da dinâmica da floresta manejada no projeto de manejo florestal comunitário do PC Pedro Peixoto na Amazônia Ocidental. **Acta Amazonica**, v. 36, n. 2, p. 177–182, 2006.

D'OLIVEIRA, M. V. N.; OLIVEIRA, L. C.; ACUÑA, M. H. A.; BRAZ, E. M. Twenty years monitoring growth dynamics of a logged tropical forest in Western Amazon. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 92, p. 493–502, 2017.

DANIELS R. F.; BURKHART H. E.; CLASON T. R. A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 16, n. 6, p. 1230–1237, 1986.

DAVIS, L. S.; JOHNSON, K. N. **Forest management**, 3 ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1987. 790 p.

DENSLOW, J. S. Patterns of plant species diversity during succession under different disturbance regimes. **Oecologia**, v. 46, p. 18–21, 1980.

DIAS, A. N.; LEITE, H. G.; CAMPOS, J. C.; COUTO, L.; CARVALHO, A. F. Emprego de um modelo de crescimento e produção em povoamentos desbastados de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 29, n. 5, p. 731–739, 2005.

DITZER, T.; GLAUNER, R.; FORSTER, M.; KOHLER, P.; HUTH, A. The process-based stand growth model Formix3-Q applied in a GIS environment for growth and yield analysis in a tropical rain forest. **Tree Physiology**, v. 20, p. 367–381, 2000.

DURIGAN, M. E. **Florística, dinâmica e análise protéica de uma Floresta Ombrófila Mista em São João do Triunfo – PR**. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Setor de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Paraná, 1999.

EK, A. R.; MONSERUD, R. A. **Forest: A computer model for simulating the growth and reproduction of mixed species stands**, University Wisconsin, College of Agriculture and Life Sciences, 1974, 90 p.

FEARNSIDE, P. Business as usual: a resurgence of deforestation in the Brazilian Amazon, in: **Yale Environment** v. 360.

FENNER, M. Seedlings. In: I. H. RORISON; J. P. GRIME; R. HUNT; G. A. F. HENDRY; D. H. LEWIS (Eds.); **Frontiers of comparative plant ecology**. London: Academic Press, p. 35–47, 1987.

FOX, J. C.; ADES, P. K.; BI, H. Q. Stochastic structure and individual-tree growth models. **Forest Ecology and Management**, n. 154, n. 1-2, p. 261–276, 2001.

FRANCEZ, L. M. B.; CARVALHO, J. O. P.; BATISTA, F. J.; JARDIM, F. C. S.; RAMOS, E. M. L. S. Influência da exploração florestal de impacto reduzido sobre as fases de desenvolvimento de uma Floresta de Terra Firme, Pará, Brasil. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 4, p. 743–753, 2013.

FRANCZAK, D. D.; MARIMON, B. S.; MARIMON JUNIOR, B. H.; et al. Changes in the structure of a savanna forest over a six-year period in the Amazon-Cerrado transition, Mato Grosso state, Brazil. **Rodriguésia**, v. 62, n. 2, p. 425–436, 2011.

GLOBAL Forest watch, university of maryland. Disponível em: <https://www.globalforestwatch.org/grants-and-fellowships/projects>. Acesso em: 26 de jun. de 2023.

GLOVER, G. R.; HOOL, J. N. A basal area ratio predictor of loblolly pine plantation mortality. **Forest Science**, v. 25, n. 2, p. 275–282, 1979.

GOURLET-FLEURY, S. **Modelisation individuelle spatialement explicite de la dynamique dun peuplement de foret dense tropicale humide**. PhD thesis, Universite Claude Bernard, Lyon, France, 1997.

GOURLET-FLEURY, S.; HOULLIER, F. Modelling diameter increment in a lowland evergreen rain forest in French Guiana. **Forest Ecology and Management**. v. 131, p. 269–289, 2000.

HANSEN, M. C.; POTAPOV, P. V.; MOORE, R.; HANCHER, M.; TURUBANOVA, S. A.; TYUKAVINA, A.; THAU, D.; STEHMAN S. V.; GOETZ S. J.; LOVELAND, T. R.; KOMMAREDDY, A.; EGOROV, A.; CHINI, L.; JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. **Science**, v. 342, p. 850–853, 2013.

HASENAUER, H.; MERKL, D.; WEINGARTNER, M. Estimating tree mortality of Norway spruce stands with neural networks. **Advances in Environmental Research**, v.5, p.405–414, 2001.

HASENAUER, H.; MONSERUD, R. A. A crown ratio model for Austrain forests. **Forest Ecology and Management**, v. 84, p. 49–60, 1996.

HIGMAN, S.; MAYERS, J.; BASS, S.; JUDD, N.; NUSSBAUM, R. **Manual do manejo florestal sustentável**. Trad.: NARDELLI, A. M. B. Ed.: UFV, 2015. 398 p.

HIGUCHI, N.; LIMA, A. J. N.; SANTOS, J.; et al. Duas décadas de parcela permanentes na Amazônia. In: L. M. BARBOSA; N. A. SANTOS-JUNIOR (Eds.); **A botânica no Brasil: pesquisa, ensino e políticas públicas ambientais**. São Paulo - SP: Sociedade de Botânica do Brasil, p. 337–341, 2007.

HOWARD, A. F.; VALERIO, J. A diameter class growth model for assessing the sustainability. **Commonwealth Forestry Review**, v. 71, p. 171–177, 1992.

HYNYNEN, J. Predicting tree crown ratio for unthinned and thinned Scots pine stand. **Canadian Journal Forest Research**, v. 25, n. 1, p. 57–62, 1995.

IGBP. The International Geosphere Biosphere Programme: **A study of global change - The initial core projects**. Global Change Report 12, International Geosphere Biosphere Programme, 1990.

INPE, 2014. **Projeto Prodes Monitoramento Da Floresta Amazônica Brasileira Por Satélite**. National Institute for Space Research (INPE). Guamá Belém (PA), Brasil.

JENNINGS, S. B. **The response of tree seedlings to canopy disturbance in an Amazonian rainforest**. Thesis of Doctor, University of Oxford, 1997.

JENTSCH, A.; BEIERKUHNLIN, C.; WHITE, P. S. Scale, the dynamic stability of forest eco-systems, and the persistence of biodiversity. **Silva Fennica**, v. 36, n. 1, p. 393–400, 2002.

JOYAS, M. I. V.; VEGA, A. C. L.; CAMACHO, R. E.; GALEANO, G.; DAVILA, E. A.; ALWZREZ, W. D. **Serie: Métodos para estudios ecológicos a largo plazo establecimiento de parcelas permanentes en bosques de Colombia**; v 1. Bogotá D.C., 2005.

KIERMAN, D. H.; BEVILACQUA, E.; NYLAND, R. D. Individual-tree diameter growth model for sugar maple trees in uneven-aged northern hardwood stands under selection system. **Forest Ecology and Management**, v. 256, p. 1579–1586, 2008.

KUNSTLER, G.; FALSTER, D.; COOMES, D. A.; HUI, F.; KOOYMAN, R. M.; LAUGHLIN, D. C.; POORTER, L.; VANDERWEL, M.; VIEILLEDENT, G.; WRIGHT, S. J.; AIBA, M.; BARALOTO, C.; CASPERSEN, J.; CORNELISSEN, J. H. C.; GOURLET-FLEURY, S., et al. Plant functional traits have globally consistent effects on competition. **Nature**, v. 529, p. 204–207, 2016.

LAAR, A.; AKÇA, A. **Forest mensuration**. Netherlands: Springer, 2007. 383 p.

LANDSBERG, J. J. Physiology in forest models: History and the future. **Forest Biometry, Modelling and Information Sciences**, v.1, p.49–63, 2003.

LAURANCE, W. F.; CAMARGO, J. L. C.; FEARNSIDE, P. M.; LOVEJOY, T. E.; WILLIAMSON, G. B.; MESQUITA, R. C. G.; MEYER, C. F. J.; BOBROWIEC, P. E. D.; LAURANCE, S. G. W. An Amazonian rainforest and its fragments as a laboratory of global change. **Biological Reviews**, v. 93, p. 223–247, 2018.

LEDERMAN, T. Evaluating the performance of semi-distance-independent competition indices in predicting the basal area growth of individual trees. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 40, p. 796–805, 2010.

LEITÃO, R. P.; ZUANON, J.; MOUILLOT, D.; LEAL, C. G.; HUGHES, R. M.; KAUFMANN, P. R.; VILLÉGER, S.; POMPEU, P. S.; KASPER, D.; PAULA, F. R.; FERRAZ, S. F. B.; GARDNER, T. A. Disentangling the pathways of land use impacts on the functional structure of fish assemblages in Amazon streams. **Ecography**, v. 41, p. 219–232, 2018.

LEVIN, S. A.; STEPHEN R.; CARPENTER, H.; CHARLES J. G.; ANN P. K.; MICHEL L.; JONATHAN, B. L.; BRIAN, W.; DAVID S. W. **The Princeton Guide to Ecology**. New Jersey, Princeton University Press, 2009.

LIEBERMAN, D.; LIEBERMAN, M. Forest tree growth and dynamics at La Selva, Costa Rica (1969-1982). *Journal of Tropical Ecology*: 3. p. 347-358. Manokaran, N.; Kochummen, K. M. 1987. Recruitment, grow and mortality of trees in an lowland Dipterocarp forest in Peninsular Malaysia. **Journal of Tropical Ecology**, v. 3, p. 315–330, 1987.

LINDENMAYER, D. B.; FRANKLIN, J. F.; LÖHMUS, A.; BAKER, S. C.; BAUHUS, J.; BEESE, W.; BRODIE, A.; KIEHL, B.; KOUKI, J.; PASTUR, G. M.; MESSIER, C.; NEYLAND, M.; PALIK, B.; SVERDRUPHYGESON, A.; VOLNEY, J.; WAYNE, A.; GUSTAFSSON, L. A major shift to the

retention approach for forestry can help resolve some global forest sustainability issues. **Conservation Letters**, v.5, p. 421–431, 2012.

LIU, J.; ASHTON, P. S. Simulating effects of landscape context and timber harvest on tree species diversity. **Ecological Applications**, v. 9, p. 186–201, 1999.

LONGHI, S. J. **A estrutura de uma floresta natural de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze, no sul do Brasil**, 197 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Setor de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1980.

LUSTOSA JUNIOR, I. M.; CASTRO, R. V. O.; GASPAR, R. DE O.; ARAÚJO, J. B. C. N.; AQUINO, F. DE G. Competition Indexes to Evaluate Tree Growth in a Semi-Deciduous Seasonal Forest. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 4, p. 1–12, 2019.

MALHI, Y.; Phillips, O. L.; LLOYD, J.; BAKER, T.; WRIGHT, J.; ALMEIDA, S.; ARROYO, L.; FREDERIKSEN, T.; GRACE, J.; HIGUCHI, N.; KILLEEN, T.; LAURENCE, W. F.; LEAÑO, C.; LEWS, S.; MEIR, P.; MONTEAGUDO, A.; NEILL, D.; NÉÑEZ, P. V.; PANFIL, S. N.; PATIÑO, S. An international network to monitor the structure, composition and dynamics of Amazonian forests (RAINFOR). **Journal of Vegetation Science**, v. 13, p. 439–450, 2002.

MANOKARAN, N.; SWAINE, N. D. Population dynamics of trees in dipterocarp forests of Peninsular Malaysia. Mala: Malayan Forest Record, 1994. JOYAS, M. I. V.; VEGA, A. C. L.; CAMACHO, R. L.; et al. **Métodos para estudos ecológicos a largo plazo: establecimiento de parcelas permanentes en bosques de Colombia**. Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá D. C., 2005.

MARTIN, G. L.; Ek, A. R. Comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pine diameter and height growth. **Forest Science**, v. 30, n. 3, p. 731–743, 1984.

MARTINS, F. B.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L.; CASTRO, R. V. O. Índices de competição em árvores individuais de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n., p. 1089–1098, 2011.

MARTINS, F. B.; SOARES, C. P. B.; da SILVA, G. F. Individual tree growth models for eucalyptus in northern Brazil. **Scientia Agricola**, v. 71, p. 212–225, 2014.

MELLO, C. M. S.; LEITE, E. J. **Levantamento do volume madeireiro, composição florística e dinâmica da regeneração natural da Reserva de Caçador, Estação Experimental de Caçador, SC**. Brasília. 1983, 100 p.

MENDES, B. R.; CALEGARIO, N.; VOLPATO, C. E. S.; MELLO, A. A. Desenvolvimento de modelos de crescimento de árvores individuais fundamentado em equações diferenciais. **Cerne**, v. 12, n. 3, p. 254-263, 2006.

MENDOZA, G. A.; VANCLAY, J. K. Trends in forestry modeling. CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, **Nutrition and Natural Resources**, v. 3, n. 10, p. 1–8, 2008.

MIRANDA, R. O. V. de.; FIGUEIREDO FILHO, A.; EBLING, Â. A.; DAVID, H. C.; ROIK, M. Individual models for diameter and height projection with contribution of competition index in *Pinus taeda* l. stands. **Floresta**, v. 52, n. 1, p. 179–188, 2022.

MONSERUD, R. A.; STERBA, H. A basal area increment model for individual trees growing in even and uneven aged forest stands in Austria. **Forest Ecology and Management**, v. 80, n. 1, p. 57-80, 1996.

MOSER, J. W.; HALL, O. F. Deriving growth and yield functions for uneven-aged forest stands. **Forest Science, Bethesda**, v. 15, n. 1, p. 183–188, 1969.

MOURA, N. G.; LEES, A. C.; ALEIXO, A.; BARLOW, J.; DANTAS, S. M.; FERREIRA, J.; LIMA, M. F. C.; GARDNER, T. A. Two hundred years of local avian extinctions in eastern Amazonia. **Conservation Biology**, v. 28, n. 5, p. 1271–1281, 2014.

MUGASHA, W. A.; MWAKALUKWA, E. E.; LUOGA, E.; MALIMBWI, R. E.; ZAHABU, E.; SILAYO, D. S.; SOLA, G.; CRETE, P.; HENRY, M.; KASHINDYE, A. Allometric models for estimating tree volume and aboveground biomass in lowland forests of Tanzania. **International Journal Forestry Research**, v. 2016, p. 1–14, 2016.

MURTA JÚNIOR, L. S.; CASTRO, R. V. O.; NAPPO, M. E.; NOGUEIRA, G. S.; ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; GASPAR, R. de O.; COSTA, L. S. da.; OLIVEIRA, E. K. B. de. Características dendrométricas de eucalipto submetido a desbaste. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 127, p. 1–14, 2020.

MUTHURAMKUMAR, S.; AYYAPPAN, N.; PARTHASARATHY, N.; et al. Plant community structure in tropical rain forest fragments of the Western Ghats, India. **Biotropica**, v. 38, n. 2, p. 143–160, 2006.

NAKASHIZUKA, T.; KOHYAMA, T.; WHITMORE, T. C.; ASHTON, P. S. Tree diversity and dynamics of western Pacific and eastern Asian forests: An introduction. **Journal of Vegetation Science**, v. 10, p. 765–766, 1999.

NASCIMENTO, R. G. M. **Modelagem e simulação do crescimento e produção de floresta tropical manejada na Amazônia Oriental**. 174 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2016.

NASCIMENTO, R. G. M.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; HIGUCHI. A growth and yield projection system for a tropical rainforest in the Central Amazon, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 327, p. 201–208, 2014.

NEWBERY, D. M.; LINGENFELDER, M. Plurality of tree species responses to drought perturbation in Bornean tropical rain forest. **Plant Ecology**, v. 201, p. 147–167, 2008.

NEWBOLD, T. HUDSON, L. N.; HILL, S. L. L.; CONTU, S.; LYSSENKO, I.; SENIOR, R. A.; BÖRGER, L.; BENNETT, D. J.; CHOIMES, A.; COLLEN, B.; DAY, J.; DE PALMA, A.; DÍAZ, S.; ECHEVERRÍA-LONDOÑO, S.; EDGAR, M. J.; FELDMAN, A.; GARON, M.; HARRISON, M. L. K.; ALHUSSEINI, T.; INGRAM, D. J.; ITESCU, Y.; KATTGE, J.; KEMP, V.; KIRKPATRICK, L.; KLEYER, M.; CORREIA, D. L. P.; MARTIN, C. D.; MEIRI, S.; NOVOSOLOV, M.; PAN, Y.; PHILLIPS, H. R. P.; PURVES, D. W.; ROBINSON, A.; SIMPSON, J.; TUCK, S. L.; WEIHER, E.; WHITE, H. J.; EWERS, R. M.; MACE, G. M.; SCHARLEMANN, J. P. W.; PURVIS, A. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. **Nature**, v. 520, p. 45–50, 2014.

NEWNHAM, R. M. **The development of a stand model for Douglas-fir**. Ph.D. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, 1964.

ODUM, E. P. **Fundamentos da Ecologia**. 2 ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 603 p, 1976.

OLIVEIRA, E. K. B de. **Modelagem em nível de árvores individuais após exploração de impacto reduzido na Amazônia Oriental**. 2020. 174 f. Tese. (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

OLIVEIRA, E. K. B de. REZENDE, A.V.; MAZZEI, L.; MURTA JÚNIOR, L. S.; CASTRO, R. V. O.; D'OLIVEIRA, M. V. N.; BARROS, Q. S. Competition indices after reduced impact logging in the Brazilian Amazon. **Journal of Environmental Management**, v. 281, p. 1–9, 2021.

OLIVEIRA, E.K.B. de.; REZENDE, A.V.; FREITAS, L.J.M. de.; JÚNIOR, L.S.M.; BARROS, Q.S.; COSTA, L.S. da. Monitoramento da estrutura e caracterização ecológica em floresta tropical manejada na Amazônia Brasileira. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. v. 14, p. 1–12, 2019.

OLIVEIRA, M. C.; FELFILI, J. M.; SILVA JÚNIOR, M. C. Análise florística e fitossociológica da comunidade arbórea da Mata de Galeria do Capetinga, após vinte anos de passagem de fogo, na Fazenda Água Limpa, Brasília, DF. **Heringeriana**, v. 5, n. 1, p. 19–31, 2011.

ORELLANA, E. **Sucessão florestal, regimes de manejo e competição avaliados com modelos de árvore individual dependente e independente da distância em um fragmento de Floresta de Araucária no Sul do Brasil**. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) –Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

ORELLANA, E.; FIGUEIREDO FILHO, A.; PÉLLICO NETTO, S.; VANCLAY, J. K. Predicting the dynamics of a native Araucaria forest using a distance-independent individual tree-growth model. **Forest Ecosystems**, v. 3, n. 1, p. 1–11, 2016.

OSHO, J. S. A. Optimal sustainable harvest models for a Nigerian tropical rain forest. **Journal of Environmental Management**, v.45, p.101–108, 1995.

PAN, Y.; BIRDSEY, R. A.; FANG, J.; HOUGHTON, R.; KAUPPI, P. E.; KURZ, W. A.; PHILLIPS, O. L.; SHVIDENKO, A.; LEWIS, S. L.; CANADEEL, G. J.; CIAIS, PHILIPPE.; JACKSON, R. B.; PACALA, S.; MCGUIRE, A. D.; PIAO, S.; RAUTIAINEN, A.; SITCH, S.; HAYES, D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. **Science**, v. 333, p. 988–993, 2011.

PELTONIEMI, M.; MÄKIPÄÄ, R. Quantifying distance-independent tree competition for predicting Norway spruce mortality in unmanaged forests. **Forest Ecology and Management**, v. 261, p. 30–42, 2011.

PENG, C. Growth and yield models for uneven-aged stands: past, present and future. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 132, n. 1-3, p. 259–279, 2000.

PHILLIPS, P. D. de AZEVEDO, C. P.; DEGEN, B.; THOMPSON, I. S.; SILVA, J.N.M.; GARDINGER, P. R. An individual based spatially explicit simulation model for strategic forest management planning in the eastern Amazon. **Ecological Modelling**, v. 173, n. 4, p. 335–354, 2004.

PHILLIPS, P. D.; BRASH, T. E.; YASMAN, I.; SUBAGYO, P.; VAN GARDINGER, P.R. A individual based spatially explicit tree growth model for forests in East Kalimantan (Indonesian Borneo). **Ecological Modelling**, v. 159, n. 1, p. 1–26, 2003.

PINARD, M. A.; CROPPER, W. P. Simulated effects of logging on carbon storage in dipterocarp forest. **Journal of Applied Ecology**, v. 37, p. 267–283, 2000.

PIZATTO, W. **Avaliação biométrica da estrutura e da dinâmica de uma Floresta Ombrófila Mista em São João do Triunfo-PR: 1995-1998**. 172 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Curitiba, 1999.

PRETZSCH, H.; BIBER, P.; ĎURSKÝ, J. The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. **Forest Ecology and Management**, v. 162, n. 1, p. 3-21, 2002.

PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P. **Mensura forestal. (Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible)**. San José, Costa Rica: IICA. 1997. 586 p.

PUCHALSKI, A.; MANTOVANI, M.; REIS, M. dos. Variação em populações naturais de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze associada a condições edafo-climáticas. **Scientia Forestalis**, n.70, p. 137–148. 2006.

REES, M.; CONDIT, R.; CRAWLEY, M.; PACALA, S.; TILMAN, D. Long-term studies of vegetation dynamics. **Science**, v. 293, n. 5530, p. 650–655, 2001.

REIS, L. P.; SOUZA, A. L.; MAZZEI, L.; REIS, P. C. M.; LEITE, H. G.; SOARES, C. P. B.; TORRES, C. M. M. E.; SILVA, L. F.; RUSCHEL, A. R. Prognosis on the diameter of individual trees on the eastern region of the amazon using artificial neural networks. **Forest Ecology and Management**, v. 382, p.161–167, 2016.

REIS, L. P.; SOUZA, A. L.; REIS, P. C. M.; MAZZEI, L.; SOARES, C. O. B.; TORRES, C. M. M. E.; SILVA, L. F.; RUSCHEL, A. R.; RÊGO, L. S.; LEITE, H. G. Estimation of mortality and survival of individual trees after harvesting wood using artificial neural networks in the amazon rain forest. **Ecological Engineering**, v. 112, p. 140–147, 2018.

REIS, L.P. **Modelagem de floresta inequiana: redes neurais artificiais aplicadas em uma floresta manejada no leste da Amazônia**. 2017. 79 f. Tese. (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

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

RIBEIRO, M. N.; SANCHEZ, M.; PEDRONI, F.; PEIXOTO, K. S. Fogo e dinâmica da comunidade lenhosa em cerrado sentido restrito, Barra do Garças, Mato Grosso. **Acta Botanica Brasilica**, v. 26, n. 1, p. 203–217, 2012.

RÍO, M., CONDÉS, S., PRETZSCH, H. Analyzing size-symmetric vs. size-asymmetric and intra- vs. inter-specific competition in beech (*Fagus sylvatica* L.) mixed stands. **Forest Ecology and Management**, v. 325, p. 90–98, 2014.

RIVERA, H.H. **Ordenamento territorial de áreas florestais utilizando avaliação multicritério apoiada por geoprocessamento, fitossociologia e análise multivariada**. 206 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

ROCHA, R. M. **Taxas de recrutamento e mortalidade da floresta de terra firme da bacia do rio Cuieiras na região de Manaus-AM**. 49f. Dissertação (Mestrado em Ciências de Florestas Tropicais). Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/ Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2001.

ROCHA, R.; OVASKAINEN, O.; LÓPEZ-BAUCELLS, A.; FARNEDA, F. Z.; SAMPAIO, E. M.; BOBROWIEC, P. E. D.; CABEZA, M.; PALMEIRIM, J. M.; MEYER, C. F. J. Secondary forest regeneration benefits old-growth specialist bats in a fragmented tropical landscape. **Scientific Reports**, v. 8, n. 3819, 2018.

ROITMAN, I. **Modelagem espacial e temporal na mata de galeria do Gama- DF**. 169 f. Tese (Doutorado em Ecologia) –Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2011.

ROITMAN, I.; FELFILI, J. M.; REZENDE, A. V. Tree dynamics of a fire-protected cerrado *sensu stricto* surrounded by forest plantations, over a 13-year period (1991– 2004) in Bahia, Brazil. **Plant Ecology**, v. 197, n. 2, p. 255–267, 2007.

ROSSI, L. M. B.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. Modelagem de mortalidade em florestas naturais. **Revista Floresta**, v. 37, n. 2, p. 275–291, 2007.

SALLES, T. T. **Modelagem de crescimento e produção de clones de eucalipto em um sistema agroflorestal**. 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

SANQUETTA, C. R. **Fundamentos biométricos dos modelos de simulação florestal**. FUPEF – Série Didática n. 8, 1996. 48 p.

SANTANA, A. C.; SANTOS, M. A. S.; SANTANA, Á. L.; YARED, J. A. G. O valor econômico da extração manejada de madeira no baixo Amazonas, estado do Pará. **Revista Árvore**, v. 36, p. 527–536, 2012.

SANTIAGO, T. M. O.; CAVIGLIA-HARRIS, J.; REZENDE, J. L. P. Carrots, Sticks and the Brazilian Forest Code: the promising response of small landowners in the Amazon. **Journal of Forest Economics**, v. 30, p. 38–51, 2018.

SANTOS, A. T. **Análise do crescimento e simulação de manejo de um plantio de *Ocotea porosa***. 93 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

SANTOS, L. G. **Modelagem do crescimento de árvores individuais de *Eremanthus incanus* (Less.) Less.** 173 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2019.

SCHAAF, L. B. **Florística, estrutura e dinâmica no período 1979-2000 de uma floresta ombrófila mista localizada no Sul do Paraná**. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

SCHIAVINI, I.; RESENDE, J. C. F.; AQUINO, F. G. Dinâmica de populações de espécies arbóreas em matas de galeria e mata mesófila na margem do Ribeirão Panga, Minas Gerais. *In*: J. F. RIBEIRO; C. E. L. FONSECA; J. C. S. SILVA (Eds.); **Cerrado: características e recuperação de matas de galeria**. Planaltina - DF: Embrapa Cerrados, 2001, p. 267–299.

SCHUCHOVSKI, M. S. **Modelos alométricos e de produção para plantações de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina, Brasil**. 182 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

SCHUMACHER, F.X. A new growth curve and its application to timber studies. **Journal of Forestry**, v.37, p.819-820, 1939.

SHEIL, D.; BURSLEM, D. F. R. P.; ALDER, D. The interpretation and misinterpretation of mortality rate measures. **The Journal of Ecology**, v. 83, n. 2, p. 331–333, 1995.

SILVA NETO, A. J. **Estratificação para estudos de dinâmica, estrutura e volumetria em cerrado sensu stricto**. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

SILVA, E. J. V. da. **Dinâmica de florestas manejadas e sob exploração convencional na Amazônia Oriental**. 156 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2004.

SILVA, J. N. M.; LOPES, J. C. A.; OLIVEIRA, L. C. **Diretrizes para instalação e medição de parcelas permanentes em florestas naturais da Amazônia Brasileira**. Belém - PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2005.

SILVA, K. E.; SOUZA, C. R.; AZEVEDO, C. P.; ROSSI, L. M. B. Dinâmica florestal, estoque de carbono e fitossociologia de uma floresta densa de terra-firme na Amazônia Central. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 105, p. 193–201, 2015.

SILVA, L. G. **Efeito do fogo sobre a dinâmica da vegetação lenhosa de um cerrado rupestre e cerrado típico, Mato Grosso, Brasil.** 64 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Conservação) – Universidade do Estado de Mato Grosso, 2013.

SILVÉRIO, D. V.; BRANDO, P. M.; MACEDO, M. N.; BECK, P. S. A.; BUSTAMANTE, M.; COE, M. T. Agricultural expansion dominates climate changes in southeastern Amazonia: the overlooked non-GHG forcing. **Environmental Research Letters**, v. 10, p. 1–8, 2015.

SIST P. Reduced-impact logging in the tropics: objectives, principles and impacts. **International Forestry Review**, v.2, p.3–10, 2000.

SIST, P.; FERREIRA, F. N. Sustainability of reduced-impact logging in the Eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 243, p. 199–209, 2007.

SIST, P.; RUTISHAUSER, E.; PEÑA-CARLOS, M.; SHENKIN, A.; HÉRAULT, B.; BLANC, L.; BARALOTO, C.; BAYA, F.; BENEDET, F.; DA SILVA, K. E.; DESCROIX, L.; FERREIRA, J. N.; GOURLET-FLEURY, S.; GUEDES, M. C.; HARUN, I. BIN.; JALONEN, R.; KANASHIRO, M.; KRISNAWATI, H.; KSHATRIYA, M.; LINCOLN, P.; MAZZEI, L.; MEDJIBÉ, V.; NASI, R.; D'OLIVEIRA, M. V. N.; DE OLIVEIRA, L. C.; PICARD, N.; PIETSCH, S.; PINARD, M.; PUTZ, H. P. F. E.; RODNEY, K.; ROSSI, V.; ROOPSIND, A.; RUSCHEL, A. R.; HAJAR, N.; SHARI, Z.; DE SOUZA, C. R.; SUSANTY, F. H.; SOTTA, E. D.; TOLEDO, M.; VIDAL, E.; WEST, T. A. P.; WORTEL, V.; YAMADA, T. The Tropical Managed Forests Observatory: a research network addressing the future of tropical logged forests. **Applied Vegetation Science**, v. 18, p. 171–174, 2015.

SNOWDON, P.; WOOLLONS, R. C.; BENSON, M. L. Incorporation of annual climatic indices into models of *Pinus radiata* in a spacing experiment. **New Forests**, v. 16, n. 2, p. 101–123, 1998.

SPATHELF, P.; NUTTO, L. **Modelagem aplicada ao crescimento e produção florestal - com exemplos e exercícios.** Santa Maria: CEPEF, 2000. 71p. (Série Técnica).

STAGE, A. R.; LEDERMANN, T. Effects of competitor spacing in a new class of individual-tree indices of competition: semi-distance-independent indices computed for Bitterlich versus fixed-area plots. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 38, n. 4, p. 890–898, 2008.

TÉO, S. J. Modelagem do crescimento e produção de árvore individual, para *Pinus taeda* L., na região meio oeste de Santa Catarina. **Floresta**, v. 52, n. 3, p. 436–456, 2022.

TOMÉ, M., BURKHART, H. E. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. **Forest Science**, v. 35, n. 3, p. 816–831, 1989.

TONINI, H. **Índices de competição e o seu uso na modelagem do crescimento das árvores.** Embrapa Roraima, documento 8, 2007, 30 p.

UHL, C. Tree dynamics in a species rich tierra firme forest en Amazônia. Venezuela. **Acta Científica Venezolana**, v.33, p.72–77.1982.

VAN DER SANDE, M. T.; POORTER, L.; BALVANERA, P.; KOOISTRA, L.; THONICKE, K.; BOIT, A.; DUTRIEUX, L. P.; EQUIHUA, J.; GERARD, F.; HEROLD, M.; KOLB, M.; SIMÕES, M.; PEÑA-CLAROS, M. The integration of empirical, remote sensing and modelling approaches enhances insight in the role of biodiversity in climate change mitigation by tropical forests. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 26, p. 69–76, 2017.

VAN DER SLEEN, P.; GROENENDIJK, P.; VLAM, M.; ANTEN, N. P. R.; BOOM, A.; BONGERS, F.; PONS, T. L.; TERBURG, G.; ZUIDEMA, P. A. No growth stimulation of tropical trees by 150 years of CO<sub>2</sub> fertilization but water-use efficiency increased. **Nature Geoscience**, v. 8, p. 24–28, 2015.

VAN GARDINGEN, P. R.; PHILLIPS, P. D. Application of growth and yield modelling as an indicator of sustainable forest management. In: Laumonier, Y.; King, B.; Legg, C.; Rennolls, K.(editors), **International conference on data management and modelling using remote sensing and GIS for tropical forest inventory**. Rodeo International Publishers, Jakarta, p.1999, 491–502.

VANCLAY, J. K. **Modelling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forests**.CAB International, Wallingford, 1994.

VATRAZ, S.; SILVA, J.N.M.; ALDER, D. Competição *versus* crescimento de árvores em floresta ombrófila densa no estado do Amapá - Brasil. **Ciência Florestal**, v. 28, p.1118–1127, 2018.

VATRAZ, S.; CARVALHO, J. O. P.; GOMES, J. M.; TAFFAREL, M.; FERREIRA, J. E. R. Efeitos de tratamentos silviculturais sobre o crescimento *de Laetia procera* (Poepp.). Eichler em Paragominas, PA, Brasil. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 93, p. 95–102, 2012.

VIRILLO, C. B.; MARTINS, F. R.; TAMASHIRO, J. Y.; SANTOS, F. A. M. Is size structure a good measure of future trends of plant populations? An empirical approach using five woody species from the Cerrado (Brazilian savanna). **Acta Botanica Brasilica**, v. 25, n. 3, p. 593–600, 2011.

WEBER, K. S. **Manejo da bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.) baseado no crescimento diamétrico de árvores individuais**. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

WENDLING, W. T.; EMERENCIANO, D. B.; HOSOKAWA, R. T. Ajuste da função de distribuição diamétrica Weibull por planilha eletrônica. **Floresta**, v. 41, n. 2, p. 205–220, 2011.

WEISKITTEL, A. R.; HANN, D. W.; KERSHAW, J. W.; VANCLAY, J. K. **Forest Growth and Yield Modeling**. Wiley, NY, 2011.

WEST, T. A. P.; VIDAL, E.; PUTZ, F. E. Forest biomass recovery after conventional and reduced-impact logging in Amazonian Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 314, p. 59–63, 2014.

ZAMIN, N. T.; MACHADO, S. do. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; KOEHLER, H. S.Effect of climate variables on monthly growth in modeling biological yield of *Araucaria angustifolia* and *Pinus taeda* in juvenile phase. **International Journal of Forestry Research**, v. 2013, p. 1–8, 2013.