

USO DA CIÊNCIAS DE DADOS PARA ANÁLISE DE QUATRO ESPÉCIES ARBÓREAS EM RESPOSTA A DIFERENTES CONDIÇÕES AMBIENTAIS

Caroline Pardi Vicente
Breno Marassato
Giovani Manoel
Matheus Mondo
Ana Luiza Oliveira

*Professor, a proposta deste artigo é utilizar os dados de um experimento realizado em 2020 para realizar uma análise sob uma perspectiva diferente da originalmente adotada. Esses dados foram coletados no contexto de um projeto de mestrado e ainda estão em fase de ajustes para publicação, portanto permanecem confidenciais. O objetivo agora é explorar novas respostas a partir do mesmo conjunto de dados.

RESUMO

A degradação de ecossistemas florestais compromete a capacidade de regeneração natural e a produção de biomassa, tornando essencial a compreensão das estratégias adaptativas das plantas em ambientes alterados. Este estudo investigou os efeitos da fertilidade do solo e da disponibilidade de luz na alocação de biomassa e nas características funcionais de quatro espécies arbóreas utilizadas na restauração florestal: *Hymenaea courbaril* (Jatobá), *Pterogyne nitens* (Amendoim do Campo), *Colubrina glandulosa* (Sobrasil) e *Myroxylon peruiferum* (Cabreúva). Os tratamentos experimentais incluíram diferentes níveis de luminosidade, adubação e um controle em campo. As variáveis analisadas foram biomassa total, frações de biomassa alocada a raízes, troncos, ramos e folhas, além de traços funcionais como área foliar (AF), área foliar específica (AFE), espessura foliar (EF) e taxa de crescimento relativo (TCR). Os resultados indicaram que as plantas cultivadas a pleno sol alocaram maior biomassa total e para as partes aéreas, enquanto as cultivadas sob sombreamento direcionaram mais recursos para o sistema radicular. A adubação influenciou positivamente o crescimento das plantas, especialmente nas espécies com maior demanda de nutrientes. A análise multivariada, incluindo Análise de Componentes Principais (PCA), revelou diferenças significativas nas estratégias adaptativas das

espécies, com *Pterogyne nitens* e *Myroxylon peruferum* adotando uma estratégia aquisitiva, enquanto *Hymenaea courbaril* e *Colubrina glandulosa* apresentaram uma abordagem conservativa, alocando mais biomassa para as raízes. Este estudo enfatiza a importância do uso de ciência de dados, como ferramenta de embasamento que desempenha um papel essencial na identificação de padrões de resposta e no planejamento de estratégias de restauração ecológica eficazes.

Palavras-chave: Fertilidade de solo, Luminosidade, Análise de Dados

1. INTRODUÇÃO

A degradação de um ecossistema é caracterizada pela perda da capacidade de produção de biomassa e de recuperação natural após distúrbios, esgotamento de recursos ou alterações estruturais (RUBIRA, 2016). Essa degradação pode gerar erosão, perda de nutrientes e deterioração de áreas ecologicamente importantes, além de modificar a entrada de luz no ambiente (PERON & EVANGELISTA, 2004; CHAZDON & URIARTE, 2016). Enquanto ecossistemas pouco degradados podem se regenerar naturalmente, áreas mais alteradas exigem intervenção humana, como a reintrodução de espécies, sendo essencial compreender como essas espécies respondem às condições ambientais alteradas, incluindo solo, nutrientes, água e luminosidade (HUANTE et al., 1995; POORTER et al., 2009).

As plantas exibem estratégias adaptativas que variam entre aquisitivas e conservativas, refletindo diferenças em folhas, raízes e alocação de biomassa. Espécies aquisitivas apresentam folhas de maior área foliar por unidade de massa e crescimento rápido, enquanto espécies conservativas possuem folhas mais espessas e duráveis, adaptadas a ambientes com recursos limitados (WRIGHT et al., 2004; DONAVAN et al., 2011). Características funcionais como taxa de crescimento relativo (TCR), área foliar (AF), área foliar específica (AFE), conteúdo de massa seca foliar (CMSF), espessura foliar (EF) e fração de massa de raízes (FMR) determinam a capacidade de aquisição e alocação de recursos, sendo moldadas pela plasticidade fenotípica em resposta às condições ambientais (VIOLLE et al., 2007; FOROUGHBAKHCH et al., 2006; SANDEL et al., 2011).

O uso de ciência de dados é fundamental para entender essas respostas,

integrando grandes conjuntos de informações sobre biomassa, traços funcionais e condições ambientais. Análises estatísticas e multivariadas permitem identificar padrões de resposta, relações entre traços e tratamentos, e gerar informações precisas para o manejo e restauração de ecossistemas degradados.

Este estudo investigou experimentalmente os efeitos da fertilidade do solo e da disponibilidade de luz na alocação de biomassa e em seis características funcionais durante os quatro primeiros meses de desenvolvimento de quatro espécies arbóreas usadas em restauração florestal. Foram avaliadas a biomassa total (Biomassa), frações alocadas a raízes finas (FMRF), raízes grossas (FMRG), ramos e troncos (FMRT) e folhas (FMF), além de AF, AFE, CMSF, EF, FMR e TCR. Esperava-se que: a limitação de recursos abaixo do solo aumentasse a alocação para raízes; a limitação acima do solo promovesse maior alocação para partes aéreas e folhas mais desenvolvidas; e as respostas diferenciam entre espécies e entre condições de campo e controladas, refletindo a interação entre espécies e ambiente.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Levantamento dos Dados

Em 2020, foram selecionadas quatro espécies arbóreas com ampla distribuição e diferentes taxas de crescimento, com base na "Lista de espécies indicadas para restauração ecológica para diversas regiões do estado de São Paulo" (SÃO PAULO, 2019). As espécies escolhidas foram: *Hymenaea courbaril* (Jatobá), *Pterogyne nitens* (Amendoim do Campo), *Colubrina glandulosa* (Sobrasil) e *Myroxylon peruferum* (Cabreúva).

O experimento consistiu em 7 tratamentos, que variaram em duas disponibilidades de luz (plena luz e 75% de sombreamento), 3 níveis de adubação (12g de adubo químico, 36g de adubo químico e substituição de $\frac{1}{4}$ do volume do saco por matéria orgânica com 12g de adubo químico) e um tratamento em campo (controle manual de pragas e gramíneas). Durante 5 meses, foram coletados dados de crescimento (altura e diâmetro) periodicamente. Após esse período, as plantas foram cuidadosamente desenterradas e lavadas para retirada do solo das raízes, que foram separadas e pesadas para a análise dos traços funcionais.

2.2. Análise de Dados

Os dados foram organizados e analisados com a biblioteca *pandas* em Python. Passaram por uma etapa de pré-processamento, que inclui limpeza e verificação de valores ausentes. A análise exploratória de dados foi realizada com medidas centrais e de dispersão para entender a distribuição das variáveis. Em seguida, foram feitas análises de crescimento, testes de normalidade e ANOVAs (one-way e two-way) para avaliar diferenças significativas entre espécies e tratamentos. O teste de Tukey foi aplicado para identificar diferenças específicas entre os grupos. Gráficos foram gerados para facilitar a interpretação e comparação dos resultados.

3. RESULTADOS

3.1. Alocação de Biomassa e Características Funcionais

De modo geral, as plantas cultivadas a pleno sol alocaram maior biomassa em comparação às cultivadas à sombra (Figura 1). No entanto, o desenvolvimento das plantas no campo foi inferior ao do viveiro, com exceção de *Pterogyne nitens*, que apresentou maior biomassa no campo, mesmo sob pleno sol. O estresse hídrico no campo afetou mais intensamente as plantas do que o estresse causado pela baixa luminosidade no tratamento de sombra.

A alocação de biomassa variou principalmente entre as condições de luminosidade e no campo, com diferenças menores associadas ao tipo de adubação. As plantas cultivadas a pleno sol tendem a alocar uma menor porcentagem de biomassa para folhas, embora essa diferença tenha sido pequena para *Hymenaea courbaril*. Por outro lado, a alocação para raízes foi maior nas plantas expostas ao sol, com variações entre as espécies.

Entre as espécies, *Colubrina glandulosa* apresentou a maior diferença na biomassa, atingindo 2,5 vezes a biomassa das plantas cultivadas à sombra e cerca de 9,5 vezes a biomassa das cultivadas no campo. No viveiro, as plantas a pleno sol, exceto *Pterogyne nitens*, alocaram menos biomassa para raízes do que aquelas cultivadas sob outras condições, especialmente no campo. *Hymenaea courbaril* e *Myroxylon peruferum* apresentaram maior alocação para as partes aéreas e menor alocação para raízes finas quando cultivadas a pleno sol, com exceção de *Myroxylon peruferum*, que teve maior alocação para raízes finas sob baixa luminosidade.

Pterogyne nitens apresentou padrão semelhante, mas com alta alocação para raízes grossas. Em geral, as diferentes formas de adubação não afetaram significativamente a alocação de biomassa dentro de cada nível de luminosidade.

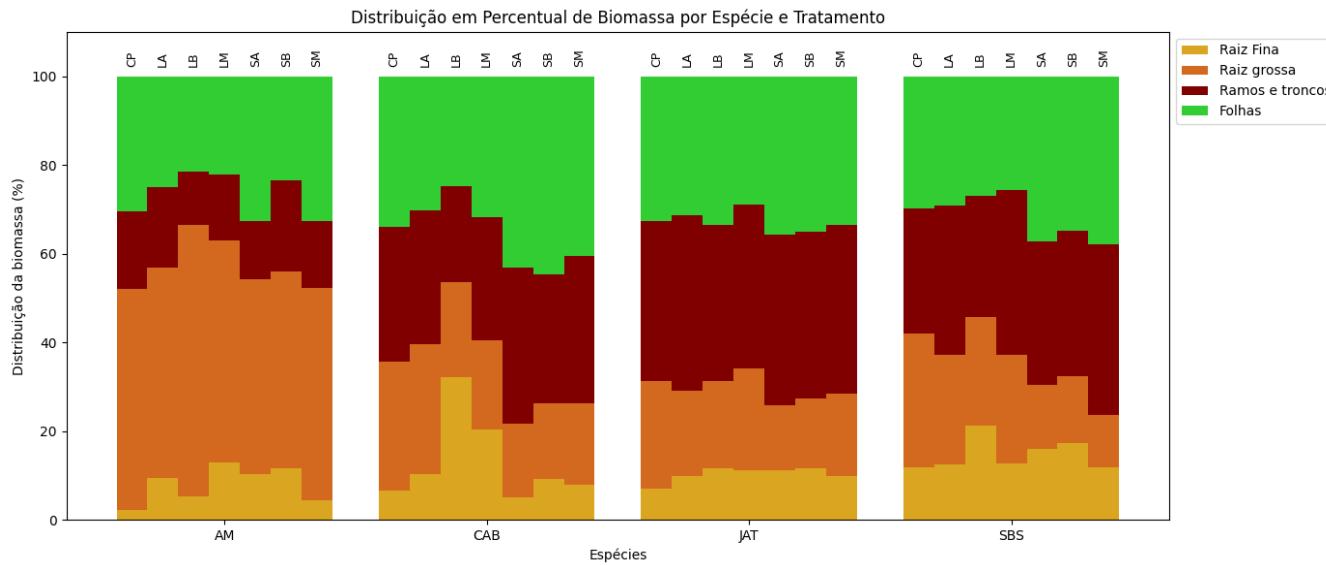


Figura 1: Distribuição de Biomassa conforme espécie e tratamento
Fonte: Autores (2025)

3.2. Análise de Componentes Principais (PCA)

A PCA revelou uma clara diferenciação nos traços funcionais das plantas entre as espécies e suas respostas aos tratamentos de luminosidade e adubação. Os dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2) explicaram 62,22% da variação total dos dados, com o PC1 responsável por 35,54%. O PC1 correlacionou-se positivamente com a biomassa total (0,419), biomassa foliar (0,388) e biomassa de ramos e troncos (0,373), sugerindo que ele reflete uma estratégia de maior alocação de biomassa para as partes aéreas. O PC2, por sua vez, correlacionou-se positivamente com a fração de massa de raízes (FMR) e a biomassa alocada para raízes grossas (0,462), enquanto se correlacionou negativamente com biomassa de ramos e troncos (-0,419) e biomassa foliar (-0,355). Esses resultados indicam que o PC2 está relacionado à alocação de biomassa para raízes e troncos, refletindo uma estratégia voltada para o suporte estrutural.

3.3. Respostas das Espécies aos Tratamentos

As espécies apresentaram respostas distintas aos tratamentos de luminosidade e adubação. Espécies como *Pterogyne nitens* e *Myroxylon peruiferum* adotaram uma estratégia mais aquisitiva, com maior alocação de biomassa para as partes aéreas, evidenciada por folhas maiores e maior taxa de crescimento. Já *Hymenaea courbaril* e *Colubrina glandulosa* adotaram estratégias conservativas, alocando mais biomassa para o sistema radicular e troncos, características adaptativas a ambientes com recursos limitados, especialmente sob sombreamento.

3.4. Análise de Variância (ANOVA)

A ANOVA revelou que os tratamentos de luminosidade e adubação influenciaram significativamente a alocação de biomassa e os traços funcionais das plantas. Embora o tratamento não tenha afetado significativamente a Taxa de Crescimento Relativo (TCR) ($p > 0,05$), traços como biomassa total ($p < 0,05$), fração de massa de raízes finas (FMRF) ($p < 0,05$) e biomassa foliar ($p < 0,05$) apresentaram diferenças significativas. As plantas cultivadas a pleno sol apresentaram maior biomassa total, maior biomassa foliar, maior espessura foliar (EF) e maior conteúdo de matéria seca foliar (CMSF), em comparação com aquelas cultivadas sob sombreamento, que direcionaram mais recursos para o desenvolvimento das raízes.

3.5. Plasticidade Fenotípica

A plasticidade fenotípica das espécies foi observada como uma resposta adaptativa aos diferentes tratamentos ambientais. As plantas cultivadas a pleno sol exibiram maior alocação de biomassa para as partes aéreas, resultando em maior TCR, espessura foliar (EF) e CMSF. Já as plantas cultivadas sob sombreamento apresentaram maior área foliar (AF), maior área foliar específica (AFE) e maior alocação de biomassa para o sistema radicular, refletindo uma estratégia adaptativa para otimizar a captura de recursos sob condições de baixa luminosidade.

4. DISCUSSÃO

4.1. Efeitos dos Tratamentos de Luminosidade e Adubação sobre o Crescimento das Plantas

Os resultados indicam que os tratamentos de luminosidade e adubação influenciaram significativamente o crescimento e a alocação de biomassa das plantas,

com variações evidentes entre as espécies. Plantas cultivadas a pleno sol apresentaram maior biomassa total e maior crescimento em altura, refletindo uma adaptação a condições de alta luminosidade, especialmente nas espécies aquisitivas como *Pterogyne nitens*, que alocaram mais biomassa para as partes aéreas, facilitando o crescimento rápido.

As plantas cultivadas sob sombreamento demonstraram uma estratégia mais conservativa, com maior alocação de biomassa para as raízes, refletindo a necessidade de maior suporte estrutural em ambientes de baixa luminosidade. Além disso, a adubação teve um efeito direto sobre a biomassa das plantas, promovendo maior crescimento, especialmente nas espécies com alta demanda de nutrientes.

4.2. A Influência dos Tratamentos nas Estratégias Funcionais das Espécies

As respostas das espécies aos tratamentos de luminosidade e adubação reforçam a ideia de que elas adotam estratégias funcionais distintas. Espécies aquisitivas, como *Pterogyne nitens*, se beneficiaram mais de condições de pleno sol e alta adubação, apresentando maior crescimento foliar e taxa de crescimento relativa (TCR). Já espécies como *Hymenaea courbaril*, com uma estratégia conservativa, se destacaram sob sombreamento, direcionando mais biomassa para o sistema radicular.

4.3. Ciência de Dados e Planejamento de Restauração Ecológica

A ciência de dados desempenhou um papel crucial na análise dos dados e na identificação de padrões de resposta das plantas aos tratamentos. Ferramentas de análise multivariada, como regressão múltipla e aprendizado de máquina, podem ser usadas para explorar interações complexas entre variáveis ambientais e as respostas das plantas, ajudando a otimizar práticas de manejo e restauração ecológica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALTZER, J. L.; THOMAS, S. C. Determinants of whole-plant light requirements in Bornean rain forest tree saplings. *Journal of Ecology*, [s. l.], v. 95, n. 6, p. 1208–1221, 2007.

CHAZDON, R. L.; URIARTE, M. Natural regeneration in the context of large-scale forest and landscape restoration in the tropics. **Biotropica**, [s. l.], v. 48, n. 6, p. 709–715, 2016. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1111/btp.12409>.

CORNELISSEN, J. H. C. et al. A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. **Australian Journal of Botany**, [s. l.], v. 51, n. 4, p. 335–380, 2003.

DONOVAN, L. A., et al. The evolution of the worldwide leaf economics spectrum. **Trends in Ecology & Evolution**, vol. 26. n.2, p. 88-95, 2011.

FOROUGHBAKHCH, R. et al. Establishment, growth and biomass production of 10 tree woody species introduced for reforestation and ecological restoration in northeastern Mexico. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 235, n. 1–3, p. 194–201, 2006. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112706008413>.

HUANTE, P.; RINCON, E.; ACOSTA, I. Nutrient Availability and growth Rate of 34 Woody Species from a Tropical Deciduous Forest in Mexico. **Functional Ecology**, [s. l.], v. 9, n. 6, p. 849, 1995.

KHAN, N. et al. Exploring the natural variation for seedling traits and their link with seed dimensions in tomato. **PLoS ONE**, [s. l.], v. 7, n. 8, p. e43991, 2012. Disponível em: <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0043991>.

KRAMER-WALTER, K. R.; LAUGHLIN, D. C. Root nutrient concentration and biomass allocation are more plastic than morphological traits in response to nutrient limitation. **Plant and Soil**, [s. l.], v. 416, n. 1–2, p. 539–550, 2017.

PÉREZ-HARGUINDEGUY, N. et al. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. **Australian Journal of Botany**, [s. l.], v. 61, n. 3, p. 167–234, 2013.

PERON, A. J.; EVANGELISTA, A. R. Degradação de pastagens em regiões de cerrado. **Ciência e Agrotecnologia**, [s. l.], v. 28, n. 3, p. 655–661, 2004. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-70542004000300023&lng=pt&tlang=pt.

POORTER, H. *et al.* Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): A meta-analysis. **New Phytologist**, [s. l.], v. 182, n. 3, p. 565–588, 2009.

RUBIRA, F. G. Definição e diferenciação dos conceitos de áreas verdes/espaços livres e degradação ambiental/impacto ambiental. **Caderno de geografía**, [s. l.], v. 26, n. 45, p. 134–150, 2016. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=333243260008>.

SANDEL, B.; CORBIN, J. D.; KRUPA, M. Using plant functional traits to guide restoration: A case study in California coastal grassland. **Ecosphere**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 1–16, 2011.

SÃO PAULO (ESTADO). Secretaria do Meio Ambiente. Instituto de Botânica. Lista de espécies para restauração ecológica (RAD): 2019. 2019. Disponível em: <https://www.infraestruturaemeioambiente.sp.gov.br/institutodebotanica/wp-content/uploads/sites/235/2019/10/lista-especies-rad-2019.pdf>. Acesso em: jul. 2025.

VIOLLE, C. *et al.* Let the concept of trait be functional! . **Oikos**, [s. l.], v. 116, n. 5, p. 882–892, 2007.

WRIGHT, I. J. *et al.* The worldwide leaf economics spectrum. **Nature**, [s. l.], v. 428, n. 6985, p. 821–827, 2004.

ZHAO, N. *et al.* Conservative allocation strategy of multiple nutrients among major plant organs: From species to community. **Journal of Ecology**, [s. l.], v. 108, n. 1, p. 267–278, 2020.