

Duas décadas de cooperação científica CIRAD-ESALQ-IPEF

Anais de comemoração

Contribuição para a compreensão do
funcionamento das plantações florestais
tropicais de rápido crescimento

Série Técnica IPEF



Série Técnica IPEF (ISSN 2764-3808) é publicada sem periodicidade regular pelo Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF). Série Técnica IPEF divulga trabalhos apresentados em reuniões técnicas e científicas promovidas pelo IPEF.

O conteúdo e as opiniões apresentadas nos trabalhos publicados não são de responsabilidade e não representam, necessariamente, as opiniões do IPEF.

Editor Chefe

Prof. Dr. Mauro Valdir Schumacher, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria, RS, Brasil

Editora Executiva

IPEF - Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (www.ipef.br)

Editoração e Diagramação

Editora Cubo (www.editoracubo.com.br)



INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS
FLORESTAIS

Duas décadas de cooperação científica CIRAD-ESALQ-IPEF

Anais de Comemoração

**Contribuição para a compreensão do funcionamento das
plantações tropicais de rápido crescimento**

Jean-Paul Laclau

José Leonardo de Moraes Gonçalves

José Otávio Brito

Ed.

SÉRIE TÉCNICA IPEF

v. 25, no. 47, dezembro de 2022

IPEF - Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais - Piracicaba, SP - Brasil

Duas décadas de cooperação científica CIRAD-ESALQ-IPEF

Anais de Comemoração

Contribuição para a compreensão do funcionamento das plantações tropicais de rápido crescimento

Colaboradores (ordem alfabética)

Abreu-Junior, Cassio Hamilton - USP/CENA
Asensio, Veronica - USP/CENA
Attia, Ahmed - UNICAMP
Battie-Laclau, Patricia - CIRAD
Bordron, Bruno - CIRAD
Bouillet, Jean-Pierre - CIRAD
Brito, José Otávio - IPEF
Campoe, Camargo Otávio – UFLA
Cabral, Osvaldo - EMBRAPA
Chaix, Gilles – CIRAD
Chambi_Legoas, Roger - USP/ESALQ
Christina, Mathias – CIRAD
Cornut, Ivan – CIRAD
Cuadra, Santiago – EMBRAPA
da Silva Araujo, Eder - FLORAGRO
da Silva Eduardo, Vinicius - USP/ESALQ
de Deus Jr, José Carlos – UNESP
Epron, Daniel – Lorraine University
Favreau, Bénédicte – CIRAD
Feret, Jean Baptiste - INRAE
Formaglio Greta – CIRAD
Franco Pires, M. - USP/ESALQ
Gonçalves, José Leonardo de Moraes – USP/ESALQ
Lambais, George Rodrigues - USP/CENA

Jourdan, Christophe - CIRAD
Laclau, Jean-Paul - CIRAD
le Maire, Gueric - CIRAD
Guerrini, Iraê Amaral - UNESP
Germon, Amandine - CIRAD
Guillemot, Joannès - CIRAD
Marsden, Claire – IRC Institut Agro Montpellier
Moreira e Moreira, Rildo - USP/ESALQ
Nouvellon, Yann – CIRAD
Oliveira, Julianne de Castro - ESALQ
de Oliveira, Ivanka Rosada - USP/ESALQ
Paula, Ranieri Ribeiro - UFES
Pinheiro, Rafael Costa – UNESP
Ponzoni, Flavio Jorge - INPE
Pradier, Céline - CIRAD
Robin, Agnès - CIRAD
Rojas, Juan Sinforiano Delgado - USP/ESALQ
Sette, Carlos – USP/ESALQ
Stape, José Luiz – UNESP
Tomasiello Filho, Mario - USP/ESALQ
Tritzl, Guedes F. – USP/ESALQ
Vezy, Rémi - CIRAD
Voigtlaender, Maureen - USP/ESALQ

SÉRIE TÉCNICA IPEF
v. 25, no. 47, dezembro de 2022

SUMÁRIO

Apresentação	01
Capítulo 1 Estudar os padrões ecofisiológicos para melhorar a sustentabilidade e o manejo das plantações de eucalipto de alta produtividade: O Programa Cooperativo EUCFLUX.....	03
Capítulo 2 Interações entre a nutrição das árvores e o estresse hídrico nas plantações de eucaliptos	08
Capítulo 3 Raízes profundas em plantações de eucalipto	14
Capítulo 4 Plantios consorciados de eucalipto e acácia: uma opção complementar às monoculturas de eucalipto?	20
Capítulo 5 Processos de facilitação nos plantios consorciados de <i>Eucalyptus</i> e <i>Acacia mangium</i>	25
Capítulo 6 Modelando o balanço de radiação e os ciclos de carbono e água nas plantações de eucalipto	29
Capítulo 7 Uso de sensoriamento remoto em plantações de eucalipto no Brasil.....	36
Capítulo 8 Melhorar a silvicultura de plantações com espécies de árvores nativas para auxiliar a restauração florestal	41
Capítulo 9 Influência das variáveis ambientais e da fertilização na xilogênese e na qualidade do lenho das árvores de eucalipto	44
Conclusão e perspectivas gerais	50

APRESENTAÇÃO

Este documento registra a trajetória de 20 anos da cooperação científica entre França e Brasil, por intermédio do CIRAD (<https://www.cirad.fr/en>), do departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP e do IPEF (<https://www.ipef.br/>). Tornou-se uma das mais importantes referências internacionais de cooperação científica sobre a interação ecofisiológica floresta-clima-solo em plantações de *Eucalyptus* e *Acacias*. O documento ressalta os avanços científicos e as aplicações práticas nas áreas de ecofisiologia, nutrição e fertilização florestal, que possibilitam tornar as plantações florestais mais sustentáveis.

Tudo se iniciou em 2002, com a designação do pesquisador Jean-Paul Laclau – CIRAD, para se estabelecer junto ao Departamento de Ciências Florestais – LCF, na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ, da Universidade de São Paulo – USP, tendo como anfitrião o Prof. José Leonardo de Moraes Gonçalves. À época, o citado professor já atuava como líder científico do Programa Cooperativo de Silvicultura e Manejo – PTSM, do IPEF, permitindo com que Jean Paul, rapidamente, se engajasse nas pesquisas do programa.

A cooperação do CIRAD se ampliou, com outras participações de pesquisadores em diversas missões de curta e longa duração no Brasil. Sucessivamente, atuaram Yann Nouvellon, baseado no Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP, Gueric le Maire, na Universidade de Campinas - UNICAMP, bem como Gilles Chaix, Bénédicte Favreau, Jean-Pierre Bouillet, Agnès Robin, Joannès Guillemot e Greta Formaglio que estiveram baseados na ESALQ.

Embora a colaboração com o programa PTSM tenha continuado, durante esses 20 anos, o envolvimento dos pesquisadores do CIRAD se estenderam ao Programa Cooperativo sobre Produtividade e Fluxos de Carbono e Água em *Eucalyptus* - EUCFLUX (<https://www.ipef.br/eucflux2/>), criado no IPEF, em 2017. O programa foi estabelecido com o objetivo de quantificar os principais fluxos dos ciclos de carbono, água e nutrientes ao longo de uma rotação completa de eucaliptos em plantações comerciais. O programa EUCFLUX foi coordenado, inicialmente, pelo Professor José Luiz Stape, até então vinculado à ESALQ/USP e, posteriormente, pelo Prof. Otavio Campoe, da Universidade Federal de Lavras - UFLA.

Deve-se também destacar o envolvimento de vários professores e estudantes da Faculdade de Estudos Agrônômicos – FCA da Universidade Julio de Mesquita Filho – UNESP, além de profissionais das empresas do IPEF, que durante todo esse tempo ofereceram todo o apoio aos trabalhos de pesquisa desenvolvidos em larga escala nos programas, em várias regiões do Brasil.

Em se tratando de sites experimentais, muitas pesquisas foram desenvolvidas junto às Estações Experimentais de Ciências Florestais da ESALQ/USP, localizada no município de Itatinga, no Estado de São Paulo. Outros trabalhos específicos também foram realizados em empresas pertencentes ao quadro de associadas ao IPEF, podendo serem citados, dentre outros os casos do estudo de ciclos biogeoquímicos, na empresa Vallourec, MG, o monitoramento de torres de fluxo, na Fibria (atualmente, Zuzano), SP, o estudo da misturas de eucalipto e acácia, nas empresas Cenibra, MG, Suzano, ES, e International Paper, SP, este último, dentro de um projeto temático apoiado pela Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP e a Agence Nationale de la Recherche – ANR, França. Destaque importante deve ser oferecido ao EUCFLUX, com seu site experimental em Itatinga, SP, inicialmente pertencente à empresa Duratex, hoje, de propriedade da Bracell.

A contribuição do CIRAD também tem se mostrado presente junto ao IPEF, pela participação do pesquisador Jean Paul Laclau como membro do Conselho Técnico Científico do instituto, desde 2019.

A colaboração CIRAD-IPEF, ao longo desses 20 anos, ganhou um alto destaque na comunidade científica florestal mundial, pela geração de mais de 100 artigos publicados em revistas internacionais, e pela conquista de avanços significativos em muitos campos. A rápida

exploração radicular de camadas muito profundas do solo por eucaliptos, a quantificação dos principais fluxos dos ciclos de carbono e água durante rotações completas, a avaliação do potencial do sensoriamento remoto para o monitoramento de povoamentos comerciais, a compreensão dos processos ecofisiológicos e biogeoquímicos nas plantações florestais, juntamente com estudos de modelagem, são alguns exemplos, os quais são destacados nos capítulos que seguem, que contribuíram e ainda contribuem para a melhoria da silvicultura em grandes áreas no Brasil.

Na prática, os resultados das pesquisas permitiram ainda a redução de custos de certas operações silviculturais, como é o caso da redução do número de fertilizações. Ajudaram ainda a melhorar a imagem das plantações de eucalipto para o público, fornecendo à comunidade internacional uma avaliação transparente do impacto ambiental do manejo florestal sobre os ciclos da água, do carbono e dos nutrientes.

Apesar dos custos significativos, sem retorno imediato do investimento, os compromissos assumidos pelo CIRAD e o IPEF, neste caso, representando empresas florestais brasileiras, tem produzido resultados destacados na pesquisa internacional sobre plantações florestais. As duas décadas de colaboração deixam um legado que permite a afirmação de que vale a pena a colaboração, que pressupõe financiamento de longo prazo, para a condução de pesquisas de ponta, dentro de objetivos comuns, gerando novos conhecimentos em prol da silvicultura.

Na comemoração dos 20 anos da cooperação CIRAD-IPEF, gostaríamos de agradecer a todas as instituições envolvidas na colaboração e, principalmente, aos pesquisadores e técnicos, os quais, direta e indiretamente, contribuíram e continuam a contribuir para o cumprimento das metas e o sucesso dos trabalhos desenvolvidos. Parabéns!

Capítulo 1

Estudar os padrões ecofisiológicos para melhorar a sustentabilidade e o manejo das plantações de eucalipto de alta produtividade: O Programa Cooperativo EUCFLUX

Guillemot J., Le Maire G., Alvares C.A., Borges J., Chaves R., Figura M.A., De Jesus G.L., Leite F., Loos R.A., Moreira G., Silva V., Stahl J., Laclau J.P., Nouvellon Y., Bouillet J.P., Stape J.L., Campoe O.C.

CONTEXTO

As mudanças climáticas estão afetando profundamente o funcionamento das plantações de eucaliptos, principalmente por meio do aumento da frequência e duração das secas. Portanto, é crucial ampliar o conhecimento sobre os processos que controlam a produtividade florestal e suas relações com o uso de recursos (água, nutrientes e luz), a fim de garantir a sustentabilidade do manejo ao longo de sucessivas rotações.

Para atender a essa necessidade, o programa internacional EUCFLUX teve início em 2008. O programa EUCFLUX reúne o IPEF, o CIRAD, e várias universidades brasileiras, como a Universidade de São Paulo/ESALQ, a Universidade de Lavras e a Universidade Estadual Paulista, tornando possível uma produção científica de alta qualidade e nível internacional. As empresas do IPEF atualmente filiadas ao programa EUCFLUX são Bracell, Cenibra, Dexco, Eldorado, Klabin, Suzano e Sylvamo. O foco principal do projeto é o monitoramento contínuo em alta resolução temporal do balanço de carbono e do balanço hídrico de uma plantação comercial de eucalipto na escala do ecossistema. O projeto também inclui muitos outros aspectos de pesquisa complementares, que são de interesse direto para o manejo das plantações de Eucalipto sob o contexto de mudanças climáticas.

Os ganhos significativos de conhecimento da primeira fase do programa que terminou em 2017, com bases de dados e informações altamente confiáveis, suportaram e ainda vem suportando o aprimoramento do manejo sustentável de florestas plantadas no Brasil. Além de muitas respostas, os resultados alcançados durante a primeira fase apontaram para novas questões, motivando a continuidade do Programa Cooperativo EUCFLUX por mais uma rotação (2018-2026). O EUCFLUX, portanto, tem monitorado continuamente a mesma plantação comercial por mais de 13 anos, incluindo dois cortes e uma rotação completa (Figura 1), constituindo o maior banco de dados mundial desse tipo sobre o gênero *Eucalyptus*.

DESCRIÇÃO DOS OBJETIVOS CIENTÍFICOS E AVALIAÇÕES

As pesquisas integram o uso de diferentes sensores complementares de alta tecnologia para medir não apenas os balanços de carbono e água na escala do ecossistema, mas também todos os principais componentes ecofisiológicos envolvidos nestes ciclos (Figura 2). O EUCFLUX, portanto, torna possível medições ininterruptas da dinâmica de água no solo de forma detalhada até 10 m de profundidade. As emissões e sequestro de carbono

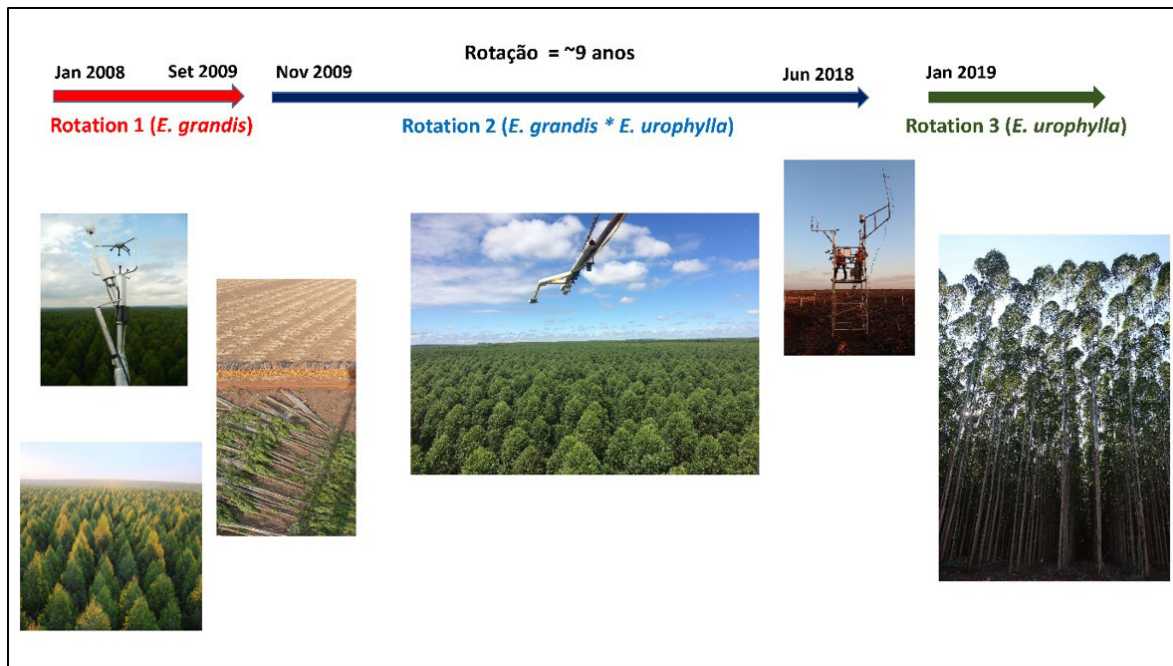


Figura 1. Linha do tempo do Programa Cooperativo EUCFLUX, que monitora sucessivas rotações de plantações comerciais de *Eucalyptus* desde 2008.



Figura 2. Apresentação geral da abordagem científica do projeto EUCFLUX e tecnologias utilizadas nos estudos científicos.

dos varios componentes do sistema solo-planta, a sazonalidade do índice de area folhar e o crescimento efetivo em madeira das árvores com alta resolução temporal. A alocação do carbono entre os diferentes componentes das árvores (folhas, galhos, troncos, sistema radicular) também é avaliada (Campoe et al., 2013). As medições dos balanços carbono e água na escala do ecossistema são feitas usando uma “torre de fluxo”, um sistema “Eddy-covariance” (covariância de vórtices) colocado acima do dossel. A torre possui ainda uma estação meteorológica completa, permitindo notavelmente a medição do balanço energético da floresta, bem como uma série de sensores ópticos. Esses dados de campo são usados em conjunto com imagens de diferentes satélites em diferentes escalas espaço-temporais para desenvolvimento de técnicas e métodos no uso sensoriamento remoto para auxiliar tomadas de decisão sobre manejo em larga escala. Assim, o programa EUCFLUX trabalha em diferentes escalas, das folhas, das árvores, da floresta e a região para caracterizar o funcionamento das plantações de Eucalipto. Finalmente, modelos ecofisiológicos e empíricos são usados em combinação com dados de campo para upscaling e extrapolação de resultado (Attia et al., 2019).

A TORRE DE FLUXO

A torre de fluxo permite medir a quantidade de água, calor e carbono trocada entre a floresta e a atmosfera (Figura 3). Essas medições são feitas 20 vezes por segundo e, em seguida, integradas a cada meia hora. Além dos fluxos líquidos de carbono, também são calculados a produtividade primária bruta e a respiração do ecossistema. Após um tratamento detalhado e rigoroso dos dados, é possível realizar balanços mensais e anuais para quantificar a quantidade de carbono sequestrada pela plantação, bem como a quantidade de água reciclada para a atmosfera. Desde o início do projeto, a quantidade de dados acumulados pela torre atingiu mais de 234.720 valores de fluxo de meia hora, o que representa mais

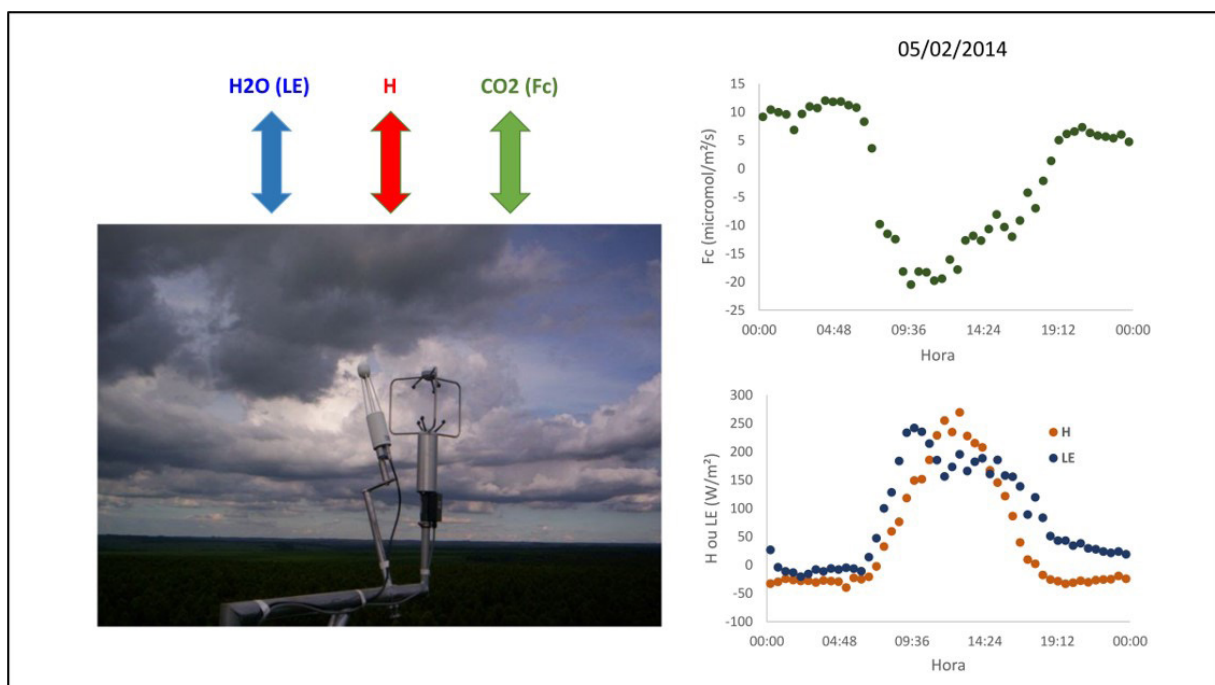


Figura 3. Foto do sistema “Eddy-covariance” da torre de fluxo e exemplo de fluxo de carbono (F_c), água (LE; fluxo de energia latente) e calor sensível (H) ao longo dum dia. Observa-se que a noite, a floresta emite carbono ($F_c > 0$) pela respiração e transpira pouco. Durante dia, a floresta é um forte sumidouro de carbono ($F_c < 0$). Por volta de 13 horas, a taxa de sequestro de carbono, a evapotranspiração e o fluxo de calor chegam ao máximo.

de $8.4 * 109$ linhas de dados brutos. Essa base extraordinária permite que o programa responda pela primeira vez questões essenciais relacionadas ao manejo e sustentabilidade, como a quantidade de carbono emitida no momento do corte, o tempo necessário para que a plantação volte a ser um sumidouro de carbono após o plantio, e a quantidade total de carbono sequestrado em uma rotação completa. Um outro avanço fundamental das pesquisas do programa é permitir a quantificação do efeito de rotações consecutivas sobre a disponibilidade de água no solo, quantificando sua importância para a recarga hídrica das camadas mais profundas do solo e do lençol freático. O banco completo de dados (incluindo as medições de fluxos, meteorologia, índice de área foliar e crescimento das árvores, umidade de solo, etc.) também é usado para melhorar nosso entendimento dos fatores que afetam a produtividade do povoamento, e para desenvolver modelos ecofisiológicos (e.g. Marsden et al., 2010; Christina et al., 2017) que podem ser usados na escala regional para simular a produtividade e os balanços de carbono e de água dos plantios de eucalipto (Attia et al., 2019).

O TESTE DE GENÓTIPOS

O Programa Eucflux possui ainda um Teste de Genótipos (Figura 4), permitindo generalizar e extrapolar os resultados para além do clone principal da área de estudo e quantificar as diferenças de funcionamento entre genótipos seminais e clonais produtivos plantado a larga escala no Brasil, bem como entre espécies diferentes de eucalipto. O teste já estava implementado na primeira fase, com 16 materiais. Atualmente (segunda fase) o teste foi ampliado e contém 25 materiais genéticos. Além disso, agora é possível comparar o funcionamento de 10 materiais manejados em sistema de alto fuste comparativamente ao sistema de talhadia.

O teste já permitiu grandes avanços em nosso conhecimento da variabilidade de absorção da luz, eficiência de uso da luz e produtividade entre genótipos (le Maire et al., 2019). Também foram estudadas as diferenças genotípicas de profundidade do sistema radicalar (Pinheiro et al., 2016). Atualmente o programa estuda as respostas ecofisiológicas e estratégias e tolerância à seca e o balanço hídrico da totalidade ou de parte desses genótipos, bem como aspectos essenciais para o seu funcionamento, como a anatomia da madeira ou a quantidade e distribuição de raízes finas.

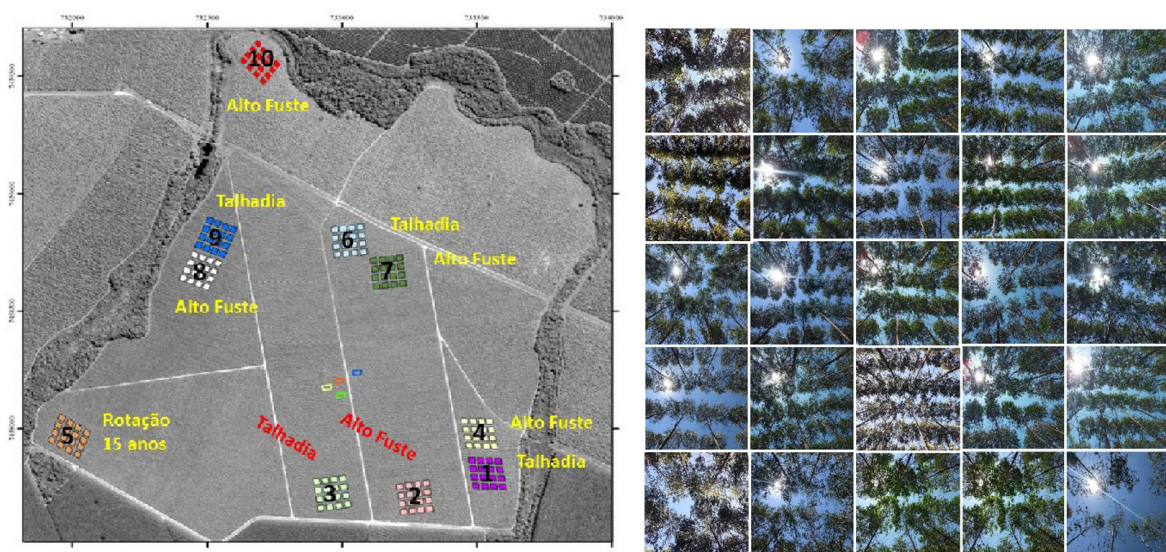


Figura 4. Mapa do teste de genótipos do EUCFLUX e fotos do dossel dos 25 materiais genéticos em sistema de alto fuste (outubro 2021).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Attia, A., Nouvellon, Y., Cuadra, S., Cabral, O., Laclau, J.-P., Guillemot, J., Campoe, O., Stape, J.-L., Galdos, M., Lamparelli, R., le Maire, G., 2019. Modelling carbon and water balance of Eucalyptus plantations at regional scale: Effect of climate, soil and genotypes. *For. Ecol. Manage.* 449. doi:10.1016/j.foreco.2019.117460
- Campoe, O.C., Stape, J.L., Laclau, J.P., Marsden, C., Nouvellon, Y., 2012. Stand-level patterns of carbon fluxes and partitioning in a Eucalyptus grandis plantation across a gradient of productivity, in São Paulo State, Brazil. *Tree Physiol.* 32, 696–706. <https://doi.org/10.1093/treephys/tps038>
- Christina, M., Nouvellon, Y., Laclau, J., Stape, J.L., Bouillet, J., Lambais, G.R., Maire, G., 2017. Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. *Funct. Ecol.* 31, 509–519.
- le Maire, G., Guillemot, J., Campoe, O.C., Stape, J.-L., Laclau, J.-P., Nouvellon, Y., 2019. Light absorption, light use efficiency and productivity of 16 contrasted genotypes of several Eucalyptus species along a 6-year rotation in Brazil. *For. Ecol. Manage.* 449. doi:10.1016/j.foreco.2019.06.040
- Marsden, C., Nouvellon, Y., Laclau, J.-P., Corbeels, M., McMurtrie, R.E., Stape, J.-L., Epron, D., le Maire, G., 2013. Modifying the G'DAY process-based model to simulate the spatial variability of Eucalyptus plantation growth on deep tropical soils, *Forest Ecology and Management*, 301: 112–128.
- Pinheiro, R.C., MS; Deus Jr, J. C., Nouvellon, Y., Campoe, O.C., Stape, J.L., Alo, L.L., Guerrini, I. A., Jourdan, C., Laclau, J.-P., 2016. A fast exploration of very deep soil layers by Eucalyptus seedling and clones in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 366:143–152.

Capítulo 2

Interações entre a nutrição das árvores e o estresse hídrico nas plantações de eucaliptos

Laclau J-P, Gonçalves JLM, Christina M., Guillemot J, le Maire G, Moreira R, Nouvellon Y, Bouillet J-P

INTRODUÇÃO

As empresas florestais brasileiras têm ampla experiência da resposta dos eucaliptos aos aportes de fertilizantes através de numerosas experiências em múltiplos locais (em particular no âmbito do programa PTSM do IPEF), mas também através da observação do comportamento das árvores em uma ampla gama de solos em plantações comerciais. O trabalho da CIRAD tem se concentrado em certos processos ecofisiológicos pouco conhecidos que podem explicar a resposta das árvores em diferentes contextos de solo e clima.

As relações entre a nutrição em potássio das árvores e seu funcionamento hídrico foram intensamente estudadas pela combinação de diferentes abordagens (experimentação, modelagem, genômica) que proporcionaram resultados muito consistentes. Estes resultados são importantes num contexto de mudança climática onde a fertilização das árvores pode ser uma alavanca importante para melhorar a adaptação a secas mais frequentes e intensas.

INFLUÊNCIA DA ADUBAÇÃO COM NITROGÊNIO (N) E POTÁSSIO (K) SOBRE O PRAZO DE VIDA DAS FOLHAS: CONSEQUÊNCIAS NA PRODUÇÃO DE BIOMASSA

Inventários sucessivos, amostragem destrutiva de árvores e coleta de folheto tornaram possível avaliar o efeito da fertilização com N e K sobre a dinâmica do acúmulo de biomassa em componentes de árvores acima do solo (Laclau et al., 2019).

Enquanto os efeitos da fertilização com N sobre o crescimento das árvores só ocorreram nos primeiros 24 meses após o plantio, a fertilização com K multiplicou por 2 a produção primária líquida acima do solo durante os primeiros 36 meses após o plantio (Figura 1).

A vida média das folhas não foi modificada pela adição de N, mas aumentou de 111 para 149 dias com a fertilização com K. O pico de produção de folhas ocorreu no segundo ano após o plantio (cerca de 8 t ha⁻¹ ano⁻¹) e não foi modificado significativamente pela fertilização N ou K. Embora a deficiência de K não afetasse a produção total de folhas, muitas folhas caíram rapidamente, resultando em baixa biomassa foliar em árvores em pé. A adição de K aumentou significativamente a biomassa das folhas nas árvores em pé, principalmente como consequência do aumento do prazo de vida das folhas.

A fertilização com potássio aumentou a biomassa total acima do solo principalmente através do aumento do índice de área foliar. Esses estudos mostraram uma forte adaptação da vida foliar do eucalipto em resposta à deficiência nutricional, com importantes consequências na captação de luz e alocação de carbono entre os órgãos das árvores (Laclau et al., 2019; Epron et al., 2020). Um melhor entendimento dos processos fisiológicos que regem a vida das folhas é necessário para melhorar os modelos baseados em processos atualmente utilizados nas plantações de eucaliptos.

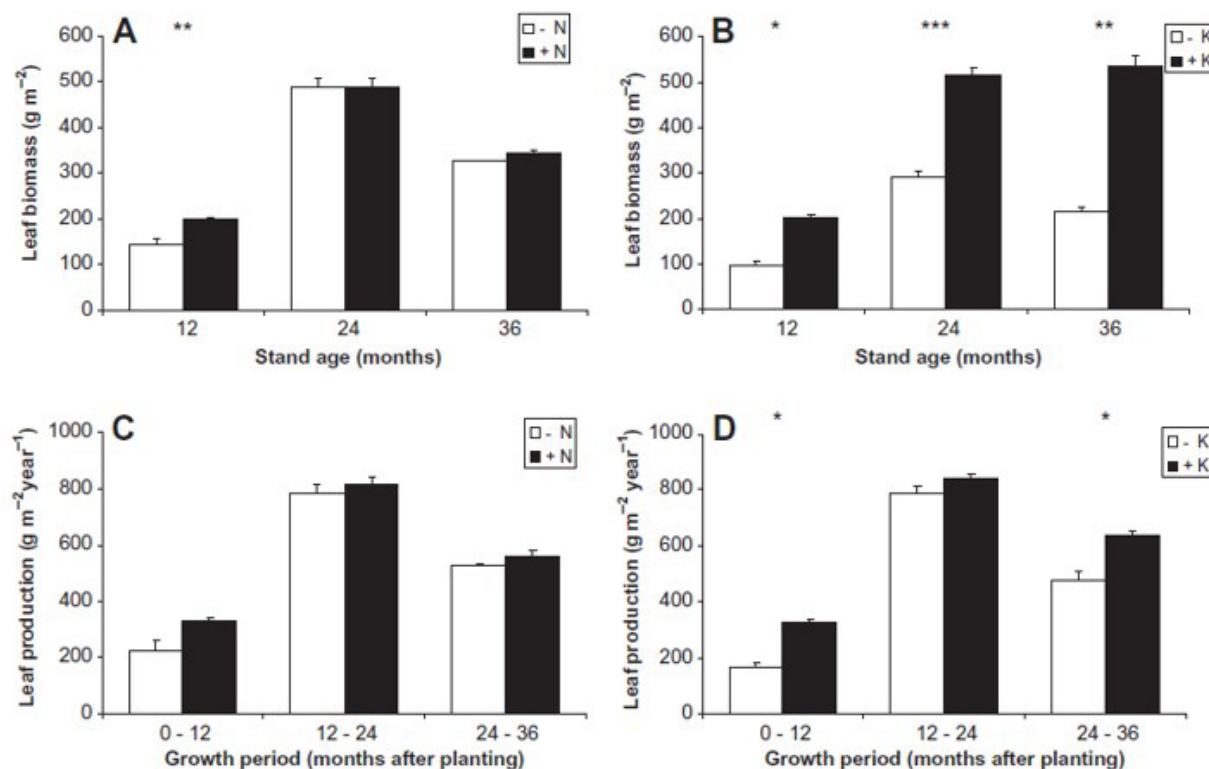


Figura 1. Dinâmica da biomassa foliar, produção foliar e porcentagem da produção de biomassa acima do solo destinada à produção de folhas no experimento estudando a resposta ao N (A e C, respectivamente) e no experimento estudando a resposta ao K (B e D, respectivamente). As diferenças significativas em cada idade são indicadas por * $P < 0,05$, ** $P < 0,01$ e *** $P < 0,001$.

INTERAÇÕES ENTRE A DISPONIBILIDADE DE ÁGUA E AS NECESSIDADES DE POTÁSSIO DAS ÁRVORES

Uma compreensão básica dos efeitos nutricionais sobre os mecanismos envolvidos na resposta das árvores à seca será essencial sob um clima mais seco no futuro. Um experimento de exclusão foi instalado em Itatinga (estado de São Paulo) para avaliar os efeitos da nutrição em potássio (K) e em sódio (Na) nos ajustes estruturais e fisiológicos das árvores para o déficit hídrico. Independentemente do abastecimento de água, o fornecimento de K e Na aumentou muito o crescimento e a área foliar (LAI) de árvores de *Eucalyptus grandis* durante os primeiros 3 anos após o plantio.

Excluindo 37% de precipitação, o acúmulo de biomassa acima do solo foi reduzido no terceiro ano após o plantio somente para as árvores adubadas com K. As árvores eram pouco sensíveis à seca devido à utilização de água armazenada em camadas profundas do solo após o corte raso da plantação anterior. As árvores se adaptaram à restrição da água através do fechamento dos estômatos, ajuste osmótico e diminuição no LAI. Além disso, as concentrações de açúcar no floema das árvores aumentaram durante as épocas secas. O fornecimento de K e Na aumentou a condutividade máxima dos estômatos, e as altas necessidades de água de árvores fertilizadas aumentou o estresse hídrico durante os períodos secos. Um estudo de genômica funcional (baseado em RNAseq) sobre amostras de câmbio e folhas no mesmo experimento mostrou resultados consistentes com marcadores de estresse hídrico muito mais fortes em árvores fertilizadas com K do que em árvores não fertilizadas (Ployet et al., 2019).

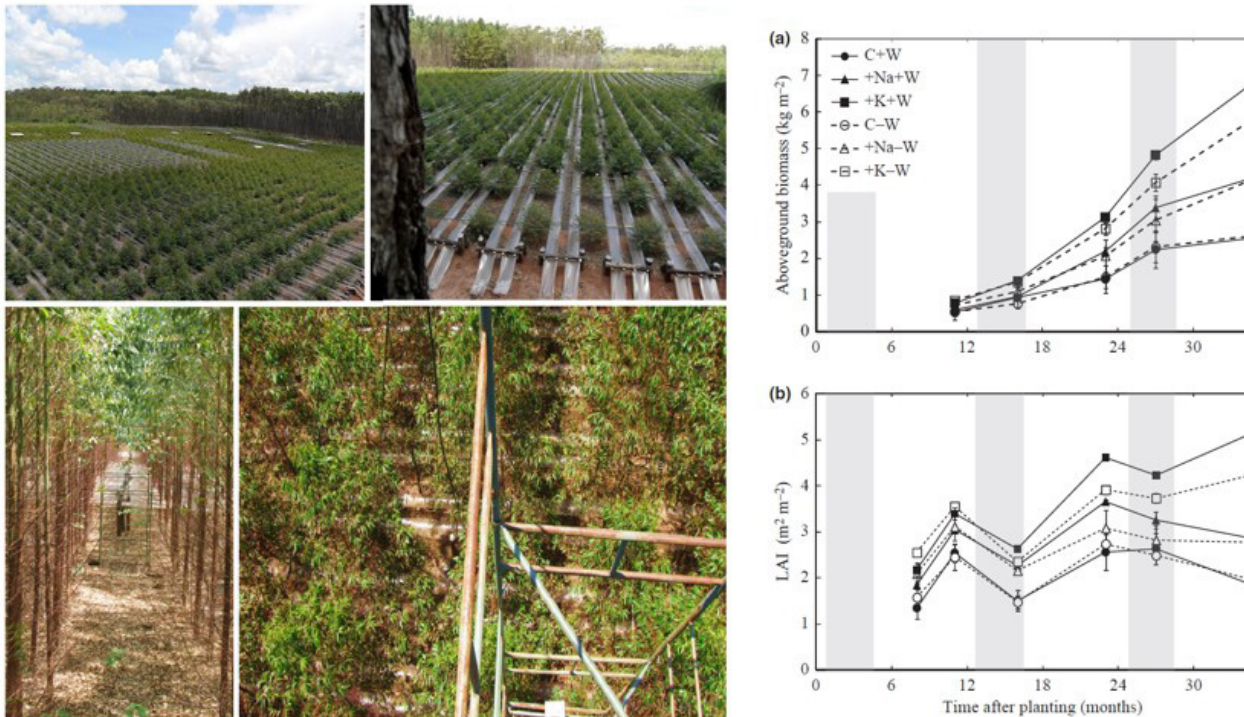


Figura 2. Experimento de exclusão de chuva em grande escala conduzido na Estação Experimental de Itatinga da Universidade de São Paulo no Brasil, aos 222 dias (fotos superiores) e 855 dias (fotos inferiores) após o plantio de *Eucalyptus grandis*. Biomassa acima do solo (a) e índice de área foliar (LAI) (b) das árvores *Eucalyptus grandis* durante os primeiros 3 anos após o plantio. C, +Na e +K referem-se às árvores do tratamento controle, adubadas com sodio (Na) e adubadas com potássio (K), respectivamente. +W e -W referem-se à precipitação não perturbada e exclusão de 37% da precipitação total, respectivamente. As áreas sombreadas representam a estação seca (julho-outubro).

Os regimes de fertilização devem ser revisitados em um futuro clima mais seco, a fim de encontrar o equilíbrio certo entre a melhoria das árvores crescimento e limitação da escassez de água.

Um modelo baseado em processos (MAESPA) foi parametrizado em um experimento de exclusão por precipitação para avaliar os efeitos combinados da deficiência de K e da redução da precipitação (37% de exclusão por precipitação) sobre a produção de biomassa, a eficiência na utilização da luz, a água utilizada pelas árvores, e as flutuações do lençol freático durante os primeiros 5 anos após o plantio.

A abordagem de modelagem mostrou que a nutrição K e o déficit de água influenciaram essencialmente a radiação absorvida através de mudanças no índice de área foliar e na altura das árvores. As mudanças na produtividade primária bruta e na eficiência do uso de água foram, entretanto, impulsionadas por um conjunto mais complexo de parâmetros das árvores, especialmente aqueles que controlam a captação de água pelas raízes e as capacidades fotossintéticas das folhas.

Uma comparação da transpiração do dossel em cada parcela com os valores previstos para o mesmo solo com o teor de água mantido na capacidade do campo, permitiu calcular um índice de estresse hídrico das árvores para cada tratamento. Em comparação com as árvores fertilizadas com K com chuva não perturbada (+K+W), a transpiração da copa foi 40% menor para a deficiência de K (-K+W), 20% menor para o déficit de W (+K-W) e 36% menor para o déficit de K e W combinados (-K-W) em média. A água foi retirada em camadas mais

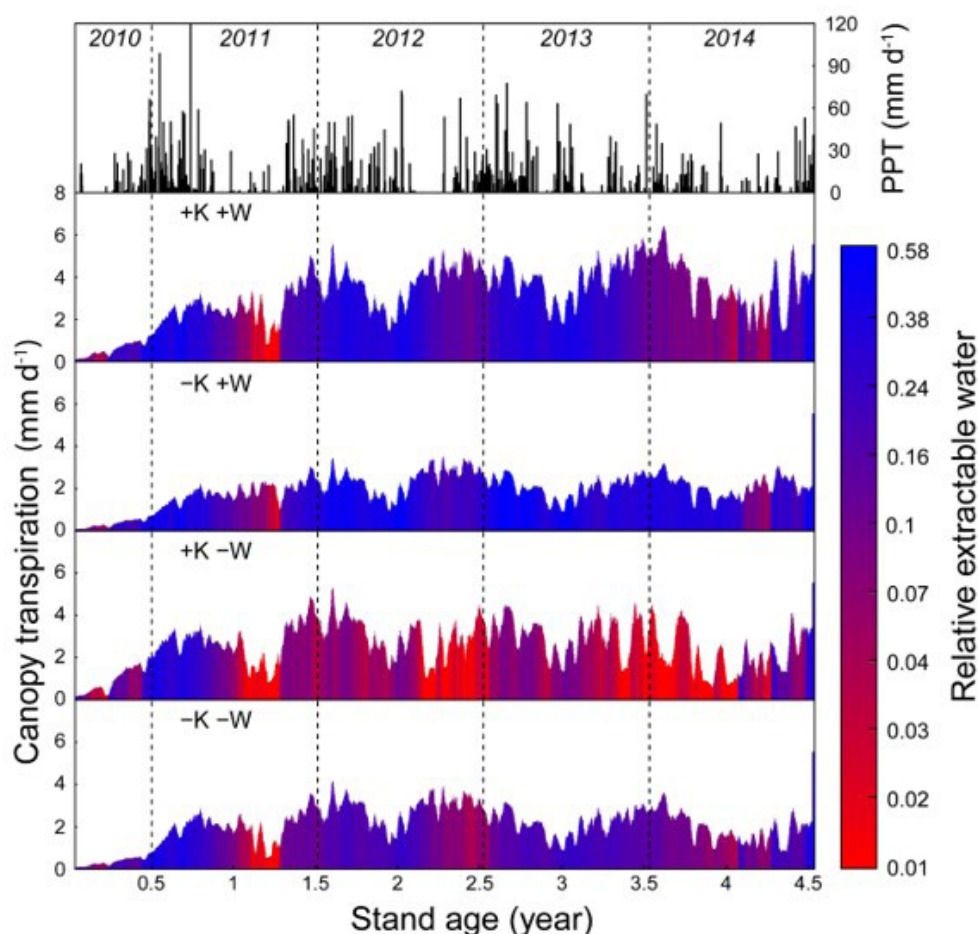


Figura 3. Transpiração de copa em parcelas de *Eucalyptus grandis* durante 4,5 anos após o plantio. -K e +K são para as árvores K-deficientes e K-fornecidas, respectivamente. +W e -W são para as chuvas não perturbadas e exclusão de 37% da precipitação total, respectivamente. O índice diário de estresse hídrico do solo, ISWS_d é mostrado como um gradiente de cor (vermelho para transpiração limitado pelo conteúdo de água do solo, e azul para transpiração não limitada). A precipitação diária (PPT) durante o período de estudo é mostrada no gráfico superior.

profundas do solo para -W do que para +W, particularmente durante as estações secas. Sob o contraste da disponibilidade de K, a retirada de água foi mais superficial para -K do que para +K. O teor médio de água no solo até 18 m abaixo da superfície foi 24% mais alto para -K+W do que para +K+W a partir de 2 anos após o plantio (após o fechamento da copa), enquanto foi 24% menor para +K-W e 12% menor para -K-W do que para +K+W. O índice de estresse hídrico das árvores acionadas pelo solo foi 166% mais alto durante os primeiros 4,5 anos após o plantio para -W do que para +W, 76% mais baixo para -K do que para +K, e 14% mais baixo para -K-W do que para +K+W. Durante o período do estudo, a infiltração profunda foi maior em 371 mm yr⁻¹ (+122%) para -K do que para +K e menor em 200mm yr⁻¹ (-66%) para -W do que para +W. A infiltração profunda foi menor em 44% para -K-W do que para +K+W. Ao final do período de estudo, o modelo previu um lençol freático superior para -K (10 m de profundidade para -K+W e 16 m para -K-W) do que para +K (16 m de profundidade para +K+W e 18 m para +K-W). Nosso estudo sugere que regimes flexíveis de fertilização poderiam contribuir para ajustar os trade-off entre a produção de madeira e a demanda de recursos hídricos do solo em florestas plantadas.

CONCLUSÃO

Esse trabalho melhorou muito nossa compreensão das interações entre a fertilização com potássio e a demanda de água no eucalipto. Em particular, revelou um maior estresse hídrico em árvores fertilizadas com K do que em árvores não fertilizadas, apesar de um melhor controle da perda de água nas folhas. O grande aumento da área foliar e a alta transpiração das árvores que limita a recarga das camadas profundas do solo na estação chuvosa explicam a sensibilidade das árvores fertilizadas a secas excepcionais que poderiam levar à mortalidade das árvores se as raízes não tivessem acesso a um lençol freático nos primeiros 20 m de solo. Outros estudos seriam interessantes para entender melhor o papel do K no funcionamento das árvores, em particular sua influência sobre o potencial osmótico das raízes e sua capacidade de absorver água, a condutividade hidráulica do tronco, etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida J.C.R., Laclau J.-P., Gonçalves J.L.M., Ranger J., Saint-André L., 2010. A positive growth response to NaCl applications in *Eucalyptus* plantations established on K-deficient soils. *Forest Ecology and Management*, 259, 1786-1795.
- Asensio V., Domec J.C., Nouvellon Y., Laclau J.-P., Bouillet J.-P., Jordan-Meille L., Lavres J., Rojas J.D., Guillemot J., Habreu-Junior C.H., 2020. Potassium fertilization increases hydraulic redistribution and water use efficiency for stemwood production in *Eucalyptus grandis* plantations. *Environmental and Experimental Botany*, 176, 104085.
- Battie-Laclau P., Delgado-Rojas J.S., Christina M., Nouvellon Y., Bouillet J.-P., Piccolo M.C., Moreira M.Z., Gonçalves J.L.M., Roupsard O., Laclau J.-P., 2016. Potassium fertilization increases water-use efficiency for stem biomass production without affecting intrinsic water-use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. *Forest Ecology and Management*, 364, 77-89. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.01.004>
- Battie-Laclau P., Laclau J.-P., Domec J.-C., Christina M., Bouillet J.-P., Piccolo M.C., Gonçalves J.L.M., Moreira R.M., Krusche A.V., Nouvellon Y., 2014. Effect of potassium and sodium supply on drought-adaptative mechanisms in *Eucalyptus grandis* plantations. *New Phytologist*, 203, 401-413.
- Battie-Laclau P., Laclau J.-P., Beri C., Mietton L., Muniz M.R.A., Arenque B.C., Piccolo M.C., Jordan-Meille L., Bouillet J.-P., Nouvellon Y., 2014. Photosynthetic and anatomical responses of *Eucalyptus grandis* leaves to potassium and sodium supply in a field experiment. *Plant, Cell & Environment*, 37, 70-81.
- Battie-Laclau P., Laclau J.-P., Piccolo M.C., Arenque B.C., Beri C., Mietton L., Muniz M.R.A., Vazami B.K., Jordan-Meille L., Buckeridge M.S., Nouvellon Y., Ranger J., Bouillet J.-P., 2013. How does potassium and sodium nutrition influence leaf area and its components in *Eucalyptus grandis* trees? *Plant and Soil*, 371, 19-35.
- Christina M., le Maire G., Nouvellon Y., Vezy R., Bordron B., Battie-Laclau P., Gonçalves J.L.M., Delgado-Rojas J.S., Bouillet J.-P., Laclau J.-P., 2018. Simulating the effects of different potassium and water supply regimes on soil water content and water table depth over a rotation of a tropical *Eucalyptus grandis* plantation. *Forest Ecology and Management*, 418, 4-14.
- Christina M., Le Maire G., Battie-Laclau P., Bouillet J.-P., Nouvellon Y., Jourdan C., Gonçalves J.L.M., Laclau J.-P., 2015. Measured and modeled interactive effects of potassium and water deficiencies on photosynthesis and light use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. *Global Change Biology*, 21(5), 2022-2039.
- Cornut I., le Maire G., Laclau J.-P., Guillemot J., Mareschal L., Nouvellon Y., Delpierre N., 2021. Potassium limitation of wood productivity : A review of elementary processes and ways forward to modelling illustrated by *Eucalyptus* plantations. *Forest Ecology and Management*, 494, 119275.
- Demarchi G., Subervie J., Leite F.P., Laclau J.-P., 2021. Farmers' preferences for water-saving strategies in Brazilian eucalypt plantations. *Forest Policy and Economics*, 128, 102459.
- Epron D., Laclau J.-P., Almeida J.C.R., Gonçalves J.L.M., Ponton S., Sette Jr C.R., Delgado-Rojas J.S., Bouillet J.-P., Nouvellon Y., 2012. Do changes in carbon allocation account for the growth response to potassium and sodium applications in tropical *Eucalyptus* plantations? *Tree Physiology*, 32, 667-679.
- Favreau B., Pereira da Silva H., Franceschini L.M., Denis M., Ployet R., Mounet F., Carrer H., Laclau J.P., Labate C., 2019. Distinct leaf transcriptomic response of water deficient *Eucalyptus grandis* submitted to potassium and sodium fertilization. *PLoS One* 14(6)
- Gonçalves J.L.M., Alvares C.A., Ferraz S.F.B., Lima W.P., Higa A.R., Silva L.D., Alfenas A.C., Stahl J., Brancalion P.H.S., Hubner A., Bouillet J.-P., Laclau J.-P., Nouvellon Y., Epron D., 2013. Joining genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in eucalypt plantations of Brazil. *Forest Ecology and Management*, 301, 6-27.

- Guillemot J., Asensio V., Bordron B., Nouvellon Y., le Maire G., Bouillet J.-P., Domec J.-C., Delgado Rojas J.S., Abreu-Junior C.H., Battie-Laclau P., Cornut I., Germon A., Gonçalves J.L.M., Robin A., Laclau J.-P., 2021. Increased hydraulic constraints in Eucalyptus plantations fertilized with potassium. *Plant Cell Environ.*, 1–13
- Laclau J.-P., Ranger J., Gonçalves J.L.M., Maquère V., Krushe A.V., M'Bou Thongo A., Nouvellon Y., Saint-André L., Bouillet J.-P., Piccolo M.C., Deleporte P., 2010. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical Eucalyptus plantations. Main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. *Forest Ecology and Management*, 259, 1771-1785.
- Laclau J.P., Almeida J.C.R., Gonçalves J.L.M., Saint-André L., Ventura M., Ranger J., Moreira R.M., Nouvellon Y., 2009. Influence of nitrogen and potassium fertilization on leaf life span and allocation of above-ground growth in Eucalyptus plantations. *Tree Physiology*, 29, 111-124.
- Ployet R., Veneziano Labate M.T., Reggiani Cataldi T., Christina M., San Clemente H., Favreau B. Tomazello Filho M., Laclau J.-P., Labate C.A., Chaix G., Grima-Pettenati J., Mounet F., 2019. Water deficiency and potassium supply trigger interconnected signals to modulate wood formation in Eucalyptus grandis. *New Phytologist*, 1-17, doi: 10.1111/nph.15802
- Pradier C., Hinsinger P., Laclau J.-P., Bouillet J.-P., Guerrini I. A., Gonçalves J.L.M., Asensio V., Abreu-Junior C.H., Jourdan C., 2017. Rainfall reduction impacts rhizosphere biogeochemistry in eucalypts grown in a deep Ferralsol in Brazil. *Plant Soil*, 414, 339–354.

Capítulo 3

Raízes profundas em plantações de eucalipto

Robin, A., Bordron, B., Bouillet, J.-P., Christina, M., Lambais, G. R.,
Pradier, C., Germon, A., Pinheiro, R.I.C., Gonçalves, J.L.M.,
Guerrini, I.A., Laclau, J.-P., Jourdan, C.

INTRODUÇÃO

Um dos principais fatores limitantes ao crescimento das árvores em regiões tropicais é a deficiência nutricional em nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). A maioria dos nutrientes disponíveis está localizada na camada superior do solo nas plantações florestais, mas em solos altamente intemperizados e profundos (Laclau et al., 2010). Apesar disso, verifica-se que há nos horizontes profundos uma quantidade de nutrientes (K e Ca notadamente) que não pode ser desprezada (da Silva et al., 2011; Laclau et al., 2010). O estudo das raízes finas é uma maneira inovadora para compreendermos os processos desenvolvidos pelas árvores na busca de recursos. As raízes finas são tradicionalmente definidas como raízes não lenhosas com diâmetro ≤ 2 mm, elas diferem em forma e função, e desempenham um papel fundamental na ciclagem de água, nutrientes e carbono (Germon et al., 2020; McCormack et al., 2015; Pregitzer et al., 2002). A maioria das raízes de eucalipto no Brasil estão localizadas abaixo de um metro de profundidade (Laclau et al., 2013), por isso durante muito tempo, pouco se sabia sobre a importância das raízes profundas no funcionamento e crescimento das plantas. Nos quinze últimos anos, pesquisas inovadoras foram realizadas na estação experimental de Itatinga que permitem de o papel das raízes profundas no funcionamento das plantações de eucalipto.

MÉTODOS DE CAMPO PARA ESTUDAR AS RAÍZES FINAS EM PROFUNDIDADE

Técnicas de escavação e coletas sequenciais de solo ainda são os métodos mais usados (Figura 1A). Embora comumente usado, as escavações e abertura de trincheiras são limitadas ao primeiro metro e dificilmente podem chegar à mais de dois metros de profundidades. Além disso, trados mecânicos foram desenvolvidos para facilitar o amostrados das camadas mais profundas do solo (Figura 1B). Por exemplo Germon et al. (2019) coletaram amostras até 17 m de profundidade chegando ao nível do lençol freático. A amostragem volumétrica de raízes de árvores através de métodos de coleta com sonda usando os polígonos de voronoi (Razakamanarivo et al., 2012; Saint-André et al., 2005) é uma opção mais eficiente para o mapeamento de distribuição de raízes finas, em comparação com a abertura de trincheiras levando em consideração à distribuição heterogênea das raízes no solo. As diversas metodologias têm sido empregadas para quantificar a biomassa e a dinâmica de crescimento em profundidade das raízes finas das plantações de eucalipto (Christina et al., 2011; da Silva et al., 2011; Germon et al., 2018; Lambais et al., 2017; Germon et al., 2019; Bordron et al., 2021), sendo que grande parte desses estudos utilizam métodos destrutivos para obtenção dos resultados. Métodos não destrutivos diretos para estudar sistemas de raízes como MiniRizotrons (MR) e “janelas de raízes” têm a vantagem de permitir a observação repetida de locais específicos no perfil do solo que foi utilizado em trincheiras de concreto permanentes (Figura 1C). Além disso existe também métodos indiretos como o uso marcadores que são utilizados para estimar a capacidade potencial de absorção das raízes em diferentes profundidades do solo (da Silva et al., 2011; Bordron et al., 2019; Pinheiro et al 2019) (Figura 1D).



Figura 1. Ilustrações de diferentes métodos de campo para estudar raízes profundas. (A) Abertura de trincheiras, (B) trado mecanizado, (C) trincheiras de concreto até 17 m de profundidade com janelas de observações, instalação de tubos de MiniRizotrons e de seringas para coletar gases (CO_2 , N_2O e CH_4), (D) aplicações de marcadores ($\text{NO}_3^{-15}\text{N}$, Rb^+ , Sr^{2+}) à diferentes profundidades no solo.

RAÍZES FINAS EM PROFUNDIDADE

Raízes finas profundas são definidas como raízes que crescem abaixo de 1 metro e que podem fornecer acesso à água e nutrientes onde as raízes das camadas superiores não conseguem alcançar. No Brasil, mais de 50% das plantações de eucalipto estão localizadas solos tropicais são solos altamente intemperizados, com alto grau de lixiviação e baixa fertilidade natural (Gonçalves et al., 2013). Esse tipo de solo são profundos, sem camada de impedimento facilitando assim os estudos sobre o crescimento radicular nos horizontes mais profundos (Christina et al., 2011; Laclau et al., 2013). Nas plantações de eucalipto no Brasil foram encontradas cerca de 60% das raízes muito finas (< 1 mm de diâmetro) abaixo de 1 m de profundidade a partir de um ano de idade e até o final da rotação (Laclau et al., 2013). As árvores de eucalipto exploram rapidamente as camadas de solo mais profundas (Christina et al., 2011;). Estudos mostraram a existência de raízes finas até 13 m de profundidade aos 2 anos (Pinheiro et al., 2016) e a 17 m de profundidade (nível do lençol freático) aos 3,5 anos de idade (Christina et al., 2011). Christinas et al. (2011) mostrou que a altura das árvores e as taxas de crescimento da frente da raiz evoluem de forma muito simétrica (Figura 2).

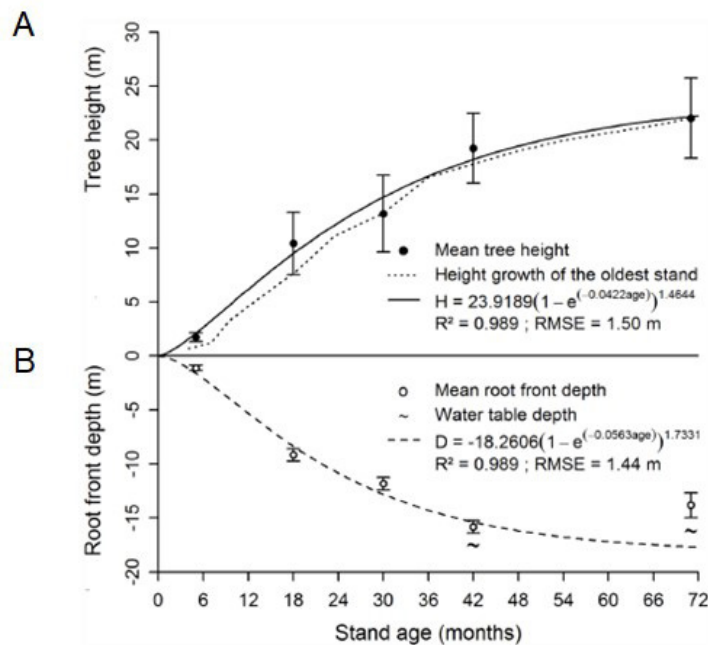


Figura 2. Crescimento da árvore em altura (A) e em profundidade (B) ao longo de uma rotação completa de eucalipto (6 anos), Christinas et al. (2011).

A exploração das raízes finas durante os primeiros meses após o plantio dos horizontes profundos do solo pode fornecer uma vantagem competitiva para espécies de crescimento rápido em florestas estabelecidas em solos profundos. Uma diminuição da precipitação anual aumenta a profundidade média de retirada de água do solo, diminui o teor de água residual do solo em camadas profundas do solo e leva a uma queda do nível do lençol freático (Guillemot et al., 2021). O impacto negativo da diminuição da precipitação anual sobre os recursos hídricos do solo foi menor nas parcelas com árvores deficientes em K do que nas parcelas fertilizadas com K. As raízes finas impedem as perdas de nutrientes por drenagem (Laclau et al., 2010), sendo assim, importantes para a absorção de nutrientes (da Silva et al., 2011; Bordron et al., 2019; Pinheiro et al. 2019). As raízes finas profundas também melhoram a tolerância das árvores à seca e armazenam C em camadas de solo profundas (Laclau et al., 2013). Pinheiro et al. (2016) cita a importância para programas de melhoramento genético na eucaliptocultura, e o considera estratégico para explicar diferentes taxas de sobrevivência de clones em períodos secos. Clones com um desenvolvimento radicular mais profundo passam a ter acesso a uma reserva de água maior no solo quando comparados a clones com desenvolvimento radicular mais superficial.

ABSORÇÃO DE NUTRIENTES DAS RAÍZES FINAS EM PROFUNDIDADE

Uma forma de verificar a capacidade de absorção das raízes finas em diferentes profundidades do solo é por meio da técnica de marcadores, aplicando isótopos estáveis ou elementos análogos em diferentes profundidades. Após um período é recolhido folhas jovens recentemente expandidas das árvores para verificar como ocorreu a absorção em cada profundidade marcada (da Silva et al., 2011). Alguns fatores devem ser considerados para a aplicação dos marcadores: 1) os marcadores devem estar bem diluídos e sua aplicação deve ser uniforme; 2) a quantidade disponível de raízes marcadas deve ser previsível com relação a processos concorrentes, como imobilização microbiana e adsorção do solo; e 3) é necessário um breve conhecimento da capacidade de absorção do marcador por raízes em

comparação com outro nutriente do solo (Maeght et al., 2013). Estudos recentes apontam que a especialização das raízes finas de *Eucalyptus grandis* na captação de nutrientes pode ocorrer em camadas superficiais e profundas. Da Silva et al. (2011) estudando raízes finas de eucalipto em plantações jovens em diferentes profundidades e utilizando marcadores de ^{15}N , Sr^{2+} (análogo do Ca^{2+}) e Rb^{+} (análogo do K^{+}) mostraram que há uma especialização funcional das raízes finas, e que elas aumentam a eficiência de captação de Ca e K em camadas profundas em relação à camada superficial de solo. Assim como as árvores adultas, as raízes finas de árvores jovens de *E. grandis* mostram taxas de absorção potencial contrastantes com profundidade dependendo do nutriente o que é reforçado pela aplicação de fertilizantes que permitiram uma maior absorção de potássio e cálcio por unidade de comprimento de raiz nas camadas profundas do solo em comparação com árvores não fertilizadas (Bordron et al., 2019). Esses resultados sugerem que a especialização funcional das raízes finas para a absorção de nutrientes é uma característica estável do eucalipto que pode ser reforçada pela aplicação de fertilizantes (Bordron et al., 2019). Grandes diferenças na densidade de ramificação de raízes muito finas e associação com simbioses micorrízicas podem desempenhar um papel importante na absorção profunda de nutrientes (Figura 3). Robin et al. (2019) demonstraram pela primeira vez usando sequenciamento molecular que simbioses ectomicorrízicas ocorreram com raízes de *Eucalyptus grandis* a uma profundidade de 4 m o que pode ter consequências na absorção de nutrientes pelas raízes profundas.

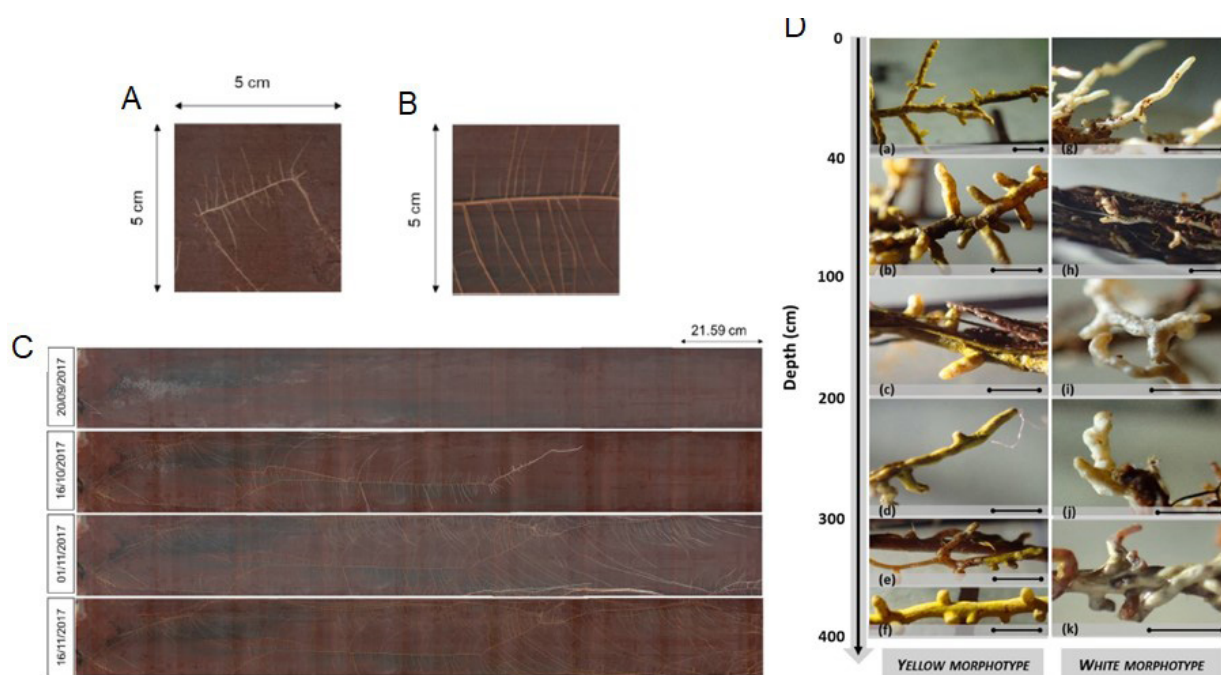


Figura 3. Imagens de raízes finas de eucalipto no solo superficial (A) e à 11,5 m de profundidade (B) em tubos de miniRizotron instalados em trincheiras profundas permanentes no Brasil. As imagens mostram grandes diferenças na densidade de ramificação das raízes muito finas (< 1 mm de diâmetro). A velocidade de exploração das camadas profundas do solo neste estande é mostrada escaneando o mesmo tubo minirizotron de 1,8 m de comprimento inserido a 11,5 m de profundidade de 20 de setembro de 2017 à 16 de novembro de 2017 (C). Adaptado de Germon et al. (2020). Fotos de raízes com ectomicorrízicas amostradas até 4 metros de profundidade em uma plantação de *Eucalyptus grandis* no Brasil (D). O morfotipo amarelo (a–f) foi identificado molecularmente como *Pisolithus* spp. e o morfotipo branco (g–k) como *Scleroderma* spp. Adaptado de Robin et al. (2019).

CONCLUSÃO

Atualmente, as informações sobre a importância de raízes profundas no funcionamento da planta e dos ecossistemas, através dos ciclos hidrológicos e bioquímicos, continuam escassas em comparação com a parte aérea da planta. Essa situação parece estar relacionada a dois fatores principais: i) limitações tecnológicas e econômicas, para coletar e analisar medir raízes com rendimento suficiente; ii) a suposição difundida que as raízes representam uma parte marginal das plantas. Apesar das raízes profundas representarem uma fração relativamente pequena do total da biomassa do sistema radicular, as pesquisas desenvolvidas no Brasil mostram as raízes finas profundas possuem um papel muito mais importante do que tem sido sido descritas. Estudos recentes indicam claramente que “um olhar mais profundo” é essencial para aumentar nosso entendimento da ecofisiologia da planta, bem como da ecologia das comunidades e dos ciclos biogeoquímicos. Assim, as raízes profundas são de primeira importância para melhorar o manejo das plantações florestais de eucalipto e, principalmente, na questão da resistência ao estresse seca.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bordron, B., Germon, A., Laclau, J.P., Oliveira, I.R., Robin, A., Jourdan, C., Paula, R.R., Pinheiro, R.C., Guillemot, J., Gonçalves, J.L.M., Bouillet, J.P., 2021. Nutrient supply modulates species interactions belowground: dynamics and traits of fine roots in mixed plantations of *Eucalyptus* and *Acacia mangium*. *Plant Soil* 460, 559–577. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04755-2>
- Bordron, B., Robin, A., Oliveira, I.R., Guillemot, J., Laclau, J.P., Jourdan, C., Nouvellon, Y., Abreu-Junior, C.H., Trivelin, P.C.O., Gonçalves, J.L.M., Plassard, C., Bouillet, J.P., 2019. Fertilization increases the functional specialization of fine roots in deep soil layers for young *Eucalyptus grandis* trees. *For. Ecol. Manage.* 431, 6–16. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.018>
- Christina, M., Laclau, J. P., Gonçalves, J. L. M., Jourdan, C., Nouvellon, Y., and Bouillet, J. P. (2011). Almost symmetrical vertical growth rates above and below ground in one of the world's most productive forests. *Ecosphere* 2, 1-10.
- da Silva, E. V., Bouillet, J. P., Gonçalves, J. L. D., Abreu, C. H., Trivelin, P. C. O., Hinsinger, P., Jourdan, C., Nouvellon, Y., Stape, J. L., and Laclau, J. P. (2011). Functional specialization of *Eucalyptus* fine roots: contrasting potential uptake rates for nitrogen, potassium and calcium tracers at varying soil depths. *Functional Ecology* 25, 996-1006.
- Germon, A., Guerrini, I. A., Bordron, B., Bouillet, J. P., Nouvellon, Y., Gonçalves, J. L. D., Jourdan, C., Paula, R. R., and Laclau, J. P. (2018). Consequences of mixing *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* trees on soil exploration by fine-roots down to a depth of 17 m. *Plant and Soil* 424, 203-220.
- Germon, A., Jourdan, C., Bordron, B., Robin, A., Nouvellon, Y., Chapuis-Lardy, L., Gonçalves, J. L. D., Pradier, C., Guerrini, I. A., and Laclau, J. P. (2019). Consequences of clear-cutting and drought on fine root dynamics down to 17 m in coppice-managed eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management* 445, 48-59.
- Germon, A., Laclau, J. P., Robin, A., and Jourdan, C. (2020). Tamm Review: Deep fine roots in forest ecosystems: Why dig deeper? *Forest Ecology and Management* 466, 118135.
- Guillemot, J., Asensio, V., Bordron, B., Nouvellon, Y., le Maire, G., Bouillet, J. P., Domec, J. C., Rojas, J. S. D., Abreu, C. H., Battie-Laclau, P., Cornut, I., Germon, A., Gonçalves, J. L. D., Robin, A., and Laclau, J. P. (2021). Increased hydraulic constraints in *Eucalyptus* plantations fertilized with potassium. *Plant Cell and Environment* 44, 2938-2950.
- Gonçalves, J.L.D.M., Alvares, C.A., Higa, A.R., Silva, L.D., Alfenas, A.C., Stahl, J., Ferraz, S.F.D.B., Lima, W.D.P., Brancalion, P.H.S., Hubner, A., Bouillet, J.P.D., Laclau, J.P., Nouvellon, Y., Epron, D., 2013. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. *For. Ecol. Manage.* 301, 6–27. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030>
- Laclau, J.-P., da Silva, E. A., Lambais, G. R., Bernoux, M., le Maire, G., Stape, J. L., Bouillet, J.-P., de Moraes Gonçalves, J. L., Jourdan, C., and Nouvellon, Y. (2013). Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m throughout the entire rotation in *Eucalyptus grandis* plantations. *Frontiers in Plant Science* 4.
- Laclau, J. P., Ranger, J., Gonçalves, J. L. D., Maquere, V., Krusche, A. V., M'Bou, A. T., Nouvellon, Y., Saint-Andre, L., Bouillet, J. P., Piccolo, M. D., and Deleporte, P. (2010). Biogeochemical cycles of nutrients in tropical eucalyptus plantations main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. *Forest Ecology and Management* 259, 1771-1785.
- Lambais, G. R., Jourdan, C., Piccolo, M. D., Germon, A., Pinheiro, R. C., Nouvellon, Y., Stape, J. L., Campoe, O. C., Robin, A., Bouillet, J. P., le Maire, G., and Laclau, J. P. (2017). Contrasting phenology of *Eucalyptus grandis* fine roots in upper and very deep soil layers in Brazil. *Plant and Soil* 421, 301-318.

- Maeght, J.-L., Rewald, B., Pierret, A., 2013. How to study deep roots-and why it matters. *Front. Plant Sci.* 4, 1–14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00299>
- McCormack, M. L., Dickie, I. A., Eissenstat, D. M., Fahey, T. J., Fernandez, C. W., Guo, D., Helmisaari, H.-S., Hobbie, E. A., Iversen, C. M., Jackson, R. B., Leppalammi-Kujansuu, J., Norby, R. J., Phillips, R. P., Pregitzer, K. S., Pritchard, S. G., Rewald, B., and Zadworny, M. (2015). Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes. *New Phytologist* 207, 505–518.
- Pinheiro, R. C., de Deus, J. C., Nouvellon, Y., Campoe, O. C., Stape, J. L., Alo, L. L., Guerrini, I. A., Jourdan, C., and Laclau, J. P. (2016). A fast exploration of very deep soil layers by Eucalyptus seedlings and clones in Brazil. *Forest Ecology and Management* 366, 143–152.
- Pinheiro, R.C., Bouillet, J.-P., Bordron, B., Aló, L.L., Costa, V.E., Alvares, C.A., Meersche, K. Van den, Stape, J.L., Guerrini, I.A., Laclau, J.-P., 2019. Distance from the trunk and depth of uptake of labelled nitrate for dominant and suppressed trees in Brazilian Eucalyptus plantations: Consequences for fertilization practices. *For. Ecol. Manage.* 447, 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.011>
- Pregitzer, K.S., DeForest, J.L., Burton, A.J., Allen, M.F., Ruess, R.W., Hendrick, R.L., 2002. Fine root architecture of nine North American trees. *Ecol. Monogr.* 72, 293–309. <https://doi.org/10.2307/3100029>
- Razakamanarivo, R.H., Razakavololona, A., Razafindrakoto, M.A., Vieilledent, G., Albrecht, A., 2012. Below-ground biomass production and allometric relationships of eucalyptus coppice plantation in the central highlands of Madagascar. *Biomass and Bioenergy* 45, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.020>
- Robin, A., Pradier, C., Sanguin, H., Mahé, F., Lambais, R. G., Pereira, A. P. A., Germon, A., Santana, M. C., Heuillard, P., Sauvadet, M., Bouillet, J. P., Andreote, F. D., Plassard, P., Gonçalves, J. L. M., Cardoso, E. J. B. N., Laclau, J. P., Hinsinger, P., and Jourdan, C. (2019). How deep can ectomycorrhizas go? A case study on *Pisolithus* down to 4 meters in a Brazilian eucalypt plantation. *Mycorrhiza* 29, 637–648.
- Saint-André, L., M'Bou, A.T., Mabiala, A., Mouvondy, W., Jourdan, C., Roupsard, O., Deleporte, P., Hamel, O., Nouvellon, Y., 2005. Age-related equations for above- and below-ground biomass of a Eucalyptus hybrid in Congo. *For. Ecol. Manage.* 205, 199–214. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.006>

Capítulo 4

Plantios consorciados de eucalipto e acácia: uma opção complementar às monoculturas de eucalipto?

Bouillet J.P, Gonçalves, J.L.M., le Maire G., Robin A, Paula R.R.,
Voigtländer M., de Oliveira I.R., Bordron B., Nouvellon Y., Laclau J.P

INTRODUÇÃO

No Brasil, plantações de eucalipto cobrem cerca de 7,6 milhões de hectares (IBGE, 2019). Para manter produtividades elevadas e sustentável durante as rotações, a fertilização é essencial (Gonçalves et al., 2013). A fertilização nitrogenada apresenta frequentemente uma forte resposta nos estágios iniciais de crescimento das árvores. Além disso, sem adubação nitrogenada, o balanço de N torna-se negativo colocando em risco a sustentabilidade das plantações de eucalipto (Laclau et al., 2010). No entanto, os fertilizantes nitrogenados têm um custo elevado (300-400 US\$ tonelada⁻¹ FOB de uréia em 2021), e o cenário é de uma tendência de aumento no médio e longo prazo. Por exemplo, o preço da uréia foi multiplicado por > 4 vezes entre 2001 e 2021 (<https://www.indexmundi.com/commodities>). Nessa perspectiva, a associação de espécies leguminosas fixadoras de N com eucaliptos é uma alternativa ao uso de fertilizantes. E, não somente para reduzir significativamente a fertilização nitrogenada, mas também diminuir a demanda de fertilizantes fosfatados, graças a uma melhor biodisponibilidade do P do solo (Waithaisong et al., 2020). Além disso, as interações ecológicas de facilitação e complementaridade entre as espécies pode levar, sob certas condições, a uma maior produção de biomassa em plantações mistas em relação às monoculturas (Forrester et al., 2006; Marron and Epron, 2019).

DESENHO E CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

Neste contexto, foi instalada uma rede de experimentos sobre plantios mistos no Brasil e no Congo em 2004 e 2005. O objetivo foi quantificar o funcionamento hídrico, de carbono e mineral das plantações consorciadas de *Eucalyptus grandis* ou *E. urophylla* * *grandis* com *Acacia mangium* em condições ecológicas contrastantes: Estação Experimental da USP-ESALQ (Itatinga - SP), empresa Suzano (Bofete - SP), empresa International Paper (Luiz Antonio - SP), empresa Cenibra (Santana de Paraíso - MG) e CRDPI (Pointe-Noire - Congo).

No período do estudo a precipitação média anual variou de 1130 mm a 1420 mm nos sítios estudados. Os locais cobriam uma faixa relativamente grande de temperaturas médias anuais (de 19,0°C na USP a 25,7°C no Congo), umidade atmosférica média (de 65-71% no Brasil a 81% no Congo) e duração da estação seca (de 2 meses na USP e Suzano a 4 meses no Congo). Os solos foram classificados como Ferralsols na USP, Cenibra e Suzano e Ferralic arenosols na International Paper (IP) e no Congo (classificação da FAO). O pH foi classificado como ácido (entre 4,5 e 5,8) com baixa quantidade de nutrientes disponíveis no solo em todos os locais analisados. Os solos diferiram em textura, com teores de argila variando de 10-15% no Congo e IP, a 50-70% na Cenibra. No Congo, os solos estudados são muito empobrecidos em N.

Os tratamentos foram instalados em 4 blocos: 1) 100A: *A. mangium*; 2) 100E: *Eucalyptus* com fertilização igual à de referência (sem N); 3) 100E+N: *Eucalyptus* com adubação igual à de referência (com N, similar as doses nas empresas da região); 4) 25A:100E: 100% de *Eucalyptus* + 25% de *A. mangium*; 5) 50A:100E: 100% de *Eucalyptus* + 50% de *A. mangium*;

6) 100A:100E: 100% de *Eucalyptus* + 100% de *A. mangium*; 7) 50A:50E: 50% de *Eucalyptus* + 50% *A. mangium*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os tratamentos aditivos (nA:100E) apresentaram uma produção total maior (+5% a +40%) no início da rotação em Itatinga, Cenibra e no Congo devido a uma complementaridade entre as espécies com maior área foliar total e maior captação da luz (le Maire et al., 2013) (Figura 1). Entretanto, nenhuma produção adicional foi observada no sítio da IP onde condições adversas (i.e. baixa, umidade do ar, estação seca marcada, solo arenoso e vento) levaram a um fraco crescimento da *A. mangium*. A maior produção (+170% em relação aos monocultivos de *Eucalyptus*) para 50A:50E foi observada apenas no Congo aos 34 meses após o plantio.

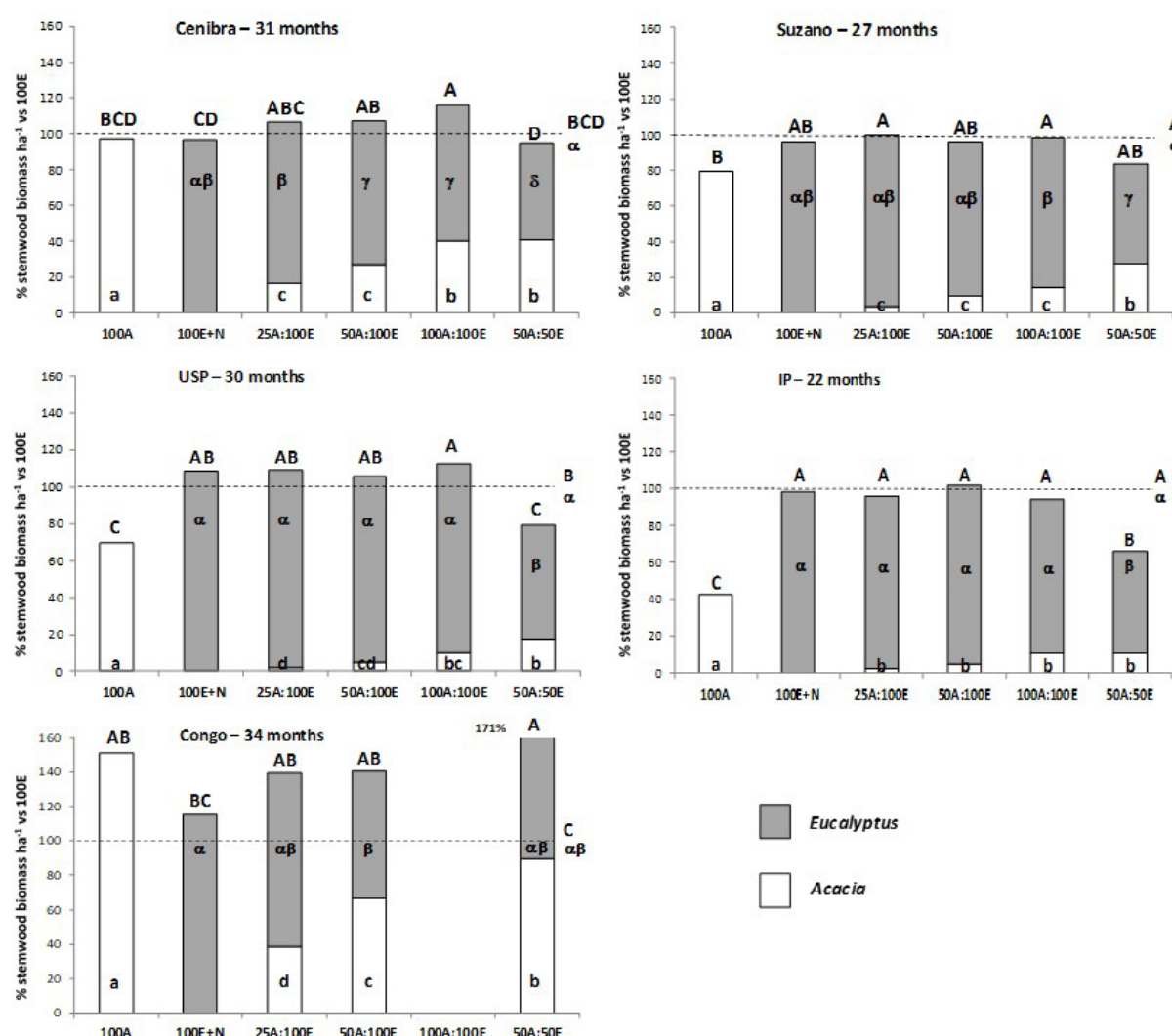


Figura 1. Porcentagem de biomassa do fuste no início da rotação em comparação com 100E, dependendo dos locais. Diferentes letras indicam diferenças significativas entre tratamentos ($P < 0,05$): a, b, etc. para biomassa do fuste de *A. mangium*; a, b, etc. para biomassa de tronco de eucalipto; A, B, etc. para biomassa total do fuste. O incremento médio de biomassa do fuste no 100E aos 22-34 meses de rotação do povoamento foi de 16,8, 17,8, 11,5, 8,7, e 4,6 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ na Cenibra, Suzano, USP, International Paper (IP) e Congo, respectivamente. As linhas tracejadas representam o tratamento 100E.

No Brasil, as plantações consorciadas não foram as mais produtivas aos seis anos de idade (Figura 2). O maior uso da água no início do plantio ocasionou uma forte competição intra- e interespecífica para este recurso no fim da rotação, acarretando em uma perda da produção adicional dos primeiros anos. Assim, nos 2 últimos anos da rotação, a eficiência de uso da luz foi menor nas plantações consorciadas 50A:50E em relação às monoculturas 100E e 100A (Nouvellon et al., 2012). Ao contrário, uma produção maior (+20% a +35%) foi observada no Congo nos plantios mistos aos 77 meses de idade. Nesta área uma parte significativa da chuva foi perdida por drenagem profunda nas monoculturas de eucaliptos, acarretando numa menor produção (Laclau et al., 2010).

Desta forma, observou-se uma complementaridade entre as espécies na rotação inteira, resultando em uma melhor captação dos recursos (luz e água) e uma maior produção

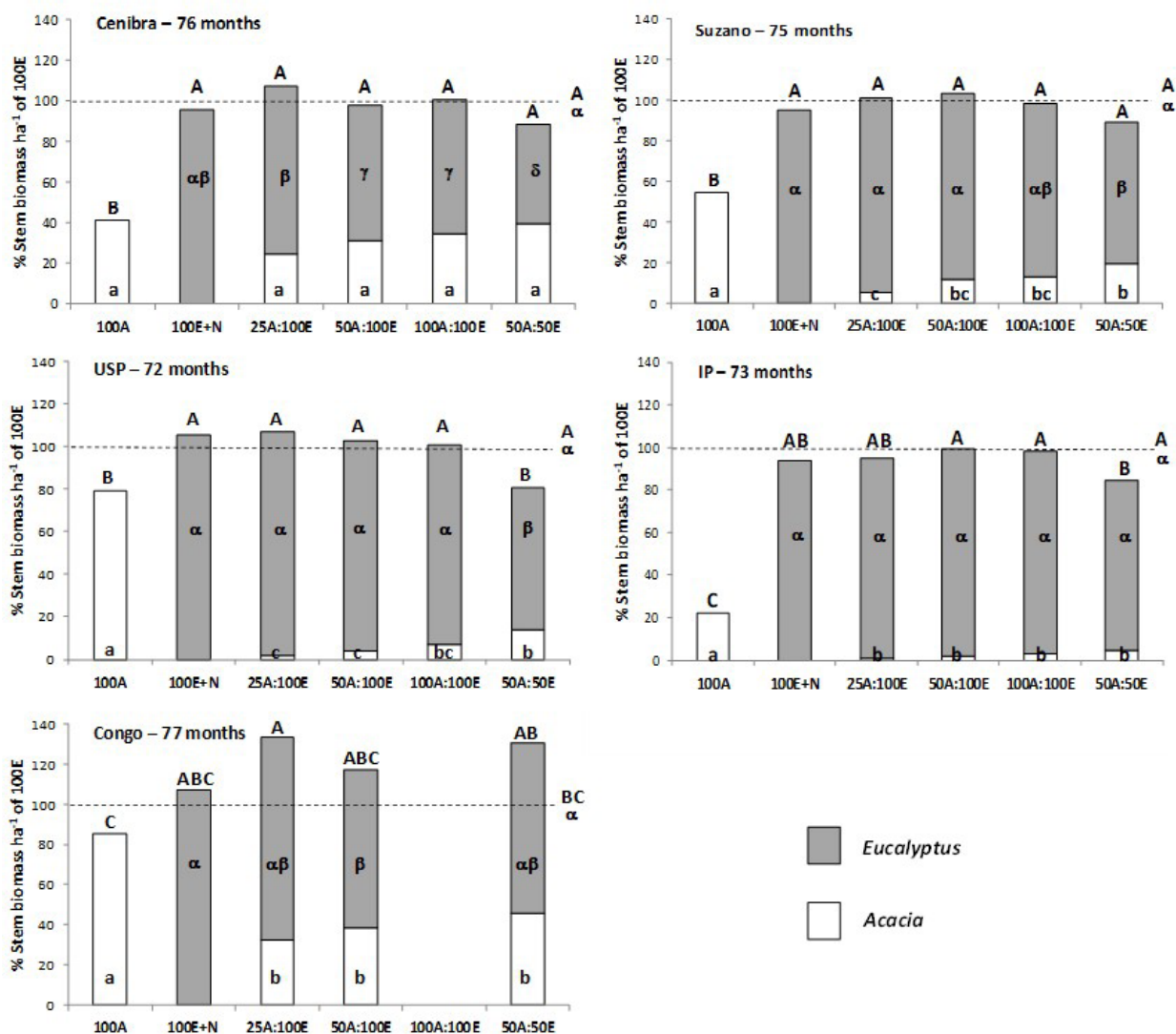


Figura 2. Porcentagem de biomassa do fuste no fim da rotação em comparação com 100E, dependendo dos locais. Diferentes letras indicam diferenças significativas entre tratamentos ($P < 0,05$): a, b, etc. para biomassa do fuste de *A. mangium*; a, b, etc. para biomassa de tronco de eucalipto; A, B, etc. para biomassa total do fuste. O incremento médio de biomassa do fuste no 100E aos 72-77 meses de rotação do povoamento foi de 20,8, 21,1, 18,2, 20,6, and 7,6 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ em Cenibra, Suzano, USP, International Paper (IP) e Congo, respectivamente. As linhas tracejadas representam o tratamento 100E.

dos povoamentos (Bouillet et al., 2013). Além disso, os eucaliptos puderam aproveitar da facilitação por meio da fixação biológica de N_2 pela *A. mangium* (Bouillet et al., 2008; Paula et al., 2018) e transferência de N (Paula et al., 2015; de Oliveira et al., 2021).

CONCLUSÃO

Os plantios mistos de *Eucalyptus* e *Acacia mangium* podem ser uma alternativa às monoculturas de eucaliptos, sobretudo em condições sub-ótimas e/ou marginais para o desenvolvimento do *Eucalyptus*, mas favoráveis para *A. mangium* (e.g. alta temperatura e umidade do ar; alta deficiência de nitrogênio no solo). Essas condições são observadas em algumas regiões do Brasil (Santos et al., 2016). O uso de espécies fixadoras de N_2 como a *A. mangium* é interessante para pequenos produtores que desejam e/ou precisam reduzir as despesas com adubação nitrogenada, e diversificar as oportunidades de mercado com a madeira e outros produtos não madeireiros. As empresas também podem se beneficiar desse sistema, se levarem em conta que as acácias Australianas (*A. mangium*, *A. crassicarpa*, *A. auriculiformis*) são altamente utilizadas no sudeste asiático para a produção de celulose (<https://www.aprilasia.com/en/our-media/articles/why-we-use-the-acacia-tree>; Haque et al., 2019).

Em adição, plantações mistas geram ambiente mais propício para a biodiversidade. Estudos mostraram que esses plantios aumentam a biodiversidade dos organismos aéreo e do solo, especialmente aqueles relacionados ao ciclo do nitrogênio (Perreira et al., 2017), melhorando a reciclagem de elementos minerais e o balanço de nutrientes (Santos et al., 2017; Voigtlaender et al., 2019). Um outro efeito da biodiversidade nas plantações florestais, é reduzir os riscos fitossanitários (Liu et al., 2018), e aumentar a resiliência das plantações florestais face às mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bordron, B., Germon, A., Laclau, J.P., Oliveira, I.R., Robin, A., Jourdan, C., Paula, R.R., Pinheiro, R.C., Guillemot, J., Gonçalves, J.L.M., Bouillet, J.P. Nutrient supply modulates species interactions belowground: dynamics and traits of fine roots in mixed plantations of *Eucalyptus* and *Acacia mangium*. *Plant Soil*, v. 460, p. 559-577, 2021.
- Bouillet J.P., Laclau J.P., Gonçalves J.L.M., Moreira M.Z., Trivelin P.C.O., Jourdan C., Silva E.V., Piccolo M.C., Tsai S.M., Galiana A. Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* in Brazil 2: Nitrogen accumulation in the stands and biological N_2 fixation. *Forest Ecology and Management*, v. 255, p. 3918-3930, 2008
- Bouillet J.-P.; Laclau J.-P.; Gonçalves J. L.M.; Voigtlaender M.; Gava J.L.; Leite F.P., Hakamada R.; Mareschal L.; Mabiala A.; Tardy F.; Levillain J.; Deleporte P.; Epron D.; Nouvellon Y. Eucalyptus and Acacia tree growth and stand production over a full rotation in single and mixed-species plantations across 5 sites in Brazil and Congo. *Forest Ecology and Management*, v. 301, p. 89 -101, 2013.
- Forrester, D.I., Bauhus, J., Cowie, A.L., Vanclay, J.K. Mixed-species plantations of Eucalyptus with nitrogen-fixing trees: a review. *For. Ecol. Manage.* V. 233, p. 211-230, 2006
- Gonçalves J.L.M., Alvares C.A., Ferraz S.F.B., Lima W.P., Higa AR, Silva L.D., Alfenas A.C., Stahl J., Brancalion P.H.S., Hubner A., Bouillet J.P., Laclau J.P., Nouvellon Y., Epron D. Joining genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in eucalypt plantations of Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 301, 6-27, 2013
- Haque M.M., Uddin N., Quaiyyum M.A., Nayeem J., Alam M.Z., Jahan M.S. Pulpwood Quality of the Second Generation *Acacia auriculiformis*. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, v.4, p. 73-79, 2019
- IBGE. Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2018. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, Brasil, 8 p, 2019.
- Laclau J.P., Ranger J., de Moraes Gonçalves J.L.M., Maquère V., Krusche A.V., Thongo M'Bou A., Nouvellon Y., Saint-André L., Bouillet J.P., de Cassia Piccolo M., Deleporte P. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical Eucalyptus plantations. Main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 259, 1771-1785, 2010
- le Maire G, Nouvellon Y, Christina M, Gonçalves JLM, Bouillet J.P., Laclau JP. Tree and stand light use efficiencies over a full rotation of mixed and pure *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* plantations. *Forest Ecology and Management*, v. 288, 31-42, 2013

- Liu C.C.L., Kuchma O., Krutovsky K.V. Mixed-species versus monocultures in plantation forestry: Development, benefits, ecosystem services and perspectives for the future. *Global Ecology and Conservation*, v. 15, e00419, 2018
- Marron N, Epron D. Are mixed-tree plantations including a nitrogen-fixing species more productive than monocultures? *Forest Ecology and Management*, v. 441, 242–252, 2019
- Nouvellon, Y., Laclau, J.P., Epron, D., Le Maire, G., Bonnefond, J.M., Gonçalves, J.L.M. and Bouillet, J.P. Production and carbon allocation in monocultures and mixed-species plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in Brazil. *Tree Physiol.*, 32(6): 680-695, 2012.
- de Oliveira, I.R, Bordron, B., Laclau, J.P, Paula, R.R, Ferraz, A.V., Gonçalves J.L.M, le Maire, G., Bouillet, J.P. Nutrient deficiency enhances the rate of short-term belowground transfer of nitrogen from *Acacia mangium* to *Eucalyptus* trees in mixed-species plantations. *Forest Ecology and Management*, v. 491, 119192, 2021
- Paula, R.R., Bouillet, J.P., Trivelin, P.C.O., Zeller, B., Gonçalves, J.L.M., Nouvellon, N., Bouvet, J.M., Plassard, C., Laclau, J.P. Evidence of short-term belowground transfer of nitrogen from *Acacia mangium* to *Eucalyptus grandis* trees in a tropical planted forest. *Soil Biology and Biochemistry* v. 91, p. 99-108, 2015
- Paula R.R., Bouillet J.P., Gonçalves J.L.M., Trivelin P.C.O. Balieiro F.C., Nouvellon Y., de Oliveira J.C., de Deus Júnior J.C., Bordron B., Laclau J.P. Nitrogen fixation rate of *Acacia mangium* Wild at mid rotation in Brazil is higher in mixed plantations with *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden than in monocultures. *Annals of Forest Science*, 75(1), 14, 2018
- Pereira, A.P.A., de Andrade, P.A.M., Bini, D., Durrer, A., Robin, A., Bouillet, J.P, Andreote, F.D., Cardoso, E.J.B.N. Shifts in the bacterial community composition along deep soil profiles in monospecific and mixed stands of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium*. *PloS One*, v. 12 (7), e0180371, 15 p, 2017
- Santos F.P., de Carvalho Balieiro F., dos Santos Ataíde D.H., Diniz A.R., Chaer G.M. Dynamics of aboveground biomass accumulation in monospecific and mixed-species plantations of *Eucalyptus* and *Acacia* on a Brazilian sandy soil. *Forest Ecology and Management*, v. 363, p. 86-97, 2016
- Santos F.P., Chaer G.M., Diniz A.R., de Carvalho Balieiro F. Nutrient cycling over five years of mixed-species plantations of *Eucalyptus* and *Acacia* on a sandy tropical soil. *Forest Ecology and Management*, v. 384, p. 110-121, 2017
- Voigtlaender, M, Brandani, C.B, Caldeira, D.R.M., Tardy, F., Bouillet, J.P, Gonçalves, J.L.M., Moreira, M.Z., Leite, F.P., Brunet, D., Paula, R.R., Laclau, J.P. Nitrogen cycling in monospecific and mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus* at 4 sites in Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 436, p. 56-67, 2019
- Waithaisong, K., Robin, A., Mareschal, L., Bouillet, J.P, Laclau, J.P., Deleporte, P., Gonçalves, J.L.D.M., Harmand, J.M., Plassard, C. Introducing N₂-fixing trees (*Acacia mangium*) in eucalypt plantations rapidly modifies the pools of organic P and low molecular weight organic acids in tropical soils. *Science of the Total environment*, v. 742, 140535, 2020

Capítulo 5

Processos de facilitação nos plantios consorciados de *Eucalyptus* e *Acacia mangium*

Bouillet J.P., Paula R.R., Bordron B., de Oliveira I.R., Voigtlaender M.,
Goncalves J.L.M., le Maire G., Robin A., Nouvellon Y., Laclau J.P.

INTRODUÇÃO

Os plantios mistos que associam espécies fixadoras de nitrogênio (EFN) com espécies não fixadoras de nitrogênio (não-EFN) podem ser uma opção para aumentar a produtividade do povoamento em relação às monoculturas, devido à um aumento e uma melhor eficiência no uso dos recursos. Isto pode ocorrer através da complementaridade entre espécies (e.g. alturas diferentes de copas para melhor captura de luz) ou da facilitação, que ocorre quando pelo menos uma espécie se beneficia de outra. No caso de uma associação com EFN, esta facilitação está ligada principalmente ao fornecimento de N para as não-EFN. Assim, as pesquisas realizadas pelo Cirad, USP e IPEF permitiram identificar e quantificar os principais processos envolvidos na associação entre *Eucalyptus* e *A. Mangium*.

FIXAÇÃO DE NITROGÊNIO

Itatinga (USP-Esalq)

A. mangium pode fixar nitrogênio, graças à simbiose de suas raízes com bactérias especializadas (rizóbio).

Um primeiro método, baseado na medição da Atividade de Redução de Acetileno (ARA) nos nódulos e usado como um proxy da atividade de redução do N_2 atmosférico, mostrou valores 3-4 vezes maiores aos 18 meses do que aos 30 meses (Bouillet et al., 2008). Um segundo método é o da diluição isotópica, que é baseado na diferença entre a razão isotópica $^{15}N/^{14}N$ do ar - uma espécie 100% fixadora tem uma assinatura isotópica $^{15}N/^{14}N$ próxima a este valor - e a razão de uma não-EFN, cujo valor é próximo ao do solo e dos fertilizantes aplicados.

Usando adubação enriquecida com ^{15}N , a percentagem estimada de N de *A. mangium* derivado da fixação simbiótica do ar (%Nd_{fa}) foi cerca de 60% em plantações mistas e puras (Bouillet et al., 2008). Entretanto, na segunda rotação, a %Nd_{fa} foi maior, entre 32 e 41 meses, em plantações mistas do que em plantios puros com valores médios de 44% e 14%, respectivamente (Paula et al., 2018). Os valores em %Nd_{fa} das acácias mudaram significativamente ao longo do ano (Figura 1).

A competição pelo N do solo, provavelmente levou a uma maior %Nd_{fa} em plantios mistos com eucaliptos do que na monocultura de *A. mangium*. Os menores valores de %Nd_{fa} na segunda rotação estão provavelmente relacionados com a maior disponibilidade de N no solo após uma primeira rotação (Voigtlaender et al., 2012).

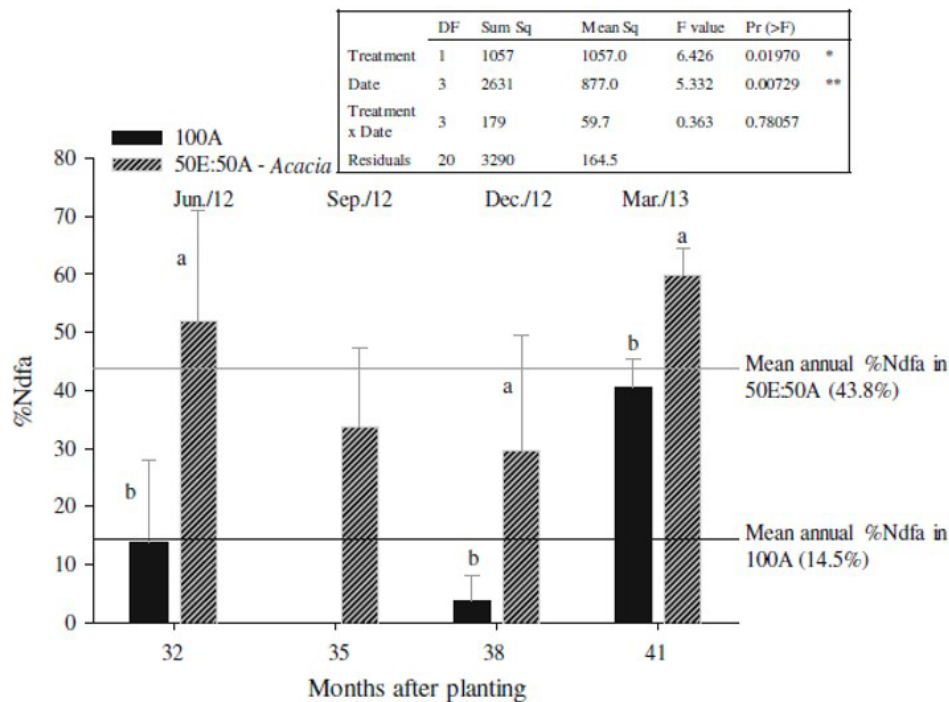


Figure 1. Variação sazonal da porcentagem de N derivado da fixação (%Ndfa) em *A. mangium* em plantios monoespecíficos (100A) e consorciados com *Eucalyptus grandis* (50E:50A-Acacia). As barras verticais indicam desvios padrão entre as árvores (n = 4). Letras diferentes indicam diferenças significativas em %Ndfa ($p < 0,05$) entre tratamentos em cada data de amostragem.

REDE DE PLANTIOS MISTOS (ESALQ-SP, SUZANO-SP, CENIBRA-MG)

O método de acreção, que compara os estoques de N em biomassa de árvores, serapilheira e solo entre ecossistemas, tornou possível estimar as quantidades de N fixadas durante uma primeira rotação de 6 anos em 250 kg N ha^{-1} em plantações mistas e 400 kg N ha^{-1} em plantações de *A. mangium* puras (Voigtlaender et al., 2019). Considerando as exportações de N com as árvores cortadas, o saldo líquido de N de uma plantação de *A. mangium* em comparação com uma monocultura de eucalipto foi de $\pm 200 \text{ kg N ha}^{-1}$.

AUMENTO DA DISPONIBILIDADE DE N

O aumento da entrada de N no ecossistema com *A. mangium* resulta em uma maior disponibilidade de N no solo para os eucaliptos associados, na qual está ligada a dois processos principais:

- A maior quantidade de N com a deposição de serapilheira em plantios mistos que em plantios puros de eucaliptos : + 30% em média entre 4 e 6 anos na Suzano-SP, Cenibra-MG e International Paper-SP. Esta maior entrada de N também é correlacionada com uma mineralização maior do N no solo : $130 \text{ vs } 100 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ nos plantios consorciados em relação aos puros (Voigtlaender et al., 2019)

- Transferência subterrânea de N da acácia para o eucalipto. Tal transferência de N de *A. mangium* marcada com solução de ^{15}N para eucaliptos vizinhos foi observada em poucos dias, pelo menos até 6,2 m de distância (Paula et al., 2015). Esta transferência pode ocorrer via exsudados radiculares ou redes ectomicorrízicas comuns em ambas as espécies (He, 2005). Esse processo pode contribuir significativamente para o fornecimento de N para o eucalipto e pode aumentar com a deficiência de N do solo (Figura 2) (de Oliveira et al., 2021)

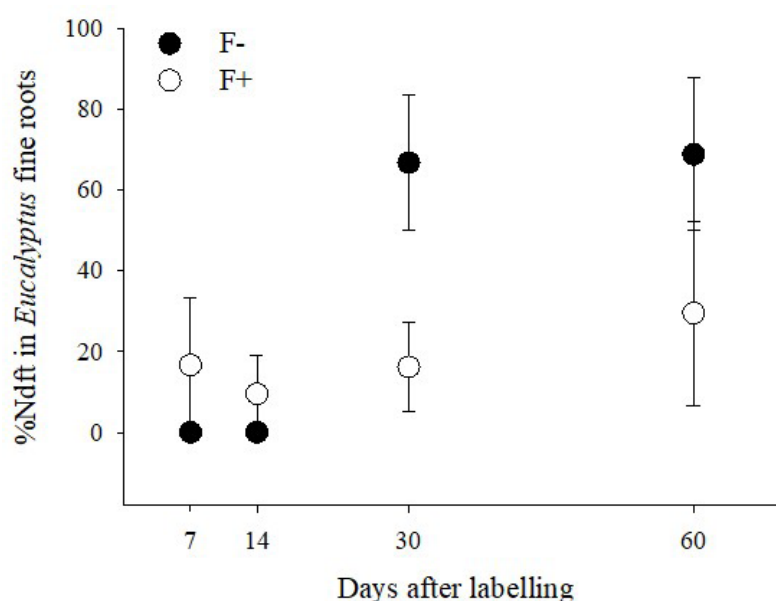


Figura 2. Estimativas da porcentagem de nitrogênio de eucalipto derivado de *A. mangium* (%Ndft) em 7, 14, 30 e 60 dias após a marcação ^{15}N de *Acacia* em plantios consorciados com *Eucalyptus grandis* com (F+) ou sem fertilização (F-). As barras verticais indicam erros padrão entre blocos (n=3). O valor médio de %NDFT durante o período de estudo de 60 dias foi de 17,96% em F+ e 33,85% em F-.

SISTEMA RADICULAR DOS EUCALIPTOS

O rápido e alto desenvolvimento radicular dos eucaliptos permite que eles aproveitem ao máximo a maior disponibilidade de N no solo. A forte competição das raízes finas dos eucaliptos levou à exclusão parcial das raízes de *Acacia* do solo superficial (Laclau et al., 2013), sendo que as raízes de acácia estão restritas ao pé da árvore (Bordron et al., 2021). Além disso, em plantios consorciados não fertilizados (F-) os eucaliptos se beneficiaram proporcionalmente de uma maior transferência de N das acácias abaixo do solo em relação aos plantios mistos fertilizados (F+), através de uma maior exploração das raízes finas dos eucaliptos perto das acácias. Aos 34 meses após o plantio, a densidade da massa das raízes finas dos eucaliptos na camada [0 – 0,15 m] foi maior próximo às acácias em F- do que em F+ (Bordron et al., 2021). O comprimento específico (razão entre o comprimento e a massa seca) das raízes finas dos eucaliptos também era maior em F- do que em F+ perto das acácias, aumentando o comprimento das raízes finas nessa área de solo enriquecido com N.

CONCLUSÃO

Os processos de facilitação de N em plantações mistas de *A. mangium* e *Eucalyptus* podem ser particularmente interessantes para limitar os custos de adubação para as empresas e/ou pequenos produtores. Essas plantações mistas também podem ser uma opção a ser favorecida para a recuperação de terras degradadas e/ou marginais (solos muito arenosos, deficiência de N elevada no solo, ...), como encontradas no RJ (Santos et al., 2017) ou no Congo (Tchichelle et al., 2019). Outra alternativa poderia ser alternar uma plantação de *Acacia* após várias rotações de eucaliptos para melhorar o funcionamento do N do ecossistema e contribuir assim para sua sustentabilidade a longo prazo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bordron, B., Germon, A., Laclau, J.P., Oliveira, I.R., Robin, A., Jourdan, C., Paula, R.R., Pinheiro, R.C., Guillemot, J., Gonçalves, J.L.M., Bouillet, J.P. Nutrient supply modulates species interactions belowground: dynamics and traits of fine roots in mixed plantations of *Eucalyptus* and *Acacia mangium*. *Plant Soil*, v. 460, p. 559-577, 2021.
- Bouillet J.P., Laclau J.P., Gonçalves J.L.M., Moreira M.Z., Trivelin P.C.O., Jourdan C., Silva E.V., Piccolo M.C., Tsai S.M., Galiana A. Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* in Brazil 2: Nitrogen accumulation in the stands and biological N₂ fixation. *Forest Ecology and Management*, v. 255, p. 3918-3930, 2008
- de Oliveira, I.R., Bordron, B., Laclau, J.P., Paula, R.R., Ferraz, A.V., Gonçalves J.L.M., le Maire, G., Bouillet, J.P. Nutrient deficiency enhances the rate of short-term belowground transfer of nitrogen from *Acacia mangium* to *Eucalyptus* trees in mixed-species plantations. *Forest Ecology and Management*, v. 491, 119192, 2021
- He, X., Critchley, C., Ng, H., Bledsoe, C. Nodulated N₂-fixing *Casuarina cunninghamiana* is the sink for net N transfer from non-N₂-fixing *Eucalyptus maculata* via an ectomycorrhizal fungus *Pisolithus* sp. using ¹⁵NH₄⁺ or ¹⁵NO₃⁻ supplied as ammonium nitrate. *New Phytologist*, v. 167, p. 897-912, 2005.
- Laclau, J-P., Nouvellon, Y., Reine, C., Gonçalves, J.L.M., Krushe, A.V., Jourdan, C., le Maire, G., Bouillet, J-P., 2013. Mixing *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* trees leads to fine root transgressive over-yielding and exclusion of the weakest competitor from resource-rich soil layers. *Oecologia*, v. 172 (3), p 903-913, 2013.
- Paula, R.R., Bouillet, J.P., Trivelin, P.C.O., Zeller, B., Gonçalves, J.L.M., Nouvellon, N., Bouvet, J.M., Plassard, C., Laclau, J.P. Evidence of short-term belowground transfer of nitrogen from *Acacia mangium* to *Eucalyptus grandis* trees in a tropical planted forest. *Soil Biology and Biochemistry* v. 91, p. 99-108, 2015
- Paula R.R., Bouillet J.P., Gonçalves J.L.M., Trivelin P.C.O. Balieiro F.C., Nouvellon Y., de Oliveira J.C., de Deus Júnior J.C., Bordron B., Laclau J.P. Nitrogen fixation rate of *Acacia mangium* Wild at mid rotation in Brazil is higher in mixed plantations with *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden than in monocultures. *Annals of Forest Science*, 75(1), 14, 2018
- Santos, F.M., Chaer, G.M., Diniz, A.R., Balieiro, F. de C. Nutrient cycling over five years of mixed-species plantations of *Eucalyptus* and *Acacia* on a sandy tropical soil. *Forest Ecology and Management*, v. 384, p. 110–121, 2017
- Tchichelle, S.V., Mareschal, L., Koutika, L.S., Epron, D. Biomass production, nitrogen accumulation and symbiotic nitrogen fixation in a mixed-species plantation of eucalypt and acacia on a nutrient-poor tropical soil. *Forest Ecology and Management*, v. 403, p. 103-111, 2017
- Voigtlaender M, Laclau J-P, Gonçalves JLM, Piccolo MC, Moreira MZ, Nouvellon Y, Ranger J, Bouillet J.P. Introducing *Acacia mangium* trees in *Eucalyptus grandis* plantations: consequences for soil organic matter stocks and nitrogen mineralization. *Plant Soil* v. 352, p. 99-111, 2012
- Voigtlaender, M, Brandani, C.B, Caldeira, D.R.M., Tardy, F., Bouillet, J.P, Gonçalves, J.L.M., Moreira, M.Z., Leite, F.P., Brunet, D., Paula, R.R., Laclau, J.P. Nitrogen cycling in monospecific and mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus* at 4 sites in Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 436, p. 56-67, 2019

Capítulo 6

Modelando o balanço de radiação e os ciclos de carbono e água nas plantações de eucalipto

Ile Maire Gueric, Attia Ahmed, Bouillet Jean-Pierre, Campoe Camargo Otávio, Christina Mathias, Cornut Ivan, Cuadra Santiago, Laclau Jean-Paul, Guillemot Joannès, Marsden Claire, Nouvellon Yann, de Oliveira Ivanka Rosada, Stape José Luiz, Vezy Rémi

INTRODUÇÃO

O balanço de carbono, água e energia de um ecossistema florestal, ou seja, a quantificação de todos os estoques e fluxos entre os compartimentos constituintes do sistema, é o resultado de uma série de processos que envolvem diferentes domínios científicos, em diferentes escalas de espaço e tempo (Bohn et al. 2014; Landsberg and Sands 2010). Uma floresta é um sistema complexo, onde ocorre e interage um grande número de processos físicos, biológicos e bioquímicos, eles próprios possivelmente modificados por intervenções externas. Os modelos mecanicistas são ferramentas de pesquisa muito úteis e complementares à experimentação em muitos aspectos: **1) Compreensão:** ajudar a compreender observações por vezes incompletas ou difíceis de interpretar directamente; procurar e apresentar uma base mecanicista para as relações empíricas; orientar a experimentação e a investigação; integrar dados por vezes muito numerosos e que interagem; **2) Descrição:** O modelo permite sintetizar o conhecimento, dar prioridade a diferentes processos, criar ligações entre variáveis e ter em conta interações e feedbacks, por vezes em diferentes campos de estudo; permite conceptualizar e partilhar conhecimento; quantificar variáveis que nem sempre são mensuráveis, mantendo os princípios físicos e as leis subjacentes. **3) Explorar:** Finalmente, quando o modelo tiver sido devidamente parametrizado e validado, pode ser usado para explorar quais parâmetros ou processos são os mais sensíveis; pode ser usado para realizar *em* experiências silicas, para testar hipóteses, ou para fazer previsões; pode ser uma ferramenta para ajudar na tomada de decisões. A previsão no sentido mais amplo é um importante propósito dos modelos mecanicistas, “compreender para prever”.

Nesse artigo, daremos alguns exemplos de trabalhos que têm sido realizados nas plantações de eucalipto no Brasil, graças à cooperação científica entre o IPEF e o CIRAD, com parceiros académicos ou privados do setor florestal. Os três tópicos tratam da simulação da interceptação de radiação, o ciclo da água e o ciclo do carbono

MODELAGEM DA INTERCEPÇÃO DE RADIAÇÃO

AZUL entre clones

A produtividade do tronco nos ecossistemas florestais depende da quantidade de luz absorvida pelas árvores (APAR) e da eficiência do uso da luz (LUE), ou seja, da quantidade de madeira do tronco produzida por quantidade de luz absorvida. Nas plantações de eucalipto fertilizado do Brasil, espera-se que o crescimento seja fortemente limitado pela absorção de luz nos primeiros anos após o plantio, quando as árvores podem beneficiar de altos estoques de água do solo, recarregados após o corte do talhão anterior. Outros factores limitantes, tais como a falta de água ou de nutrientes são considerados de importância crescente após o encerramento do dossel, e são esperadas mudanças

nos padrões de alocação, mudando o LUE. O estudo das mudanças em APAR e LUE ao longo de uma rotação completa é fundamental para se obter uma visão dos mecanismos que impulsionam as variações inter e intra-genótipos da produtividade e da biomassa do caule no momento da colheita. Em le Maire et al. (2019), apresentamos um levantamento de produtividade de 6 anos, juntamente com modelagem de APAR e LUE de 16 genótipos de eucalipto de diversas espécies utilizadas em plantações comerciais e plantadas em 10 replicações aleatórias na Região de São Paulo, Brasil. MAESPA é um modelo tridimensional. Foi parametrizado em escala de árvores para cada árvore em cada parcela (um total de 16.000 árvores) usando medidas locais de propriedades foliares e dossel. Os resultados na escala da parcela mostraram que:

- LUE aumentou com a idade do suporte para todos os genótipos, de 0,15, na idade de 1 ano para 1,70 g MJ⁻¹, aos 6 anos de idade em média;
- A absorção da luz foi um fator limitante importante durante o primeiro ano de crescimento (R² entre APAR e biomassa do povoamento variando de 0,5 a 0,95), explicando a maior parte da variabilidade de crescimento inter e intra-genótipo;
- Na escala de rotação, a variabilidade da biomassa do tronco final entre genótipos foi, em geral, atribuível a outros factores que APAR;
- Differences em produções de madeira entre genótipos permaneceu durante toda a rotação;
- Os LUEs durante a segunda metade da rotação, em vez do crescimento inicial ou APAR, foi o principal fator explicando a biomassa do tronco na data da colheita.

LUE de uma plantação mista Eucalipto - Acacia

O modelo MAESTRA também foi utilizado para analisar o crescimento de uma plantação mista entre *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* (le Maire et al. 2013). A idéia desta experiência é testar a complementaridade e/ou efeitos de facilitação entre espécies, já que a acácia é uma planta fixadora de nitrogênio. Um dos factores críticos nas plantações mistas é a partilha da luz. De facto, esta partilha de luz resulta numa diferença na fotossíntese, o que pode eventualmente levar a uma diferença no crescimento. A absorção de radiação depende de muitas características estruturais e ópticas das árvores: posição das árvores em relação aos seus vizinhos, índices foliares, ângulos foliares, propriedades ópticas das folhas, ramos e troncos, etc. Também é frequentemente impossível medir esta absorção ao nível da espécie e muito menos ao nível da árvore. Em um ensaio experimental, há também a questão dos efeitos de vizinhança entre tratamentos. A modelagem tridimensional pode ajudar a estimar a absorção de cada árvore e espécie dentro de uma experiência, e depois analisá-la como uma função do crescimento. O modelo MAESPA foi parametrizado utilizando numerosas medidas experimentais ao nível da folha ou da árvore em diferentes tratamentos. A radiação APAR de cada árvore do ensaio foi, portanto, calculada por MAESPA, para cada ano. Isto foi então relacionado com o crescimento anual medido das árvores, dando uma eficiência de uso leve para a produção de madeira do tronco (LUE). Nas plantações mistas, o LUE tanto do eucalipto como da acácia diminuiu no final da rotação, enquanto nas plantações puras era bastante estável. Este decréscimo é especialmente forte para as acácias mistas, com o LUE quase reduzida pela metade. Nas plantações mistas, esta diminuição do LUE explica a diminuição da produtividade enquanto o LAI total aumenta. Assim, embora o dossel absorva mais radiação, a produção é menor, já que outros fatores entram em jogo, como escassez de água ou mudanças de alocação, como mostrado nos papéis por Nouvellon et al. (2012) e Laclau et al. (2012).

MODELAGEM DO CICLO DA ÁGUA

Simulação na parcela do projeto Eucflux

O balanço hídrico de um povoamento de eucalipto no Brasil (sítio Eucflux) foi modelado com o modelo MAESPA. As medições da umidade do solo e da evapotranspiração por

correlação não são suficientes para compreender o funcionamento do ecossistema como um todo, a evolução das medições da altura dos lençóis freáticos, o papel das raízes profundas, nem permitem um balanço hídrico completo. O trabalho de modelagem tem dado muitas respostas e levado a uma melhor compreensão do funcionamento da água nas plantações de eucaliptos. Em Christina et al. (2017) o modelo é primeiro testado nos fluxos de evapotranspiração medidos pela torre, no teor de água do solo até 10 metros e na altura do lençol freático. As simulações para os primeiros 5 anos após o plantio são apresentadas na Figura 1 abaixo. As conclusões são as seguintes foram obtidas a partir do modelo (Figura 1):

- A evaporação do solo contribui muito pouco para a evapotranspiração da parcela, exceto no início da rotação, quando os eucaliptos ainda são pequenos e a copa não está fechada
- As amostras de raízes são colhidas principalmente nos primeiros 2 metros: o sistema radicular “duplo”, com uma alta densidade de raízes laterais superficiais usando água na estação chuvosa, e um número limitado, mas funcionalmente importante de raízes explorando o solo em profundidade e útil durante a estação seca (Canadell and Zedler 1995).
- No final da estação seca, quando o solo de superfície é seco, as raízes vão-se aprofundando progressivamente e permitem manter a produção bruta durante as estações secas, como se pode ver em outros trabalhos sobre ecossistemas tropicais (Alton 2014; Jackson et al. 1999; Oliveira et al. 2005)

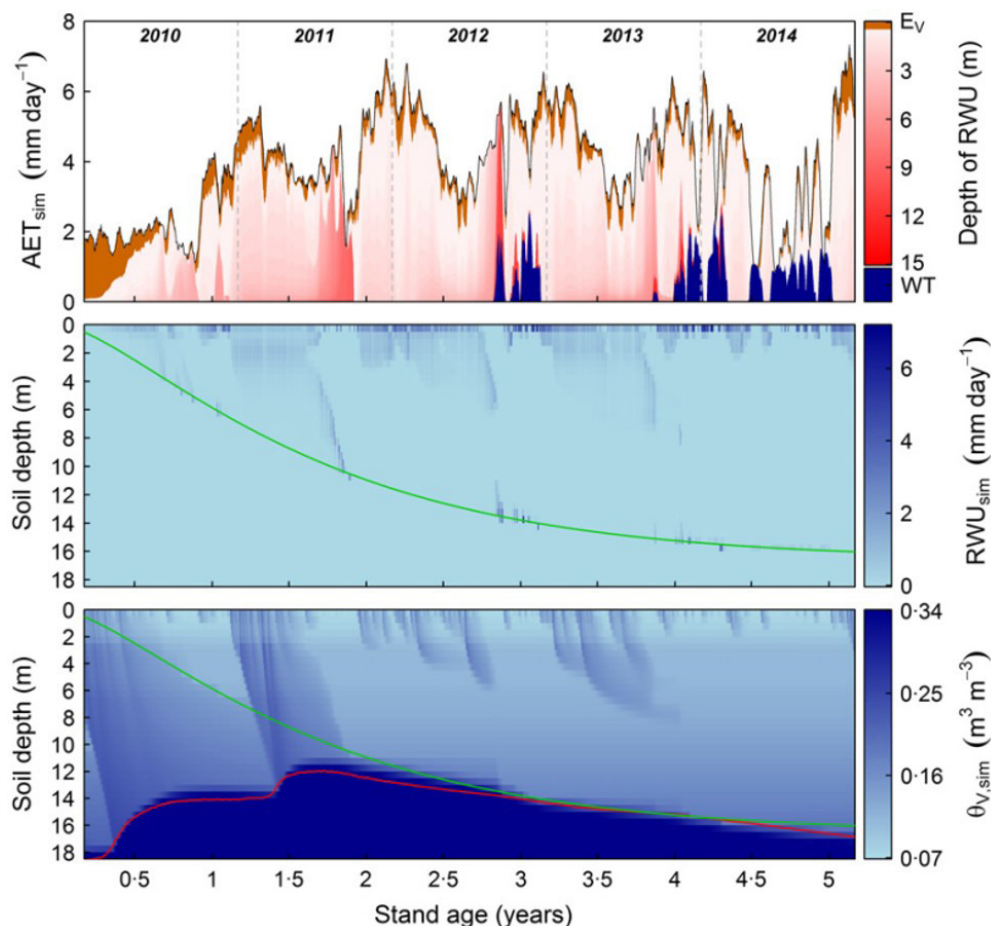


Figura 1. Resultado das simulações do balanço hídrico do MAESPA em Eucflux. AET_{sim} é a evapotranspiração diária simulada (topo), RWU_{sim} é a captação de água da raiz (meio), e θ_{v,sim} é o conteúdo de água do solo simulado (fundo). WT: lençol freático. Ev: evaporação do solo e da água na folhagem. A profundidade medida do lençol freático está em vermelho. A frente da raiz está em verde (extraído de Christina et al. 2017).

- No ano 2, as raízes atingiram o lençol freático (12 m) e podem eventualmente extrair-se dele ou das suas proximidades
- Após 2 anos, as chuvas que se infiltram no solo são gradualmente absorvidas pelas raízes e nunca chegam a mais de 6 metros.
- A água da chuva já não chega ao lençol freático, que por isso diminui tanto sob o efeito da retirada das raízes como sob a sua própria dinâmica à escala da bacia hidrográfica (fluxo subsuperficial). A remoção de raízes garante o acesso à água na estação seca, mas não constitui uma grande quantidade de água transpirada.
- O lençol freático sobe 6 metros durante 1.5 anos após o plantio, pois neste momento os eucaliptos ocupam menos água (menos área foliar, menos área radicular e perfil do solo mais raso), o que já foi observado em vários outros trabalhos (Adelana et al. 2015; Dean et al. 2015; Manzione et al. 2014; Smethurst et al. 2015)
- O rápido crescimento do sistema radicular em profundidade permite uma tripla vantagem adaptativa do ponto de vista hídrico (Reich 2014): 1) poder alcançar progressivamente um estoque de água acumulada no solo durante o corte e durante a primeira estação chuvosa; 2) ter tempo para absorver o fluxo de água gravitacional ao longo do perfil neste solo arenoso com regime de chuvas fortes; 3) poder eventualmente alcançar o lençol freático
- O crescimento profundo das raízes precede em grande parte a escassez de água, sendo uma característica comum das espécies pioneiras ou precoces sucessionais (*E. Grandis* tem as características destas espécies (Tng et al. 2014)).
- Os balanços anuais de transpiração são altamente variáveis, dependendo principalmente da idade da parcela e da variabilidade da pluviosidade. Após 2 anos, a evapotranspiração é igual ou até superior à precipitação.

Simulação na parcela de exclusão da chuva, cruzada com uma omissão de K

Modelagem do ciclo da água foi feito em um estudo silvicultural sobre um clone de eucalipto no Brasil cruzando dois tratamentos, exclusão da chuva (30%) e fertilização com potássio (Battie-Laclau et al. 2014). Essa experiência foi criada, entre outras coisas, para ver até que ponto a fertilização com potássio poderia influenciar o funcionamento dos eucaliptos com stress hídrico. Neste estudo, os índices foliares foram medidos durante a rotação, e pareceu que as grandes diferenças de produtividade entre os tratamentos estavam estatisticamente correlacionadas com esses índices foliares. No entanto, a relação causal não é óbvia, pois muitos outros traços funcionais mudam entre os tratamentos: parâmetros fotossintéticos das folhas, ângulos das folhas, perfis radiculares, etc. O modelo MAESPA foi utilizado para descobrir quais parâmetros, e, portanto, quais funções, explicam as maiores diferenças de produtividade (Christina et al. 2015). Uma vez parametrizada com precisão para cada tratamento, MAESPA permite estimar variáveis como a radiação absorvida no gráfico (aPAR), a eficiência do uso da luz (LUE) e a fotossíntese bruta (GPP) para cada tratamento, e assim verificar se as diferenças na produção vêm apenas das diferenças na radiação absorvida (como se poderia pensar com as análises indiretas do LAI). Os resultados mostram que a exclusão da chuva e a fertilização modificam significativamente tanto aPAR como LUE. Com o modelo, foi possível explicar com mais detalhes as diferenças entre tratamento: para cada variável aPAR, LUE e GPP, é possível ver qual o parâmetro (ou traço funcional) que mais explica as mudanças nestas variáveis em função dos tratamentos.

MODELAGEM DO CICLO DE CARBONO

Simulação do ciclo do carbono e crescimento da plantação

O modelo G'Day foi utilizado para simular espacialmente a produtividade da trama (Marsden et al. 2013). Esse trabalho consistiu em primeiro lugar na integração de novos processos no modelo G'Day, alguns dos quais são específicos dos eucaliptos (por exemplo, enraizamento profundo). Em seguida, o modelo foi parametrizado para simular o crescimento

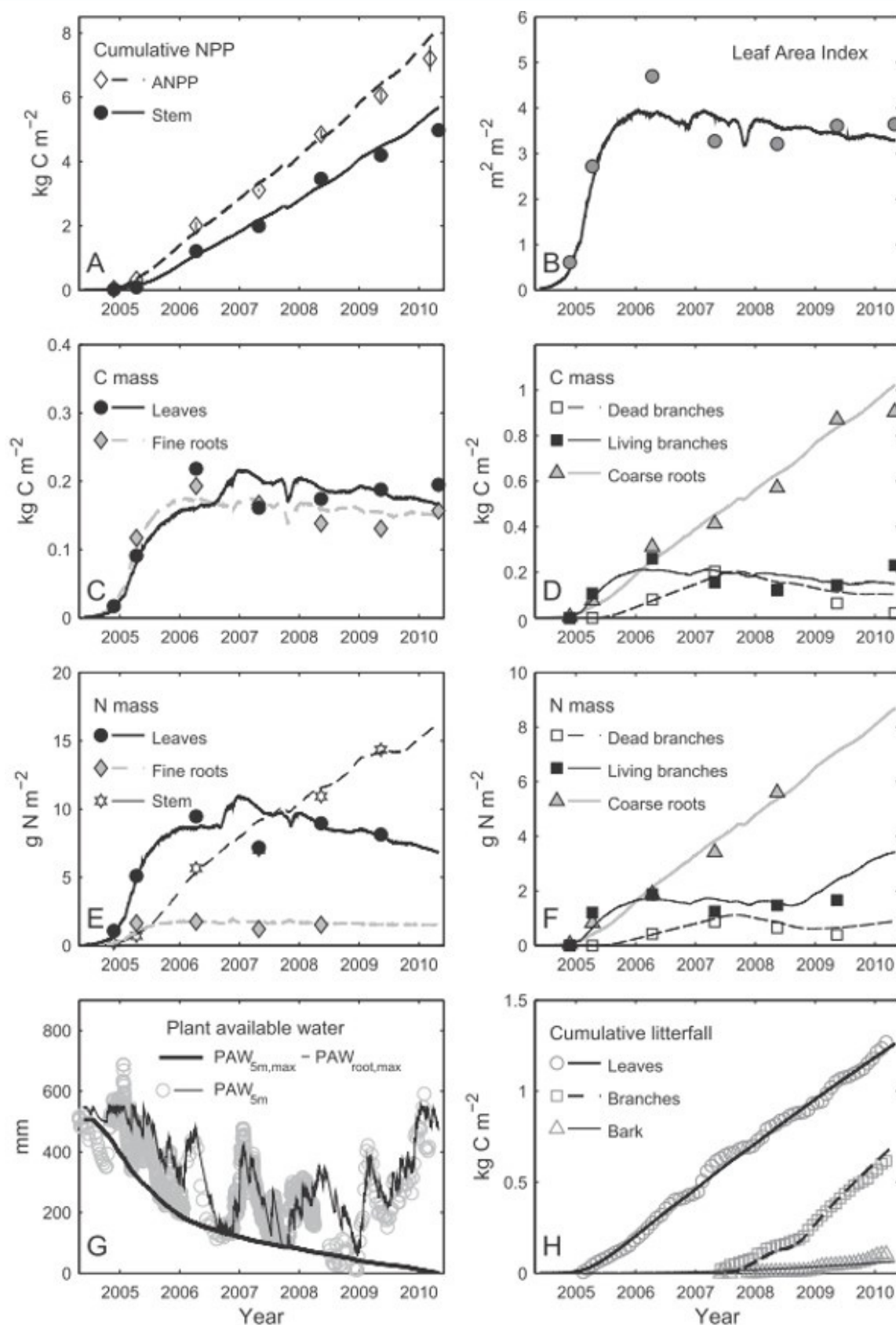


Figura 2. Comparação de simulações do modelo G'Day (linhas) e medidas (símbolos) em um terreno de eucalipto na estação Itatinga (São Paulo, Brasil). Adaptado de Marsden et al (2013)

destas parcelas desde a sua data de plantio (Figura 2). Neste caso, o número de variáveis espaciais foi menor. Neste sistema, a idade da parcela é o primeiro critério que determina a variabilidade espacial do funcionamento do carbono e da água da plantação. Além disso, a simples consideração das propriedades locais do solo no ciclo da água explica mais de 85% da variabilidade espacial do crescimento do tronco com o modelo. Os resultados iniciais obtidos com G'Day mostraram que foi possível forçar o índice de área foliar com medições via satélite para obter resultados satisfatórios (le Maire et al. 2010b). Após extenso trabalho no módulo de simulação do índice de área foliar, o modelo foi finalmente capaz de simular o índice de área foliar de forma mais eficiente, e assim não foi mais necessário forçar o índice de área foliar, aumentando assim sua genericidade.

Espacialização do modelo

A ‘espacialização’ dos fluxos e equilíbrios de carbono e água (e nutrientes) é uma demanda de aplicação importante, e um desafio científico. Em termos de aplicação, por exemplo na silvicultura, a integração do funcionamento específico de cada unidade de manejo para definir práticas adequadas está atualmente baseada principalmente na história da parcela e na experiência do silvicultor. A modelagem poderia permitir uma adaptação mais local das florestas. Outro exemplo é que as estimativas de emissões de gases de efeito estufa são altamente variáveis espacial e temporalmente na escala local, por exemplo, na escala de uma região administrativa. A estimativa dos potenciais de mitigação das emissões de gases de efeito estufa é necessária para a implementação de reformas e programas nacionais (por exemplo, o Brasil e o programa de “agricultura de baixo carbono”). A espacialização do modelo foi realizada no trabalho de Marsden et al. (2013), que mais tarde foi ampliada para uma escala muito maior (Attia et al. 2019). Neste último trabalho, foi realizada uma abordagem de calibração em várias escalas, com uma calibração fina num local instrumentado com numerosas medições (Eucflux), depois em dois locais intermediários onde são medidas algumas variáveis. Finalmente, foi feita uma calibração de alguns parâmetros associados aos genótipos em milhares de parcelas (27.500 ha). A conclusão foi que a calibração para cada genótipo, ou grupo de genótipos, é essencial. A consideração da variabilidade espacial do clima e dos solos também é importante.

CONCLUSÕES

O trabalho realizado na modelação de balanços energéticos, de carbono e de água cobriu diferentes domínios, em escalas espaciais que vão desde a árvore até à região e em escalas temporais que vão desde o dia até à rotação completa. Em geral, estes modelos foram baseados em numerosas experiências realizadas em vários programas conjuntos entre o CIRAD e o IPEF, com outras instituições de investigação e com empresas parceiras. A quantidade e qualidade dos dados adquiridos ou disponíveis através das empresas permitiu parametrizar, calibrar e testar os modelos em muitos processos, e em saídas mais integradas como a biomassa na colheita. É de salientar aqui que o facto de ter alguns locais altamente instrumentados com medições contínuas, combinados com redes de parcelas que permitem ter em conta a variabilidade espacial das plantações e que têm certas medições (menos numerosas), foi essencial no trabalho de espacialização dos modelos. Os modelos permitiram-nos compreender melhor o funcionamento hídrico e carbónico das plantações e complementar as medições. As perspectivas em termos de desenvolvimento de modelos dizem agora respeito à integração dos ciclos de nutrientes (Cornut et al. 2021). Em termos de utilização, o foco no sequestro de carbono e as possíveis alavancas para melhorá-lo são essenciais, especialmente no contexto das desejáveis perspectivas de neutralidade de carbono.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adelana, S.M., Dresel, P.E., Hekmeijer, P., Zydor, H., Webb, J.A., Reynolds, M., & Ryan, M. (2015). A comparison of streamflow, salt and water balances in adjacent farmland and forest catchments in south-western Victoria, Australia. *Hydrological Processes*, 29, 1630-1643

- Alton, P.B. (2014). Reconciling simulations of seasonal carbon flux and soil water with observations using tap roots and hydraulic redistribution: A multi-biome FLUXNET study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 198-199, 309-319
- Attia, A., Nouvellon, Y., Cuadra, S., Cabral, O., Laclau, J.-P., Guillemot, J., Campoe, O., Stape, J.-L., Galdos, M., Lamparelli, R., & le Maire, G. (2019). Modelling carbon and water balance of Eucalyptus plantations at regional scale: Effect of climate, soil and genotypes. *Forest Ecology and Management*, 449, 117460
- Battie-Laclau, P., Laclau, J.P., Domec, J.C., Christina, M., Bouillet, J.P., de Cassia Piccolo, M., de Moraes Gonçalves, J.L., e Moreira, R.M., Krusche, A.V., Bouvet, J.M., & Nouvellon, Y. (2014). Effects of potassium and sodium supply on drought-adaptive mechanisms in Eucalyptus grandis plantations. *New Phytologist*, 203, 401-413
- Bohn, F.J., Frank, K., & Huth, A. (2014). Of climate and its resulting tree growth: Simulating the productivity of temperate forests. *Ecological Modelling*, 278, 9-17
- Canadell, J., & Zedler, P.H. (1995). Underground Structures of Woody Plants in Mediterranean Ecosystems of Australia, California, and Chile. In M.T.K. Arroyo, P.H. Zedler, & M.D. Fox (Eds.), *Ecology and Biogeography of Mediterranean Ecosystems in Chile, California, and Australia* (pp. 177-210). New York, NY: Springer New York
- Christina, M., Le Maire, G., Battie-Laclau, P., Nouvellon, Y., Bouillet, J.-P., Jourdan, C., de Moraes Gonçalves, José L., & Laclau, J.-P. (2015). Measured and modeled interactive effects of potassium deficiency and water deficit on gross primary productivity and light-use efficiency in Eucalyptus grandis plantations. *Global Change Biology*, 21, 2022-2039
- Christina, M., Nouvellon, Y., Laclau, J.-P., Stape, J.L., Bouillet, J.-P., Lambais, G.R., & le Maire, G. (2017). Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. *Functional Ecology*, 31, 509-519
- Cornut, I., Le Maire, G., Laclau, J.-P., Guillemot, J., Mareschal, L., Nouvellon, Y., & Delpierre, N. (2021). Potassium limitation of wood productivity: A review of elementary processes and ways forward to modelling illustrated by Eucalyptus plantations. *Forest Ecology and Management*, 494, 119275
- Dean, J.F., Webb, J.A., Jacobsen, G.E., Chisari, R., & Dresel, P.E. (2015). A groundwater recharge perspective on locating tree plantations within low-rainfall catchments to limit water resource losses. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 1107-1123
- Jackson, P.C., Meinzer, F.C., Bustamante, M., Goldstein, G., Franco, A., Rundel, P.W., Caldas, L., Iglar, E., & Causin, F. (1999). Partitioning of soil water among tree species in a Brazilian Cerrado ecosystem. *Tree Physiology*, 19, 717-724
- Laclau, J.-P., Nouvellon, Y., Reine, C., Gonçalves, J.d., Krusche, A., Jourdan, C., le Maire, G., & Bouillet, J.-P. (2012). Mixing Eucalyptus and Acacia trees leads to fine root over-yielding and vertical segregation between species. *Oecologia*, 1-11
- Landsberg, J.J., & Sands, P. (2010). *Physiological ecology of forest production: principles, processes and models*. Academic Press
- le Maire, G., Guillemot, J., Campoe, O.C., Stape, J.-L., Laclau, J.-P., & Nouvellon, Y. (2019). Light absorption, light use efficiency and productivity of 16 contrasted genotypes of several Eucalyptus species along a 6-year rotation in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 449, 117443
- le Maire, G., Nouvellon, Y., Christina, M., Ponzone, F.J., Gonçalves, J.L.M., Bouillet, J.P., & Laclau, J.P. (2013). Tree and stand light use efficiencies over a full rotation of single- and mixed-species Eucalyptus grandis and Acacia mangium plantations. *Forest Ecology and Management*, 288, 31-42
- Manzoni, R.L., Tanikawa, D.H., & Soldera, B.C. (2014). RELAÇÃO ENTRE A RESPOSTA ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO EM DIFERENTES CULTIVOS AGRÍCOLAS E NÍVEIS FREÁTICOS EM ÁREA DE RECARGA DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI. *Águas Subterrâneas*, 28, 1-13
- Marsden, C., Nouvellon, Y., Laclau, J.-P., Corbeels, M., McMurtrie, R.E., Stape, J.L., Epron, D., & le Maire, G. (2013). Modifying the G'DAY process-based model to simulate the spatial variability of Eucalyptus plantation growth on deep tropical soils. *Forest Ecology and Management*, 301, 112-128
- Nouvellon, Y., Laclau, J.-P., Epron, D., Le Maire, G., Bonnefond, J.-M., Gonçalves, J.L.M., & Bouillet, J.-P. (2012). Production and carbon allocation in monocultures and mixed-species plantations of Eucalyptus grandis and Acacia mangium in Brazil. *Tree Physiology*, 32, 680-695
- Oliveira, R.S., Bezerra, L., Davidson, E.A., Pinto, F., Klink, C.A., Nepstad, D.C., & Moreira, A. (2005). Deep root function in soil water dynamics in cerrado savannas of central Brazil. *Functional Ecology*, 19, 574-581
- Reich, P.B. (2014). The world-wide 'fast-slow' plant economics spectrum: a traits manifesto. *Journal of Ecology*, 102, 275-301
- Smethurst, P.J., Almeida, A.C., & Loos, R.A. (2015). Stream flow unaffected by Eucalyptus plantation harvesting implicates water use by the native forest streamside reserve. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 187-198
- Tng, D.Y.P., Goosem, S., Jordan, G.J., Bowman, D.M.J.S., & Sheppard, A. (2014). Letting giants be - rethinking active fire management of old-growth eucalypt forest in the Australian tropics. *Journal of Applied Ecology*, 51, 555-559

Capítulo 7

Uso de sensoriamento remoto em plantações de eucalipto no Brasil

le Maire Gueric, Cabral Osvaldo, Feret Jean-Baptiste, Laclau Jean-Paul,
Guillemot Joannès, Marsden Claire, Nouvellon Yann,
Oliveira Julianne de Castro, Ponzoni Flavio Jorge, Stape José Luiz

INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto por satélite é cada vez mais utilizada nos sectores agrícola e florestal para a caracterização espacial, gestão e monitoramento de grandes áreas em escala da parcela ou em escala intra-parcela. **Esta utilização aumentará no futuro com a expansão do número e qualidade dos sensores e a melhoria das capacidades de análise.** As especificidades das plantações de eucaliptos tropicais e subtropicais requerem uma atenção especial quando se utilizam métodos ou produtos genéricos, e muitas vezes requerem o desenvolvimento de metodologias dedicadas, o que defende a realização de pesquisas mais específicas. Esse artigo revisa os principais trabalhos realizados sobre esse tema em projetos conjuntos CIRAD-IPEF nos últimos 10 anos, com parceiros de universidade ou do setor privado florestal, no caso particular da detecção remota de plantações industriais de eucaliptos, de acordo com três temas principais.

ESTIMATIVA DE ÍNDICES FOLIARES E FAPAR DE PLANTAÇÕES

O índice de área foliar é uma característica chave das plantações de eucalipto, e estimar sua dinâmica é essencial para entender e modelar o crescimento, e os ciclos de carbono e água nas plantações. Vários métodos para estimar o índice de área foliar foram desenvolvidos no Brasil, em particular através do conjunto de medições realizadas no projeto Eucflux. Um método relativamente complexo, mas preciso utiliza a inversão do modelo de transferência radiativa (le Maire et al. 2011b) e uma mais simples utilizando um índice de vegetação calibrado especificamente para os eucaliptos (le Maire et al. 2012). A fração de radiação fotossintética absorvida (fAPAR) também é uma variável interessante de se obter por sensoriamento remoto, pois está diretamente relacionada com a quantidade de luz que uma plantação pode absorver. Um método para estimar o fAPAR foi desenvolvido em (Marsden et al. 2010). O produto do fAPAR e a radiação PAR incidente dá a radiação absorvida pela plantação. Isto muda com a idade da plantação, e é particularmente variável nos primeiros anos (Figure 1). As parcelas com o PAR mais alto são as mais produtivas. Uma perspectiva é melhorar os métodos de estimativa do índice de área foliar, por exemplo, com outros modelos ou mais medições (projeto Eucflux). (Oliveira et al. 2017) ou mais medições (projecto Eucflux 2 com satélite Sentinel 2) e depois utilizar estas estimativas de índices foliares ou fAPAR em modelos espaciais de produção de madeira (le Maire et al. 2010).

ESTIMATIVA DA BIOMASSA DA PARCELA

A estimativa de biomassa ou outras características relacionadas, como o volume do tronco ou a altura da árvore, não é óbvia por sensoriamento remoto. Testamos três métodos

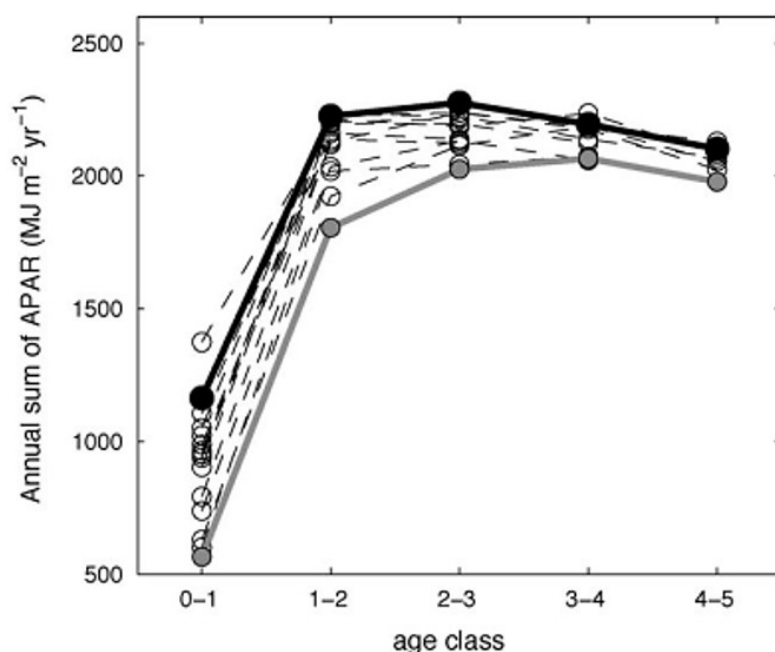


Figura 1. Evolução da radiação absorvida por várias parcelas de acordo com a sua idade. A parcela mais produtiva (maior biomassa na colheita) é mostrada em preto, e a parcela menos produtiva em cinza.

para estimar biomassa de parcelas de eucalipto usando três técnicas completamente diferentes: sensoriamento remoto visível, sensoriamento remoto por radar e sensoriamento remoto Lidar (Tabela 1). Embora os métodos desenvolvidos acima não substituam totalmente estes inventários, seria possível reduzir o seu número durante o crescimento (por exemplo, o inventário aos 2 anos poderia ser substituído por uma imagem de Radar, um inventário posterior por uma medição Lidar, etc.). Isto também fornece uma estimativa da variabilidade espacial da biomassa, enquanto os inventários geralmente amostram apenas uma pequena área da parcela.

ESTIMATIVA DA ÁREA DE PLANTIO E DINÂMICA DE FLORESTAMENTO

O mapeamento das plantações na escala do Brasil foi realizado com dados de satélite MODIS. A análise da série temporal de imagens de plantações de eucaliptos adquiridas pelo sensor MODIS é muito rica em informações. Em primeiro lugar, a dinâmica de crescimento do NDVI (índice de vegetação calculado para cada pixel como a diferença normalizada das bandas espectrais vermelha e infravermelha próxima) após uma plantação é muito rápida, uma vez que o NDVI vai de um valor de solo descoberto (cerca de 0.3) para um alto valor de NDVI (acima de 0.8) dentro de dois anos. Esse crescimento da NDVI é aqui utilizado como critério de classificação das plantações de eucalipto na escala brasileira (le Maire et al. 2014). Quase nenhum outro ecossistema, cultivado ou não, mostra um tal crescimento em dois anos no Brasil. Nesse trabalho, utilizamos um método baseado na comparação de séries temporais de referência (pixels 100% cobertos por um único plot de *Eucalyptus*, verificados in situ) e as séries temporais a serem classificadas. O mapa obtido por esse método foi o primeiro mapa de plantações de eucaliptos no Brasil obtido pela análise de imagens de satélite no Brasil (Figura 2), levando também em conta as fases de transição entre duas rotações e a estimativa das datas de plantio (Figura 3). Outros trabalhos mais detalhados, ou pelo contrário mais abertos a outros tipos de culturas, foram realizados na sequência deste trabalho (de Oliveira Santos et al. 2019; Dias et al. 2019; Dias et al. 2020a; Dias et al. 2020b; Menini et al. 2019; Menini et al. 2018).

Tabela 1. Comparação de três métodos para estimar as características das parcelas de eucalipto (biomassa, altura dominante, volume), com três métodos diferentes

Método	Óptica	Lidar	Radar
Publicação	(le Maire et al. 2011a)	(Baghdadi et al. 2014; Fayad et al. 2021a; Fayad et al. 2021b; Fayad et al. 2021c)	(Baghdadi et al. 2015)
Tipo de dados	Terra/MODIS (resolução de 250 m, cobertura completa)	ICESat/GLAS (resolução de 60m, 1 medição a cada 170m ao longo dos transectos) GEDI (resolução de 25m, 1 medição a cada 60m ao longo das transectos)	ALOS/PALSAR (resolução de 12,5 m, imagens de ~80 km)
Método	Extracção das características das séries temporais NDVI a partir da data de plantio; variáveis bioclimáticas e classe do tipo de solo	Extracção de métricas da forma de onda; utilização conjunta de um DEM	Backscatter HH e HV da banda L; teste usando a idade de plantio
Algoritmo	Floresta Aleatória	Modelo de regressão Multilinear; Redes Neurais Convolucionais	Floresta Aleatória
Variáveis prognosticadas	Volume de madeira (V), altura dominante (Hdom)	Biomassa (B), altura dominante (Hdom), volume de madeira (V)	Biomassa (B)
Detalhes obtidos	V: rmse=25 m ³ /ha (15% da média)	B: 16 t/ha (25% da média)	B: 46,7 t/ha (70% da média)
	Hdom: rmse=1,6 m (8% da média)	V: 27 m ³ /ha Hdom : rmse=1,89 m para IceSat (10% da média) e 1,45 m para GEDI	B usando a idade, para além dos dados SAR: 18,9 t/ha (28% da média)
Comente	Idade e NDVI acumulados nos dois primeiros anos explicam a maioria das variáveis previstas	Medição “directa”, sem cobertura espacial total, medições via satélite interrompidas	Medida correlacionada à biomassa apenas para biomassa muito baixa (<50m ³) ou plantações jovens (<3 anos). Pode ser usado como informação adicional se a idade da parcela for conhecida.
Vantagens/desvantagens	Cobertura global e gratuita, história desde 2000, apenas grandes parcelas, áreas livres de nuvens	Boa precisão, mas cobertura espacial e temporal muito limitada.	Cobertura global sob demanda e por uma taxa, sem problemas de nuvem, alta resolução, aplicação simples, baixa precisão

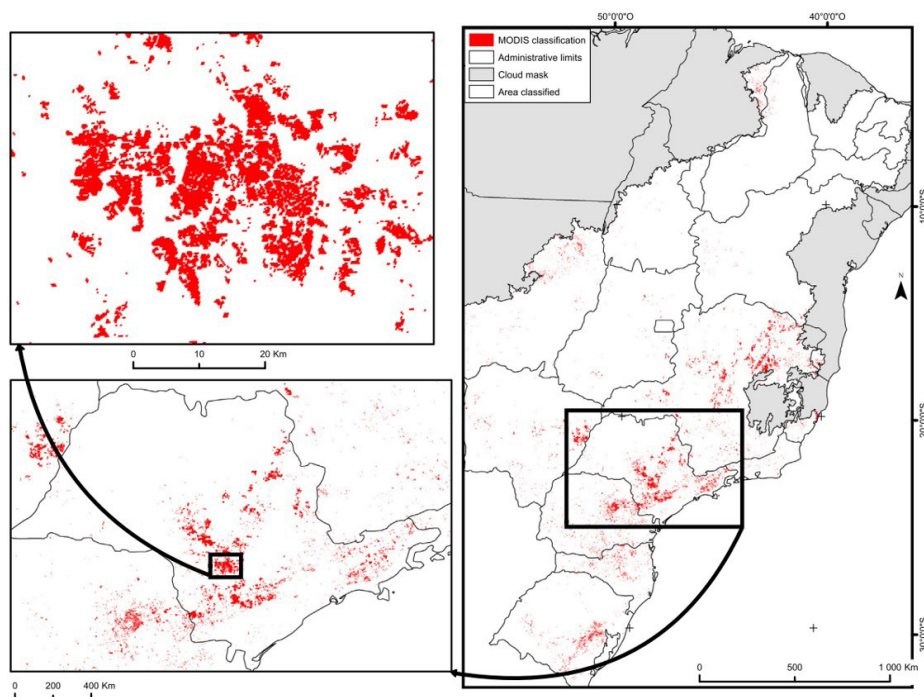


Figura 2. Classificação das parcelas de eucalipto em todo o Brasil, para o ano de 2009 (extraído de le Maire et al., 2014)

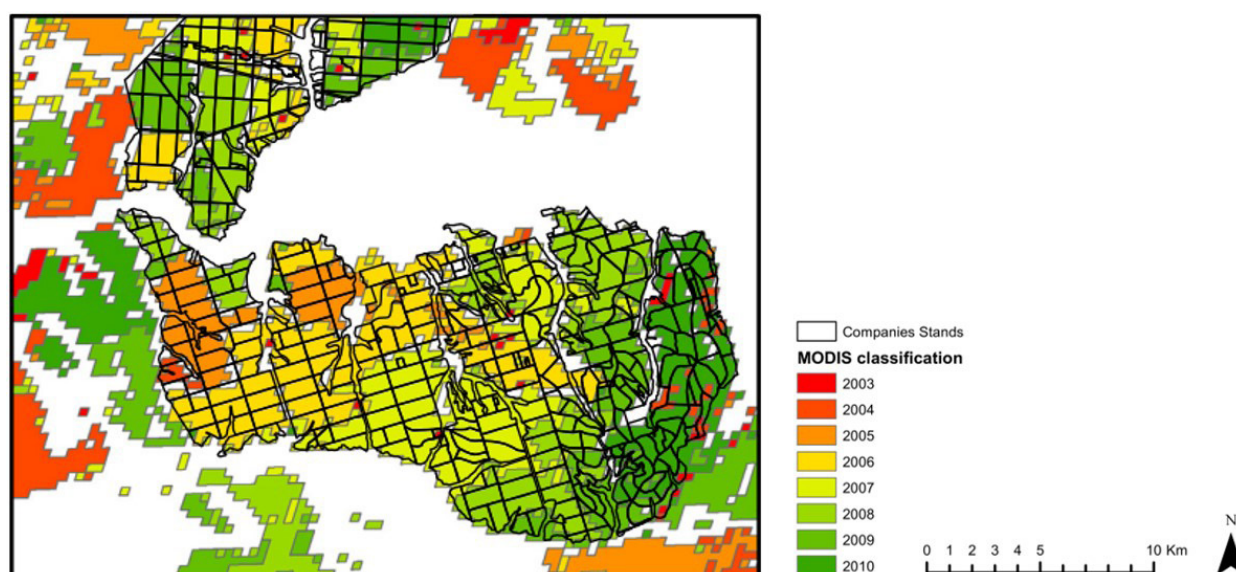


Figura 3. Extrato da classificação MODIS, mostrando as datas de plantio dos lotes e uma comparação com os limites fornecidos por uma empresa (extraído de le Maire et al., 2014)

CONCLUSÕES

A sensoriamento remoto tem sido utilizada em plantações de eucalipto, no âmbito da cooperação entre a CIRAD e o IPEF, durante vários projectos, alguns dos quais foram apresentados neste artigo. Podemos ver que as plantações de eucalipto oferecem muitas vantagens para a análise de imagens de satélite: geralmente parcelas homogêneas e grandes, medições precisas in situ, acesso aos históricos das parcelas. Contudo, também coloca desafios: dinâmica de crescimento muito rápido, possível heterogeneidade de parcelas devido a distúrbios, estruturação de linhas visíveis em idades jovens, por exemplo. Contudo, a melhoria contínua das imagens e a sua facilidade de acesso (por exemplo, através do programa Sentinel 2) abre possibilidades importantes nas três áreas desenvolvidas acima, mas também em novas áreas como a detecção rápida e precoce de anomalias nas plantações.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baghdadi, N., Le Maire, G., Bailly, J., Ose, K., Nouvellon, Y., Zribi, M., Lemos, C., & Hakamada, R. (2015). Evaluation of ALOS/PALSAR L-Band Data for the Estimation of Eucalyptus Plantations Aboveground Biomass in Brazil. *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of*, 8, 3802-3811
- Baghdadi, N., le Maire, G., Fayad, I., Bailly, J.S., Nouvellon, Y., Lemos, C., & Hakamada, R. (2014). Testing Different Methods of Forest Height and Aboveground Biomass Estimations From ICESat/GLAS Data in Eucalyptus Plantations in Brazil. *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of*, 7, 290 - 299
- de Oliveira Santos, C.L.M., Lamparelli, R.A.C., Dantas Araújo Figueiredo, G.K., Dupuy, S., Boury, J., Luciano, A.C.d.S., Torres, R.d.S., & le Maire, G. (2019). Classification of Crops, Pastures, and Tree Plantations along the Season with Multi-Sensor Image Time Series in a Subtropical Agricultural Region. *Remote Sensing*, 11, 334
- Dias, D., Dias, U., Menini, N., Lamparelli, R., Maire, G.L., & Torres, R. (2019). Pixelwise Remote Sensing Image Classification Based on Recurrence Plot Deep Features. In *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 1310-1313)
- Dias, D., Dias, U., Menini, N., Lamparelli, R., Maire, G.L., & Torres, R.d.S. (2020a). Image-Based Time Series Representations for Pixelwise Eucalyptus Region Classification: A Comparative Study. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17, 1450-1454

- Dias, D., Pinto, A., Dias, U., Lamparelli, R., Maire, G.L., & Torres, R.d.S. (2020b). A Multirepresentational Fusion of Time Series for Pixelwise Classification. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 4399-4409
- Fayad, I., Baghdadi, N., Alcarde Alvares, C., Stape, J.L., Bailly, J.S., Scolforo, H.F., Cegatta, I.R., Zribi, M., & Le Maire, G. (2021a). Terrain Slope Effect on Forest Height and Wood Volume Estimation from GEDI Data. *Remote Sensing*, 13, 2136
- Fayad, I., Baghdadi, N.N., Alvares, C.A., Stape, J.L., Bailly, J.S., Scolforo, H.F., Zribi, M., & Maire, G.L. (2021b). Assessment of GEDI's LiDAR Data for the Estimation of Canopy Heights and Wood Volume of Eucalyptus Plantations in Brazil. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 7095-7110
- Fayad, I., Ienco, D., Baghdadi, N., Gaetano, R., Alvares, C.A., Stape, J.L., Ferraço Scolforo, H., & Le Maire, G. (2021c). A CNN-based approach for the estimation of canopy heights and wood volume from GEDI waveforms. *Remote Sensing of Environment*, 265, 112652
- le Maire, G., Dupuy, S., Nouvellon, Y., Loos, R.A., & Hakamada, R. (2014). Mapping short-rotation plantations at regional scale using MODIS time series: Case of eucalypt plantations in Brazil. *Remote Sensing of Environment*, 152, 136-149
- le Maire, G., Marsden, C., Laclau, J.-P., Stape, J.-L., Corbeels, M., & Nouvellon, Y. (2010). Spatial and temporal variability of the carbon budget of tropical eucalyptus plantations assessed using ecosystem modelling and remote sensing. In, *International Conference on Integrative Landscape Modelling (Landmod2010) Montpellier: Edition Quae Symposcience*
- le Maire, G., Marsden, C., Nouvellon, Y., Grinand, C., Hakamada, R., Stape, J.-L., & Laclau, J.-P. (2011a). MODIS NDVI time-series allow the monitoring of Eucalyptus plantation biomass. *Remote Sensing of Environment*, 115, 2613-2625
- le Maire, G., Marsden, C., Nouvellon, Y., Stape, J.-L., & Ponzoni, F. (2012). Calibration of a Species-Specific Spectral Vegetation Index for Leaf Area Index (LAI) Monitoring: Example with MODIS Reflectance Time-Series on Eucalyptus Plantations. *Remote Sensing*, 4, 3766-3780
- le Maire, G., Marsden, C., Verhoef, W., Ponzoni, F.J., Lo Seen, D., Bégué, A., Stape, J.-L., & Nouvellon, Y. (2011b). Leaf area index estimation with MODIS reflectance time series and model inversion during full rotations of Eucalyptus plantations. *Remote Sensing of Environment*, 115, 586-599
- Marsden, C., Le Maire, G., Stape, J.L., Lo Seen, D., Rouspard, O., Cabral, O., Epron, D., Nascimento Lima, A.M., & Nouvellon, Y. (2010). Relating MODIS vegetation index time-series with structure, light absorption and stem production of fast-growing Eucalyptus plantations. *Forest Ecology and Management*, 259, 1741-1753
- Menini, N., Almeida, A.E., Lamparelli, R., Maire, G.L., Oliveira, R.S., Verbesselt, J., Hirota, M., & Torres, R.d.S. (2019). Tucumã: A toolbox for spatiotemporal remote sensing image analysis [Software and Data Sets]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 7, 110-122
- Menini, N., Almeida, A.E., Lamparelli, R., Maire, G.L., Santos, J.A.d., Pedrini, H., Hirota, M., & Torres, R.d.S. (2018). A Soft Computing Framework for Image Classification Based on Recurrence Plots. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 1-5
- Oliveira, J.D.C., Feret, J.B., Ponzoni, F.J., Nouvellon, Y., Gastellu Etchegorry, J.-P., Camargo Campoe, O., Stape, J.L., Estraviz Rodriguez, L.C., & Le Maire, G. (2017). Simulating the canopy reflectance of different eucalypt genotypes with the DART 3-D model. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10, 4844-4852

Capítulo 8

Melhorar a silvicultura de plantações com espécies de árvores nativas para auxiliar a restauração florestal

Guillemot J., Brancalion P., le Maire G., Laclau J.P.,
Stape J.L., Campoe O.C., Robin A.

INTRODUÇÃO

As florestas tropicais se destacam como os mais importantes centros de biodiversidade no planeta, representando uma importante fonte de bens e serviços ecossistêmicos essenciais para o bem-estar da população humana. Porém, vários biomas florestais do Brasil se destacam como « biodiversity hotspot » ameaçados do mundo, com um histórico de degradação e desmatamento bem conhecido. Para reverter esse quadro, iniciativas pioneiras de restauração ecológica têm sido executadas as últimas décadas, com plano a larga escala no Brasil. O Brasil estabeleceu metas ambiciosas para a restauração de seus biomas florestais, que são respaldadas por lei. Em particular, uma parte significativa das propriedades ou posses rurais deve manter uma área com cobertura de vegetação florestal nativa (áreas chamadas de reserva legal). Isso torna as empresas do IPEF em importantes atores da restauração florestal no Brasil. O plantio de espécies arbóreas nativas é uma importante ferramenta para as empresas cumprirem suas metas ambientais. Contudo, as bases científicas da silvicultura de plantações tropicais com espécies nativas ainda são incompletas.

Entre os desafios científicos atuais, o efeito da diversidade das árvores no funcionamento dos ecossistemas florestais restaurados e na provisão de serviços ecossistêmicos é um tópico muito importante. É necessário conhecer melhor o número de espécies a introduzir para alcançar os diferentes objetivos estabelecidos pelo projeto de restauração. Isso irá melhorar a gestão dos futuros projetos de restauração e promover a silvicultura de espécies nativas para financiar esta restauração. Um outro assunto importante é a adubação da plantação, fator que impacta tanto na viabilidade econômica do projeto, quanto na produtividade e também pode condicionar a resistência às mudanças climáticas, por exemplo, por seu efeito na resistência à seca.

Ao mesmo tempo, o efeito da restauração da floresta sobre o funcionamento do ecossistema é pouco conhecido, particularmente o impacto da restauração nos ciclos de água e carbono. Isso impede de saber como às florestas restauradas sequestram carbono (armazenamento de carbono em árvores e solo) e ajudam a manter o recurso hídrico promovendo a infiltração de chuva no solo.

Para responder a esses desafios, foi plantado em 2019 o experimento MataDIV numa área de 7 ha. Trata-se de um plantio experimental localizado na estação de Itatinga (USP/ESALQ), onde são manipulados o número de espécies em mistura, adubação e abastecimento de água. O experimento estuda 6 espécies, escolhidas por sua ampla distribuição natural na Mata Atlântica e na Amazônia. Foram plantadas parcelas com 3 e 6 espécies misturadas, bem como as monoculturas correspondentes, o que permite isolar e quantificar o interesse da mistura de espécies para a produtividade e para outros serviços ecossistêmicos. Além disso, também é estudado o efeito da adubação reduzida em parcelas de monocultura e de mistura. Finalmente, uma exclusão de mais de 2 ha permite simular um estresse hídrico importante em parte do experimento, para avaliar como a mistura e a fertilidade afetam a durabilidade

das plantações sob mudanças climáticas. Essas plantações são replicadas em um desenho experimental de blocos permitindo análises estatísticas robustas (total de 144 parcelas em 4 blocos). O MataDIV já foi replicado em vários tipos de solo no estado de São Paulo, e poderá ser replicado em outros lugares para abranger as condições climáticas variadas do Brasil.

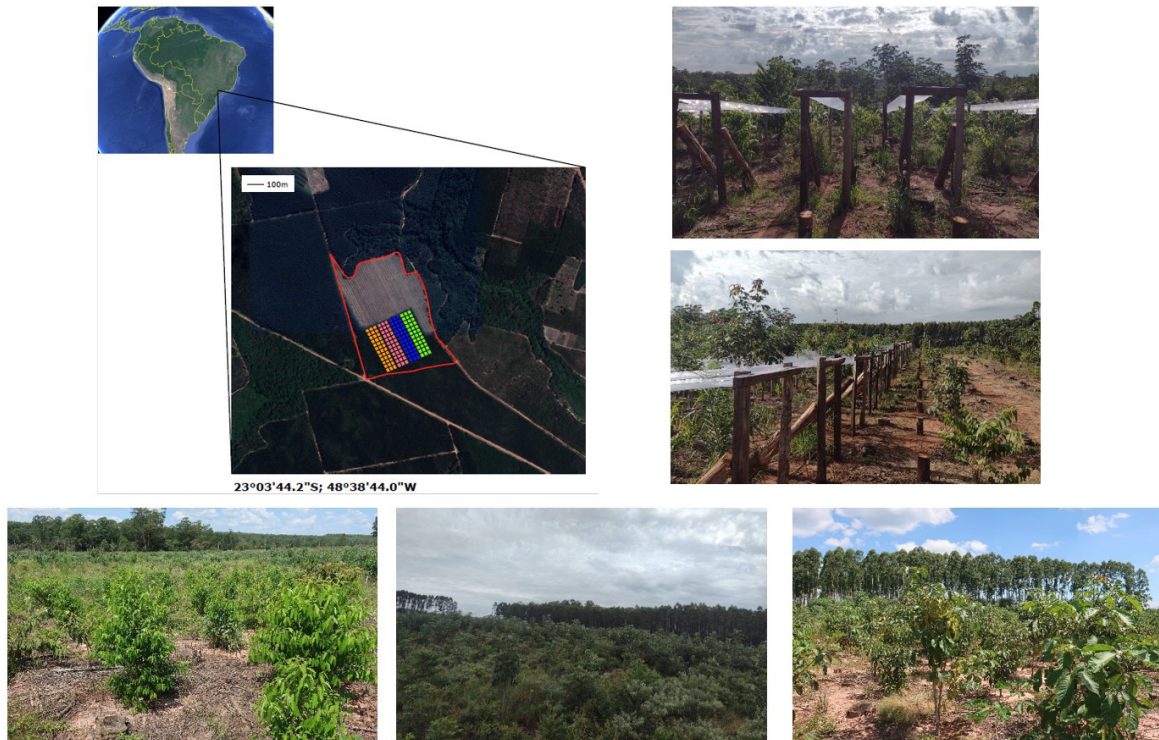


Figura 1. Fotografia e mapa do experimento MataDIV, estação de Itatinga-SP.



Figura 2. Torre de fluxo do sítio MataFLUX, Itatinga-SP.

Ao lado do experimento MataDIV, foi plantada uma parcela de 23 ha com uma mistura das mesmas 6 espécies estudada no MataDIV. No centro dessa área, um sítio observatório foi instalado (MataFLUX) para monitorar os ciclos de água, carbono e energia duma parcela de restauração florestal. O MataFLUX está equipado com uma torre de fluxo “Eddy-covariance”, sensores de humidade do solo e estação meteorológica. O Banco de dados do MataFLUX permitirá fornecer avaliação pioneiras do balanço de carbono e água de parcelas de restauração tropical.

O site MataDIV/MataFLUX é, portanto, um site pioneiro que fornecerá informações valiosas para melhorar o manejo de plantações nativas tropicais e entender as implicações da restauração florestal tropical nos ciclos da água e do carbono.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Christian Messier, Jürgen Bauhus, Rita Sousa-Silva, Harald Auge, Lander Baeten, Nadia Barsoum, Helge Bruehlheide, Benjamin Caldwell, Jeannine Cavender-Bares, Els Dhiedt, Nico Eisenhauer, Gislene Ganade, Dominique Gravel, Joannès Guillemot, Jefferson S Hall, Andrew Hector, Bruno Hérault, Hervé Jactel, Julia Koricheva, Holger Kreft, Simone Mereu, Bart Muys, Charles A Nock, Alain Paquette, John D Parker, Michael P Perring, Quentin Ponette, Catherine Potvin, Peter B Reich, Michael Scherer-Lorenzen, Florian Schnabel, Kris Verheyen, Martin Weih, Meike Wollni, Delphine Clara Zemp, For the sake of resilience and multifunctionality, let's diversify planted forests!, Conservation Letters, 2021.

Capítulo 9

Influência das variáveis ambientais e da fertilização na xilogênese e na qualidade do lenho das árvores de eucalipto

Chambi Legoas R., Chaix G., Franco Pires M.,
Tritzl Guedes F. Sette C. Tomazello Filho M.

INTRODUÇÃO

Grande parte das plantações florestais no Brasil localiza-se em regiões com ocorrência de déficit hídrico e que tem registrado, nas últimas décadas, um aumento na sua frequência e na expansão do seu período (Coelho et al., 2016; Nobre et al., 2016). O crescimento das árvores de eucalipto é responsivo à disponibilidade de água no solo, com as secas prolongadas impactando severamente a produtividade das plantações florestais (Gonçalves et al., 2017). Por outro lado, nas áreas com risco de seca severa, tem-se como prática comum a aplicação de fertilizantes, como o potássio (K) no manejo florestal visando o incremento da produtividade volumétrica das plantações principalmente em solos pobres de nutrientes (Laclau et al., 2009).

Assim, com a finalidade de estudar a interação do K e déficit hídrico em árvores de *Eucalyptus grandis* a parceria CIRAD-LCF/ESALQ/USP instalou dois experimentos de fertilização com K e Na (Na – como potencial nutriente substituto do K). O primeiro experimento foi instalado em 2004 com tratamentos controle, com adição de K e de Na (Almeida et al., 2010); o segundo, foi instalado em 2010, com tratamento de exclusão de 37% da precipitação (com cobertura do solo com lençol de polipropileno) nas parcelas controle, com adição de K e de Na (Battie-Laclau et al., 2014). Os resultados inéditos obtidos nos experimentos destacam a importância do K na eficiência uso da água, nos mecanismos de adaptação à seca e com reflexo no crescimento das árvores de eucalipto e na produtividade florestal (Asensio et al., 2020; Battie-Laclau et al., 2016, 2014; Christina et al., 2018; Guillemot et al., 2021; Laclau et al., 2009), além da constatação da aplicação potencial do Na como substituto do K (Almeida et al., 2010).

Embora a produtividade florestal seja, principalmente, relacionada com o crescimento volumétrico das árvores é, também, necessário avaliar os parâmetros de qualidade do lenho do tronco pela relação com as propriedades da madeira e dos seus produtos finais. Como o crescimento em diâmetro do tronco das árvores (crescimento 2ário) está relacionado com a atividade/sazonalidade do meristema cambial (câmbio) e que sofre influência das variáveis climáticas, da fertilização mineral, etc. Por sua vez, as alterações da atividade cambial resultam em modificações nas características anatômicas e nas propriedades químicas e físico-mecânicas do lenho do tronco das árvores afetando a qualidade e o rendimento da madeira e as suas aplicações industriais.

Pelo exposto, as árvores de eucaliptos dos experimentos indicados foram analisadas, visando o conhecimento da influência da exclusão parcial da precipitação pluviométrica,

da intensidade dos períodos secos-chuvosos, do estresse hídrico e da interação com a fertilização na formação, plasticidade e parâmetros de qualidade do lenho, em uma rotação completa das plantações de eucalipto.

MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO LENHO DAS ÁRVORES DE EUCALIPTO

Na avaliação da variação intra e interanual das características do lenho do tronco das árvores de eucalipto foram analisados os parâmetros de qualidade do lenho do tronco das árvores de eucalipto por um período contínuo de 6 anos. Da mesma forma, foi realizada a avaliação dos parâmetros anatômicos e físico do lenho do tronco das árvores de eucalipto, com o crescimento monitorado por fitas dendrométricas de aço. Foram aplicadas técnicas histológicas, possibilitando a avaliação dos parâmetros anatômicos do lenho – processo de corte histológico e de maceração do lenho para a avaliação das dimensões e frequência das fibras e dos vasos. Também, foi aplicada a metodologia de densitometria de raios X, possibilitando a construção dos perfis radiais de microdensidade do lenho, como parâmetro físico. A delimitação dos anéis de crescimento anuais na seção transversal do lenho do tronco das árvores foi realizada pela anatomia do lenho, perfil de microdensidade e valores de incremento contínuo do diâmetro do tronco, obtidos pelos dendrômetros de aço.

RESULTADOS

No experimento das árvores de eucalipto de 4 anos fertilizadas com K ou Na verificou-se que não houve variação significativa na densidade do lenho do tronco. Em relação às características anatômicas do lenho, observou-se que a adição de Na promoveu a formação de fibras de parede celular menos espessa e de maior diâmetro do lume; com o K propiciando o aumento do diâmetro do lume dos vasos (Figura 1).

Por outro lado, no experimento de disponibilidade hídrica (37% de precipitação hídrica) e de fertilização as árvores de eucalipto de 6 anos apresentaram um significativo incremento na densidade do lenho com fertilização de Na, não com K. A relação alborno/cerne (xilema funcional/não funcional) não mostrou efeito significativo em relação aos tratamentos de exclusão/disponibilidade hídrica.

Nas árvores de eucalipto do 2º experimento, os tratamentos de fertilização com K e Na resultaram na significativa diminuição da densidade do lenho, sendo maior com a aplicação do Na (Figura 2A). Ainda, a relação alborno/cerne (xilema funcional/não funcional) foi menor no lenho das árvores de eucalipto fertilizadas com K e Na em relação às do tratamento controle (Figura 2B); maior proporção do cerne no lenho das árvores fertilizadas com o K em comparação com o Na, sendo relacionada com a maior taxa de crescimento do tronco das árvores de eucalipto em resposta à fertilização química.

Importantes resultados foram obtidos na análise da estrutura anatômica do lenho verificando-se que a menor disponibilidade hídrica não alterou as dimensões das fibras e dos vasos, característicos do sistema de sustentação e hídrico do tronco das árvores de eucalipto. Também, não se observou uma interação significativa entre a disponibilidade hídrica e a fertilização mineral, com o K induzindo aumento significativo do comprimento das fibras independente da disponibilidade hídrica (Figura 3A); a largura e a espessura da parede das fibras não foram afetadas pela fertilização do K e Na (Figuras 3B, C). Quanto ao sistema vascular, a fertilização com K induziu significativo aumento no diâmetro e diminuição da frequência dos vasos do lenho do tronco das árvores de eucalipto nos 6 anos, com o Na evidenciando efeito intermediário (Figuras 3D, 3E).

As características anatômicas do lenho do tronco das árvores de eucalipto, ao longo do processo de xilogênese de 6 anos, indicaram o efeito das variações climáticas (alternância de

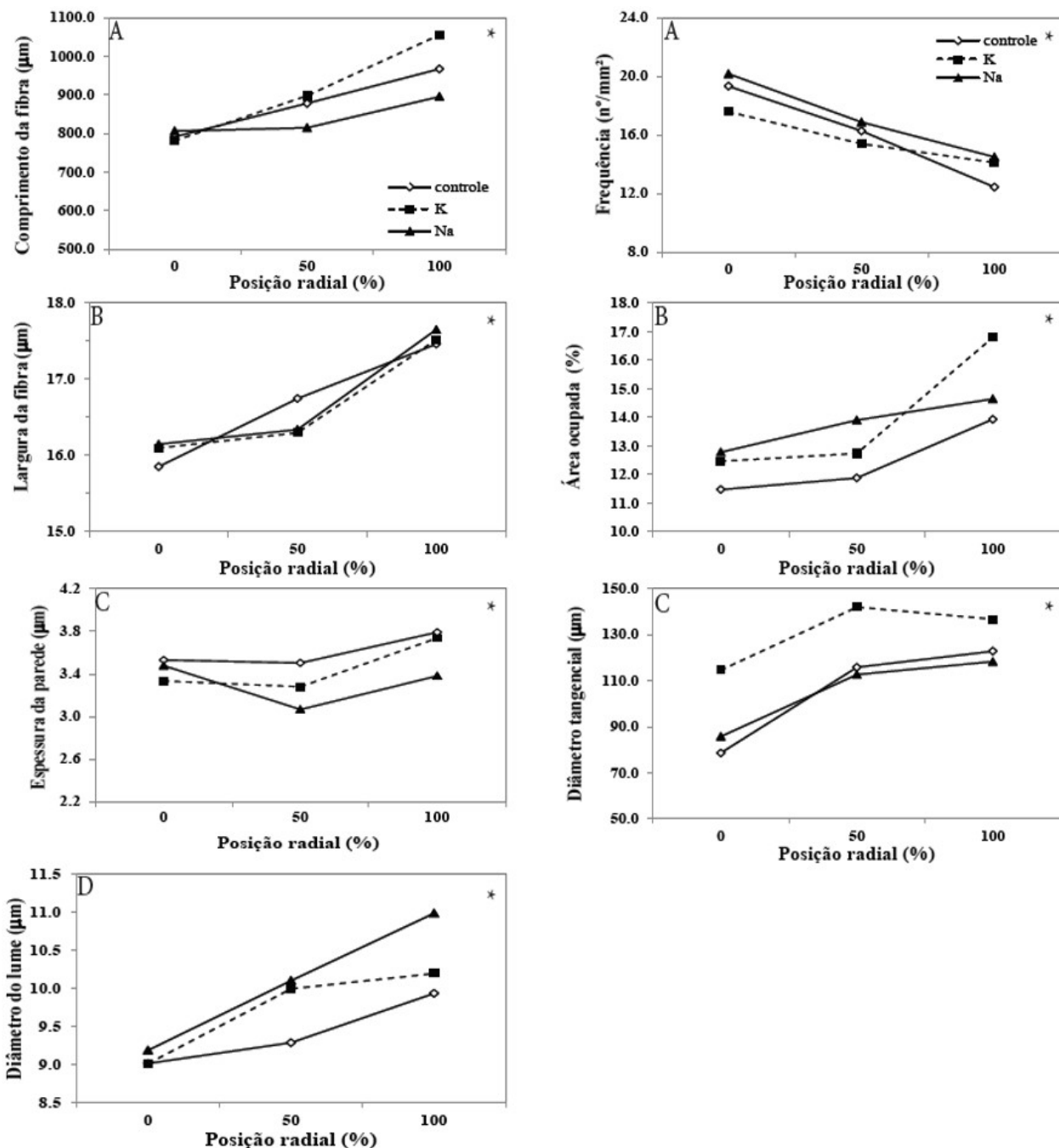


Figura 1. Características anatômicas do lenho de árvores de *E. grandis*, de 4 anos - em 3 posições radiais (0, 50 e 100%) – fertilizadas com K, Na e controle (fonte: Sette Jr et al., 2014).

períodos secos e chuvosos) na sazonalidade da atividade cambial (Figura 4). O registro no lenho das árvores de eucalipto em resposta aos períodos de estresse hídrico extremo, como o do ano de 2014, confirma a plasticidade genética da espécie, sendo maior nas árvores fertilizadas com K.

A análise da estrutura anatômica do lenho das árvores de eucalipto mostrou uma resposta ao estresse hídrico extremo, evidentes nas árvores fertilizadas com K caracterizadas pela

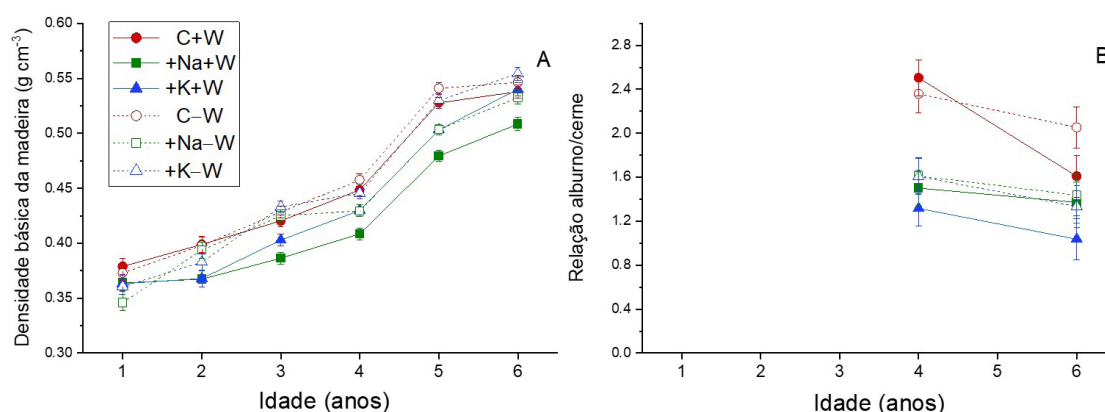


Figura 2. Densidade básica do lenho (A) e relação alburno/cerne (B) das árvores de *E. grandis*, de 6 anos - fertilizadas (+K: adição de potássio, +Na: adição de sódio, e C: controle) e disponibilidade hídrica (+W: 100% das chuvas, e -W: exclusão 37% das chuvas) (fonte: Chambi-Legoas et al., 2021).

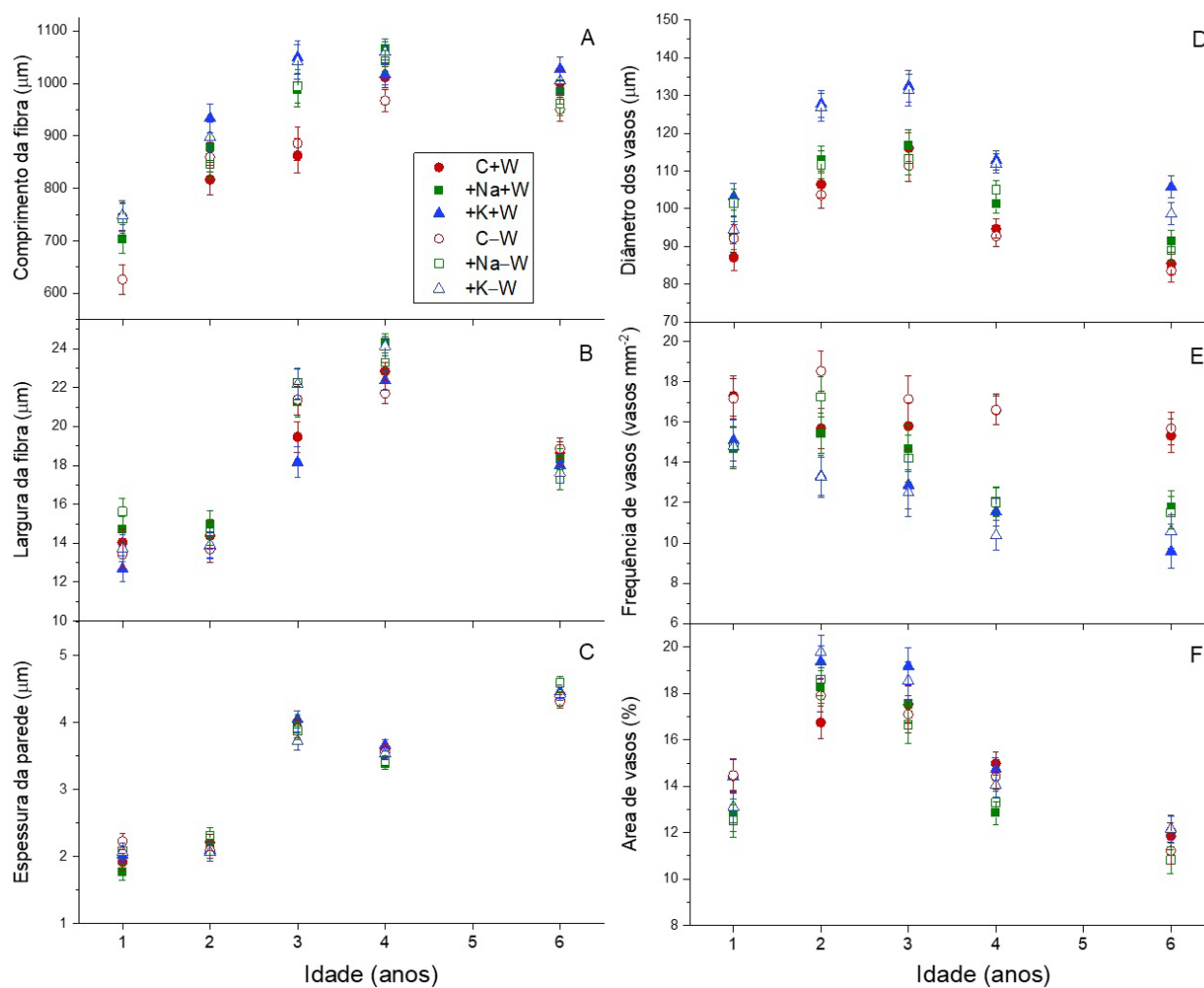


Figura 3. Características anatômicas do lenho de *E. grandis*, 6 anos - dimensões das fibras (A, B, C) e dos vasos (D, E, F), fertilizadas (+K: adição de potássio, +Na: adição de sódio e C: controle) e disponibilidade hídrica (+W: 100% das chuvas, e -W: exclusão 37% das chuvas) (fonte: Chambi-Legoas et al., 2021).

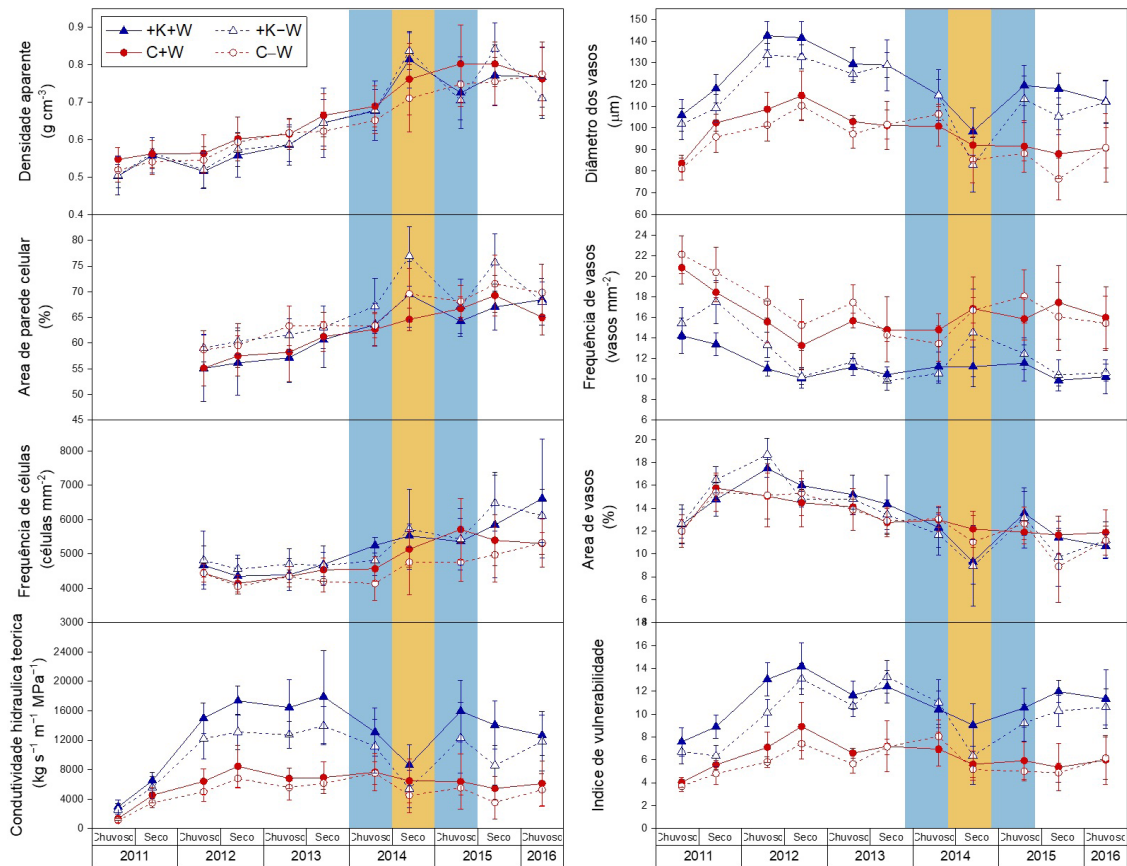


Figura 4. Características do lenho de *E. grandis*, 6 anos - fertilizadas (+K: adição de potássio, e C: controle) e disponibilidade hídrica (+W: 100% das chuvas, e -W: exclusão 37% das chuvas) considerando as estações chuvosas (out-março- faixa vertical azul) e secas (abril-set- faixas vertical marrom) (fonte: Chambi-Lagoas et al., 2022).

formação do lenho com maior frequência de células e de maior área de parede celular, resultando em aumento da densidade do lenho; esse resultado foi menos marcante no lenho do tronco das árvores com deficiência de K. A expressão fenotípica do lenho do tronco das árvores de eucalipto, em resposta ao extremo estresse hídrico, é marcante quando analisado a sua estrutura hidráulica ou vascular (transporte ascendente de seiva mineral): a fertilização com K promoveu uma significativa diminuição da condutividade hidráulica do lenho, como mecanismo de adaptação à seca, expressa pelo menor diâmetro e maior frequência dos vasos. Em contraste, as árvores de eucalipto do tratamento controle apresentaram alteração das dimensões dos vasos na estrutura anatômica do seu lenho (Figura 4).

CONCLUSÕES

As árvores de *E. grandis*, de plantações experimentais instaladas na Estação Florestal Experimental de Itatinga, resultado da cooperação científica entre o CIRAD-IPEF e o LCF/ESALQ/USP, propiciaram o entendimento do efeito das condições climáticas e da fertilização na formação e na qualidade do lenho do tronco, visando a utilização da madeira, principalmente, para a produção de celulose e papel. Os resultados dos experimentos indicaram que a fertilização com K não afeta a qualidade do lenho mesmo em condições de estresse hídrico. A substituição do K pelo Na não apresentou melhora no principal parâmetro físico do lenho – a sua densidade. A exclusão de 37% da precipitação pluviométrica, considerada de moderado efeito, não evidenciou alterações nas características anatômicas

do lenho, relacionadas com as fibras e os vasos e, assim, com a qualidade do lenho. Outro resultado importante verificado foi o incremento da plasticidade fenotípica do lenho do tronco das árvores de eucalipto com fertilização com K, regulando especificamente a sua condutividade hidráulica em períodos de forte estresse hídrico. Os experimentos de exclusão de precipitação hídrica mostram-se eficientes na simulação do estresse hídrico e a avaliação da resposta do crescimento e das características e propriedades do lenho das árvores de eucalipto, principalmente no contexto das mudanças climáticas globais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, J.C.R., Laclau, J.P., Gonçalves, J.L. de M., Ranger, J., Saint-André, L., 2010. A positive growth response to NaCl applications in *Eucalyptus* plantations established on K-deficient soils. *For. Ecol. Manage.* 259, 1786–1795. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.08.032>
- Asensio, V., Domec, J.C., Nouvellon, Y., Laclau, J.P., Bouillet, J.P., Jordan-Meille, L., Lavres, J., Rojas, J.D., Guillemot, J., Abreu-Junior, C.H., 2020. Potassium fertilization increases hydraulic redistribution and water use efficiency for stemwood production in *Eucalyptus grandis* plantations. *Environ. Exp. Bot.* 176, 104085. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104085>
- Battie-Laclau, P., Delgado-Rojas, J.S., Christina, M., Nouvellon, Y., Bouillet, J.-P., Piccolo, M. de C., Moreira, M.Z., Gonçalves, J.L. de M., Rouspard, O., Laclau, J.-P., 2016. Potassium fertilization increases water-use efficiency for stem biomass production without affecting intrinsic water-use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. *For. Ecol. Manage.* 364, 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.01.004>
- Battie-Laclau, P., Laclau, J.P., Domec, J.C., Christina, M., Bouillet, J.P., de Cassia Piccolo, M., de Moraes Gonçalves, J.L., Moreira, R.M., Krusche, A.V., Bouvet, J.M., Nouvellon, Y., 2014. Effects of potassium and sodium supply on drought-adaptive mechanisms in *Eucalyptus grandis* plantations. *New Phytol.* 203, 401–413. <https://doi.org/10.1111/nph.12810>
- Chambi-Legoas, R., Chaix, G., Castro, V.R., Franco, M.P., Tomazello-Filho, M., 2021. Inter-annual effects of potassium/sodium fertilization and water deficit on wood quality of *Eucalyptus grandis* trees over a full rotation. *For. Ecol. Manage.* 496, 119415. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119415>
- Chambi-Legoas, R., Tomazello-Filho, M., Laclau, J.-P., Chaix, G., 2022. Potassium fertilization enhances xylem plasticity and growth recovery of *Eucalyptus grandis* trees in response to drastic changes in water availability. [Unpublished manuscript].
- Christina, M., le Maire, G., Nouvellon, Y., Vezy, R., Bordon, B., Battie-Laclau, P., Gonçalves, J.L.M., Delgado-Rojas, J.S., Bouillet, J.P., Laclau, J.P., 2018. Simulating the effects of different potassium and water supply regimes on soil water content and water table depth over a rotation of a tropical *Eucalyptus grandis* plantation. *For. Ecol. Manage.* 418, 4–14. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.12.048>
- Coelho, C.A.S., de Oliveira, C.P., Ambrizzi, T., Reboita, M.S., Carpenedo, C.B., Campos, J.L.P.S., Tomaziello, A.C.N., Pampuch, L.A., Custódio, M. de S., Dutra, L.M.M., Da Rocha, R.P., Rehbein, A., 2016. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. *Clim. Dyn.* 46, 3737–3752. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2800-1>
- Gonçalves, J.L.M., Alvares, C.A., Rocha, J.H.T., Brandani, C.B., Hakamada, R., 2017. Eucalypt plantation management in regions with water stress. *South. For.* 79, 169–183. <https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1255415>
- Guillemot, J., Asensio, V., Bordron, B., Nouvellon, Y., le Maire, G., Bouillet, J.P., Domec, J.C., Delgado Rojas, J.S., Abreu-Junior, C.H., Battie-Laclau, P., Cornut, I., Germon, A., De Moraes Gonçalves, J.L., Robin, A., Laclau, J.P., 2021. Increased hydraulic constraints in *Eucalyptus* plantations fertilized with potassium. *Plant Cell Environ.* 44, 2938–2950. <https://doi.org/10.1111/pce.14102>
- Laclau, J.P., Almeida, J.C.R., Gonçalves, J.L.M., Saint-André, L., Ventura, M., Ranger, J., Moreira, R.M., Nouvellon, Y., 2009. Influence of nitrogen and potassium fertilization on leaf lifespan and allocation of above-ground growth in *Eucalyptus* plantations. *Tree Physiol.* 29, 111–124. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpn010>
- Nobre, C.A., Marengo, J.A., Seluchi, M.E., Cuatras, A., Alves, L.M., 2016. Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015 Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. *J. of Water Resour. Prot.* 8, 252–262. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2016.82022>
- Sette Jr, C.R., Deus Jr, J.C. De, Tomazello Filho, M., Pádua, F.A. De, Calil, F.N., Laclau, J.P., 2014. Alterações na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela adubação mineral. *Rev. Cern.* 20, 251–258. <https://doi.org/10.1590/01047760.201420021499>

CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS GERAIS

Os capítulos acima mostram a diversidade de temas tratados por colaborações entre pesquisadores franceses e brasileiros no âmbito de diferentes programas do IPEF, com o objetivo permanente de fornecer informações úteis para o manejo das plantações florestais. A flexibilidade do funcionamento do IPEF, com a possibilidade de desenvolver novos programas de pesquisa e o apoio efetivo para a organização de reuniões regulares entre pesquisadores e gerentes de P&D das empresas, tem sido um elemento chave para o sucesso desta colaboração nos últimos 20 anos. A união dos recursos fornecidos pelas empresas brasileiras e seu apoio no campo para responder a questões de interesse geral, tornou possível reunir fortes habilidades, associando professores e estudantes das melhores universidades brasileiras com pesquisadores internacionais, que encontraram condições privilegiadas para realizar pesquisas originais. A possibilidade de realizar trabalhos por longos períodos, o que hoje é raro quando o financiamento da pesquisa se baseia essencialmente em projetos de 3-4 anos, permitiu a produção de conhecimento original em nível internacional, com o estudo de plantações ao longo de rotações completas.

O dinamismo destas atividades de pesquisa também deve muito ao apoio financeiro da FAPESP e da CAPES, que financiaram numerosas bolsas de mestrado e doutorado, bem como vários projetos de pesquisa envolvendo universidades brasileiras e o CIRAD, com financiamento adicional de empresas através do IPEF. O CIRAD também contribuiu significativamente para o financiamento deste trabalho, garantindo os salários dos pesquisadores no Brasil, através de seus próprios fundos, bem como de projetos franceses e europeus, que permitiram a compra de equipamentos, o financiamento de bolsas de estudo e contribuição para cobertura de custos das atividades de campo. Vários projetos USP-COFECUB também têm sido muito úteis na promoção do intercâmbio de estudantes e pesquisadores ao longo dos últimos 20 anos. Além da produção de conhecimento e propostas concretas para a evolução da silvicultura, um importante impacto desses programas de pesquisa refere-se à formação de muitos estudantes em ciências florestais. Vários deles tornaram-se professores em universidades brasileiras, alguns foram recrutados como pesquisadores no CIRAD, e outros são pesquisadores nos departamentos de P&D de empresas florestais.

Após 20 anos dedicados ao estudo dos ciclos de carbono, água e nutrientes em plantações monoespecíficas de eucalipto e em misturas de eucalipto e acácia, os tópicos de pesquisa estão evoluindo. Os trabalhos mais recentes iniciados, dizem respeito, por exemplo, à contribuição do sensoriamento remoto para o monitoramento em tempo real das plantações, a influência da silvicultura no funcionamento biológico dos solos e o desempenho das plantações mistas de espécies florestais nativas.

Há um grande potencial para o desenvolvimento de vários outros estudos, no modelo cooperativo, que atendam às necessidades das empresas do IPEF, ao mesmo tempo em que podem gerar uma produção científica relevante, para o atendimento de questões globais. Esse segundo ponto, em especial, é essencial para justificar a continuidade do engajamento do CIRAD em projetos no Brasil. No somatório de mútuos interesses, são várias as oportunidades, que poderão permitir melhorar ainda mais a silvicultura das plantações de florestas tropicais e melhor quantificar suas correlações com o meio ambiente. Em particular podem ser citados: i) compreender melhor o potencial das plantações para mitigar a mudança climática; ii) melhorar o manejo das plantações de espécies nativas para alcançar os objetivos de restauração florestal, a um menor custo; iii) melhorar nossa compreensão das funções desempenhadas pelas comunidades microbianas dos solos tropicais para melhorar os serviços ecossistêmicos prestados pelas plantações. Além do apoio contínuo às pesquisas, novas formas de colaboração poderiam ser previstas, mediante intervenções na forma de missões e acolhimento de estudantes tanto no Brasil quanto na França.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todas as empresas florestais que, direta e/ou indiretamente, contribuirão para com o sucesso alcançado nesses 20 anos de cooperação IPEF-CIRAD, e o fazemos, na citação das atuais associadas do IPEF.



