



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu



GERARDO ROJAS HINCAPIE

**FLUXOS E ALOCAÇÃO DE CARBONO DE CINCO GENÓTIPOS DE *Pinus taeda*
COM DIFERENTES IDEOTIPOS DE COPA**

Botucatu

2020

GERARDO ROJAS HINCAPIE

**FLUXOS E ALOCAÇÃO DE CARBONO DE CINCO GENÓTIPOS DE *Pinus taeda*
COM DIFERENTES IDEOTIPOS DE COPA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Ciência Florestal.

Orientador: Dr. Otávio Camargo Campoe

Coorientador: Dr. Clayton Alcarde Alvares

Botucatu

2020

R741f

Rojas, Gerardo Hincapie

Fluxos e alocação de carbono de cinco genótipos de *Pinus taeda* com diferentes ideótipos de copa / Gerardo Hincapie Rojas. -- Botucatu, 2020

87 p. : tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu

Orientador: Otávio Camargo Campõe

Coorientador: Clayton Alcarde Alvares

1. Manejo florestal. 2. Seqüestro de carbono. 3. *Pinus taeda*. 4. Engenharia florestal. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Câmpus de Botucatu



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: FLUXOS E ALOCAÇÃO DE CARBONO DE CINCO GENÓTIPOS DE *Pinus taeda* COM DIFERENTES IDEOTIPOS DE COPA

AUTOR: GERARDO ROJAS HINCAPIE
ORIENTADOR: OTÁVIO CAMARGO CAMPOE
COORIENTADOR: CLAYTON ALCARDE ALVARES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em CIÊNCIA FLORESTAL,
pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. OTÁVIO CAMARGO CAMPOE
Ciências Florestais / Universidade Federal de Lavras

Prof. Dr. RACHEL COOK
North Carolina State University

Prof. Dr. MÁRIO DOBNER JÚNIOR
Agricultura, Biodiversidade e Florestas / Universidade Federal de Santa Catarina

Botucatu, 31 de agosto de 2020

*Aos meus amados avós,
Uvaldina, Roselia e Rodrigo,
dedico*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Otávio Campoe, pela orientação, ensinamentos, conselhos e sabedoria, mas, acima de tudo, pela grande oportunidade de desenvolver pesquisa junto a ele, sempre lhe serei grato.

Aos meus pais, pelo amor infinito, pela paciência e pelo apoio em cada uma das minhas decisões.

À Forest Productivity Cooperative, pelo apoio econômico em cada uma das minhas viagens de campo e em cada um dos gastos necessários para realizar o presente estudo.

À empresa Valor Florestal por todo o apoio em atividades de campo e manutenção do experimento desde sua implantação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida durante a realização desta etapa acadêmica (Processo nº 88882.433233/2019-01).

A Angie Vanessa Prieto pela sua eterna companhia, amor e força nos momentos mais difíceis.

Ao LABB (Laboratório Agroflorestal de Biomassa e Bioenergia), ao seu diretor Prof. Dr. Saulo Guerra e em especial a Emanuel Spadim e Natalia Arruda pela ajuda e companhia.

A todos os amigos que me brindaram momentos de risadas e companhia ao longo da minha experiência de morar em Brasil (Felipe, Aline, Alessandra, Marina, Vanessa, Rafael).

RESUMO

O crescimento das florestas plantadas pode ser descrito em função da oferta de recursos do ecossistema onde estão estabelecidas, da proporção desses recursos que as árvores podem realmente absorver, da eficiência com a qual são usados na conversão do CO₂ da atmosfera em biomassa (Produção Primária Bruta ou GPP) e da posterior alocação de carbono para os diferentes compartimentos da floresta (folhas, galhos, troncos e raízes). No entanto, os padrões nos fluxos de carbono e partição para os diferentes componentes da árvore podem ser diferentes entre variedades de uma mesma espécie, dependendo do material genético e do manejo silvicultural. O presente estudo objetivou a avaliação da produção Primária Líquida Acima do Solo (ANPP, produção de troncos, folhas e galhos), da respiração autotrófica da parte aérea (Ra) e do Fluxo Total de Carbono Abaixo do Solo (TBCF, produção de raízes e respiração heterotrófica), a fim de conhecer e comparar os padrões de partição da produtividade primária bruta destinada para cada um desses componentes. A avaliação foi realizada em cinco genótipos de *Pinus taeda* com ideótipos de copa contrastantes (copa ampla, meia, estreita e uma sem padrão definido) aos sete anos de idade numa plantação localizada em Rio Negrinho - SC, Brasil. Os resultados indicaram que quanto menor a amplitude da copa, maior o valor para GPP, apresentando diferença significativa entre as amplitudes mais contrastantes, variando de 43,3 Mg C m⁻² ano⁻¹ a 55,5 Mg C m⁻² ano⁻¹. O estoque de carbono apresentou diferença estatística entre os genótipos aos 7,2 anos de idade, porém ao longo do ano avaliado os fluxos de carbono não apresentaram diferenças significativas de partição, mostrando que as disparidades na alocação de carbono entre os materiais genéticos são resultante dos primeiros anos de desenvolvimento e que aos sete anos de idade a competição entre as árvores no espaçamento avaliado é elevada o suficiente, fazendo que a distribuição do carbono não apresentara diferença significativa, mesmo com as distintas estruturas de copa. A produtividade primária líquida de madeira (WNPP) teve relação positiva com a GPP, embora as maiores alocações de carbono no tronco + casca foram encontradas nos genótipos que apresentaram as maiores porcentagens de partição para ANPP:GPP e não necessariamente no genótipo com a maior GPP. O TBCF foi o componente que teve o maior fluxo de carbono em todos os genótipos, com média de distribuição de 44% para TBCF:GPP, seguido pela respiração aérea (30%) e finalmente a ANPP (26%). As perdas por respiração do ecossistema (autotrófica e heterotrófica) marcaram um intervalo de 75% a 80% do total de carbono capturado nos processos de fotossíntese. Todos os genótipos atuaram como drenos de carbono da atmosfera (NEP positiva), sem apresentar diferença significativa entre as suas médias, com variação de 8,6 Mg C m⁻² ano⁻¹ a 12,2 Mg C m⁻² ano⁻¹. Concluindo que os diferentes ideótipos de copa afetam os estoques de carbono, assim com a GPP, e que à medida que a Produtividade Primária Líquida aumenta há uma tendência de elevação na produção de madeira.

Palavras-chave: Balanço de carbono. Produtividade Primária Bruta. Partição. Fluxos de carbono. Ideótipos de copa. Alocação.

ABSTRACT

The growth of planted forests can be described according to the supply of ecosystem resources where they are established, the proportion of these resources that trees can actually absorb, the efficiency with which they are used to convert CO₂ from the atmosphere into biomass (Gross Primary Production or GPP) and the subsequent allocation of carbon to the different components of the forest (leaves, branches, stems and roots). However, patterns of carbon fluxes and partitioning to different components can significantly vary among varieties of the same species, depending on genetic material and silvicultural management. Therefore, the present study aimed to measure over one year the Aboveground Net Primary Production or ANPP (production of stems, leaves and branches), *R_a* (Autotrophic respiration) and Total Belowground Carbon Flux or TBCF (root production and heterotrophic respiration) in order to know and compare the percentages in the GPP partition that was assigned to each of these components. The evaluation was conducted in five genotypes of *Pinus taeda* with contrasting canopy ideotypes (wide, half, narrow crown and one without pattern) on 7-year-old plantation located in Rio Negrinho - SC in southern Brazil. The results indicated that the smaller the canopy amplitude, the greater the value for GPP, presenting a significant difference between the most contrasting amplitudes, varying from 43.3 Mg C m⁻² yr⁻¹ to 55.5 Mg C m⁻² yr⁻¹. The carbon storage at the seventh year of growing showed a statistical difference between the genotypes, however, throughout the assessment year, the carbon fluxes did not present significant partition differences, showing that these variances in carbon allocation among genetic materials are the result of the first years of development, thus at the age of seven, the competition among trees in the evaluated spacing is high enough making the carbon distribution not present significant difference, even with the different canopy structures. The Wood Net Primary production (WNPP) had a positive relationship with the GPP, although the highest carbon allocations in stem + bark were found in the genotypes that had the highest partition percentages for ANPP:GPP and not necessarily in the genotype with the highest GPP. TBCF was the component that had the highest carbon flux in all genotypes, with an average distribution of 44% for TBCF:GPP, followed by areal respiration (30%) and ANPP (26%). Ecosystem Respiration losses (autotrophic and heterotrophic) marked a range of 75% to 80% of the total carbon captured in photosynthesis processes. All genotypes acted as carbon drains from the atmosphere (positive NEP), with no significant difference between their averages, ranging from 8.6 Mg C m⁻² yr⁻¹ to 12.2 Mg C m⁻² yr⁻¹. Concluding that the different canopy ideotypes affect the carbon stocks, as well as the GPP; finally, as the Net Primary Productivity increases there is an upward trend in wood production.

Keywords: Carbon balance. Gross Primary Productivity. Partition. Carbon flows. Canopy ideotypes. Allocation.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 — Diagrama de partição do GPP como fluxo de carbono para os principais componentes da árvore na produção florestal26
- Figura 2 — Procedência e distribuição atual do *Pinus taeda* no sul (região central da Flórida), sudeste (litoral do sudeste) e centro-sul (leste do Texas) dos Estados Unidos.....30
- Figura 3 — Projeção de expansão da espécie *Pinus taeda*30
- Figura 4 — Precipitação pluviométrica e temperaturas médias do município de Rio Negrinho - SC35
- Figura 5 — Estrutura das copas dos genótipos de *Pinus taeda* avaliados em ordem de ideótipo de copa, de estreita (C3) até s/ copa definida (OP). As fotos foram tiradas com a idade de 7,2 anos38
- Figura 6 — Delineamento experimental de blocos casualizados do protocolo RW20 no Brasil e marcação dos arranjos a serem avaliados (quadrados pretos).....39
- Figura 7 — Pontos de medição sob o dossel marcando o transepto perpendicular às linhas do plantio e à direção do sensor44
- Figura 8 — Armação da tela de sombreamento utilizada como coletor46
- Figura 9 — Localização da medição da respiração do solo com respeito das árvores dentro da parcela49
- Figura 10 — Aparelho PPSYSTEM EGM-4 com a câmera adaptada sobre o anel de PVC.....49
- Figura 11 — Localização da coleta de serapilheira acima do solo dentro da parcela (esquerda); armação de metal utilizada nas coletas (direita).....51
- Figura 12 — Componentes da produtividade primária líquida da parte aérea (ANPP) para cada um dos clones avaliados62
- Figura 13 — Sazonalidade média do acúmulo mensal da deposição de folheto coletado para cada um dos genótipos avaliados ao longo do ano do experimento63
- Figura 14 — Acúmulo das médias mensais coletadas do fluxo total de carbono associado à queda de folheto ao longo do ano de avaliação para cada um dos genótipos avaliados.....64

Figura 15 — Média mensal da respiração do solo, ao longo do ano de estudo, para cada um dos genótipos avaliados	66
Figura 16 — Média do acúmulo de serapilheira na superfície do solo para cada genótipo.....	67
Figura 17 — Relação entre o fluxo de carbono para a produção de madeira (WNPP) e a produtividade primária líquida (GPP) para todas as parcelas avaliadas	71
Figura 18 — Diminuição do fluxo para WNPP à medida que aumenta a proporção de TBCF:GPP.....	72
Figura 19 — Fluxo da Produtividade Primária Bruta para os diferentes compartimentos da árvore (aéreo e abaixo do solo) e o gasto de GPP na manutenção da parte aérea por meio da respiração autotrófica	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Análise das amostras de solo da área experimental em duas posições e duas profundidades (0-20cm e 20-40cm).	36
Tabela 2 — Genótipos estudados de Pinus taeda, suas respectivas cores de identificação e características da estrutura de copa.	37
Tabela 3 — Dados médios, máximos e mínimos de DAP, HT e HC para cada um dos genótipos avaliados no presente estudo obtidos no inventário de julho de 2019.	40
Tabela 4 — Modelo de procedimento gerado para o cálculo de biomassa para o RW20 a partir da amostragem destrutiva de 2017.....	41
Tabela 5 — Comparação na distribuição média da GPP para cada um dos componentes da árvore em porcentagem.....	56
Tabela 6 — Estoque de carbono (Mg C ha ⁻¹) para os diferentes compartimentos da árvore para cada um dos cinco genótipos avaliados aos 7,4 anos de idade	53
Tabela 7 — Valores médios da Área Foliar Específica (AFE), da área foliar média por árvore (AF), do Índice de Área Foliar (IAF)	57
Tabela 8 — Valores de Produtividade Primária Líquida da parte aérea (ANPP), fluxos de carbono para produção de madeira (WNPP) e folhas (FNPP) e respiração da parte aérea(Ra).....	59
Tabela 9 — Componentes usados no cálculo do fluxo de carbono para o solo (TBCF) nos cinco genótipos avaliados.....	65
Tabela 10 — Fluxos de carbono (g C m ⁻² ano ⁻¹) para cada um dos genótipos estudados ao longo do sétimo ano de avaliação.	69
Tabela 11 — Partição do GPP para cada componente da árvore e a respiração da parte aérea em cada um dos genótipos avaliados.....	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANPP	Aboveground Net Primary Production (Produtividade Primária Líquida Aérea)
GPP	Gross Primary Production (Produtividade Primária Bruta)
R_a	Autotrophic Respiration (Respiração Autotrófica)
R_E	Ecosystem Respiration (Respiração do Ecossistema)
TBCF	Total Belowground Carbon Flux (Fluxo Total de Carbono Abaixo do Solo)
NPP	Net Primary Production (Produtividade Primária Líquida)
WNPP	Wood Net Primary Production (Produtividade Primária Líquida de Madeira)
FNPP	Foliage Net Primary Production (Produtividade Primária Líquida de Folhas)
NEP	Net Ecosystem Production (Produtividade Líquida do Ecossistema)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	23
2.1	ALOCAÇÃO DE CARBONO E DISTRIBUIÇÃO DE BIOMASSA.....	23
2.2	Aspectos gerais do <i>Pinus taeda</i>	29
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	34
3.1	Localização e caracterização da área experimental.....	34
3.2	Delineamento experimental.....	36
3.3	Coleta de dados	39
3.3.1	Dados climáticos.....	39
3.3.2	Inventário anual.....	40
3.3.3	Equações alométricas.....	40
3.4	Determinação da Área Foliar Específica	41
3.5	Determinação do Índice de Área Foliar	43
3.6	Determinação do Balanço de Carbono.....	44
3.6.1	Produtividade Primária Líquida da Parte Aérea (ANPP).....	45
3.6.2	Respiração da Parte Aérea (Ra).....	47
3.6.3	Total do fluxo de carbono no solo (TBCF).....	47
3.7	Produtividade Líquida do Ecossistema (NEP)	51
3.8	Análise Estatística	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
4.1	Biomassa da Floresta.....	53
4.2	Área Foliar Específica e Índice de Área Foliar.....	56
4.3	Determinação do Balanço de carbono	59
4.3.1	Produtividade Primária Líquida da parte aérea (ANPP)	59
4.3.2	Fluxo de carbono para o solo (TBCF)	64
4.4	Produtividade Primária Bruta (GPP) e partição de carbono	68
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	77
6	CONCLUSÕES.....	78
	REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

O crescimento das florestas depende da disponibilidade de recursos que são disponibilizados às árvores em um plantio comercial, da proporção de recurso capturado e da eficiência com que as árvores os utilizam (MONTEITH, 1977; BINKLEY; STAPE; RYAN, 2004). Por meio da luz e da água, todas as espécies arbóreas absorvem o CO₂ atmosférico e o transformam em moléculas de carboidrato que são transportadas para os diferentes componentes da planta; esse fluxo de fotossíntese total ou de Produtividade Primária Bruta (GPP) é conhecido como alocação (RYAN et al. 2004).

No ecossistema florestal, a alocação de carbono desempenha um papel fundamental, já que os processos de respiração, produção de biomassa, desenvolvimento dos componentes subterrâneo e aéreo e a formação de tecidos utilizam os elementos produzidos durante a fotossíntese (CHOPPER; GHOLZ, 1994), logo, irá determinar a direção e a proporção em que estes elementos serão distribuídos.

Embora a maior eficiência nos processos de fixação e estocagem do carbono seja atingida logo após o fechamento da copa em plantações jovens - com dois a três anos de idade -, os padrões de alocação dentro de uma espécie se modificam-se com a idade do talhão ao mesmo tempo que acontece a diminuição da produtividade primária bruta (RYAN et al., 2004).

Desse modo, para a obtenção de maiores quantidades de biomassa alocada na parte aérea nos plantios florestais, é preciso ter um maior conhecimento do fluxo e distribuição do C em resposta às características específicas (influências edáficas, precipitação, radiação solar, temperaturas médias e extremas) de um determinado local (GIARDINA et al., 2003) e das interações entre a genética e os tratamentos silviculturais, pois estes também afetam as produtividades que um plantio pode alcançar (LARCHER, 2006).

No entanto, a disponibilidade de recursos não é sempre a mesma ao longo do ano; pode variar consideravelmente em cada estação, levando diferentes espécies de árvores a desenvolver padrões distintos de alocação desses carboidratos produzidos para a parte aérea (ANPP: produção de troncos, folhas e ramos) ou

como fluxo de C para o solo (TBCF: a soma de produção de raiz, respiração e produção de micorrizas) (LITTON et al., 2007), visando à sobrevivência nos períodos em que os recursos podem ser mais reduzidos. Desta forma, uma planta que sofre constante déficit hídrico irá destinar recursos prioritariamente ao desenvolvimento de raízes, transformando esse padrão numa característica genética própria da espécie.

Em geral, estudos para encontrar tratamentos silviculturais que permitam aumentar o volume de massa seca nas toras a serem exploradas precisaram compreender os mecanismos que determinam a captura e a alocação de carbono (MUNHOZ, 2011; CAMPOE et al., 2012; DELIBERALI, 2015; RODRIGUES, 2017), sob a premissa de que elevar a produção de GPP gera maior disponibilidade de carboidratos que serão enviados e utilizados dentro de cada componente da árvores e que a produção de madeira dependerá de uma maior quantidade destinada desse GPP para o tronco, em comparação à produção de raízes (GIARDINA et al., 2003).

Este estudo teve como objetivo quantificar e comparar os fluxos e partição de carbono de cinco genótipos comerciais da espécie *Pinus taeda*, com três ideótipos de copa distintos (estreita, média e ampla) e um genótipo sem ideótipo definido, a fim de entender as diferenças de produtividade de madeira.

As hipóteses são:

- Diferentes genótipos apresentam diferentes estoques de carbono;
- Diferenças de produtividade de madeira são explicadas pela combinação de maior absorção de carbono (GPP) e maior partição para o componente madeira;
- Genótipos com maior produtividade de madeira apresentam menor partição para componentes abaixo do solo;
- Independentemente do genótipo, plantios de *Pinus taeda* são drenos de carbono.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Alocação de carbono e distribuição de biomassa

O desenvolvimento das florestas pode ser descrito em função da oferta de recursos do ecossistema onde são estabelecidas, da proporção desses recursos que as árvores conseguem absorver e da eficiência com que elas os utilizam na fixação de dióxido de carbono (BINKLEY; STAPE; RYAN, 2004), gerando uma constante competição por minerais, água e luz disponíveis no meio em que se desenvolvem. Portanto, à medida que a árvore consegue atingir essas necessidades, a assimilação de carbono do dossel acontece e ela crescerá, aumentando a estocagem de biomassa nos seus diferentes componentes e melhorando as suas possibilidades de sobrevivência.

Em síntese, o dióxido de carbono (CO_2) é assimilado pela planta por meio da fotossíntese (Produtividade Primária Bruta - GPP), sendo uma parte transferida para os organismos simbiotes e micorrizas e outra convertida em nova biomassa (Produtividade Primária Líquida - NPP), podendo ser folhas, madeira (incluindo troncos, galhos, e casca), raízes ou partes reprodutivas (RODRIGUES, 2017). Entretanto, outra parte é liberada de volta para a atmosfera através da respiração, a qual, por sua vez, é fortemente afetada pela temperatura e, em alguns casos, pelo estado nutricional do tecido (MAIER et al., 1998), representando um considerável gasto de energia para a manutenção de cada um desses elementos.

Assim, as plantações florestais, por sua estrutura relativamente simples, são úteis para estudar as relações que existem entre a respiração de alguns dos componentes da árvore e a troca de carbono do ecossistema inteiro (MAYER et al., 2004). Desse modo, pode-se inferir que o ganho de carbono através da fotossíntese e a posterior perda de parte desse carbono por meio da respiração são os fatores que demarcam o crescimento da floresta e o carbono restante é alocado dentro do ecossistema ou NEP (Produtividade Líquida do Ecossistema).

Buscando entender a distribuição feita por diferentes espécies dos produtos oriundos da fotossíntese, experimentos têm sido estabelecidos em diferentes regiões climáticas a fim de ampliar a compreensão dos efeitos do meio ambiente na produção florestal (FORRESTER et al., 2006; STAPE et al., 2008; LACLAU et al.,

2009; RYAN et al., 2010), contudo, ainda é preciso avançar esses estudos para cada espécie de importância florestal.

Nos plantios com fins comerciais, além das características físicas da madeira, é importante alcançar a maior quantidade de biomassa alocada no tronco por hectare. Conseqüentemente, a alocação de carbono é uma questão importante na produção de madeira, uma vez que controla os fluxos de C fixados na fotossíntese entre respiração e produção de biomassa, e entre os componentes acima e abaixo do solo (EPRON; NOUVELLON; RYAN, 2012).

É importante entender que, para previsões assertivas dos rendimentos das plantações ao longo dos anos e das paisagens, serão necessárias informações detalhadas sobre as respostas da alocação de carbono às condições ambientais e à disponibilidade de recursos (STAPE; BINKLEY; RYAN, 2008), além da contribuição na melhora contínua a níveis mais específicos dos modelos ecofisiológicos na previsão de produtividades futuras.

Desse modo, o termo alocação de carbono é conhecido como o fluxo de C para um componente específico da árvore ou, simplesmente, como a distribuição da Produção Primária Bruta (GPP) (RYAN et al., 1996a; GIARDINA et al., 2003). No entanto, esse termo é geralmente utilizado de maneira ampla na literatura, pois abrange três elementos fundamentais: a biomassa (quantidade de material orgânico presente), o fluxo (movimento de carbono para um componente por unidade de tempo) e a partição (fração da Produtividade Primária Bruta usada por componente) (LITTON et al., 2007).

Segundo Giardina et al. (2003), a Produção Primária Bruta é a fotossíntese líquida somada ao longo de um intervalo de tempo anual e fornece os carboidratos usados para todos os processos da planta. Nos ecossistemas florestais, o fluxo de fotossíntese total é particionado como uma fração expressa em porcentagem ou como uma relação de 0 a 1, sem unidades, entre os componentes acima e abaixo do solo e sua respectiva produção e respiração (Figura 1) (LITTON, 2007).

Diferentes metodologias foram desenvolvidas para o estudo desses fluxos, baseadas na quantidade de carbono alocado para uma parte da planta por unidade de área em um determinado tempo (ODUM, 1953), tais como as propostas por Raich

e Nadelhoffer (1989), Ryan (1991) e Giardina e Ryan (2002). Esta última apresenta o GPP como o balanço da produtividade primária líquida da parte aérea (ANPP), da respiração autotrófica da parte aérea (R_a) e do fluxo de carbono enviado para abaixo do solo (TBCF).

O ANPP (do inglês, Aboveground Net Primary Production) representa o total de material orgânico produzido acima do solo (folhas, galhos, casca e madeira), ou seja, a quantidade de carbono alocada como biomassa aérea por unidade de área e tempo (GOWER et al., 2001). O ANPP é subdividido em WNPP (Produtividade Primária Líquida de Madeira) e FNPP (Produtividade Primária Líquida de Folhas).

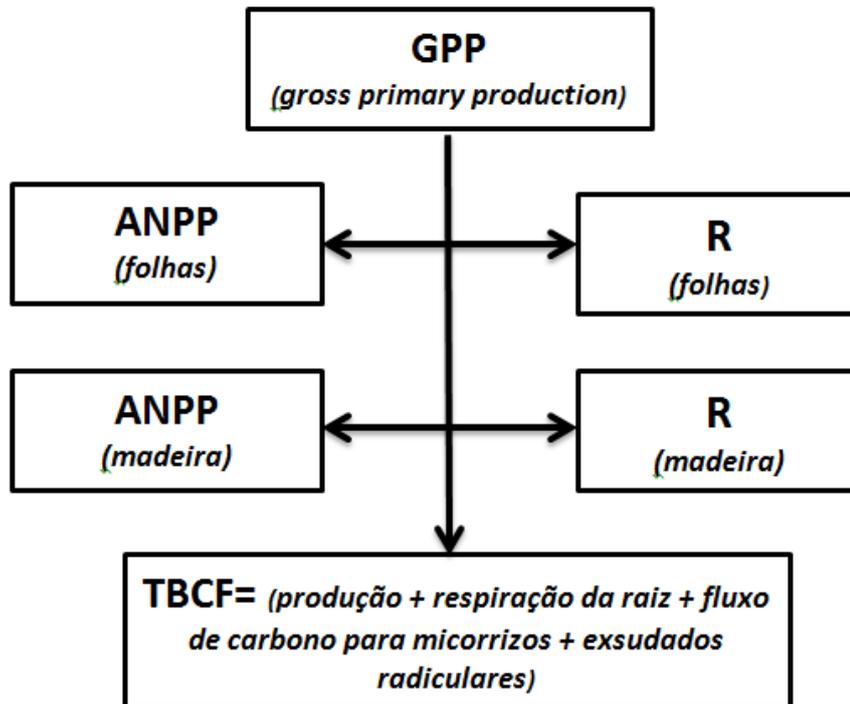
Já a respiração autotrófica (R_a) desempenha um papel fundamental na resposta das plantações florestais aos tratos silviculturais, inclusive às mudanças climáticas. Segundo Delucia et al. (2007), apenas 30-50% da fotossíntese (GPP) é utilizada na produção de biomassa aérea e o restante retorna à atmosfera na forma de R_a ; entretanto, advertem que pode ser inapropriado supor que a respiração é uma fração constante da GPP, pois a adesão a essa suposição pode contribuir para estimativas incorretas dos ciclos de carbono.

Como último componente, observa-se como as árvores alocam grande parte da produção primária bruta abaixo do solo para a produção e a manutenção de raízes e micorrizas (GIARDINA; RYAN, 2002).

O Fluxo Total de Carbono Abaixo do Solo (do inglês, Total Belowground Carbon Flux - TBCF) pode variar entre 25% e 63% do total da produtividade primária bruta (LITTON et al., 2007), sendo muitas vezes o principal uso de carbono em ecossistemas florestais.

Onde a respiração do solo (F_s) é o seu componente de maior representação, afetado principalmente por fatores abióticos como a temperatura e o teor de água (SINGH; GUPTA, 1977).

Figura 1 — Diagrama de partição do GPP como fluxo de carbono para os principais componentes da árvore na produção florestal



Nota: ANPP dividido em produção de madeira (WNPP) e folhas (FNPP); respiração autotrófica dos componentes da parte aérea (R) e o TBCF.

Fonte: Litton et al. (2007), modificado de Ryan et al. (2004).

Para Mayer et al. (2004), estudar o crescimento dos componentes da árvore fornece a oportunidade de entender o comportamento do sistema como um todo, além de determinar como o ecossistema florestal responde às mudanças climáticas e às atividades de manejo florestal. Ao mesmo tempo, Campoe et al. (2012) afirmam que a produção de madeira representa uma fração grande, porém variável, da produção primária bruta em plantações de eucaliptos altamente produtivos.

Contudo, é importante mencionar que, após o fechamento do dossel, observou-se uma clara redução na produção de madeira em uma plantação de *Eucalyptus saligna* com idade de 6,5 anos, como foi relatado por Ryan et al. (2004), que explicam como essa redução ocorre devido ao aumento da fração de GPP que é particionada para respiração foliar e alocada abaixo do solo comparada com estágios anteriores de desenvolvimento da floresta.

Alguns estudos realizados no Brasil envolveram a produção primária bruta e sua alocação para os diferentes componentes da árvore. Campoe et al. (2012) observaram que o aumento da GPP gerava um incremento diretamente proporcional

na partição de carbono como NPP (Produtividade Primária Líquida) para a produção de madeira na espécie *Eucalyptus grandis*, com alocação da NPP no tronco de 18% na parcela com a menor quantidade da GPP (2971 g C m⁻² ano⁻¹), a 22% na parcela com a maior GPP produzida (4132 g C m⁻² ano⁻¹).

Em adição, Rodriguez (2017) demonstrou que a maior produtividade de madeira encontrada para o clone AEC 0144 (*Eucalyptus urophylla*) no espaçamento 3x2 m foi resultado de uma maior GPP (5997,45 g C m⁻² ano⁻¹) somada à maior partição de carbono para incremento de tronco (30%) e menor partição da GPP para TBCF (34%), quando comparado a outros clones da mesma espécie e em diferente espaçamento.

No caso do *Pinus taeda*, há importantes ganhos na produtividade florestal em resposta a diferentes tratamentos silviculturais que podem ser amplamente encontrados na literatura. Albaugh (1998) foi um dos pioneiros a estudar essas respostas, medindo os incrementos no volume de madeira, na produção total de biomassa e no índice de área foliar de até 152%, 99% e 101%, respectivamente, após quatro anos de fertilização como tratamento silvicultural; em contraste com o tratamento de irrigação, cujos incrementos foram somente de 25%, 23% e 16%, respectivamente. Porém, quando utilizadas em um mesmo tratamento silvicultural, a fertilização e a irrigação levaram a um incremento de até 120% na eficiência de produção de biomassa total (índice medido em relação ao crescimento por unidade de IAF), em que a fertilização e a irrigação aplicadas separadamente apresentaram 91% e 29% de incremento, respectivamente.

Samuelson et al. (2001) demonstraram como o aumento da disponibilidade nutricional causou maior impacto na eficiência de crescimento do que o aumento da disponibilidade de recurso hídrico para o *Pinus taeda*.

Esse resultado foi validado por Litton et al. (2007), que citam uma redução de 77% do GPP destinado ao componente da planta abaixo do solo (TBFC) no *Pinus taeda*, quando as árvores foram submetidas a tratamentos de irrigação e fertilização ao mesmo tempo, e de 59%, quando foi utilizada apenas a fertilização como tratamento silvicultural; novamente, em contraste com o tratamento de irrigação que não apresentou mudanças na distribuição do GPP.

Os estudos supracitados permitem inferir que os padrões de fluxo do carbono para as raízes, nessa espécie, representam fatores genéticos ligados diretamente ao ambiente em que evoluiu naturalmente, mais do que a disponibilidade de recursos do local de plantio, nesses casos, a disponibilidade de água.

Ainda em relação a essa afirmação dentro da mesma espécie, Deliberali (2015) não encontrou diferenças na distribuição de GPP entre tratamentos silviculturais e tratamentos controle, mas sim o incremento linear do TBCF juntamente com a maior produção de GPP.

Já Mayer et al. (2004) descrevem como o tratamento de fertilização juntamente com a irrigação modificou a disponibilidade de NPP para os componentes da planta, aumentando a distribuição do GPP para acima do solo (+5%) e diminuindo-a para abaixo do solo (-13%), em povoamentos de 12 anos da espécie *Pinus taeda*.

No entanto, outro estudo desenvolvido no estado da Bahia, Brazil com a espécie *E. grandis x urophylla* verificou incrementos de 6100 g C m⁻² ano⁻¹ para 11300 g C m⁻² ano⁻¹ na Produtividade Primária Bruta, atribuídos ao aumento substancial na eficiência de converter a luz capturada em biomassa, aplicando a irrigação como tratamento silvicultural, em que o autor explica como a disponibilidade da água contribui no aumento da porcentagem de luz capturada pela copa das árvores (STAPE, 2002).

De qualquer forma, a irrigação não deve ser descartada como tratamento silvicultural em lugares com déficit hídrico ou na intenção de aumentar a produtividade. Todavia, é possível afirmar que a espécie florestal *Pinus taeda* é majoritariamente responsiva a outros tratamentos silviculturais. Assim como, há grande potencial de aumentar a produtividade via manejo nutricional (fertilização), escolha de ambientes mais aptos (regime hídrico e térmico) e melhoramento genético, sendo necessários ensaios experimentais específicos (MUNHOZ, 2011).

2.2 Aspectos gerais do *Pinus taeda*

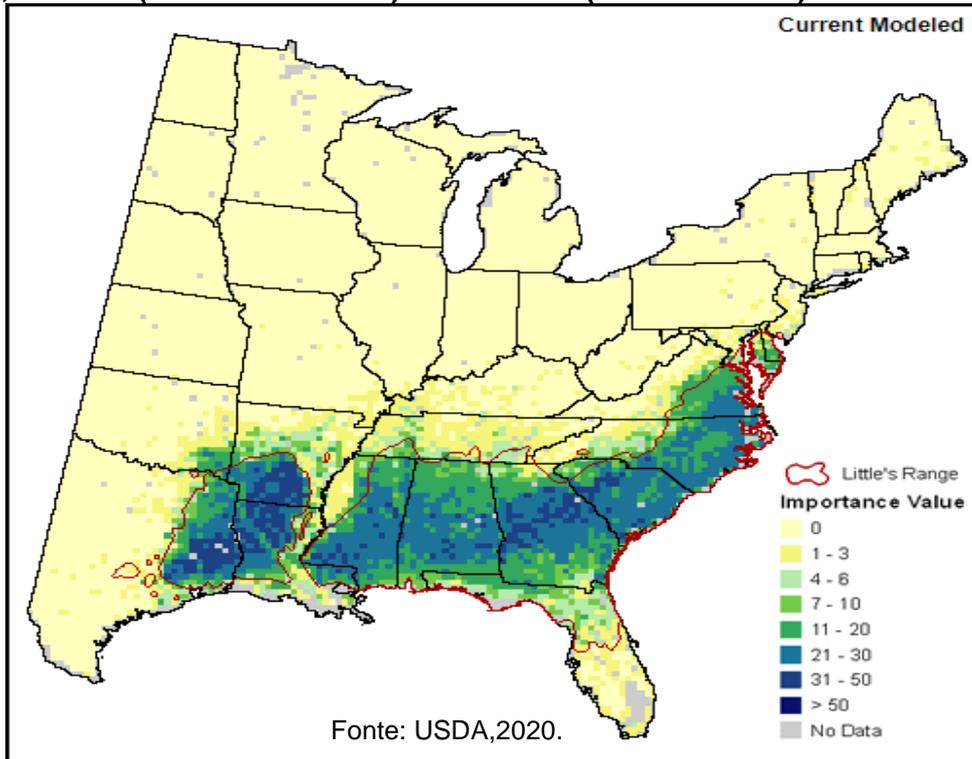
O *Pinus taeda* é uma espécie subtropical que ocorre naturalmente em 15 estados do sudeste e leste dos Estados Unidos. Sua distribuição geográfica (Figura 2) é mais ampla que qualquer outra espécie de *Pinus* no país, abrangendo desde o norte de Delaware até a região central da Flórida e o leste do Texas. Para o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, essa espécie tem a projeção de se expandir em pelo menos outros 15 estados (Figura 3), alcançando o Nordeste do país (USDA, 2019).

Tal distribuição geográfica, somada às características que a tornam uma árvore ideal para a restauração e manejo florestais, transformou-a na principal espécie madeireira do sudeste dos Estados Unidos. A espécie é robusta e versátil em termos de capacidade de se reproduzir e crescer rapidamente em diversos sítios, em comparação com outras espécies de *Pinus* (SCHULTZ, 1997). Por esses motivos, *Pinus taeda* tem sido plantado em várias partes do mundo para a produção de madeira para processamento industrial ao tempo que serve como espécie de reflorestação de áreas degradadas.

Vale a pena mencionar que, povoamentos de *Pinus taeda* estabelecidos em regiões de clima úmido, com invernos moderados, ausência de déficit hídrico e preferivelmente solos bem drenados são ideais para atingir maiores produtividades (SHIMUZY; SEBBEN; 2008).

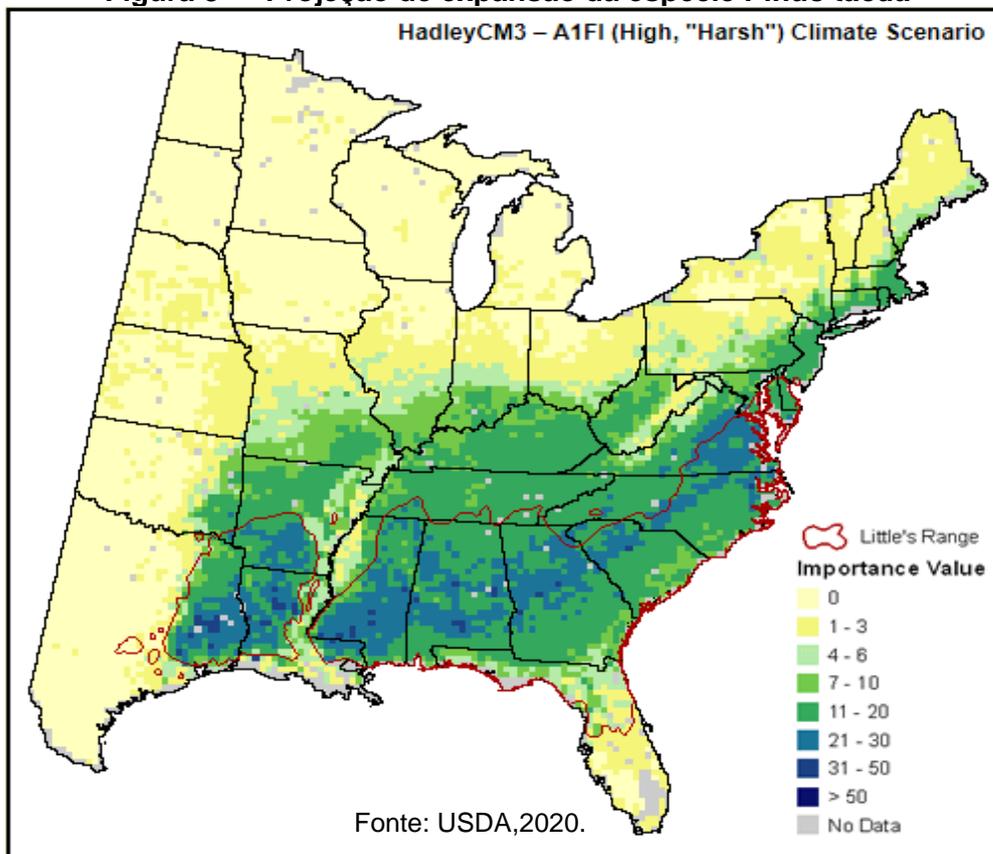
A fim de realizar ensaios de crescimento com espécies norte-americanas de *Pinus*, conhecidas como “pinheiros amarelos”, em 1948 foram introduzidas no Brasil, pelo Serviço Florestal do Estado de São Paulo, as primeiras sementes de *Pinus taeda*, *Pinus elliottii*, *Pinus echinata* e *Pinus paluta*. Devido principalmente à necessidade que se tinha da produção de madeira para o abastecimento industrial, viu-se nessas espécies de *Pinus* o potencial para suprir tal demanda, motivando sua experimentação em todo o território nacional (KRONKA et al., 2005).

Figura 2 — Procedência e distribuição atual do *Pinus taeda* no sul (região central da Flórida), sudeste (litoral do sudeste) e centro-sul (leste do Texas) dos Estados Unidos



Nota: As cores representam o valor de importância assinado para cada local do inventário da USDA.

Figura 3 — Projeção de expansão da espécie *Pinus taeda*



Nota: As cores representam o valor de importância assinado para cada local do inventário da USDA.

Contudo, o plantio em larga escala da espécie *Pinus taeda* teve início na década de 1960 no Brasil, impulsionado pelos incentivos fiscais para reflorestamento nos estados do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e São Paulo, além da facilidade nos tratamentos silviculturais, do rápido crescimento e da reprodução intensa (SHIMIZU, 2006).

Enquanto estudos sobre materiais genéticos procedentes da Carolina do Norte mostraram melhor adaptação às serras gaúchas e também ao planalto catarinense onde as temperaturas por baixo dos 0 °C são mais prolongadas; e aqueles provenientes da planície costeira do estado da Carolina do Sul apresentaram maior produtividade e melhor qualidade do fuste no sul e no sudeste do Brasil, onde as geadas não são tão severas (SHIMIZU, 2006).

Atualmente, o Brasil conta com 7,83 milhões de hectares de florestas plantadas (0,9% de todo o seu território) – deste montante, 1,6 milhão ocupados por plantios do gênero *Pinus* – concentradas principalmente no Paraná (42%) e em Santa Catarina (34%), seguidos do Rio Grande do Sul (12%) e São Paulo (8%) (IBÁ, 2019).

Nos últimos sete anos, a área plantada com esse gênero se manteve praticamente estável, agrupando-se cada vez mais dentro desses quatro estados. Embora neste mesmo período, a produtividade média do *Pinus* tenha apresentado um decréscimo de 0,8% ao ano - resultado associado à conversão das áreas de *Pinus*, usualmente detentoras de produtividades mais expressivas nos plantios de eucalipto de grandes empresas -, em 2018, obteve-se uma produtividade média de 30,1 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, a mais alta do mundo, quase 7,0 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ acima da segunda maior referência mundial, representada pela Oceania (IBÁ, 2019).

Entretanto, há grande variação da produtividade média nos povoamentos do gênero *Pinus* no Brasil, entre 18 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ e 45 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (PINTO JÚNIOR et al., 2013), devido à dimensão da área englobada nos plantios que abrangem muitas classes de solos (REISSMANN; WISNIEWSKI, 2005) e tipos de clima (FERREIRA et al., 2001).

Além disso, as florestas de *Pinus* no Brasil possuem a rotação média mais curta ao lado da China (9,5 anos), sendo até seis ou sete vezes menor quando

comparada às rotações médias de países considerados referências na produção de madeira, como Canadá ou Rússia (IBÁ, 2019).

Como mencionado, entre as espécies produtoras de madeira, o *Pinus taeda* é uma das mais importantes e mais plantadas no mundo, devido à sua baixa exigência nutricional, o que a diferencia do eucalipto, levando muitas empresas florestais de *Pinus* a optarem por não acrescentar a adubação como prática silvicultural, alegando sua não viabilidade econômica (FERREIRA et al., 2001). Já nos Estados Unidos a aplicação de fertilizantes tornou-se uma prática comum para aumentar a área foliar e a produção de madeira (ALBAUGH et al., 2004).

A não utilização da adubação como prática silvicultural nas plantações de *Pinus* pode reduzir a manutenção e a sustentabilidade da floresta, onde problemas de deficiência já foram relatados em solos de baixa fertilidade, como no caso do segundo planalto paranaense (BATISTA et al., 2015).

Dessa forma, diferentes estudos têm demonstrado como a espécie é responsiva à maior disponibilidade de nutrientes, água e luz, principalmente em sítios com baixa capacidade produtiva (DEDECEK et al., 2008; BOGNOLA et al., 2010; SCHNEIDER, 2011), obtendo ganhos na uniformidade do povoamento, bem como na produtividade final.

Moro et al. (2014) encontraram um incremento significativo no volume de madeira nas plantas de *Pinus taeda* com apenas um ano de idade, ao aplicar 70 kg ha⁻¹ de P₂O₅, e em plantios de cinco e nove anos, com a adição de macronutrientes, nos quais também houve aumento no estoque de madeira, mostrando, inclusive, que a adubação em florestas já estabelecidas é uma estratégia a ser considerada em sítios de baixa fertilidade.

Também foram verificados aumentos da biomassa em pé por Albaugh et al. (2004) em plantios de *Pinus taeda* com 17 anos de idade, de 100% e 25%, com tratamentos de fertilização e irrigação, respectivamente, enquanto o incremento anual da produção de biomassa de madeira foi de 119% e 23% com esses mesmos tratamentos, respectivamente, após nove anos de aplicação.

As informações apresentadas, aliadas ao aprimoramento das atividades de controle da matocompetição, preparo do solo, ajuste no espaçamento do plantio

(dependendo da topografia do local) e à seleção de genótipos mais adaptados a sítios e climas específicos, podem resultar em rendimentos significativos de produção de madeira (ALBAUGH et al., 2012; ZHAO et al., 2016).

Apesar de os avanços na silvicultura do *Pinus* ao longo das últimas décadas terem resultado em aumentos significativos de produtividade (FOX et al., 2007), no Brasil ainda há espaço para ampliar esses ganhos através do avanço no melhoramento genético e da adequação de atividades silviculturais específicas às regiões de plantio (MUNHOZ, 2015).

O entendimento de como os fatores relacionados às atividades silviculturais e ao melhoramento genético podem afetar o uso e a eficiência dos recursos (radiação solar, nutrientes e água) é essencial para a manutenção dos altos níveis de produtividade de madeira, além de garantir a sustentabilidade dos plantios de *Pinus* no Brasil e no mundo.

Destaca-se também a ampla diversidade na utilização do *Pinus* no setor florestal, haja vista as distintas finalidades de sua madeira, tais como a geração de energia em siderurgias, a produção de carvão vegetal, madeira serrada, painéis de compensados e, principalmente, a produção de celulose e papel; além disso, os resíduos de todas essas etapas têm sido aproveitados como biomassa para geração de vapor e energia (MARTO, 2006).

Ao mesmo tempo que os fustes da madeira de *Pinus taeda* são utilizados na produção de peças serradas para estruturas, confecção de móveis, embalagens, molduras e chapas de diversos tipos; na produção de celulose de fibra longa, a madeira juvenil dessa espécie de baixa densidade é muitas vezes preferida por seus processos mecânicos e semimecânicos (SHIMIZU, 2006).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área experimental

O presente estudo faz parte da rede de experimentos da FPC (Forest Productivity Cooperative, <https://forestproductivitycoop.net/>), conhecida como RW20, que visa encontrar os efeitos do espaçamento, adubação e controle do mato em diferentes variedades de *Pinus taeda*, cada uma com o ideótipo de copa definido e alcançado por meio da melhora genética. Esses efeitos foram avaliados de acordo com o estabelecimento de diferentes tratamentos silviculturais aliados a distintos espaçamentos e, posteriormente, comparados em três locais de estudo: 1- na Planície Costeira da Carolina do Norte, em Bladen Lakes State Forest (EUA); 2- no Piemonte da Virginia no Tech Reynolds Homestead Research Center (EUA); 3- no Primeiro Planalto, ou Planalto de Curitiba, na área rural da cidade de Rio Negro - PR (Brasil).

O local do experimento escolhido no Brasil representa regiões tipicamente históricas de plantio de *Pinus taeda* da região do sul do país, situado mais especificamente na latitude de 26°19'05.3" S e longitude de 49°49'48.2" W. O local onde esse experimento foi implantado esteja cadastrado no estado do Paraná, pois os terrenos fazem parte da área rural da cidade de Rio Negro – PR.

As condições atmosféricas utilizadas para a área experimental foram as registradas pela estação meteorológica A862 do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), a uma distância de 10,5 km do local experimental. Quando os dados desta estação não estavam disponíveis, os dados da estação INMET mais próxima com dados disponíveis foram utilizados.

A área onde está instalado o experimento é administrada pela empresa Valor Florestal, sediada na cidade de Rio Negrinho - SC, a qual gerencia e possui grande parte dos terrenos destinados para plantio de *Pinus taeda* na região, sendo ela responsável pela manutenção do RW20 no Brasil.

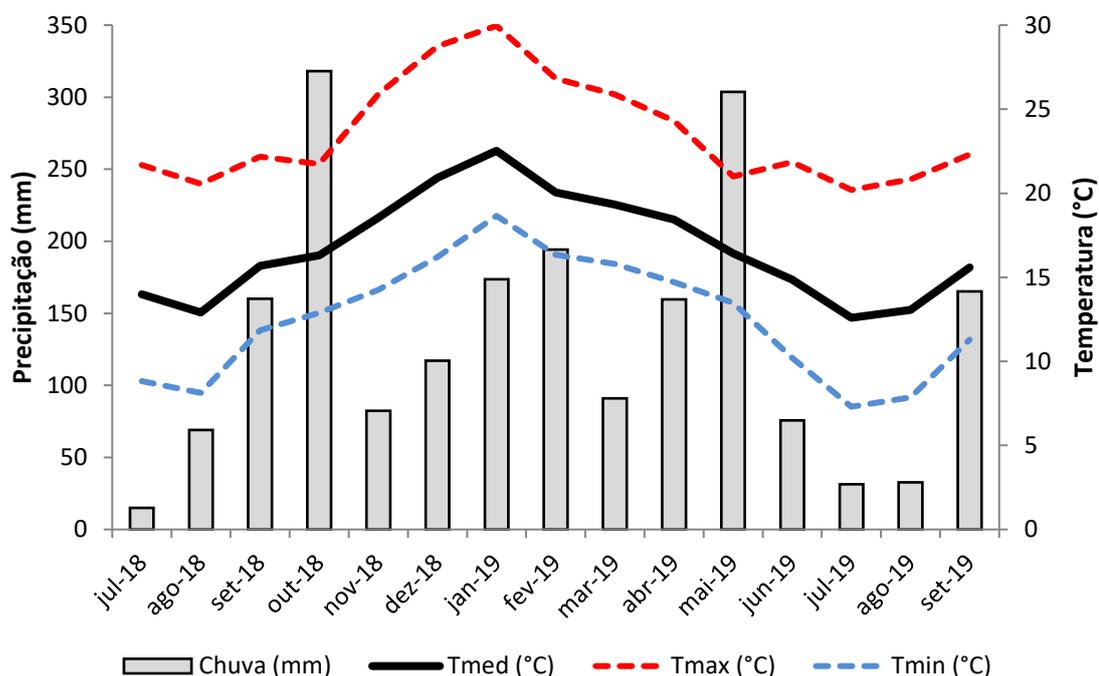
O solo da área experimental é classificado como cambissolo háplico alumínico úmbrico argiloso média a proeminente ondulada. A região situa-se em uma área de maiores altitudes (800 m a 1000 m), o clima é classificado como Cfb (úmido subtropical, sem estação seca e com verão temperado), com temperatura

média histórica anual de 16,5 °C e precipitação anual de 1.625 mm (ALVARES et al., 2013).

Durante o período de amostragem – julho de 2018 a setembro de 2019 –, a maior e menor temperatura média registradas foram de 29,7 °C e 7,3 °C em janeiro de 2019 e julho de 2019, respectivamente; representando também os meses mais quente e frio ao longo do ano de média. Quanto à precipitação, obteve-se o maior índice no mês de outubro de 2018 e o menor no mês de julho de 2019 (Figura 4).

Para a análise química do solo, foram realizadas subamostras coletadas em duas profundidades (0-20 cm e 20-40 cm) e em duas posições aleatórias dentro da área experimental, a fim de se conhecer a fertilidade do solo, matéria orgânica, pH e outras características apresentadas na Tabela 1.

Figura 4 — Precipitação pluviométrica e temperaturas médias do município de Rio Negrinho - SC



Nota: dados obtidos por meio do preenchimento de dados climáticos provenientes da INMET de anos anteriores nos casos de falhas para dados dos meses da medição.

Tabela 1 — Análise das amostras de solo da área experimental em duas posições e duas profundidades (0-20cm e 20-40cm).

	<i>Profundidade (cm)</i>		Unidades
	0-20	20-40	
pH	3,75	3,90	
M. O.	55	57,50	(g dm ⁻³)
P	5	3	(mg dm ⁻³)
K	0,85	0,50	(mmolc dm ⁻³)
SB	2,85	2,50	
CTC	249,45	232,75	(mmolc dm ⁻³)
V	1	1	%
Cu	0,45	0,40	(mg.dm ⁻³)
Ca	1	1	(mmolc dm ⁻³)
Mg	1	1	(mmolc dm ⁻³)
H+Al	246,50	230,50	(mmolc dm ⁻³)
B	0,16	0,13	(mg dm ⁻³)
Fe	102	48,50	(mg dm ⁻³)
Mn	1,30	0,80	(mg.dm ⁻³)
Zn	0,15	0,10	(mg.dm ⁻³)

Nota: Métodos: pH em CaCl₂ (acidez ativa) - CaCl₂ 0,01 mol.L⁻¹; M. O.- Dicromato/Colorimétrico; Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio - Resina trocadora de íons; H+Al (acidez potencial) - pH SMP. Boro - água quente/micro-ondas; Cu, Fe, Mn e Zn - extração DTPA - TEA em pH 7,3.

3.2 Delineamento experimental

O experimento RW20 no Brasil foi implantado em abril de 2011, na área comercial da empresa Valor Florestal, segundo os requerimentos da Forest Productivity Cooperative, a fim de manter o desenho original já implantado nos outros dois locais dos Estados Unidos, os quais compõem uma área destinada para o experimento Nelder, uma segunda para o experimento Single Tree Plot e, finalmente, uma área maior de plantio com delineamento experimental em blocos casualizados, com três repetições, utilizando as mesmas variedades trazidas dos Estados Unidos e adicionando um ideótipo geneticamente melhorado pela empresa regional.

Sendo que, o presente estudo teve o objetivo de conhecer as diferenças de fluxo e alocação de carbono entre os genótipos, por meio do método de balanço de carbono, dentro do espaçamento adensado, o qual melhor expressou as características de copa – estreita, média, ampla ou não definida - (Figura 5), desenvolvidas para cada um deles (Tabela 2).

Tabela 2 — Genótipos estudados de *Pinus taeda*, suas respectivas cores de identificação e características da estrutura de copa

Genótipo	Cor	Ideótipo de copa	Reprodução vegetal
C3	Azul	Estreita (E)	Clone
C1	Vermelho	Média (M)	Clone
C2	Amarelo	Ampla (A)	Clone
C4	Verde	Ampla (A)	Clone
OP	Branco	S/copa definida (S)	Polinização aberta

Desse modo, são estabelecidas parcelas dentro da área experimental de blocos casualizados de 132 m² para cada um dos cinco genótipos selecionados dentro do espaçamento adensado (1852 arv⁻¹ há⁻¹) e no tratamento silvicultural intensivo em cada um dos blocos, totalizando 15 parcelas experimentais (cinco em cada um dos três blocos) (Figura 6) e no tratamento silvicultural intensivo descrito a seguir:

T. Intensivo: controle químico da mato-competição, com glifosato, em toda a área de plantio previamente à instalação das mudas, somado a outras duas aplicações durante o primeiro ano, a cada seis meses, aliado à fertilização na instalação de 150 kg por hectare de Super Fosfato Triplo.

Figura 5 — Estrutura das copas dos genótipos de *Pinus taeda* avaliados em ordem de ideótipo de copa, de estreita (C3) até s/ copa definida (OP). As fotos foram tiradas com a idade de 7,2 anos



Fonte: Forest Productivity Cooperative

A distribuição estabelecida das árvores no desenho inicial totaliza 81 árvores para cada espaçamento (9 X 9), sendo que no mais adensado o arranjo foi de 2,4 m na linha X 2,2 m na entrelinha, portanto as 25 árvores (5 X 5) que se encontram no meio do arranjo original contêm os 132 m² onde foram coletados os dados, deixando duas árvores de bordadura em todas as direções da parcela de medição.

Figura 6 — Delineamento experimental de blocos casualizados do protocolo RW20 no Brasil e marcação dos arranjos a serem avaliados (quadrados pretos)



Nota: a= espaçamento adensado, m= espaçamento médio, e= espaçamento espaçado; SN= trato silvicultural operacional, SI= trato silvicultural intensivo.; R = número de bloco.
Fonte: Forest Productivity Cooperative.

3.3 Coleta de dados

3.3.1 Dados climáticos

Os dados climáticos, ao longo do período do estudo – de Julho de 2018 a Setembro de 2019 –, foram obtidos em intervalos de uma hora, através da estação automática da INMET em Rio Negrinho - SC, localizada a 10,5 km de distância, em linha reta, do local do experimento (latitude de 26°24'84.11" S e longitude de 49°58'06.24" W, com altitude de 857 metros). Assim, foram baixados os dados de temperatura média, mínima e máxima diária (°C) e precipitação pluviométrica diária (mm) disponíveis diretamente do site da INMET (Figura 4).

3.3.2 Inventário anual

O inventário vem sendo realizado anualmente para todos os genótipos, espaçamentos e tratamentos de todas as áreas experimentais do RW20, a partir do quinto ano de idade, e contempla a coleta do diâmetro à altura do peito, altura total (HT), altura do início da copa viva (HC), bem como a mortalidade e doenças que eventualmente aconteceram (Tabela 3).

Para o presente estudo, foram utilizados os dados coletados no inventário realizado nos meses de outubro de 2018 e julho de 2019. A fim de conhecer o estoque inicial e final de carbono para cada uma das parcelas avaliadas, esses dados também foram utilizados nos cálculos de fluxos do carbono para cada componente da planta.

Tabela 3 — Dados médios, máximos e mínimos de DAP, HT e HC para cada um dos genótipos avaliados no presente estudo obtidos no inventário de julho de 2019.

Genótipo	DAP médio	DAP máx	DAP min	HT média	HT máx	HT min	HT média	HC máx	HC min
C3 – E	18,9	25,3	6,2	14,8	18,0	8,4	10,2	12,9	4,6
C1 – M	20,2	27,2	9,4	14,4	17,1	6,2	9,8	13,2	0,5
C2 – A	19,4	26,6	6,9	15,5	17,3	9,2	11,1	13,4	6,3
C4 – A	18,7	28,5	8,0	14,4	17,3	5,2	10,5	12,8	3,6
OP	19,3	31,2	5,6	14,6	18,9	6,4	10,1	13,9	0,5

Nota: Medidas de DAP em cm e medidas de HT e HC expressadas em m.

3.3.3 Equações alométricas

Todo procedimento para a obtenção das equações alométricas do RW20 foi realizado antes do presente estudo, pois essas informações são relevantes para acompanhar outras pesquisas que têm sido desenvolvidas nessa área experimental por parte da FPC.

Dessa forma, a partir do inventário de julho de 2016, por meio da abordagem de modelo misto (PROC MIXED (SAS-Institute, 2002)) Albaugh et al. 2018, testaram os efeitos dos blocos casualizados e as variedades genéticas por bloco na mesma área experimental, para diâmetro, incremento de diâmetro, altura, incremento de

altura, área basal, incremento de área basal, volume, incremento de volume e densidade de plantio; Utilizando o ajuste de Tukey-Kramer para determinar a separação das médias, onde os três blocos foram utilizados como repetições (SCHABENBERGER, 2013).

A escolha dos melhores modelos alométricos de biomassa e volume foi baseada na metodologia desenvolvida por Zhao et al. (2015) e os principais indicadores estatísticos são apresentados na Tabela 4:

Tabela 4 – Modelo de procedimento gerado para o cálculo de biomassa para o RW20 a partir da amostragem destrutiva de 2017

Modelo Procedimento						
Resumo não linear ITSUR de erros residuais						
Variável	DF Erro	SQ	MQ	Root MQ	r^2	r^2 Adj
Tronco + casca	66	591,2	8,9571	2,9928	0,9832	0,9824
Resíd. t + c	66	13,5666	0,2056	0,4534		
Raízes grossas	68	367,5	5,4047	2,3248	0,9225	0,9213
Resíd. raízes	68	8,9942	0,1323	0,3637		
Folhas	67	56,1287	0,8377	0,9153	0,9322	0,9302
Resíd. folhas	67	0,0339	0,000506	0,0225		
Galhos	67	741,5	11,0675	3,3268	0,9267	0,9245
Resíd. galhos	67	13,4945	0,2014	0,4488		
Total	58	2371	40,8786	6,3936	0,9828	0,9796
Resíd. Total	58	11,8411	0,2042	0,4518		

Nota: os valores do coeficiente de determinação (r^2), coeficiente de correlação, desvio padrão (σ) e nível de significância (P).

3.4 Determinação da Área Foliar Específica

Albaugh et al. (2020) selecionaram 72 árvores dos genótipos C3 e OP para os cálculos de folhagem de dentro dos blocos casualizados do RW20 no Brasil, já que estes representaram os extremos de largura da copa entre todas as variedades de ideótipos de copa com base nas medições anuais de todas as árvores, no

tratamento operacional e intensivo, nas densidades 618 arv ha⁻¹ e 1853 arv ha⁻¹ ao longo dos três blocos, no período de dormência de 2017 (Julho).

As árvores foram cortadas na base e o diâmetro dos galhos e a DFT (distância do topo da árvore) foram medidos em todos os galhos vivos. Em cada árvore, seis galhos não danificados foram selecionados, a folhagem viva foi separada da madeira desses galhos e as duas amostras foram secas até atingir peso constante a 65 °C; uma subamostra de folhagem foi retirada antes da secagem para determinação específica da área foliar.

As acículas foram separadas dos fascículos de cada subamostra e digitalizadas no escâner Epson Expression 11000XL. Cada digitalização incluía um padrão para garantir que os cálculos de área fossem corretos e consistentes. Após a digitalização, as acículas foram secas até atingir peso constante a 65 °C.

As imagens digitais obtidas foram posteriormente processadas no software ImageJ, no R pacote de área foliar “LeafArea” (<https://cran.r-project.org/package=LeafArea>) para calcular a área projetada.

Finalmente, calcularam-se a razão entre a massa da folhagem e a ramificação de cada ramo e, em seguida, somamos a massa da folhagem de cada árvore e calculamos a densidade do dossel (massa da folhagem por comprimento da copa viva) de cada árvore.

Dessa forma, desenvolveu-se a relação para estimar a área foliar específica (Equação 1) entre a área foliar dos dados coletados dos seis galhos não danificados de cada árvore e a biomassa foliar. E a estimação da área foliar como produto da biomassa foliar e área foliar específica (Equação 2).

$$AFE = \frac{AF}{BS} \quad (1)$$

$$AF = AFE * BSt \quad (2)$$

Nota: AFE= área foliar específica (m² kg⁻¹); AF= área do fascículo com base na matéria verde (m²); BS = Biomassa do fascículo com base na matéria seca (kg); AF= Área foliar total da árvore (m² árvore⁻¹); BSt = Biomassa total de fascículos da árvore com base na matéria seca (kg árvore⁻¹).

Os resultados de AFE e AF do genótipo OP foram utilizados como referente para o cálculo de biomassa de folhas no começo e no final do ano de avaliação para os clones C1, C2 e C4.

3.5 Determinação do Índice de Área Foliar

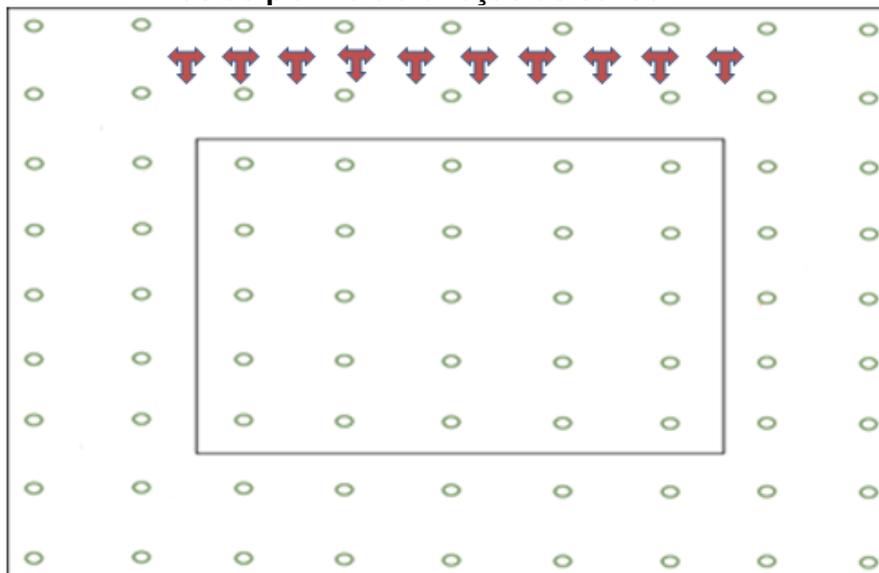
A medição por método indireto do Índice de Área Foliar (IAF) foi realizada em duas datas (agosto de 2018 e julho de 2019) nas 15 parcelas, utilizando o aparelho LAI – 2200 Plant Canopy Analyzer (Li-COR, Inc., Lincoln, EUA). Este instrumento portátil mede a radiação difusa (<490 nm) por meio de um sensor óptico que possui uma lente “olho de peixe” com cinco anéis concêntricos, cada um responsável por uma faixa de ângulos zenitais (7°, 23°, 38°, 53° e 68°).

Para a correta utilização do aparelho, foram utilizados dois sensores: o primeiro era levado para dentro de cada parcela (abaixo do dossel, Figura 7) para medir a radiação transmitida pela copa; enquanto o segundo foi posicionado simulando a mesma direção na qual seriam obtidos os dados sob o dossel, porém em uma área aberta, sem nenhuma vegetação, de modo a capturar a radiação direta ou incidente acima do dossel, em intervalos de 15 segundos.

As coletas podiam ser realizadas a qualquer hora durante o dia, sempre que houvesse boa incidência de luz solar – tempo nublado interferiria na coleta de dados. No início e no final de cada medição, os instrumentos eram intercalibrados na área aberta para posterior correção de diferenças entre aparelhos.

Dentro de cada parcela, foram coletados dez pontos em um transecto perpendicular às linhas de plantio, pois nos blocos casualizados do RW20 as entrelinhas têm espaço fixo entre as árvores (2,4 m), variando-se os espaços dentro das linhas de plantio para cada arranjo espacial. A primeira linha paralela à primeira entrelinha era o ponto de início da coleta, porém, em caso de falha ao longo do transecto, pulava-se para a seguinte entrelinha até evitar as falhas (Figura 8), sempre com o sensor obedecendo a mesma orientação do sensor externo. Os dados foram processados no software FV2000.

Figura 7 — Pontos de medição sob o dossel marcando o transepto perpendicular às linhas do plantio e à direção do sensor



3.6 Determinação do Balanço de Carbono

O total de carbono que a vegetação consegue capturar do ecossistema é conhecido como Produtividade Primária Bruta (GPP) ou também definido como o carbono fixado após o processo de fotossíntese subtraídas as perdas por fotorrespiração (RYAN, 1991).

Após o fechamento das copas em ecossistemas florestais, a GPP pode ser calculada mediante a somatória da ANPP (produção de folhagem e madeira acima do solo), R_a (respiração autotrófica ou de manutenção da parte aérea) e, por último, o TBCF (alocação total de carbono abaixo do solo) por período de tempo de um ano (RYAN, 1991; GIARDINA, 2003; STAPE; BINKLEY; RYAN, 2008; RYAN et al., 2010), descrita na Equação 3:

$$GPP = ANPP + R_a + TBCF \quad (3)$$

Os fluxos calculados para ANPP e TBCF foram estimados com base no total de material coletado, o qual posteriormente foi seco e pesado para ser convertido e finalmente expresso em g de carbono $m^{-2} \text{ ano}^{-1}$. Em cada cálculo, foram considerados os respectivos teores de carbono para cada um dos elementos.

A concentração de carbono dos componentes vegetais e do solo foi amostrada no começo e no final do ano de avaliação. No solo, foram coletadas três diferentes profundidades (10-20 cm; 20-40 cm; 40-60 cm) (item 3.6.3) e para a deposição de folhagem foram utilizadas duas amostras por parcela – uma no meio de quatro árvores e outra no pé de alguma árvore aleatória.

As amostras preparadas foram transportadas para o Laboratório de Solos da Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA) – UNESP. Os resultados de CHN (carbono, hidrogênio e nitrogênio) foram determinados no analisador elementar, da marca Perkin Elmer, modelo EA 2400 - Series II, utilizando 3 mg de cada amostra seca e moída, através de metodologia por combustão – sistema que conta com um forno de alta temperatura para completa combustão das amostras, retenção seletiva dos gases (separação por cromatografia frontal) e detecção dos gases por TCD (detector de condutividade térmica).

3.6.1 Produtividade Primária Líquida da Parte Aérea (ANPP)

O aumento da biomassa acima do solo (folhas, casca, tronco e galhos) de uma floresta ou de uma simples árvore representa sua ANPP, ou seja, a sua produção de material lenhoso e folhagem num período de tempo determinado.

Para Giardina (2003), a produção total de material seco acima do solo (expressa em $g\ C\ m^{-2}\ ano^{-1}$ no presente estudo) é o equivalente à queda anual de folhas, casca, pinhas e galhos junto à mortalidade anual de madeira e somado à mudança anual de biomassa de folhas, galhos, cascas e madeira, podendo ser calculada a partir da Equação 4:

$$ANPP = F_A + F_W + \Delta C_C + \Delta C_W \quad (4)$$

Nota: F_A = fluxo de C associado à queda de folhagem, casca, pinhas e galhos; F_W = fluxo de C associado à mortalidade de madeira; ΔC_C = variação no estoque de carbono das folhas vivas da copa; ΔC_W = variação no estoque de carbono de madeira (tronco, casca e galhos).

A deposição de folhagem, ou o fluxo de C associado à queda de folhagem, casca, pinhas e galhos (F_A), foi coletada utilizando telas de sombreamento, posicionadas acima do solo ocupando a área de quatro árvores (Figura 9), com três repetições por parcela, buscando representatividade espacial. A tela foi colocada a

30 cm acima do solo para evitar algum grau de decomposição, já que, pelo curto período entre as coletas este efeito foi desconsiderado (Figura 8).

A serapilheira depositada em cada uma das telas era coletada a cada 30 dias, dentro de sacos de papel, e posteriormente transportada até o LABB (Laboratório Agroflorestal de Biomassa e Bioenergia) da FCA – UNESP, em Botucatu. Logo após a secagem por cinco dias em estufa de ventilação forçada a 65°C, todos os componentes arbóreos foram separados em pinhas, acículas, casca e galhos, para serem pesados numa balança de precisão.

O incremento de carbono estocado de folhas (ΔC) foi calculado de acordo com a relação existente entre a Área Foliar Específica e o Índice de Área Foliar mensurados para cada ano (item 3.5) e o incremento de carbono estocado para madeira (ΔC_w = galhos, casca e tronco) foi obtido por meio da diferença de biomassa, determinada pelas equações alométricas desenvolvidas em estudos anteriores realizados no RW20 junto aos dados dos inventários de outubro de 2018 e julho de 2019 (detalhamento e metodologia nos itens 3.3.2 e 3.3.3).

Figura 8 — Armação da tela de sombreamento utilizada como coletor



Nota: Coleta da deposição de folhedeo, em julho de 2019. Coletores: 3 repetições por parcela x 5 genótipos x 1 tratamento x 1 espaçamento x 3 blocos = 45 telas. Fonte: Autor.

3.6.2 Respiração da Parte Aérea (Ra)

Epron et al. (2011) explicam a respiração autotrófica, ou de manutenção, como uma fração constante da Produção Primária Líquida da parte aérea da planta (ANPP), gerando a Equação 5, a qual utiliza também o conceito de Eficiência de Uso do Carbono, conhecido como CUE:

$$Ra = ANPP * \left(\frac{1 - CUE}{CUE} \right) \quad (5)$$

A Eficiência de Uso do Carbono não apresentou variação entre tratamentos silviculturais de florestas plantadas de *Pinus taeda* aos oito anos de idade na Carolina do Norte – USA estudados por Maier et al., 2004; com base nessa informação, o valor assumido de CUE para todos os genótipos foi de 0,47 – média global sugerida por Waring et al. (1998), após demonstrarem que a NPP é uma fração constante da GPP, sendo que mudanças na disponibilidade de recursos dentro de uma floresta, conseqüentemente, traduzem-se em alterações nas taxas de respiração e crescimentos da mesma.

Outros estudos que mediram de maneira direta (RYAN et al., 1996; SCHÄFER et al., 2003; BOWN et al., 2009) ou indireta (MAIER et al., 2004) a respiração autotrófica de *Pinus taeda* e *Pinus radiata* encontraram valores entre 0,42 e 0,52, assim como em outras espécies florestais (GIARDINA et al., 2003; DELUCIA et al., 2007; LITTON; RAICH; RYAN, 2007).

3.6.3 Total do fluxo de carbono no solo (TBCF)

A somatória do total anual de carbono enviado para abaixo do solo e disponibilizado para produção e manutenção de raízes e micorrizas e o carbono liberado como exsudado das raízes ou como renovação de biomassa através da serapilheira, é definido como TBCF (GIARDINA et al., 2004), deste modo, baseado

em que todo fluxo de carbono para abaixo do solo acabará sendo respirado, ou transportado fora do local ou armazenado, o TBCF pode ser estimado a partir da equação 6:

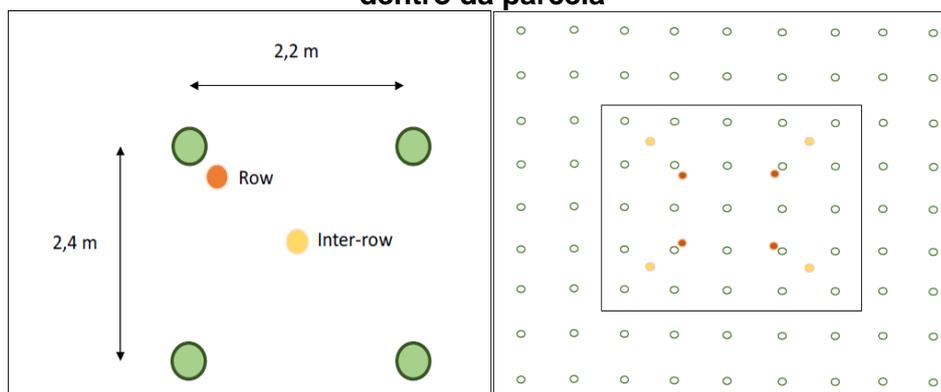
$$TBCF = F_S + F_E - F_A + \Delta C_S + \Delta C_R + \Delta C_L \quad (6)$$

Nota: F_S = fluxo de CO_2 na superfície do solo ou respiração do solo; F_E = o fluxo de carbono transportado para fora do local por lixiviação do carbono orgânico e inorgânico dissolvido ou por erosão (considerado zero para o ano de estudo); F_A = fluxo de C associado à queda de folhagem; ΔC_S = variação no estoque de carbono no solo mineral; ΔC_R = variação no estoque de carbono de raízes (grossas e finas); ΔC_L = variação no estoque de carbono na camada de serapilheira na superfície do solo.

Medições do fluxo de CO_2 (F_S) no solo foram realizadas a cada mês, durante um ano, em duas posições, com quatro repetições por parcela (Figura 9), no intuito de representar espacialmente a respiração do solo dentro do povoamento, já que alguns estudos demonstraram que quanto mais próximo da árvore estiver o ponto da coleta, maior os valores de F_S ; correndo o risco de superestimação dos valores, caso fossem colocados os oito pontos somente nos pés das árvores (SAMUELSON et al., 2004; WISEMAN e SEILER, 2004).

Em cada ponto foi enterrado um cano de PVC, deixando 5 cm para fora do solo, de modo a permitir o encaixe da câmera SRC-1 (PPSystem EGM-4, Haverhill MA, USA), a qual teve de ser adaptada a um diâmetro de 20 cm e acoplada a um analisador portátil de gás por infravermelho EGM-4 (Figura 10). A serapilheira que estava no solo foi colocada de volta dentro do anel já instalado e a porção que caía dentro dele permaneceu durante todo o período de estudo.

Figura 9 — Localização da medição da respiração do solo com respeito das árvores dentro da parcela



○ Árvores dentro da parcela ● Amostragem perto da árvore ● Amostragem no meio de 4 árvores

Nota: 2 posições x 4 repetições x 5 genótipos x 1 tratamento x 1 espaçamento x 3 blocos = 120 anéis.

Figura 10 — Aparelho PPSYSTEM EGM-4 com a câmera adaptada sobre o anel de PVC



Variações no teor de carbono no solo, perdas por lixiviação, erosão ou estoque em camadas profundas foram consideradas negligenciáveis e não foram quantificadas durante o período de estudo (GIARDINA e RYAN, 2002; SMITH, 2004).

Segundo Raich e Nadelhoffer (1989), em florestas com a copa já fechada, a mudança no estoque de carbono do solo em curtos intervalos de tempo, é muito pequena em comparação aos outros fluxos de entrada e saída de carbono.

Do mesmo modo, Cook, Binkley e Stape (2016) mostraram uma ligeira diminuição no estoque de carbono do solo através de uma gradiente de idade de 18

a 26 anos, em florestas de *Eucalyptus* no Brasil, sendo que na região subtropical não houve alteração de estoque.

A biomassa total abaixo do solo de raízes grossas foi estimada com base nos inventários realizados em outubro de 2018 e julho de 2019. Por meio dos modelos alométricos desenvolvidos para o RW20 (detalhamento da metodologia no item 3.3.3.), a variação no estoque de carbono entre essas duas datas será ΔC_R .

Já a porcentagem da biomassa de raízes finas é, em média, inferior a 10% e não apresenta mudanças de estoque em intervalos pequenos de tempo (RYAN et al., 1996; KING et al., 1999; SAMUELSON; JOHNSEN; STOKES, 2004). Esses fatores permitiram assumir, no presente estudo, que as raízes finas não tiveram mudança anual em seu estoque de carbono.

A coleta de serapilheira sobre o solo (horizonte 0 do solo) foi realizada no começo das medições (julho de 2018) e no final (agosto de 2019), em duas posições – uma do lado da árvore e a outra no meio de quatro árvores –, com duas repetições, totalizando quatro pontos por parcela. Foi utilizada uma armação de metal de 0,25 m² colocada acima do chão, as laterais foram cortadas com uma faca ou espátula para coletar somente a serapilheira de dentro da armação (Figura 11). A variação no estoque de carbono da serapilheira acima do solo entre as duas datas representou o ΔC_L .

Uma vez as amostras secas e pesados separadamente a casca, folhas e galhos (mesma metodologia da F_A , item 3.6.1.), a fim de aplicar a metodologia de teor de cinzas em cada amostra, os componentes foram misturados novamente para serem moídos, peneirados (2 mm), incinerados por 5 horas a 600°C e, finalmente, a quantidade de solo remanescente foi pesada em balança de precisão eletrônica (0,0000 g).

Uma segunda subamostra foi enviada para o Laboratório de Solos a fim de conhecer as porcentagens de carbono (detalhamento da metodologia do CHN, item 3.3.3.).

Figura 11 — Localização da coleta de serapilheira acima do solo dentro da parcela (esquerda); armação de metal utilizada nas coletas (direita)



Nota: 2 posições x 2 repetições x 5 genótipos x 1 tratamento x 1 espaçamento x 3 blocos x 2 anos = 120 amostras.

3.7 Produtividade Líquida do Ecossistema (NEP)

A Produtividade Líquida do Ecossistema (NEP) pode ser definida como o fluxo total de carbono para dentro (estoque) ou para fora (respiração) da floresta, onde valores negativos do NEP indicariam uma perda líquida de carbono do sistema. É aqui que a respiração do ecossistema (R_E = soma da respiração autotrófica e heterotrófica) desempenha um papel importante ao determinar o funcionamento de uma floresta, como fonte ou sumidouro de carbono atmosférico (MAIER et al., 2004).

O cálculo da Produtividade Líquida do Ecossistema é descrito pela equação 7 e 8 e é expressa em $\text{g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$:

$$NEP = GPP - R_E \quad (7)$$

$$R_E = (R_A + F_S) \quad (8)$$

Nota: GPP = Produtividade Primária Bruta; R_E = respiração do ecossistema; R_A = respiração autotrófica da parte aérea; F_S = fluxo de CO_2 na superfície do solo ou respiração do solo.

3.8 Análise Estatística

Para a análise estatística, comparou-se as médias de cada genótipo em cada uma das variáveis respostas: Índice de Área Foliar e Área Foliar Específica,

estoques de carbono inicial e final (troncos, folhas, galhos, raízes), partição de GPP para cada componente (ANPP, WNPP, FNPP, TBCF e Ra) e NEP, já que o desenho experimental deste estudo adota como tratamento de comparação os cinco diferentes genótipos da espécie *Pinus taeda*, pois o espaçamento e o trato silvicultural foram o mesmo para todos eles, com três blocos ou repetições.

Toda a análise procedeu-se no software estatístico R, utilizando o pacote “ExpDes - pt”, e em todos os testes estatísticos utilizou-se o nível de significância de 5%. As comparações das médias foram realizadas pelo Teste de Tukey.

A análise de regressão linear foi adotada para avaliar a resposta de WNPP (produtividade primária líquida de madeira) com os valores da produção total de GPP. Para a avaliação dessas relações, considerou-se os valores de coeficiente de determinação (R^2) e valor de significância (p).

Com o intuito de apresentar a variabilidade dos dados coletados e dos valores desenvolvidos para cada um dos fluxos, foi calculado o desvio padrão (σ ou S) e posteriormente o erro padrão (SE) ($n=3$) para todas as variáveis.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Biomassa da Floresta

O estoque total de carbono para toda a floresta em pé aos 7,4 anos de idade resultou da somatória dos compartimentos da árvore e da serapilheira acumulada acima do solo (detalhamento da amostragem de ΔC_L , item 3.6.3), onde o maior estoque total de carbono apresentou-se no genótipo C1 com 75,1 Mg C ha⁻¹ superando em 13% os clones C3 e C4, seguido pelo genótipo OP com estoque de 70,8 Mg C ha⁻¹ (Tabela 5).

Os componentes avaliados para o estoque de carbono apresentaram diferença estatística entre os genótipos, exceto na biomassa armazenada nos galhos (Tabela 5); No entanto, ao longo do sétimo ano os fluxos de carbono não apresentaram diferenças na partição da GPP incluindo a parte aérea (ANPP) (Tabela 10), mostrando que, essas diferenças no estoque de carbono entre os materiais genéticos são resultante dos primeiros anos de desenvolvimento, e que aos sete anos de idade a competição entre as árvores no espaçamento avaliado é elevada o suficiente, onde mesmo com as distintas estruturas de copa, os genótipos não conseguem ter distribuições diferentes da GPP.

Em florestas de oito anos de idade nos EUA, foram apresentados valores de estoque de carbono entre 13,6 Mg ha⁻¹ e 13,8 Mg ha⁻¹ e de 3,5 Mg ha⁻¹ a 4,7 Mg ha⁻¹ para o componente aéreo (tronco, galhos, casca e folhas) e para o componente abaixo do solo (tocos, raízes grossas e finas), respectivamente (ALBAUGH et al., 2004), contrastando com as variações encontradas no presente estudo: de 17,4 Mg ha⁻¹ a 19,4 Mg ha⁻¹ para o componente aéreo e de 11,2 Mg ha⁻¹ e 13,4 Mg ha⁻¹ para o estoque de raízes nos genótipos C1 e C3, respectivamente.

Tabela 5 — Estoque de carbono (Mg C ha⁻¹) para os diferentes compartimentos da árvore para cada um dos cinco genótipos avaliados aos 7,4 anos de idade

Componente	Genótipo				
	C3 (E)	C1 (M)	C2 (A)	C4 (A)	OP (S)
Acículas	3,9 (0,0) c	5,5 (0,1) a	4,5 (0,1) bc	4,5 (0,1) bc	4,7 (0,1) b
Galhos	6,9 (0,2) a	8,0 (0,8) a	7,4 (0,5) a	7,2 (0,5) a	8,5 (0,1) a
Tronco + Casca	39,4 (0,6) b	43,8 (1,0) a	39,8 (0,6) b	38,3 (0,2) b	40,6 (1,2) ab
Raízes Grossas	11,3 (0,1) b	13,4 (0,2) a	11,5 (0,2) b	11,3 (0,1) b	11,9 (0,3) b
Serapilheira	4,1 (0,1) b	4,3 (0,1) b	4,4 (0,0) a	4,2 (0,1) b	5,1 (0,1) a
Total	65,5 (0,9) b	75,1 (1,2) a	67,7 (1,4) b	65,5 (0,9) b	70,8 (1,6) ab

Nota: Valores entre parênteses representam o erro padrão dos dados ($n = 3$) também em Mg C ha⁻¹. Valores seguidos de letras iguais não diferem estatisticamente entre genótipos pelo Teste de Tukey ($p = 0,05$).

Ao longo dos anos, incrementos consideráveis na proporção de carbono alocado no tronco (de 8 a 16 anos de idade), em relação ao estoque total da floresta, foram descritos por Albaugh et al. (2004) para *Pinus taeda*, cujas porcentagens para os tratamentos controle e irrigado tiveram, em média, um aumento de 11 pontos percentuais; já para os tratamentos de fertilização e fertilização + irrigação a média foi de 25 pontos.

Munhoz (2011), ao examinar plantios da mesma espécie em uma mesma região, encontrou valores que variaram entre 75,2 Mg ha⁻¹ e 109,8 Mg ha⁻¹ para o tronco + casca aos dez anos de idade. Para a idade de 8,2, no presente estudo, os dados variaram de 47,6 Mg ha⁻¹ a 53,1 Mg ha⁻¹, com incremento médio de 22%. Se esse incremento se mantiver pelos próximos anos, os rendimentos estarão de acordo com esse padrão.

O genótipo C1 foi o que possuiu a maior estocagem total de carbono com até 10 Mg ha⁻¹ a mais que os clones C3 e C4, ao tempo que também teve o maior fluxo de ANPP ao longo do ano de avaliação (Tabela 7).

Valores no estoque total de carbono da floresta aos 8,4 de idade em *Pinus taeda* de 85 Mg ha⁻¹ e 72 Mg ha⁻¹ para os tratamentos fertilizado + irrigado e controle, respectivamente (DELIBERALI, 2015), se encaixam com os valores

encontrados nos genótipos avaliados com um ano menos de idade a menos, de 65,5 Mg ha⁻¹ a 75,1 Mg ha⁻¹.

Comparações do estoque de carbono com espécies de *Eucalyptus* permitem obter valores similares aos relatados para *Eucalyptus urophylla* aos 52 meses de idade, de 56 Mg ha⁻¹ a 81 Mg ha⁻¹ (RODRIGUES, 2017) ou para *Eucalyptus grandis* aos 7 anos de idade (CAMPOE et al., 2012), que variaram de 85 Mg ha⁻¹ a 114 Mg ha⁻¹.

Contudo, em florestas de *Pinus taeda* aos 12 anos de idade na Carolina do Norte, foram encontrados valores inferiores, inclusive no tratamento fertilizado e irrigado, de 33,3 Mg ha⁻¹, e no tratamento controle, de 15,7 Mg ha⁻¹ (MAIER et al., 2004), demonstrando os altos rendimentos alcançados por espécies de *Pinus* nos solos do sul do Brasil (IBA, 2019).

Estudos mostram que a distribuição da biomassa para os diferentes compartimentos da árvore depende em grande parte da disponibilidade de recursos, podendo ser manipulada (GOWER et al., 1994; ALBAUGH et al., 1998; SAMUELSON; JOHNSEN; STOKES, 2004; SAMUELSON et al., 2008). Outro fator determinante na partição é a idade da floresta, como já foi mencionado.

Na espécie *Pinus taeda*, porcentagens elevadas de distribuição para a produção de raízes grossas e finas são um fator genético prevaiente, devido à falta de matéria orgânica e profundidade de solo produtivo nos locais de procedência desta espécie (Tabela 5). Isto demonstra como o solo no Brasil aporta maiores quantidades de água e nutrientes a esta espécie permitindo-lhe se desenvolver produtivamente sem a necessidade de investir grandes porcentagens do carbono absorvido na produção de raízes, quando comparados com os solos de outras partes do mundo.

Tabela 6 — Comparação na distribuição média da GPP para cada um dos componentes da árvore em porcentagem.

Autor	Tronco	Raízes	Galhos	Acículas	Serapilheira	Idade (anos)
1	58	17	11	7	7	7,2
2	25	27	13	35	*	12
3	48	23	18	11	*	11
4	51	22-25	16	10	*	6
5	46	21	18	8	7	8,2

Nota: Autores 1- presente estudo; 2- Maier et al, 2004 (tratamento fertilizado e irrigado); 3- King et al.,1999 (igual entre tratamentos); 4- Samuelson, Johnsen e Stokes, 2004 (igual entre tratamentos); 5- Deliberali, 2015 (tratamento fertilizado e irrigado). * = Não foi considerado pelo autor.

Contudo, existe uma grande disparidade nos padrões de distribuição, pois alguns estudos com *Pinus taeda* mostraram que a fertilização e a irrigação conseguiram diminuir a porcentagem de biomassa destinada à produção de raízes, realocando o carbono na biomassa aérea (ALBAUGH et al., 1998; LITTON et al., 2007); em contrapartida, Coyle, Coleman e Aubrey (2008) encontraram que essa proporção não mudou.

4.2 Área Foliar Específica e Índice de Área Foliar

A área foliar específica (AFE) foi calculada para os genótipos mais contrastantes C3 (copa estreita) e OP (sem ideótipo de copa definido), aos cinco anos de idade, apresentando valores médios de 4,73 m² kg⁻¹ e 4,46 m² kg⁻¹, respectivamente (Tabela 7).

Valores equivalentes (entre 4,5 e 5,1 m² kg⁻¹) foram apresentados por Carneiro (2013), também aos cinco anos de idade, em plantações de *Pinus taeda*, enquanto Deliberali (2015) registrou, para o tratamento fertilizado e irrigado e o tratamento controle, valores de 6,8 m² kg⁻¹ e 6,5 m² kg⁻¹, respectivamente, aos 7,1 anos de idade na mesma espécie.

Tabela 5 — Valores médios da Área Foliar Específica (AFE), da área foliar média por árvore (AF), do Índice de Área Foliar (IAF)

Genótipo	AFE	AF	IAF	IAF
	m ² kg ⁻¹	m ² arv ⁻¹	08/2018 m ² m ⁻²	07/2019 m ² m ⁻²
C3 (E)	4,73 a	12,4 a	6,0 (0,1) b	5,7 (0,3) b
C1 (M)	4,46 a	12,8 a	6,2 (0,1) b	7,0 (0,4) ab
C2 (A)	4,46 a	12,8 a	6,1 (0,2) b	6,2 (0,0) b
C4 (A)	4,46 a	12,8 a	8,2 (0,1) a	7,9 (0,3) a
OP (S)	4,46 a	12,8 a	6,7 (0,1) b	6,7 (0,1) ab

Nota: Valores de OP para AFE e AF foram utilizados como padrão para os clones C1, C2 e C4. Valores entre parênteses representam o erro padrão dos dados ($n = 3$) para IAF. Valores seguidos de letras iguais não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey ($p = 0,05$).

A AFE pode ser influenciado por distintos manejos em diferentes sítios e idades. Estudos com espécies de *Pinus* relataram valores de AFE oscilando de 3,5 m² kg⁻¹ a 11 m² kg⁻¹ (MARTIN; JOKELA, 2004; SAMUELSON; JOHNSEN; STOKES, 2004).

O IAF foi medido nos dois anos durante o inverno, justamente nos meses com menor taxa de deposição de folheto, o que explicaria os valores elevados quando comparados aos valores apresentados para a mesma espécie de 5,6 m² m⁻² e 6,7 m² m⁻² em tratamentos sem manejo e tratamento fertilizado e irrigado aos sete anos de idade, enquanto que, aos 8,5 anos de idade houve uma queda no índice de área foliar para 4,6 m² m⁻² para tratamentos sem manejo e para 5 m² m⁻² no manejo intensivo (DELIBERALI, 2015).

Esse decréscimo no índice de área foliar também pode ser observado no local do experimento deste estudo, onde Albaugh et al. (2018) apresentaram valor médio para todos os clones na mesma densidade (1854 arv ha⁻¹) de 8 m² m⁻² aos cinco anos de idade, sendo que o único genótipo que não apresentou diminuição nesse valor foi o C4.

Os maiores picos de IAF para uma floresta de *Pinus taeda* nos Estados Unidos foram encontrados aos oito anos de idade na estação de outono, com valores de 1,49 m² m⁻² e 1,7 m² m⁻² para os tratamentos de fertilização e fertilizado e

irrigado (CAMPOE et al., 2014), valores consideravelmente inferiores aos amostrados para o presente estudo.

Valores de IAF máximos, teoricamente projetados, têm sido propostos para o *Pinus taeda* ao redor de $6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ por diferentes autores (JOKELA; DOUGHERTY; MARTIN, 2004; SAMUELSON; JOHNSEN; STOKES, 2004), ao mesmo tempo que Samuelson et al. (2008) relataram valores de IAF de $5,7 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ para esta mesma espécie aos oito anos de idade, em tratamentos sem manejo; irrigado; e irrigado e fertilizado.

Sabe-se que os recursos hídricos disponíveis influenciam fortemente o desenvolvimento e a longevidade das folhas, sendo que sob estresse a primeira resposta da planta será a diminuição no crescimento das folhas (LANSBERG, 1997), resultando na redução da sua área foliar.

Entretanto, a região onde está implantado o experimento é conhecida historicamente como um local que ao longo dos anos não apresenta déficit hídrico, pois apesar de ter menores quantidades de chuva nos meses do inverno (julho/2019 = 31,4 mm e agosto/19 = 32,6 mm), não existe uma ausência prolongada de dias sem chuva (Figura 5).

Yáñez, Fox e Seiler (2015), ao analisarem as respostas de crescimento do RW20 nos seus três locais (Carolina do Norte e Virgínia nos EUA e Paraná no Brasil), encontraram incrementos consideráveis na altura e no diâmetro à altura do peito (DAP) das árvores no tratamento fertilizado, ao mesmo tempo que o tratamento mais adensado (1852 arv ha^{-1}) diminuiu em 11,5% a amplitude da copa e aumentou a altura em 20%; concluindo que complexas interações entre efeitos genéticos e ambientais podem ter um impacto significativo nos ganhos operacionais esperados para cada interação silvicultural.

Algumas avaliações do Índice de Área Foliar feitas para *Pinus taeda* na Carolina do Norte (EUA) indicaram que o tratamento fertilizado e irrigado conseguiu aumentar em até 100% o valor de IAF ao longo de vários anos, passando de $1,7 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ aos oito anos de idade para $2,81 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ aos dez anos, ressaltando a relação linear positiva e significativa entre o IAF e a produtividade em volume e biomassa para esse tratamento, pois os valores máximos de produtividade estiveram

fortemente relacionados aos picos máximos de IAF medidos nos meses de agosto e setembro (ALBAUGH et al, 1998).

Neste mesmo local experimental, Campoe et al. (2013) explicam como as árvores grandes (maior biomassa seca na parte aérea e maiores IAF) crescem mais rapidamente do que as árvores menores, associando esse comportamento à maior captura de luz, uma vez que as árvores grandes foram mais responsivas aos tratamentos, aumentando sua eficiência no uso da luz.

Os resultados de IAF e estoque de biomassa seca mostraram que o clone C1 foi quem possuiu o maior estoque de carbono para tronco + casca, galhos e acículas no ano 2018 e 2019 com 52,3 Mg ha⁻¹ e 58,9 Mg ha⁻¹, respectivamente, porém o C4 foi quem apresentou os maiores valores de IAF, de 8,2 m⁻² m² e 7,9 m⁻² m² para cada um dos anos amostrados, assim, no presente estudo não foi possível estabelecer a relação apresentada por Albaugh et al. (1998) nem Campoe et al. (2013).

4.3 Determinação do Balanço de carbono

4.3.1. Produtividade Primária Líquida da parte aérea (ANPP)

A ANPP total variou de 11 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ para o genótipo OP a 14 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ encontrada no genótipo C1, ao longo do ano de estudo (Tabela 8).

Tabela 6 — Valores de Produtividade Primária Líquida da parte aérea (ANPP), fluxos de carbono para produção de madeira (WNPP) e folhas (FNPP) e respiração da parte aérea (Ra)

Fluxos	GENÓTIPO				
	C3 (E)	C1 (M)	C2 (A)	C4 (A)	OP (S)
FNPP	223 (24) a	332 (43) a	296 (24) a	206 (33) a	309 (10) a
WNPP	1101 (52) a	1082 (156) a	1058 (98) a	1050 (101) a	817 (129) a
ANPP	1324 (56) a	1414 (121) a	1354 (115) a	1256 (130) a	1126 (135) a
Ra	1493 (63) a	1594 (136) a	1527 (130) a	1416 (147) a	1269 (152) a

Nota: Valores para cada um dos fluxos em g C m⁻² ano⁻¹. Valores entre parênteses representam o erro padrão dos dados ($n = 3$). Valores seguidos de letras iguais não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey ($p = 0.05$).

Apesar das médias na proporção destinada para FNPP (Produtividade Primária Líquida de folhas) e WNPP (Produtividade Primária Líquida de madeira: tronco + casca, galhos) da ANPP total serem estatisticamente iguais, existe uma expressiva diferença nos resultados avaliados em termos de produtividade florestal final.

Sendo assim, as distribuições ideais sob uma perspectiva de maiores rendimentos de madeira foram encontradas para os clones C3 e C4, onde a relação de partição para FNPP:ANPP e WNPP:ANPP foi de 16% e 83%, respectivamente; em contraste, o genótipo OP apresentou uma partição para a produção de folhas de 27% e redução para 72% na relação WNPP:ANPP, finalmente para os genótipos C1 e C2 as distribuições variaram somente 7%, em comparação com as distribuições ideais encontradas.

Comparando esse resultado com a partição encontrada por Deliberali (2015), observa-se um padrão diferente, pois a proporção da ANPP destinada à produção de folhas é consideravelmente maior (47%), e quase igual à destinada para WNPP (50%).

Contudo, os valores atingidos de ANPP neste estudo e em alguns outros realizados no Brasil superam consideravelmente a produtividade primária líquida da parte aérea atingida nos EUA, onde mesmo florestas mais velhas não superam os 9,8 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ do genótipo OP; por exemplo, numa floresta de 12 anos de idade, nos tratamentos de fertilização e fertilizado e irrigado, os valores de ANPP estiveram entre 7 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ e 8,4 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, chegando inclusive aos 3,5 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ para o tratamento controle (MAIER et al., 2004).

Já Campoe et al. (2013) encontraram valores para ANPP de 8,83 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ a 13,6 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, aos dois anos de aplicação desses mesmos tratamentos em uma floresta de *Pinus taeda* aos nove anos de idade, nas árvores de porte médio dentro dos povoamentos avaliados para cada tratamento e, numa segunda medição aos 24 anos de idade, obtiveram valores para ANPP de 6,93 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ no tratamento fertilizado e de 10,9 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ para o tratamento fertilizado e irrigado.

Os valores de este último estudo para ANPP se encaixam aos encontrados no presente estudo aos 8 anos de idade (11,2 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ a 14,1 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹), e semelhantes aos apresentados por Deliberali (2015) de 6,2 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ a 10,7 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ aos sete anos de idade, e por Dallateia e Jokela (1991), de 3,1 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ a 16 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ aos seis anos de idade; esclarecendo que essa grande variação foi atribuída a maiores índices de área foliar segundo os autores.

A ANPP em florestas plantadas de *Pinus ponderosa* na Patagônia – Argentina apresentou aumento diretamente proporcional entre a precipitação e o fluxo de ANPP indo de 3,8 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ para 10,4 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, através de gradiente de precipitação de 250 mm aumentando até os 1400 mm em diferentes sítios avaliados.

Ryan et al. (2004) avaliaram povoamentos de *Pinus radiata* na Austrália, aos 20 anos de idade, e encontrou ANPP de 5,9 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, 7,5 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ e 12,9 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ para os tratamentos controle, irrigação e fertilizado e irrigado, respectivamente.

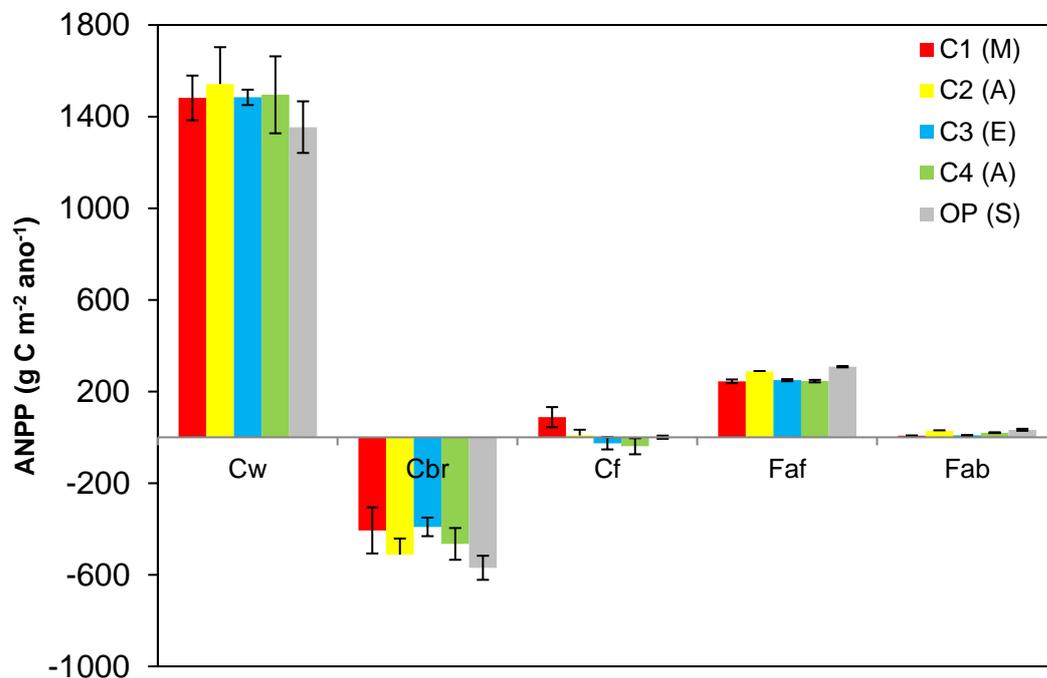
Espécies do gênero *Eucalyptus* apresentaram, para a produtividade primária líquida da parte aérea, valores superiores em diversos estudos, por exemplo, em plantações de *Eucalyptus grandis* dos cinco aos seis anos de idade, os resultados para ANPP variaram de 12 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ a 17,9 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ (CAMPOE et al., 2012), enquanto Nouvellon et al. (2012), examinando florestas de quatro a seis anos de idade, encontraram uma ANPP média registrada de 16,2 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹.

Comparando tratamentos controle e irrigado em plantações de *Eucalyptus grandis x urophylla*, a produtividade primária líquida da parte aérea teve valores de 2,1 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ e 2,4 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente (STAPE; BINKLEY; RYAN, 2008).

Rodrigues (2017), ao investigar diferentes clones de *Eucalyptus urophylla*, encontrou valores máximos no espaçamento 3x2, que variaram de 14,5 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ a 22,8 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ aos 4,3 anos de idade; para povoamentos de *Eucalyptus grandis*, dos quatro aos sete anos de idade, foram avaliados tratamentos de fertilização com potássio e sódio apresentando ANPP média de 1,85 kg C m⁻² ano⁻¹ e 1,42 kg C m⁻² ano⁻¹, respectivamente (EPRON et al., 2012).

A Figura 12 apresenta a produtividade primária líquida da parte aérea (ANPP) por componentes (variação na estocagem de carbono para folhas, galhos e tronco + casca e queda de serapilheira ao longo do ano de medição separada por galhos + casca e folhas). Embora os clones tenham estruturas de copa diferentes, as quantidades de cada um dos seus componentes são similares (médias consideradas homogêneas pelo Teste de Tukey), em contraste com as quantidades amostradas para o genótipo de polinização aberta.

Figura 12 — Componentes da produtividade primária líquida da parte aérea (ANPP) para cada um dos clones avaliados



Nota: C_w = variação na biomassa de tronco + casca, C_{br} = variação na biomassa galhos, C_f = variação na biomassa de folhas, F_{af} = fluxo de biomassa através da queda de flohas, F_{ab} = fluxo de biomassa através da queda de galhos e casca. As barras representam o erro padrão da média ($n = 3$).

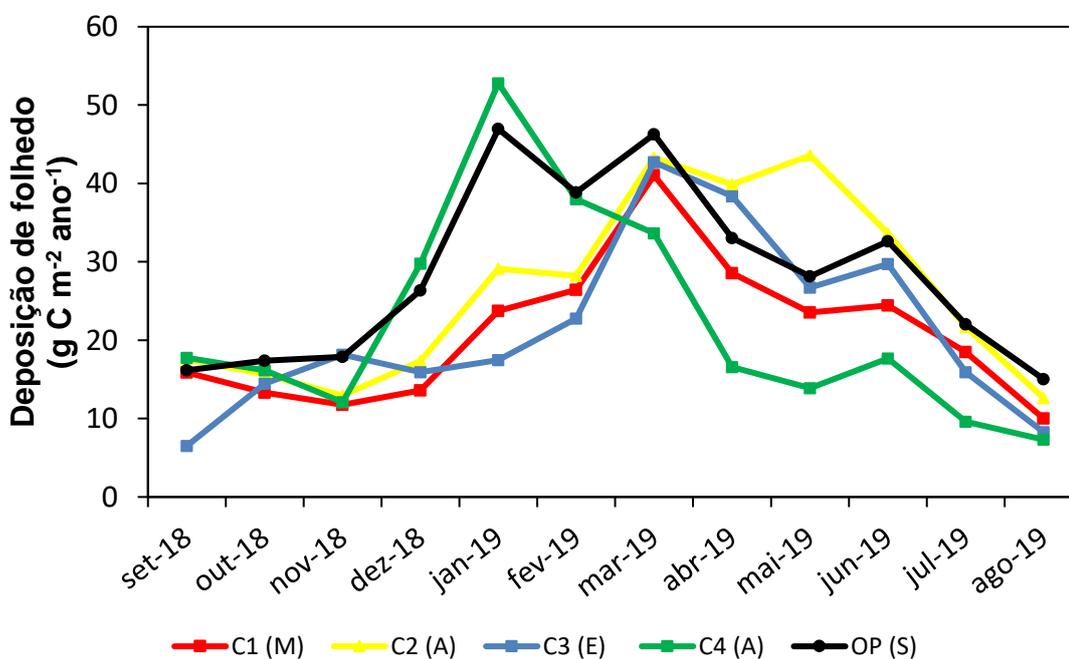
A deposição de folheto ou o fluxo de carbono associado à queda de folhas, casca, pinhas, galhos (Fa), teve o maior acúmulo ao longo do ano de avaliação no genótipo OP ($3,4 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), apresentando diferença significativa na queda de folheto de 36% quando comparado com o menor acúmulo que foi para o C1 ($2,5 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) (Tabela 9). Deliberali (2015) encontrou valores para a deposição de folheto similares aos 7,5 e 8,5 anos de idade, de $2,9 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $2,5 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente.

Em resumo, as médias da deposição de folhede para os genótipos C1, C3 e C4 mostraram não haver diferenças significativas entre si, porém mostraram diferenças nos valores encontrados para os genótipos C2 e OP.

A Figura 13 ilustra a sazonalidade da queda de folhede ao longo do ano de avaliação, observando-se o pico de deposição em janeiro de 2019 para os genótipos C4 e OP, contrastando-se à curva invertida do genótipo C3 para a estação de verão e apresentando resistência às altas temperaturas, porém, quando a precipitação cai no mês de março, a queda de folhas para esse genótipo quase se equipara aos níveis de deposição dos outros clones.

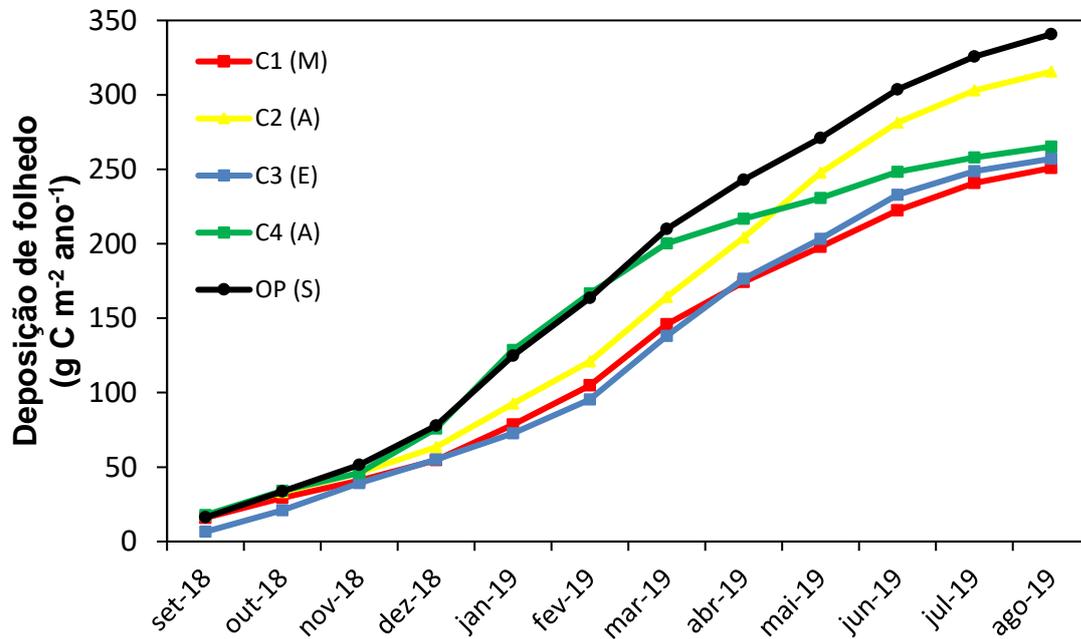
O outono de 2019 foi a estação na qual, em média, para todos os genótipos, foi obtida a maior porcentagem de queda de folhede, representando 36% do ano, enquanto os meses do inverno representam somente 14%. Deliberali (2015) também observou quedas de 35% do total anual na estação de outono para a mesma espécie na mesma idade.

Figura 13 — Sazonalidade média do acúmulo mensal da deposição de folhede coletado para cada um dos genótipos avaliados ao longo do ano do experimento



Obteve-se, ainda, que as maiores diferenças não foram representadas entre os genótipos de copa estreita e os de copa ampla, mas sim pelo genótipo de copa meia e o de polinização aberta (Figura 14), com valores finais em $\text{g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ de OP = 340,71; C2 = 315,59; C4 = 265,3; C3 = 257,06; C1 = 250,84.

Figura 14 — Acúmulo das médias mensais coletadas do fluxo total de carbono associado à queda de folheto ao longo do ano de avaliação para cada um dos genótipos avaliados



4.3.2. Fluxo de carbono para o solo (TBCF)

O fluxo total de carbono para o solo, ao longo do ano de avaliação, teve diferença significativa entre seus valores mais contrastantes, sendo o genótipo C3 o qual teve o valor máximo, de $2732 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$, e o C4 o menor valor, de $1813 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ (Tabela 9).

As estimativas do TBCF deste trabalho são superiores às encontradas por outros autores na mesma espécie em outras partes do mundo. Por exemplo, em florestas na Carolina do Norte (EUA) aos 12 anos de idade, Maier et al. (2004) obtiveram valores para TBCF de $701 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ a $898 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ em tratamentos de fertilização e de irrigação, respectivamente; já na Austrália, para *Pinus radiata* com 20 anos de idade, o TBCF teve variação de $739 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ no manejo fertilizado e irrigado e de $1036 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ no manejo de fertilização (RYAN et al., 1996).

Tabela 7 — Componentes usados no cálculo do fluxo de carbono para o solo (TBCF) nos cinco genótipos avaliados

Variável	GENÓTIPO				
	C3 (E)	C1 (M)	C2 (A)	C4 (A)	OP (S)
F_S	2854 (187) a	2194 (22) a	2402 (173) a	1926 (51) a	2199 (158) a
F_A	257 (7) b	251 (9) b	316 (4) a	265 (5) b	341 (7) a
ΔC_R	91 (20) a	110 (27) a	96 (25) a	159 (28) a	121 (22) a
ΔC_L	44 (8) a	-49 (33) a	-55 (24) a	-6 (40) a	-39 (39) a
TBCF	2732 (171) a	2004 (56) ab	2127 (194) ab	1813 (58) b	1940 (122) ab

Nota: F_S = fluxo de CO₂ na superfície do solo ou respiração do solo; F_A = fluxo de C associado à queda de foleiros; ΔC_R = variação no estoque de carbono de raízes grossas; ΔC_L = variação no estoque de carbono na camada de serapilheira na superfície do solo. Valores para cada um dos fluxos em g C m⁻² ano⁻¹. Valores entre parênteses representam o erro padrão dos dados ($n = 3$). Valores seguidos de letras iguais não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey ($p = 0.05$) (comparação na linha).

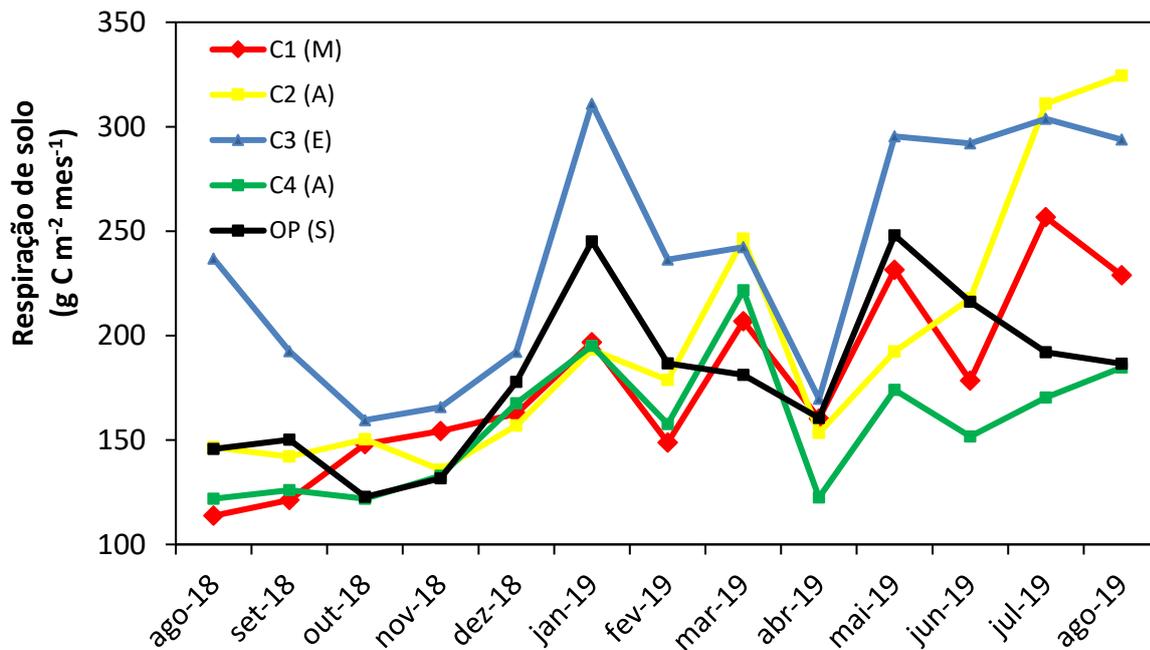
No Brasil, em florestas de *Pinus taeda* de 7,5 anos de idade, o fluxo total de carbono para o solo apresentou 2197 g C m⁻² ano⁻¹ de média entre tratamentos contrastantes, sendo reduzido no ano seguinte à medição para 1323 g C m⁻² ano⁻¹, em função do índice de pluviosidade total, que foi menor no segundo ano (DELIBERALI, 2015).

Para algumas espécies de *Eucalyptus* os valores são similares, de 790 g C m⁻² ano⁻¹ a 950 g C m⁻² ano⁻¹ para *Eucalyptus grandis* entre os sete e oito anos de idade (EPRON et al., 2012); de 1720 g C m⁻² ano⁻¹ a 1940 g C m⁻² ano⁻¹ no tratamento controle e fertilizado para *Eucalyptus saligna* aos quatro anos de idade (GIARDINA et al., 2004); Ryan et al. (2004), ao investigar plantações de *Eucalyptus grandis* x *urophylla* submetidas a diferentes disponibilidades de água e nutrientes, constataram TBCF de 1000 g C m⁻² ano⁻¹ para o tratamento não irrigado; Rodrigues (2017) teve valor máximo de 2056 g C m⁻² ano⁻¹ para o clone AEC 0144 de *Eucalyptus urophylla*, em espaçamento 3x2.

Observou-se, ainda, como o fluxo de CO₂ na superfície do solo ou respiração do solo (F_S), foi a variável de maior representatividade em todos os genótipos, exercendo forte influência no TBCF. Outros estudos que suportam esses resultados para diferentes espécies do gênero *Pinus* aferiram que a respiração das raízes (autotrófica) representa de 45 a 78% do fluxo total de CO₂ do solo (HANSON et al., 2000; MAIER; KRESS, 2000).

A Figura 15 apresenta os valores médios coletados ao longo do ano de avaliação para (F_s), em que novamente os valores contrastantes foram encontrados para os genótipos C3 (2854 g C m⁻² ano⁻¹) e C4 (1926 g C m⁻² ano⁻¹), mas sem diferenças significativas entre as médias (Tabela 9).

Figura 15 — Média mensal da respiração do solo, ao longo do ano de estudo, para cada um dos genótipos avaliados



Algumas pesquisas evidenciam a umidade do solo como a principal variável influenciadora na respiração do solo, especificamente quando a mesma se encontra baixa (CARLYLE; BA THAN, 1988; MAIER; KRESS, 2000; MAIER et al., 2004), enquanto outros estudos encontraram melhor relação com a temperatura do solo (HAYNES; GOWER, 1995; SAMUELSON et al., 2004).

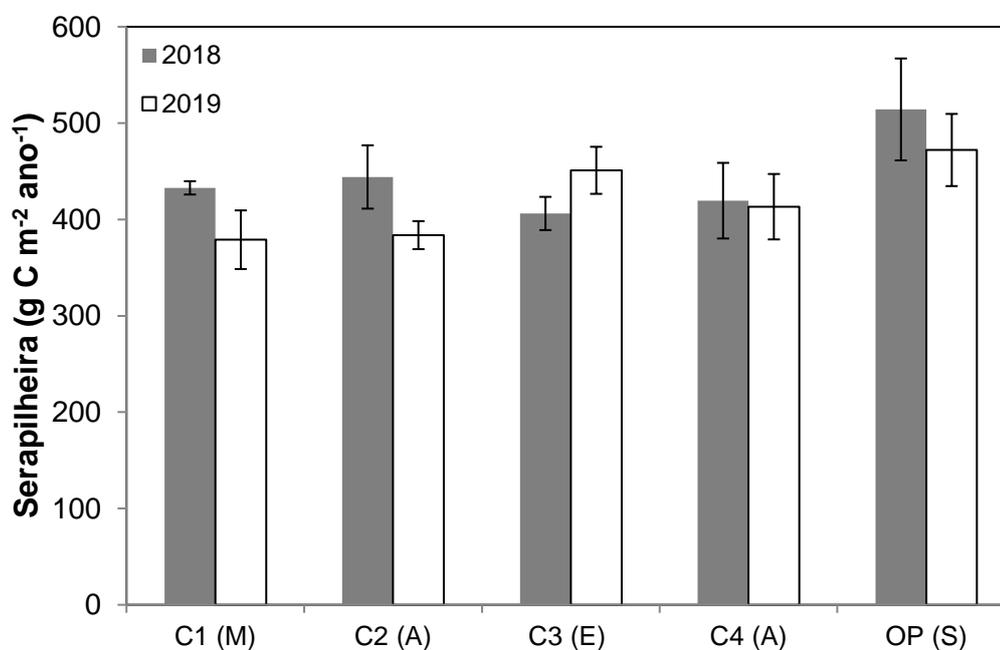
Segundo Wiseman e Seiler (2004), a umidade do solo, quando muito alta ou muito baixa, modifica sua influência sobre a temperatura do solo no fluxo de CO₂, todavia nenhum desses fatores foi levantado no presente estudo. As variáveis ambientais também podem ter influência direta nas taxas de respiração, pois a precipitação altera a temperatura do solo, ao mesmo tempo que eleva sua umidade (SANTOS; CAMARGO, 1999).

Desse modo, as condições de tempo, como a umidade e a temperatura atmosférica, também são consideradas influenciadoras diretas no processo de respiração do solo (EKBLAD et al., 2001; WANG et al., 2010).

As maiores taxas de respiração do solo foram encontradas nos meses mais quentes, os quais, apesar de não serem os mais chuvosos, poderiam apresentar grandes retenções de água, devido ao acúmulo das precipitações de meses anteriores (umidade do solo e temperatura do solo não foram medidos no presente estudo). Maier et al. (2004) mencionam em seu trabalho que, durante o verão, a alta umidade do solo aumentou significativamente a F_S nas parcelas irrigadas.

A variação no estoque de carbono na camada de serapilheira na superfície do solo (ΔC_L) não apresentou diferenças significativas entre os genótipos, embora unicamente o C3 tenha acumulado 11% de serapilheira na superfície do solo durante o ano de avaliação, ao tempo que os outros quatro genótipos exibiram redução de 12,4%, 13,6%, 1,5% e 8,2% para o C1, C2, C4 e OP, respectivamente (Figura 16).

Figura 16 — Média do acúmulo de serapilheira na superfície do solo para cada genótipo



Nota: As barras de amplitude estão demarcando o erro padrão da média ($n=3$) para cada um dos genótipos no mês de agosto de 2018 e 2019.

É interessante ressaltar como esse resultado permite inferir que somente o clone de copa estreita difere no comportamento de serapilheira acumulada no solo após o ano de medição, deixando os outros genótipos se comportar de maneira muito parecida embora a queda de serapilheira tenha apresentado diferença significativa entre algum deles. Estudos futuros da decomposição do serapilheira que é depositada no solo podem contribuir ao entendimento no ritmo de queda de folhas comparado ao tempo de decomposição total da mesma.

Valores de decrescimento no estoque de carbono na camada de serapilheira na superfície do solo de um ano para outro também foram encontrados para *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *Pinus taeda* entre os 6,5 anos de idade, no início das medições, e no final do estudo, aos 8,5 anos, com diminuições de 222 g C m⁻² ano⁻¹ para 35 g C m⁻² ano⁻¹ na espécie tropical e de 93 g C m⁻² ano⁻¹ para 39 g C m⁻² ano⁻¹ na espécie subtropical (DELIBERALI, 2015).

4.4 Produtividade Primária Bruta (GPP) e partição de carbono

Os valores de GPP apresentaram diferença significativa entre o genótipo C3, que obteve maior Produtividade Primária Bruta, de 5549 g C m⁻² ano⁻¹, e o genótipo OP com menor quantidade de GPP, somente 4334 g C m⁻² ano⁻¹, marcando uma considerável diferença de 22%, mostrando diferença significativa também com o GPP do clone C4 (Tabela 10).

O genótipo OP, ainda que tenha apresentado o pior desempenho, obteve valores superiores aos aferidos por outros autores para a mesma espécie, Maier et al. (2004) encontraram como valor máximo 2587 g C m⁻² ano⁻¹, aos 12 anos, nos EUA, com tratamento fertilizado e irrigado; Deliberali (2015) mediu o GPP de 4658 g C m⁻² ano⁻¹ aos sete anos de idade e encontrou para o ano seguinte uma diminuição de 39% (2830 g C m⁻² ano⁻¹).

Ryan et al. (1996) encontraram em tratamentos irrigado e fertilizado e irrigado aos vinte anos de idade, GPP somente de 2415 g C m⁻² ano⁻¹ a 3438 g C m⁻² ano⁻¹ para *Pinus radiata* na Austrália; enquanto estudos com espécies de *Eucalyptus* apresentaram valores de GPP mais similares: 4132 g C m⁻² ano⁻¹ (CAMPOE et al.,

2012), 4162 g C m⁻² ano⁻¹ (NOUVELLON et al., 2012), 3960 g C m⁻² ano⁻¹ (GIARDINA et al., 2003), 4955 g C m⁻² ano⁻¹ (RYAN et al., 2004).

Tabela 8 — Fluxos de carbono (g C m⁻² ano⁻¹) para cada um dos genótipos estudados ao longo do sétimo ano de avaliação.

Fluxos	Genótipos				
	C3 (E)	C1 (M)	C2 (A)	C4 (A)	OP (S)
ANPP	1324 (56) a	1414 (121) a	1354 (115) a	1256 (130) a	1126 (135) a
Folhas	223 (24) a	332 (43) a	296 (24) a	206 (33) a	309 (10) a
Galhos	-391 (41) a	-406 (101) a	-512 (70) a	-465 (69) a	-570 (53) a
Tronco + Casca	1484 (34) a	1481 (98) a	1542 (161) a	1495 (168) a	1354 (113) a
TBCF	2732 (171) a	2004 (56) ab	2127 (194) ab	1813 (58) b	1940 (122) ab
Raízes	91 (20) a	110 (27) a	96 (25) a	159 (28) a	121 (22) a
Respiração do Solo	2854 (187) a	2194 (22) a	2402 (173) a	1926 (51) a	2199 (158) a
Serapilheira	257 (7) b	251 (9) b	316 (4) a	265 (5) b	341 (7) a
Acúmulo Folhas	44 (8) a	-49 (33) a	-55 (24) a	-6 (40) a	-39 (39) a
Ra	1493 (63) a	1594 (136) a	1527 (130) a	1416 (147) a	1269 (152) a
GPP	5549 (260) a	5012 (270) ab	5008 (435) ab	4485 (219) b	4334 (177) b
NEP	1202 (35) a	1224 (140) a	1078 (136) a	1143 (122) a	867 (150) a

Nota: ANPP = produtividade primária líquida da parte aérea; Ra = respiração autotrófica da parte aérea; TBCF = fluxo de carbono para o solo; GPP = produtividade primária bruta; WNPP = produtividade primária líquida do tronco; NEP = Produtividade líquida do ecossistema. Valores entre parênteses representam o erro padrão dos dados ($n = 3$). Valores seguidos de letras iguais não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey ($p = 0.05$) (comparação na linha).

Previamente, verificou-se para os genótipos do presente estudo que o desenvolvimento das variedades das copas pode ser modificado, já que responde às condições ambientais e práticas de manejo (YÁÑEZ, FOX E SEILER, 2015). Conseqüentemente, as respostas apresentadas de GPP foram exclusivamente

responsivas às amplitudes de copa, pois o tratamento silvicultural e o local do experimento foram os mesmos para todos os genótipos; concluindo que, à medida que a estrutura de copa é mais ampla, a produtividade primária diminui.

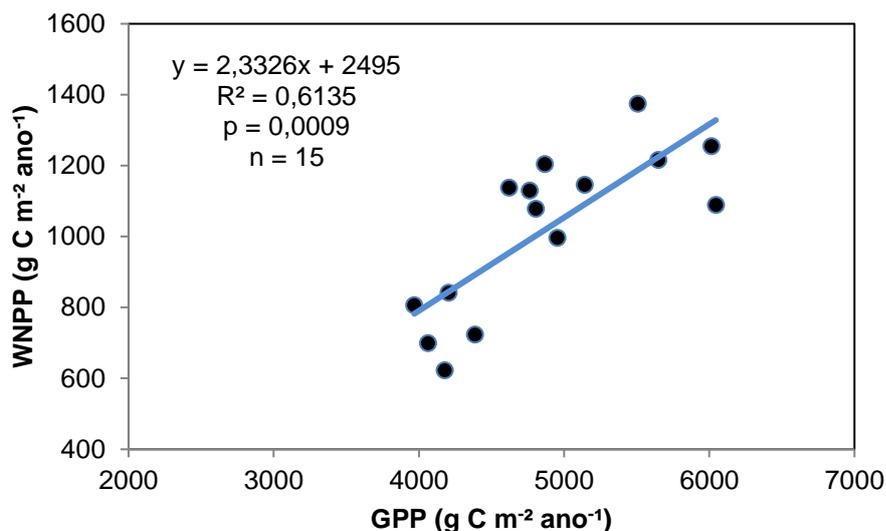
Outros estudos com *Pinus* e *Eucalyptus* têm mostrado forte resposta do GPP ao aumento da disponibilidade de recursos naturais (RYAN et al., 1996, 2010; MAIER et al., 2004; STAPE; BINKLEY; RYAN, 2008; BOWN et al., 2009; CAMPOE et al., 2012). No Sudeste dos EUA, Maier et al. (2004) aferiram um aumento de 103% do GPP através da adição de irrigação e fertilização de *Pinus taeda*, em comparação ao tratamento controle.

Durante o ano de avaliação, o maior fluxo de carbono, independente do genótipo, foi para respiração do solo, seguido pela respiração da parte aérea com quase os mesmos valores para produção de tronco + casca, e finalmente a produção de acículas e raízes. Tal distribuição é amplamente sustentada por outros estudos (STAPE et al., 2008; SCHUMACHER et al., 2011; CAMPOE et al., 2012; RIBEIRO et al., 2015; RODRIGUES, 2017). No sul do Brasil, Balbinot et al. (2008) concluíram que 21% da biomassa é destinada para produção de raízes grossas e 67% ao tronco, ao avaliar as distribuições totais para *Pinus taeda* e *Pinus elliotti*, dos 5 aos 15 anos de idade.

Todos os genótipos apresentaram uma redução na biomassa de carbono para os galhos, em alguns casos de até 42%, isto se deve a que à medida que as árvores do plantio crescem e as copas se sobrepõem acontece uma redução na proporção de copa viva para cada árvore, fazendo diminuir a quantidade total de biomassa estocada na produção de galhos de um ano para o outro.

Embora a diferença da Produtividade Primária Bruta entre o genótipo que obteve o maior valor (C3) e o menor (OP) tenha sido de 22%, a diferença entre seus índices de Produtividade Primária Líquida de Produção de Madeira caiu para 9%, e a diferença com o clone C2 que teve o maior fluxo para WNPP foi de 13%. Isto pode ser explicado por dois motivos: a partição que cada genótipo apresentou para WNPP:GPP (Tabela 8) e relação diretamente proporcional que existe entre WNPP — GPP, sendo que há maior fluxo de carbono para a produção de madeira à medida que o GPP aumenta (Figura 17).

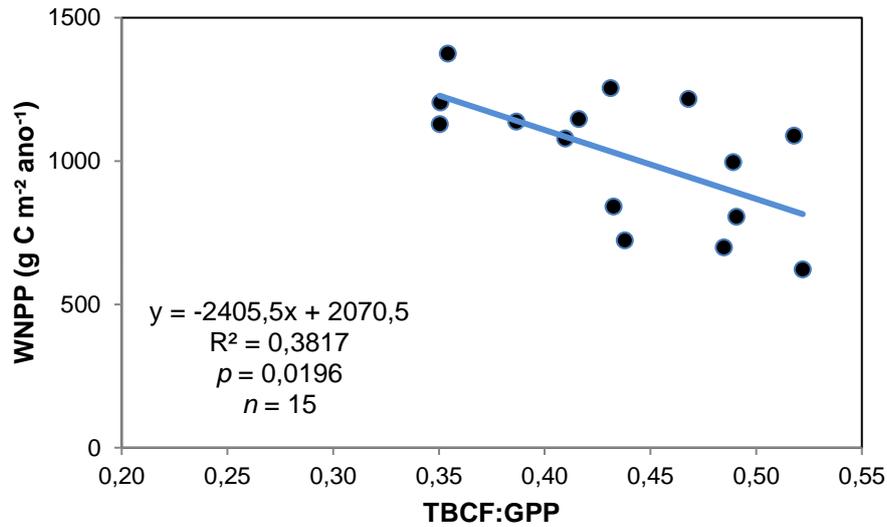
Figura 17 — Relação entre o fluxo de carbono para a produção de madeira (WNPP) e a produtividade primária líquida (GPP) para todas as parcelas avaliadas



Litton, Raich e Ryan (2007) ressaltaram este mesmo comportamento, quando mediram que a diminuição na partição para o TBCF, ocorreu ao mesmo tempo em que a GPP aumentou em ecossistemas florestais, à medida que os suprimentos de recursos abaixo do solo aumentavam.

Como já foi tratado, outro fator importante na produção de madeira na espécie *Pinus taeda* é a grande distribuição que a árvore faz do total de carbono capturado da atmosfera para o componente abaixo do solo. A Figura 18 mostra que quanto menor é a partição para o TBCF dentro de todos os ideótipos avaliados maior é a partição para WNPP.

Figura 18 — Diminuição do fluxo para WNPP à medida que aumenta a proporção de TBCF:GPP

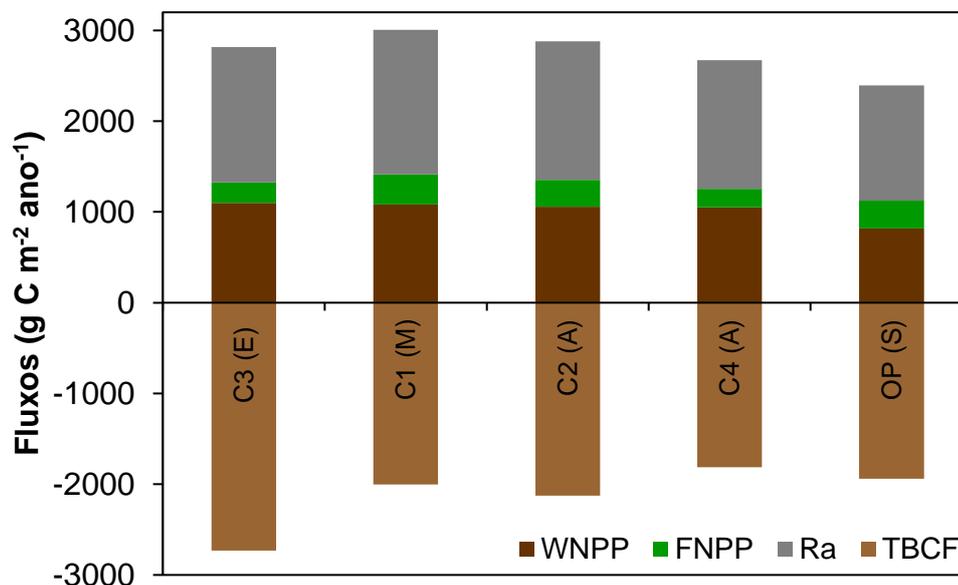


Quanto à respiração autotrófica da parte aérea (R_A), os valores variaram de 1269 g C m⁻² ano⁻¹ para o genótipo OP a 1594 g C m⁻² ano⁻¹ para o genótipo C1 (Tabela 10). É importante mencionar que a respiração da parte aérea foi calculada com base na eficiência do uso do carbono, e não mensurada; conseqüentemente, esses dois genótipos também apresentaram o maior e o menor valor para ANPP, respectivamente.

A Figura 19 representa os fluxos que compõem o balanço de carbono para cada um dos genótipos avaliados, na qual o TBCF é ilustrado como negativo, representando graficamente o acúmulo total abaixo do solo para cada genótipo. Pode-se observar também que os genótipos C3 e C1 conseguiram alocar a maior quantidade de carbono para a produção de madeira; porém, cada um deles tem a respiração de manutenção mais elevada para cada um de seus componentes, sendo o C1 o que respira mais na parte aérea e o C3 o que tem a maior respiração abaixo do solo.

A partição do carbono absorvido (GPP) que foi distribuída para cada um dos componentes da árvore não teve diferença significativa entre os genótipos avaliados para nenhum dos fluxos (Tabela 9). Porém, as distribuições que adotaram cada um dos genótipos os levaram a diferentes taxas de Produtividade Primária Bruta e conseqüentemente diferente desenvolvimento nos primeiros anos de idade.

Figura 19 — Fluxo da Produtividade Primária Bruta para os diferentes compartimentos da árvore (aéreo e abaixo do solo) e o gasto de GPP na manutenção da parte aérea por meio da respiração autotrófica



Nota: TBCF = fluxo de carbono para o solo; WNPP = produtividade primária líquida de madeira; FNPP = produtividade primária líquida de folhas; Ra = respiração autotrófica da parte aérea.

O TBCF foi o fluxo que levou as maiores proporções de uso do GPP em cada um dos genótipos, variando de 52% a 39% (Tabela 11). Estes resultados confirmam que a espécie *Pinus taeda* prioriza a manutenção e o crescimento de raízes em vez da geração de novas folhas e galhos. Todavia, outros estudos mostram que o TBCF pode tanto aumentar como diminuir, ou até se manter estável com o incremento da ANPP (NADELHOFFER; ABER; MELILLO, 1985; RAICH; NADELHOFFER, 1989; LITTON; RYAN; KNIGHT, 2004; GIARDINA et al., 2005).

Deliberali (2015) comparou a partição de duas espécies de *Pinus* e encontrou que o *Pinus taeda* distribui até 46% do GPP como fluxo TBCF, em que o *Pinus caribaea* var. *hondurensis* utiliza somente 22% como fluxo para abaixo do solo, sendo sua maior partição para a ANPP.

Os genótipos OP e C3, embora sejam os que priorizam a produção e manutenção de raízes, tiveram os desempenhos mais contrastantes, devido às porcentagens de distribuição acima do solo, já que o C3 utiliza apenas 4% do GPP na produção de folhas e 20% na alocação de madeira, enquanto o OP destina o dobro para a produção de folhas e somente 15% no crescimento de madeira.

Campoe et al. (2012) também relataram que as parcelas com os maiores GPP tiveram maior partição de carbono para WNPP e maiores alocações de carbono no tronco, ao mesmo tempo que uma menor distribuição para FNPP.

Tabela 9 — Partição do GPP para cada componente da árvore e a respiração da parte aérea em cada um dos genótipos avaliados.

Fluxos	Genótipo				
	C3 (E)	C1 (M)	C2 (A)	C4 (A)	OP (S)
FNPP	0,04 (a)	0,07 (a)	0,06 (a)	0,05 (a)	0,08 (a)
WNPP	0,20 (a)	0,22 (a)	0,21 (a)	0,23 (a)	0,15 (a)
ANPP	0,24 (a)	0,29 (a)	0,27 (a)	0,28 (a)	0,23 (a)
Ra	0,27 (a)	0,32 (a)	0,31 (a)	0,31 (a)	0,26 (a)
TBCF	0,49 (a)	0,39 (a)	0,42 (a)	0,41 (a)	0,52 (a)

Nota: TBCF = fluxo de carbono para o solo; WNPP = produtividade primária líquida de madeira; FNPP = produtividade primária líquida de folhas; Ra = respiração autotrófica da parte aérea. Valores seguidos de letras iguais não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey ($p = 0,05$).

Muitos estudos sobre balanço de carbono documentaram que, ao incrementar o GPP, há incrementos de carbono para todos os fluxos em geral (RYAN et al., 1996, 2010; ALBAUGH et al., 1998; MAIER et al., 2004; LITTON et al., 2007; STAPE; BINKLEY; RYAN, 2008; BOWN et al., 2009). No entanto, o presente estudo conseguiu demonstrar também que os padrões de partição do carbono absorvido resultam em diferentes taxas de GPP, sendo que para alcançar maiores produtividades de GPP é necessário escolher padrões de partição dentro de cada espécie que favoreçam a produtividade primária líquida e a alocação de carbono no tronco.

É muito relevante mencionar que embora os genótipos não apresentaram diferenças significativas nas porcentagens de distribuição da GPP que cada um deles fez para os diferentes fluxos (Tabela 11), se obteve sim, diferenças significativas nas quantidades finais produzidas no TBCF e GPP total comparando os genótipos após o ano de estudo (Tabela 10).

Demonstrando que apesar da repartição da GPP ser “parecida”, pequenas diferenças de distribuição carregaram os genótipos a terem produção total de GPP

contrastante, assim como alocação do carbono diferente em alguns dos componentes da árvore.

A produtividade líquida do ecossistema (NEP) encontrada em todos os genótipos foi positiva, ao mesmo tempo em que não apresentaram diferença significativa entre as suas médias, indicando que independentemente da amplitude de copa do genótipo, todos eles atuaram como dreno de carbono para esta área experimental e com idade de oito anos (Tabela 10).

A variação registrada para NEP foi de 47% entre os valores mais contrastantes, de 866 g C m⁻² ano⁻¹ para o genótipo OP a 1223 g C m⁻² ano⁻¹ referente ao genótipo C1 (Tabela 8). Nesta mesma idade, Deliberali (2015) relatou valores similares de 1595 g C m⁻² ano⁻¹ e 688 g C m⁻² ano⁻¹ para o *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e para o *Pinus taeda*, respectivamente, no manejo fertilizado e irrigado.

Embora o clone C3 tivesse a maior produtividade de GPP, ele perde por meio de respiração aérea e subterrânea (R_E) até 10% a mais do que o clone C4. Outros estudos documentaram que a respiração do ecossistema (R_E) desempenha um papel importante em determinar se uma floresta funciona como fonte ou sumidouro de carbono atmosférico (RYAN et al., 1994; LAW et al., 1999, 2001; FALGE et al., 2002; MAIER et al., 2004).

A respiração do ecossistema representou até 77% de gasto do GPP, em média, para todos os genótipos; deixando uma variação de 18% a 25% do total de carbono capturado armazenado na floresta, fazendo-a atuar como dreno de carbono da atmosfera.

Ao redor do mundo, as florestas de coníferas demoram a se tornar reservatórios de carbono, as florestas boreais, por exemplo, podem levar décadas até a produtividade primária líquida exceder a respiração heterotrófica (SCHULZE; WIRTH; HEIMANN, 2000). Plantações de 50 a 250 anos da espécie *Pinus ponderosa* nos EUA mostraram ser pequenos drenos de carbono, capturando somente de 20 g C m⁻² ano⁻¹ a 100 g C m⁻² ano⁻¹, enquanto aos 15 anos atuavam ainda como fonte de CO₂ (LAW, 2001).

Teoricamente, a NEP atinge o seu máximo perto do fechamento de copa do povoamento, quando a relação de biomassa de folha pela biomassa de madeira é maior (GOWER et al., 1994). Para o presente estudo, as árvores aos oito anos de idade já tinham atingido o fechamento de copa e os resultados demonstraram que continuaram funcionando como dreno de carbono.

Para Maier et al. (2004), a NEP está fortemente ligada à NPP, sendo que o maior armazenamento de carbono no ecossistema resulta principalmente do aumento da biomassa de folhagem sempre verde assim como de madeira. Foram encontrados valores de $640 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ nos tratamentos de fertilização e de fertilização e irrigação e de zero para o tratamento irrigado e no controle, indicando que estes dois últimos não atuaram como dreno nem como fonte de carbono, nas florestas de *Pinus taeda* aos 12 anos de idade.

Law et al. (2002) obtiveram os mesmos resultados para esta espécie com oito anos de idade, mostrando que as parcelas sem fertilização funcionaram como fonte de carbono para a atmosfera ($-106 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$), enquanto as fertilizadas foram, de maneira moderada, drenos de carbono ($127 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$). Entretanto, existe uma forte relação entre fertilização e a transição da floresta de fonte para dreno de carbono em áreas de baixa fertilidade do solo (MAIER e KRESS, 2000).

Não obstante, o clima também é um fator que pode influenciar os valores de carbono estocado e trocado com a atmosfera, conforme o registro de Deliberali (2015) de um ano com maior disponibilidade hídrica e o ano seguinte mais seco, em uma floresta de *Pinus taeda* aos oito anos de idade, cuja drenagem variou de $867 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ a $428 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ no ano mais seco.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em termos de produção de madeira todos os clones tiveram bom desempenho, porém as características de copa de cada um deles os colocam em diferentes nichos de mercado: o C3 ou o C1 (copa meia e estreita) podem ser mais recomendados para uso de madeira serrada por possuírem menos defeitos, como nós ao tempo que possuem galhos mais finos (característica qualitativa podendo ser observada na Figura 5), enquanto os clones C2 e C4 (copas amplas) assim como o genótipo OP alcançariam melhores rendimentos de biomassa aérea pensada para combustão.

O resultado mais interessante é a comparação entre os genótipos com menor largura de copa, pois apesar de terem partições muito diferentes acima e abaixo do solo, obtiveram quase a mesma quantidade de carbono alocada para produção de madeira: o genótipo C3, com baixa produção de novas folhas e menor respiração da parte aérea, porém melhor desenvolvimento de raízes, alcançou uma alocação para o tronco + casca de $1484 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$; enquanto o C1, com o melhor crescimento de folhas e conseqüentemente a maior respiração da parte aérea, porém crescimento moderado de raízes, conseguiu alocar $1487 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ para o tronco + casca.

Assim, apesar do presente estudo não incluir a comparação de tratamentos silviculturais, tais como irrigação ou fertilização, é possível inferir que o desempenho do clone C3, que obteve o maior estoque de raízes e o maior fluxo de carbono para abaixo do solo, permitiu uma melhor captação de água e nutrientes, resultando no genótipo com o maior GPP.

6 CONCLUSÕES

Com base nas avaliações realizadas de fluxo e alocação de carbono para cinco genótipos da espécie *Pinus taeda* com diferentes ideótipos de copa, avaliados dos 7 aos 8 anos, pode-se concluir que:

- Os diferentes ideótipos de copa dos genótipos avaliados afetam os estoques de carbono;
- Os padrões de partição de carbono aos 7 anos não explicam as diferenças nos estoques de carbono;
- Aumento da Produtividade Primária Bruta resulta em tendência de elevação da produção de madeira;
- Independentemente do ideótipo de copa a prioridade de distribuição da GPP é maior para componentes abaixo do solo, comparativamente a componentes acima do solo, desconsiderando a respiração autotrófica;
- Independentemente do ideótipo de copa e mesmo após o fechamento do dosel, todos os genótipos atuam como drenos de carbono da atmosfera na idade de 8,4 anos;
- Os clones tem melhor desempenho como dreno de carbono e maiores fluxos de carbono para produção de madeira do que o genótipo de polinização aberta, consolidando a importância da melhora genética na espécie *Pinus taeda*.
- Por não apresentarem diferenças significativas de produtividade dos componentes da parte aérea e partição, as diferenças no estoque de carbono são provenientes de idades anteriores aos sete anos.

Voltando às hipóteses:

- Diferentes genótipos apresentarão diferentes estoques de carbono: **corroborada**

- Diferenças de produtividade de madeira serão explicadas pela combinação de maior absorção de carbono (GPP) e maior partição para o componente madeira: **não corroborada**.

- Genótipos com maior produtividade de madeira apresentarão menor partição para componentes abaixo do solo: **não corroborada**.

- Independentemente do genótipo, plantios de *Pinus taeda* são drenos de carbono: **corroborada**.

REFERÊNCIAS

- ALBAUGH T.J., ALLEN H. L., DOUGHERTY P. M., KRESS L. W., KING J. S. Leaf area and above- and belowground growth responses of loblolly pine to nutrient and water additions. **Forest Science**, V. 44, n.2, p.317-328, 1998.
- ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H. L.; DOUGHERTY, P.M.; JOHNSEN, K.H. Long term growth responses of loblolly pine to optimal nutrient and water resource availability. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 192, p. 3-19, 2004.
- ALBAUGH, T.J., STAPE, J.L., FOX, T.R., RUBILAR, R.A., ALLEN, H.L. Midrotation Vegetation Control and Fertilization Response in *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* across the Southeastern United States. **Southern Journal of Applied Forestry**, v. 36, p. 44-53, 2012.
- ALBAUGH, T.J., MAIER, C.A., CAMPOE, O.C., YÁÑEZ, M.A., CARBAUGH, E.D., CARTER, D.R., COOK, R.L., RUBILAR, R.A., FOX, T.R., 2020. Crown architecture, crown leaf area distribution, and individual tree growth efficiency vary across site, genetic entry, and planting density. **Trees - Struct. Funct.** 34, 73–88.
<https://doi.org/10.1007/s00468-019-01898-3>
- ALBAUGH, T.J., FOX, T.R., MAIER, C.A., CAMPOE, O.C., RUBILAR, R.A., COOK, R.L., RAYMOND, J.E., ALVARES, C.A., STAPE, J.L., 2018. A common garden experiment examining light use efficiency and heat sum to explain growth differences in native and exotic *Pinus taeda*. **Forest Ecology and Management**. 425, 35–44.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.05.033>
- ARAUJO, PATRICIA I.; AUSTINA, AMY T. Exotic pine forestation shifts carbon accumulation to litter detritus and wood along a broad precipitation gradient in Patagonia, Argentina. **Forest Ecology and Management**, [S. l.], v. 460, n. 117902, p. 30-40, 15 mar. 2020.
- ALVARES C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., GONÇALVES, J.L.M., SPAROVEK, G. KÖPPEN'S climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711-728, 2013.
- BALBINOT, R.; VALÉRIO, Á.F.; SANQUETTA, C.R.; CALDEIRA, M.V.W.; SILVESTRE, R. Estoque de carbono em plantações de *Pinus spp.* em diferentes idades no sul do estado do Paraná. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, p. 317–324, 2008.
- BOGNOLA, I.; DEDECEK, R.; LAVORANTI, O.; HIGA, A.R. Influência de propriedades físico-hídricas do solo no crescimento de *Pinus taeda*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 61, p. 37-49, 2010.
- BINKLEY, DAN; STAPE, JOSE LUIZ; RYAN, MICHAEL G. Thinking about efficiency of resource use in forests. **Forest Ecology And Management**, [s.l.], v. 193, n. 1-2, p.5-16, maio 2004.
- CAMPOE, O.C.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.P.; MARSDEN, C.; NOUVELLON, Y. Stand-level patterns of carbon fluxes and partitioning in a *Eucalyptus grandis*

plantation across a gradient of productivity, in São Paulo State, Brazil. **Tree Physiology**, Victoria, v. 32, n. 6, p. 696–706, 2012.

CAMPOE, O.C.; STAPE, J.L.; NOUVELLON, Y.; LACLAU, J.P.; BAUERLE, W.L.; BINKLEY, D.; LE MAIRE, G. Stem production, light absorption and light use efficiency between dominant and non-dominant trees of *Eucalyptus grandis* across a productivity gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 288, p. 14–20, 2013.

COOK, R.L.; BINKLEY, D.; STAPE, J.L. *Eucalyptus* plantation effects on soil carbon after 20years and three rotations in Brazil. **Forest Ecology And Management**, [S.L.], v. 359, p. 92-98, jan. 2016.

COYLE, D.R.; COLEMAN, M.D.; AUBREY, D.P. Above- and below-ground biomass accumulation, production, and distribution of sweetgum and loblolly pine grown with irrigation and fertilization. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 38, n. 6, p. 1335–1348, 2008.

DALLATEA, F., JOKELA, E.J. Needlefall, canopy light interception, and productivity of young intensively managed slash and loblolly-pine stands. **Forest Science**. V. 37, n. 5, p. 1298–1313.1991.

DEDECEK, R.A.; FIER, I.S.N.; SPELTZ, R.; LIMA, L.C.S. Influência do sítio no desenvolvimento do *Pinus taeda* aos 22 anos. 1. Características físico-hídricas e químicas do solo. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 3, p. 507-516, jul./set. 2008.

DELIBERALI, I. **Captura e alocação de carbono em *Pinus taeda* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis* sob manejos hídricos e nutricionais distintos**. 2015. 108 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

DELUCIA, E.H.; DRAKE, J.E.; THOMAS, R.B.; GONZALEZ-MELER, M. Forest carbon use efficiency: is respiration a constant fraction of gross primary production? **Global Change Biology**, Oxford, v. 13, n. 6, p. 1157–1167, 2007.

DU TOIT, B. 2008. Effects of site management on growth, biomass partitioning and light use efficiency in a young stand of *Eucalyptus grandis* in South Africa. **Forest Ecology And Management**. 255:2324–2336.

EKBLAN, A.; HOGBERG, P. Natural abundance of ^{13}C in CO_2 respired from forest soils reveals speed of link between photosynthesis and root respiration. **Oecologia**, Berlin, V. 127, n. 3, p. 305-308. 2001.

EPRON, D.; LACLAU, J.-P.; ALMEIDA, J.C.R.; GONCALVES, J.L.M.; PONTON, S.; SETTE, C.R.; DELGADO-ROJAS, J.S.; BOUILLET, J.-P.; NOUVELLON, Y. Do changes in carbon allocation account for the growth response to potassium and sodium applications in tropical *Eucalyptus* plantations? **Tree Physiology**, Oxford, v. 32, n. 6, p. 667–679, 2012.

EPRON, D.; NOUVELLON, Y.; RYAN, M.G. Introduction to the invited issue on carbon allocation of trees and forests. **Tree Physiology**, Oxford, v. 32, n. 6, p. 639–643, 2012.

FERREIRA, C.A.; SILVA, H.D.; REISSMANN, C.B.; BELLOTE, A.F.J. MARQUES, R. Nutrição de *Pinus* no sul do Brasil: diagnóstico e prioridades de pesquisa. Colombo: Embrapa Florestas, 2001. 23p.

FOX, T.R., ALLEN, H.L.; ALBAUGH, T.J.; RUBILAR, R.; CARLSON, C.A. Tree nutrition and forest fertilization of pine plantations in the Southern United States. **Southern Journal Applied Forestry**, v. 31, p. 5–11, 2007.

GIARDINA, C. P.; RYAN, M.G. Total Belowground Carbon Allocation in a Fast-growing Eucalyptus Plantation Estimated Using a Carbon Balance Approach. **Ecosystems**, [s.l.], v. 5, n. 5, p. 487-499, 1 ago. 2002. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10021-002-0130-8>.

GIARDINA, C.P.; RYAN M.G.; BINKLEY D.; FOWNES J.H. Primary production and carbon allocation in relation to nutrient supply in a tropical experimental forest. **Global Change Biology**, 9, 1438–1450, 2003.

GOERL, R.; KOBAYAMA, M.; PELLERIN, J. R.; Proposta metodológica para mapeamento de áreas de risco a inundação: estudo de caso do município de Rio Negrinho – SC. **Caminhos de geografia**. v. 12, n. 40, p. 205-221. 2011.

GOWER, S.T.; GHOLZ, H.L.; NAKANE, K.; BALDWIN, V.C. Production and carbon allocation patterns of pine forests. **Ecological Bulletins**, Copenhagen, n. 43, p. 115–135, 1994.

GOWER, S. T.; KRANKINA, O.; OLSON, R. J.; APPS, M.; LINDER, S.; WANG, C.. Net primary production and carbon allocation patterns of boreal forest ecosystems. **Ecological Applications**, [s.l.], v. 11, n. 5, p. 1395-1411, 2001. Wiley. [http://dx.doi.org/10.1890/1051-0761\(2001\)011\[1395:nppaca\]2.0.co;2](http://dx.doi.org/10.1890/1051-0761(2001)011[1395:nppaca]2.0.co;2).

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório IBA 2017. São Paulo: Studio 113, 2017. 80 p.

JOKELA, E.J.; DOUGHERTY, P.M.; MARTIN, T. a. Production dynamics of intensively managed loblolly pine stands in the southern United States: A synthesis of seven long-term experiments. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 192, n. 1, p. 117–130, 2004.

JOKELA, E.J.; MARTIN, T. a.; VOGEL, J.G. Twenty-five years of intensive forest management with southern pines: important lessons learned. **Journal of Forestry**, Christchurch, v. 108, n. Nov., p. 338–347, 2010.

KRONKA F.J.; BERTOLANI F.; HERRERA PONCE R. **A cultura do *Pinus* no Brasil**. São Paulo: SBS; 2005. 160 p.

LANDSBERG, J.J.; WARING, R.H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 95, n. 3, p. 209–228, 1997.

LARCHER, W. *Ecofisiologia vegetal*. São Carlos: RIMA, 2006. 531 p.

Law B. E., Ryan M.G., Anthoni P. M. Seasonal and annual respiration of a ponderosa pine ecosystem. **Global Change Biology**, v. 5, p. 169–182, 1999.

LAW, B.; THORNTON, P.; IRVINE, J. Carbon storage and fluxes in ponderosa pine forests at different developmental stages. **Global Change Biology**, Oxford, v. 7, n. 7, p. 755–777, 2001.

Law B. E., Falge E., Gu L. et al. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 113, p. 97–120, 2002.

LITTON, CREIGHTON M.; RAICH, JAMES W.; RYAN, MICHAEL G. Carbon allocation in forest ecosystems. **Global Change Biology**, [s.l.], v. 13, n. 10, p.2089-2109, out. 2007. Wiley.

MAIER, C.A.; ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H.L.; DOUGHERTY, P.M. Respiratory carbon use and carbon storage in mid-rotation loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations: The effect of site resources on the stand carbon balance. **Global Change Biology, Oxford**, v. 10, n. 8, p. 1335–1350, 2004.

MAIER, C.A.; KRESS, L.W. Soil CO₂ evolution and root respiration in 11 year-old loblolly pine (*Pinus taeda*) plantations as affected by moisture and nutrient availability. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 30, n. 3, p. 347–359, 2000.

MARTIN, T. a.; JOKELA, E. J. Stand development and production dynamics of loblolly pine under a range of cultural treatments in north-central Florida USA. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 192, n. 1, p. 39–58, 2004.

MARTO, G.B.T. **Indicações para a escolha da espécie de *Pinus***. Piracicaba: IPEF, 2006. Disponível em: <http://www.ipef.br/silvicultura/escolha_Pinus.asp>. Acesso em: 18 nov. 2010.

MONTEITH, J.L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil Trans. Royal Soc. B* 281, 277–294, 1977.

MORO, L.; GATIBONI, L.C.; SIMONETE, M.A.; CEZAR, P. Resposta de *Pinus taeda* com diferentes idades à adubação NPK no planalto Sul Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 4, p. 1181-1189, 2014.

MUNHOZ, JULIANA SOARES BIRUEL. **Caracterização da produtividade florestal e dos padrões de crescimento de *Pinus taeda* L. no sul do Brasil através de análise de tronco**. 2011. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Florestais., Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2011.

MUNHOZ, JULIANA SOARES BIRUEL. **Influência dos fatores edafoclimáticos na produtividade e na eficiência do uso dos recursos naturais do *Pinus taeda* L. sob distintos manejos no Sul do Brasil.** 2015. 141 f. Tese (Doutorado) - Curso de Recursos Florestais., Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2015.

NOUVELLON, Y.; LACLAU, J.P.; EPRON, D.; LE MAIRE, G.; BONNEFOND, J.M.; GONCALVES, J.L.M.; BOUILLET, J.P. Production and carbon allocation in monocultures and mixed-species plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in Brazil. **Tree Physiology**, Oxford, v. 32, n. 6, p. 680–695, 2012.

REISSMANN, C.B.; WISNIEWSKI, C. **Aspectos nutricionais de plantios de *Pinus*.** In: Gonçalves, J.L.D.M.; Benedetti, V. Nutrição e fertilização florestal. Piracicaba: IPEF, 2005. p. 135–166.

RIBEIRO, S.C.; SOARES, C.P.B.; FEHRMAN, L.; JACOVINE, L.A.G.; VON GADOW, K. Aboceground and belowground biomass and carbono estimates for clonal eucalyptus trees in southeast brazil. *Revista Árvore*, Viçosa, V.39, n.2, p. 353-363, 2015.

RODRIGUES, GLEICE GOMES. **Fixação e alocação de carbono em plantações clonais de Eucalipto sob diferentes densidades de plantio.** 2017. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Florestais., Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2017.

Ryan MG. A simple method for estimating gross carbon budgets for vegetation in forest ecosystems. *Tree Physiol.* 1991;9(1_2):255-266. doi:10.1093/treephys/9.1-2.255

RYAN MG, HUNT ER JR, MCMURTRIE RE ET AL. **Comparing models of ecosystem function for temperate conifer forests. I. Model description and validation. Global Change: effects on Coniferous Forests and Grasslands** (SCOPE) (eds Breymer AI, Hall DO, A ° gren GI, Melillo JM), pp. 313–362, 1996. John Wiley and Sons, London.

RYAN, M.G.; STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; FONSECA, S.; LOOS, R. a.; TAKAHASHI, E.N.; SILVA, C.R.; SILVA, S.R.; HAKAMADA, R.E.; FERREIRA, J.M.; LIMA, A.M. N.; GAVA, J.L.; LEITE, F.P.; ANDRADE, H.B.; ALVES, J.M.; SILVA, G.G.C. Factors controlling *Eucalyptus* productivity: How water availability and stand structure alter production and carbon allocation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1695–1703, 2010.

SAINT-ANDRÉ, L.; M'BOU, A.T.; MABIALA, A.; MOUVONDY, W.; JOURDAN, C.; ROUPSARD, O.; DELEPORTE, P.; HAMEL, O.; NOUVELLON, Y. Age-related equations for above- and below-ground biomass of a *Eucalyptus* hybrid in Congo. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 205, n. 1/3, p. 199–214, 2005.

SAMUELSON, L., STOKES, T., COOKSEY, T., MCLEMORE, P. Production efficiency of loblolly pine and sweetgum in response to four years of intensive management. *Tree Physiol.* 21, 369–376, 2001.

SAMUELSON, L.J.; JOHNSEN, K.; STOKES, T. Production, allocation, and stemwood growth efficiency of *Pinus taeda* L. stands in response to 6 years of intensive management. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 192, n. 1, p. 59–70, 2004.

SAMUELSON, L.J.; JOHNSEN, K.; STOKES, T.; LU, W. Intensive management modifies soil CO₂ efflux in 6-year-old *Pinus taeda* L. stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 200, n. 1/3, p. 335–345, 2004.

SAMUELSON, L.J.; BUTNOR, J.; MAIER, C.; STOKES, T. a.; JOHNSEN, K.; KANE, M. Growth and physiology of loblolly pine in response to long-term resource management: defining growth potential in the southern United States. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 38, n. 4, p. 721–732, 2008.

SAS-Institute. 2002. SAS Version 9.1 TS. SAS Institute, Inc: Cary, NC.

SCHABENBERGER, O. 2013. SAS Code for some advanced experimental designs. UC Regents.

<<http://people.math.carleton.ca/~smills/201617/STAT5505/SAS%20Code%20for%20Some%20Advanced%20Experimental%20Designs.htm>>. (Maio 15, 2020).

SCHNEIDER, T. **Crescimento e teores de B, Cu, Mn, Fe e Zn em *Pinus taeda* L., como resultado da adubação e calagem sob a técnica da omissão de nutrientes.** 2011. 51 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

SCHULTZ, ROBERT P. **Loblolly pine: the ecology and culture of loblolly pine (*Pinus taeda* L.).** Agriculture Handbook 713. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 493 p. 1997.

SCHULZE, E.D.; WIRTH, C.; HEIMANN, M. Managing forests after Kyoto. **Science**, Washington, v. 289, p. 2058–2059, 2000.

SCHUMACHER, Mauro Valdir; WITSCHORECK, Rudi; CALIL, Francine Neves. BIOMASSA EM POVOAMENTOS DE *Eucalyptus* spp. DE PEQUENAS PROPRIEDADES RURAIS EM VERA CRUZ, RS. **Ciênc. Florest.**, Santa Maria, v.21, n.1, p.17-22, Mar.2011. <https://doi.org/10.5902/198050982743>.

SHIMIZU, J.Y. *Pinus* na silvicultura brasileira. **Revista da Madeira**, 2006.

SHIMIZU, J.Y.; SEBEN, A.M. Espécies de *Pinus* na silvicultura brasileira. In:

SHIMIZU, J.Y. ***Pinus* na silvicultura brasileira.** Colombo: Embrapa Florestas, 2008. p. 49–74.

SINGH, J.S.; GUPTA, S.R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. **The Botanical Review**, New York, v. 43, n. 4, p. 449–528, 1977.

SMITH, P. How long before a change in soil organic carbon can be detected? **Global Change Biology**, Oxford, v. 10, p. 1878—1883, 2004.

STAPE, J.L. **Production ecology of clonal *Eucalyptus plantations* in northeastern Brazil**. Ph.D. Dissertation. Colorado State University, Ft Collins, USA. 2002.

STAPE, JOSE LUIZ; BINKLEY, DAN; RYAN, MICHAEL G. Production and carbon allocation in a clonal *Eucalyptus plantation* with water and nutrient manipulations. **Forest Ecology And Management**, [s.l.], v. 255, n. 3-4, p.920-930, mar. 2008. USDA, 2019. <https://www.fs.fed.us/nrs/atlas/tree/131>

WANG, W.; CHEN, W.; WANG, S. Forest soil respiration and its heterotrophic and autotrophic components: Global patterns and responses to temperature and precipitation. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmford, v. 42, n. 8, p. 1236-1244, 2010.

WISEMAN, P.E.; SEILER, J.R. Soil CO₂ efflux across four age classes of plantation loblolly pine (*Pinus taeda* L.) on the Virginia Piedmont. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 192, n. 2/3, p. 297–311, 2004.

YÁÑEZ, M.A., FOX, T.R., SEILER, J.R. Early responses of loblolly pine varieties and families to silvicultural intensity. **Forest Ecology And Management**, v. 356, p.204–215. 2015.

Zhao, D., Kane, M., Markewitz, D., Teskey, R.O., & Clutter, M. (2015). Additive Tree Biomass Equations for Midrotation Loblolly Pine Plantations. *Forest Science*, 61, 613-623.

ZHAO, D., KANE, M., TESKEY, R., FOX, T.R., ALBAUGH, T.J., ALLEN, H.L., RUBILAR, R. Maximum response of loblolly pine plantations to silvicultural management in the southern United States. **Forest Ecology and Management**, v. 375, p. 105-111, 2016.