



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
DEPARTAMENTO DE ECOLOGIA



WADSON DE JESUS CORREIA

Relação Biodiversidade-Produtividade na Mata Atlântica

São Cristóvão

2024.1



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
DEPARTAMENTO DE ECOLOGIA



WADSON DE JESUS CORREIA

Relação Biodiversidade-Produtividade na Mata Atlântica

Orientador: Prof. Dr. Sidney Feitosa Gouveia

Monografia apresentada ao
Departamento de Ecologia da
Universidade Federal de Sergipe como
parte dos requisitos para obtenção do
título de Bacharel em Ecologia

São Cristóvão

2024.1

AGRADECIMENTOS

A princípio gostaria de dedicar este momento especial para as pessoas que foram de extrema importância nesta minha jornada, expressando os meus mais sinceros agradecimentos.

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por me ajudar a superar as dificuldades encontradas durante esse caminho.

Aos meus queridos pais, Welington e Aparecida, expresso meu agradecimento pelo carinho e apoio incondicional que deram durante todos os dias da minha vida, seus esforços contribuíram na formação do meu caráter. Da mesma forma, dedico meu agradecimento aos meus irmãos, Sueli e Widson, por me incentivarem e apoiarem ao longo dessa jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Sidney Feitosa Gouveia, sou grato por ter aceitado ser o meu orientador, pela sua disponibilidade, paciência, atenção e seus ensinamentos durante esse projeto.

Agradeço também ao Dr. Eduardo Vinícius da Silva Oliveira, por estar sempre a disposição para sanar minhas dúvidas e também pela sua paciência.

Aos colegas de turma e à minha amiga Leyliane, que me acompanharam ao longo deste percurso, que passaram pelos mesmos perrengues, pelos momentos de descontração durante a graduação e por estarem presentes para estender a mão para ajudar quando necessário. Já que fiz meu agradecimento aos colegas de turma, não poderia esquecer de deixar algumas palavras de reconhecimento à Michelly, minha parceira que encontrei na UFS. Agradeço por estar sempre presente para aconselhar e também compartilhar importantes momentos de descontração.

Por fim, e não menos importante, agradeço aos professores do departamento de ecologia e ao pessoal do PIBILab por compartilharem seus conhecimentos.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVOS	8
2.1 Objetivo Geral	8
2.2 Objetivos específicos	8
3. MATERIAL E MÉTODOS	8
3.1 Área de estudo	8
3.2 Coleta dos dados	9
3.3 Análise dos dados	10
4. RESULTADOS	11
5. DISCUSSÃO	13
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	16
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	17

RESUMO

A biodiversidade proporciona diversos serviços para o meio ambiente, sendo fundamental para o funcionamento dos ecossistemas. Devido a crescente perda de biodiversidade, um campo de estudo relativamente novo conhecido como BEF (do inglês '*Biodiversity Ecosystem Functions*') têm ganhado proeminência. O BEF busca relacionar os efeitos da biodiversidade nas funções ecossistêmicas, investigando como a perda da diversidade de espécies pode afetar suas propriedades. O bioma Mata Atlântica é reconhecido como um "hotspot" da biodiversidade, abrigando ecossistemas de elevada diversidade e endemismos. Neste trabalho, testamos o efeito da riqueza de espécies de plantas lenhosas, da densidade de indivíduos e de preditores ambientais sobre a produtividade da Mata Atlântica, estimada a partir da área basal total dos indivíduos de 26 sítios distribuídos no seu domínio, obtidos a partir de dados da literatura. Foi empregada uma matriz de correlação de Pearson para analisar a colinearidade entre as variáveis ambientais e o índice *I* de Moran para avaliar a autocorrelação espacial da riqueza, densidade e área basal. Para determinar a relação destas variáveis foi utilizado lineares não espaciais e espaciais, na presença de autocorrelação espacial. Por fim, comparamos modelos de regressão aditivo e com interação da riqueza com as variáveis de densidade, precipitação anual, pH, topografia, temperatura histórica, precipitação histórica através de seleção de modelos empregando o critério de informação de Akaike (AIC). O índice *I* de Moran revelou a autocorrelação espacial nos resíduos da regressão entre densidade e área basal, e o modelo SAR (*spatial autoregressive model*) não revelou significância estatística entre essas variáveis. Por sua vez, a relação entre riqueza e área basal apresentou uma relação negativa, contrária ao esperado. O modelo com interação (AIC = 116.99; $R^2 = 0,80$) foi superior ao modelo aditivo (AIC = 138.66; $R^2 = 0,52$), indicando que fatores ambientais influenciam a produtividade dependendo da riqueza local de espécies. A interação entre riqueza e precipitação anual sugere um efeito de interações competitivas entre as espécies, resultando em uma redução da área basal total em áreas com elevada riqueza de espécies. Nossos resultados corroboram a hipótese de que a produtividade pode não estar diretamente ligada à diversidade. Estudos como o BEF continuam sendo essenciais para a elaboração de estratégias visando a conservação da biodiversidade.

Palavras-chave: BEF, riqueza, diversidade, área basal.

1. INTRODUÇÃO

A ecologia se desenvolveu, ao longo do século XX, em torno de dois grandes programas de pesquisa complementares, porém com pouca integração: a ecologia dos organismos (ou demoecologia) e a ecologia de ecossistemas (ou sinecologia) (Hutchinson, 1978). A ecologia dos organismos atualmente abrange o que chamamos de ciência da biodiversidade e está pautada no conceito de espécies e nos processos evolutivos que resultam na variação dos organismos em níveis de população e de comunidades. Por sua vez, a ecologia de ecossistemas se consolidou em torno dos princípios físicos de fluxo de energia e matéria, e do papel funcional dos organismos nessas dinâmicas, independentemente da identidade dos organismos envolvidos (i.e., das espécies) (Loreau et al., 2001). Porém, essas diferentes abordagens da ecologia têm um interesse comum, que é a relação entre os organismos, ou seja, a própria biodiversidade, e o funcionamento dos diferentes sistemas geoecológicos da biosfera. Os primeiros ecólogos já observavam que a sucessão terrestre e lacustre estava acompanhada de mudanças no ambiente físico provocadas por organismos (McIntosh, 1985). Atualmente, diferentes abordagens ecológicas perseguem essa integração entre ciência da biodiversidade e ecologia de ecossistemas. Essa urgência decorre do agravamento da perda da biodiversidade, a qual pode ter inúmeras consequências negativas sobre os ecossistemas (Van Ruijven et al., 2005).

Uma dessas abordagens tem sido chamada de Programa de Pesquisa BEF (do inglês '*Biodiversity Ecosystem Functions*'). Ela busca estabelecer um nexos teórico de como o desempenho das diferentes funções ecossistêmicas dependem diretamente da biodiversidade (Doherty & Zedler, 2018). De acordo com Isbell et al. (2015), a maior biodiversidade promove diversos benefícios aos ecossistemas, tais como sua estabilidade e resiliência, as quais reduzem com a perda de diversidade. Os estudos relacionados à biodiversidade e funções ecossistêmicas normalmente utilizam a riqueza, composição e sua uniformidade e analisam como essas variáveis favorecem o funcionamento de um ecossistema (Moral et al., 2023). Uma das perguntas centrais dos estudos no âmbito do BEF se refere à relação entre a diversidade de espécies e produtividade ecossistêmica. Tem-se debatido se de fato a produtividade é influenciada ou não pela diversidade de espécies arbóreas, ou ainda se essa influência ocorre de maneira isolada ou depende de outros fatores, como o clima e características do solo (Kohyama et al., 2023). Embora os

estudos tenham se intensificado em diversos países, ainda há diversas lacunas geográficas para investigar essa relação e não há um consenso (O'Connor et al., 2021).

Dentre os pontos controversos sobre a relação entre biodiversidade e produtividade estão os possíveis efeitos da competitividade, do efeito de seleção, da complementaridade de nicho, entre outros fatores que podem interferir nessa possível relação (Ali, 2023). Diante disso, diferentes hipóteses foram propostas para explicar essa relação no ecossistema. Segundo Furey e Tilman (2021), à medida que a biodiversidade aumenta, ocorre aumento na produtividade dos ecossistemas. Para os autores, a maior diversidade contribui com a fertilidade do solo. Por outro lado, David Wardle sugere que o aumento da produtividade atribuído à biodiversidade pode estar diretamente associado às espécies dominantes e aos grupos funcionais (Gurevitch et al., 2021). Dessa forma, não haveria, necessariamente, uma relação entre diversidade e produtividade.

As florestas estão entre os principais focos do BEF, pois possuem uma enorme importância para a biodiversidade e contribuem para o funcionamento dos serviços ecossistêmicos globalmente. Pesquisas recentes têm mostrado a influência da biodiversidade sobre as funções ecossistêmicas (Brockhoff et al., 2017), incluindo a polinização, ciclagem de nutrientes, ciclo da água, sequestro de carbono, controle de pragas e regulação do clima. Além disso, as florestas desempenham um papel cultural e espiritual para a sociedade (Palo & Uusivuori, 1999), de modo que sua presença é essencial tanto para a biodiversidade quanto para a sociedade, fornecendo inúmeros benefícios. Contudo, ainda não há um consenso sobre a associação entre a diversidade e a produtividade em ambientes florestais, especialmente nas regiões tropicais, onde há menos estudos.

Nesse contexto, a Mata Atlântica se destaca por ser um dos ecossistemas com maior diversidade do planeta. Essa formação, distribuída na costa leste da América do Sul entre Brasil e Argentina, apresenta climas tropicais e subtropicais, predominantemente quente e úmido, e diferentes características geológicas, geomorfológicas e climatológicas, resultando em uma formação heterogênea (Barros et al., 2016). O macroclima é um fator determinante na distribuição das fitofisionomias encontradas neste bioma (Franke et al., 2005), que é conhecido por possuir a maior biodiversidade por área equivalente no Brasil, sendo inclusive um dos hotspots de biodiversidade (Myers et al., 2000). Essa formação florestal abrange uma ampla

quantidade de espécies na fauna e flora. Devido às suas características este bioma é reconhecido internacionalmente como uma das áreas de prioridade de conservação, devido a sua riqueza e taxa de endemismo (Tabarelli et al., 2010). No entanto, apesar da Mata Atlântica possuir essa enorme importância para a biodiversidade, ainda existem lacunas em conhecimentos que aprofundam sobre essa temática. Este estudo buscou investigar a relação entre a diversidade de espécies vegetais arbóreas e a produtividade na Mata Atlântica, contemplando as distintas hipóteses propostas por Tilman e Wardle (Gurevitch et al. 2021). Além disso, buscou-se determinar como outros fatores ambientais também estão relacionados à produtividade, incluindo a densidade de árvores e aspectos edafoclimáticos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Neste trabalho, investigamos a relação entre a riqueza de espécies lenhosas e a produtividade, descrita pela área basal, na Mata Atlântica brasileira, e como outros fatores ambientais e a densidade participam desta relação.

2.2 Objetivos específicos

- Testar o efeito da riqueza de espécies e densidade de árvores sobre a área basal.
- Testar o efeito de preditores edafoclimáticos sobre a área basal.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A área de estudo contemplou localidades de estudos no domínio fitogeográfico da Mata Atlântica do Brasil, delimitada através do polígono disponibilizado pelo IBGE (2004).

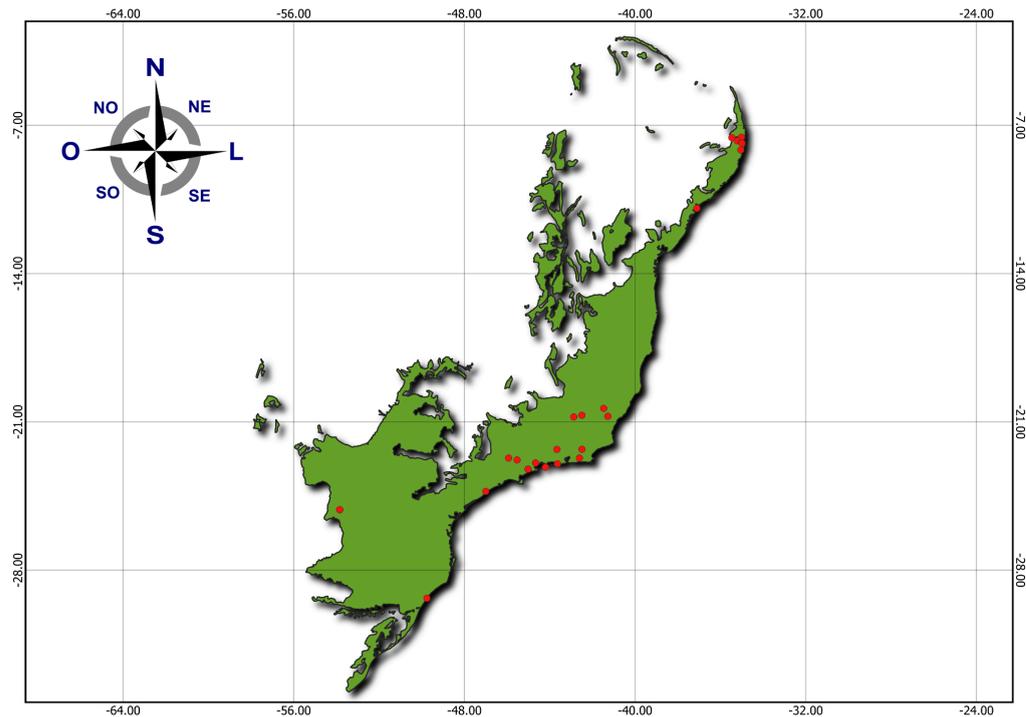


Figura 1. Localização dos sítios do estudo (pontos vermelhos) na Mata Atlântica (verde)

3.2 Coleta dos dados

Inicialmente, foi feito um levantamento bibliográfico referente a fitofisionomia de espécies lenhosas da Mata Atlântica nas bases de dados Scielo, Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) e Google Acadêmico, utilizando os termos: (Fitossociologia OR Estrutura OR Sociabilidade) AND (Mata Atlântica OR Floresta Atlântica), ("Mata Atlântica" OR "Floresta Atlântica") AND (densidade OR frequência OR dominância OR "área basal" "índice de valor de importância" lenhosas), ("Mata Atlântica" OR "Floresta Atlântica") AND (Regeneração Composição / levantamento florístico "espécie* arbórea*"), (Mata Atlântica OR Floresta Atlântica) AND (Fitossociologia OR Estrutura OR Sociabilidade) AND (árvores OR "espécies arbóreas" OR "espécies lenhosas"), (Fitossociologia OR Estrutura OR Sociabilidade) AND (Mata Atlântica OR Floresta Atlântica) AND (NORDESTE) e foram coletados dados de densidade e área basal, esta última sendo a medida da soma das seções transversais dos troncos, que é fortemente correlacionada com a biomassa (Silva et al., 2022), enquanto os dados de riqueza foi obtido no site NeoTropTree (Oliveira-Filho, 2017).

O levantamento resultou em 21 artigos distribuídos nas regiões Nordeste, Sudeste e Sul, os quais apresentaram dados de área basal e densidade de 30 sítios diferentes. Para

determinar a riqueza de espécies lenhosas nas localidades, utilizamos os 30 sítios do estudo para criar um área de buffer com raio de um 1.0 grau, dentro do qual obtivemos a riqueza total de espécies disponível na base de dados NeoTropTree (Oliveira-Filho, 2017). Os pontos referentes aos trabalhos acadêmicos que se encontravam dentro da área coberta pelo buffer, foram então comparados com as coordenadas geográficas e a fitofisionomia da vegetação determinado pelo buffer para identificar se correspondiam ao mesmo local de estudo. As amostras de estudo que não atenderam esses critérios foram excluídas do estudo. Esse procedimento foi feito com o software QGIS (QGIS Development Team, 2022).

Para testar o efeito de variáveis ambientais sobre a área basal, foram coletados dados de temperatura média anual, sazonalidade de temperatura, temperatura máxima do mês mais quente, temperatura mínima do mês mais frio, precipitação anual, precipitação do mês mais chuvoso, precipitação do mês mais seco, sazonalidade de precipitação, velocidade do vento e pressão do vapor. Esses dados foram obtidos da plataforma WorldClim (Fick et al., 2017). Para representar as variáveis de solo, foram obtidos dados de densidade de carbono orgânico, pH e nitrogênio com profundidade de 0 a 30 cm e porosidade de 30 a 60 cm de profundidade, todas disponibilizadas no banco de dados do SoilGrids (Hengl et al., 2017). Para descrever a topografia, foi calculado o coeficiente de variação da altitude, obtida da base de dados SRTM 90m DEM Digital Elevation Database (Reuter et al., 2007). Além disso, utilizamos variáveis climáticas que descrevem as mudanças históricas do clima, incluindo a diferença na temperatura média anual e precipitação anual entre o presente e período de 800 mil anos atrás. Esses dados foram coletados utilizando-se o pacote PastClim (Leonardi et al. 2023) no software R (R Core Team 2023).

3.3 Análise dos dados

Inicialmente, foram identificados 4 *outliers* que foram removidos da análise, resultando em 26 sítios. Para determinar a direção e intensidade da correlação entre as variáveis preditoras, foi realizada a matriz de correlação de Pearson, excluindo-se as variáveis que apresentava coeficiente de correlação $r \geq 0,7$. Para testar a relação entre as variáveis foi aplicada a regressão linear simples, utilizando as variáveis riqueza, área basal e densidade. Na primeira análise, a riqueza foi considerada a variável independente e a área basal como variável dependente. Em seguida, realizou-se a regressão linear da riqueza com a densidade e, posteriormente, a densidade com a área basal. Em seguida, foi calculado o índice I de Moran com permutação de Monte Carlo para verificar a presença de autocorrelação espacial nos

resíduos das regressões envolvendo riqueza, área basal e densidade. Quando esses resíduos apresentaram autocorrelação espacial, as análises foram refeitas utilizando um modelo de regressão espacial autorregressivo (*spatial autoregressive model* - SAR; Ver Hoef et al., 2018). Este modelo de regressão espacial considera que os dados possuem dependência espacial, levando em consideração a influência da estrutura espacial nos dados.

Por fim, foram realizados dois procedimentos de seleção de modelos (Burnham & Anderson 2004) utilizando análises de regressão linear múltipla. O primeiro inclui apenas modelos aditivos, sem interação entre variáveis. A segunda incluiu a interação entre riqueza e as variáveis ambientais. Além de selecionar os melhores modelos de cada procedimento de seleção de modelos, também foram comparados os melhores modelos aditivos e com interação. Para isso, foi utilizado o critério de informação de Akaike (AIC). Quanto menor o valor do AIC, menor a distância entre os dados observados e o predito pelo modelo, sendo este o melhor modelo para explicar os dados (Burnham & Anderson 2004). Todas as análises foram feitas no ambiente R (R Core Team 2023), utilizando os pacotes raster (Hijman & Van Etten, 2012), spdep (Bivand & Piras, 2022), spatialreg (Bivand et al. 2021), sf (Pebesma & Bivand, 2023), exactextractr (Baston, 2023), MASS (Venables & Ripley, 2002), stargazer (Hlavac, 2018), olsrr (Hebbali, 2024), ggcorrplot (Kassambara & Patil, 2023).

4. RESULTADOS

A matriz de correlação de Pearson indicou correlação entre variáveis. Após exclusão das variáveis redundantes, retivemos precipitação anual, pH, topografia, temperatura histórica, precipitação histórica para as análises subsequentes. O teste de Moran nos resíduos da regressão linear entre a riqueza e área basal não identificou autocorrelação espacial (p -valor = 0,49), nem nos resíduos da regressão entre riqueza e densidade (p -valor = 0,06). Porém, encontrou autocorrelação espacial significativa no modelo envolvendo área basal e densidade (p -valor = 0,01) (Figura 2).

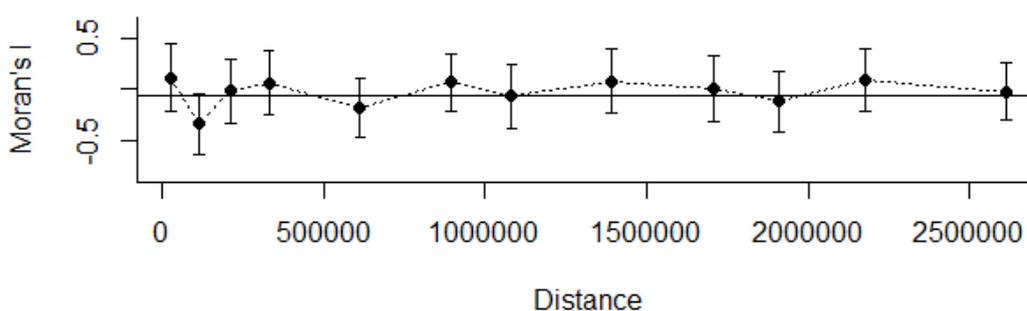


Figura 2. Correlograma de Moran dos resíduos da regressão linear entre área basal e densidade de árvores da Mata Atlântica.

A análise da regressão linear entre a riqueza e densidade não revelou uma relação estatisticamente significativa (R^2 -ajustado = 0,27; p-valor = 0,63). O modelo SAR envolvendo a relação entre área basal e densidade também revelou a ausência de uma relação estatisticamente significativa (p-valor = 0,81). Por sua vez, na regressão linear entre a riqueza e área basal (Figura 3) o resultado foi significativo, porém, com relação negativa ($R^2 = 0,27$; $\beta = -0,07$; p-valor = 0,003).

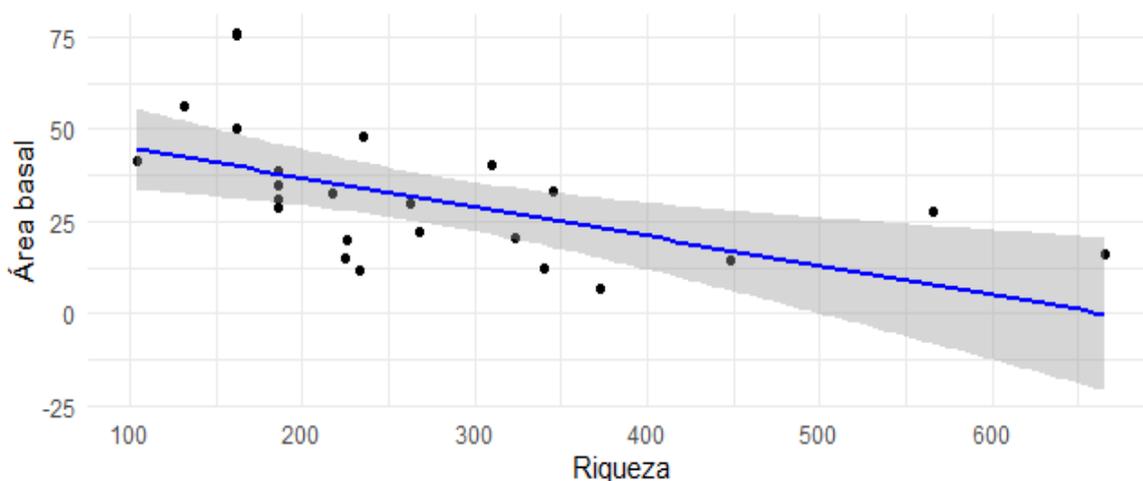


Figura 3. Relação entre área basal e riqueza de espécies.

O melhor modelo aditivo ($AIC = 138,66$) incluiu todas as variáveis e explicou 52% da variação dos dados ($R^2 = 0,52$; $\beta = 51,97$; p-valor < 0,05). O melhor modelo permitindo a interação da riqueza com as variáveis ambientais que também incluiu as mesmas variáveis do modelo aditivo. Este modelo interativo foi superior ao modelo aditivo, com um menor AIC e explicando 80% da variação na área basal ($AIC = 116,99$; $R^2 = 0,80$; $\beta = 8,72$; p-valor < 0,05).

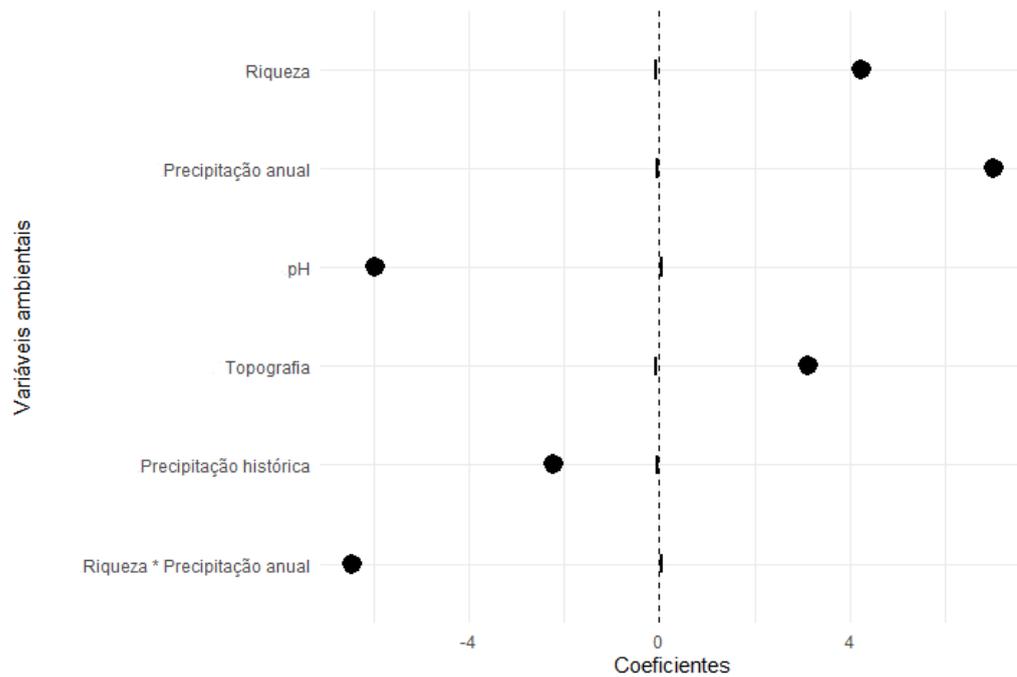


Figura 4. Regressão linear entre área basal e as variáveis ambientais e a interação da riqueza com as variáveis ambientais.

O coeficiente angular da riqueza na regressão múltipla foi positivo (Figura 4), contrastando com o coeficiente negativo da regressão em que foi analisada individualmente (Figura 3), evidenciando interação da riqueza com outras variáveis, o que de fato foi observado. Isso é notado pela interação entre riqueza e precipitação anual, que apresentou coeficiente negativo (Figura 4). Em relação às variáveis climáticas, a precipitação anual também apresentou um coeficiente positivo. Por outro lado, a precipitação histórica apresentou coeficiente negativo (Figura 4). Entre os fatores edáficos, o pH teve coeficiente negativo, enquanto a topografia apresentou uma inclinação positiva (Figura 4).

5. DISCUSSÃO

Encontramos uma relação negativa entre a riqueza e a área basal (Figura 3), ao contrário das duas hipóteses prevalentes sobre essa relação. Por outro lado, não houve relação entre riqueza e densidade, nem entre densidade e área basal. A riqueza só apresentou efeito positivo sobre a área basal quando analisada em conjunto com as outras variáveis. A principal preditora da área basal foi a precipitação anual, exibindo uma relação positiva. O pH apresentou um efeito negativo na área basal, enquanto a topografia mostrou um efeito positivo na área basal. Além disso, a precipitação histórica apresentou uma relação negativa. Por fim, a

interação da riqueza com a precipitação, resultou na mudança de seu coeficiente, alternando entre o efeito positivo para o negativo.

A relação negativa entre riqueza e área basal foi inesperada, contrariando a relação esperada de um efeito positivo da riqueza sobre a produtividade, assumindo-se que a área basal é um indicador adequado da produtividade do ecossistema. Os resultados da relação entre diversidade e produtividade são variados, porém com predominância de resultados positivos (Hector et al., 1999; Liang et al., 2016; Loreau et al., 2001; Pan et al., 2022; Tilman et al., 2001). Wardle et al. (1997, 2000) já tinham proposto que o aumento da produtividade poderia não se relacionar positivamente com a riqueza, mas depender das características das espécies dominantes e dos grupos funcionais (Gurevitch et al., 2021). Neste sentido, é possível que a composição funcional da Mata Atlântica esteja relacionada a essa relação negativa encontrada. Neste caso, a relação negativa poderia ser resultado de uma intensificação de interações competitivas entre as espécies funcionalmente semelhantes com o aumento da diversidade. A competição resulta do balanço entre número de espécies competidoras e a disponibilidade de recursos (Figura 5). Este raciocínio é consistente com a ideia de que a Mata Atlântica é um hotspot de biodiversidade, concentrando a maior riqueza de espécies de plantas do planeta por unidade de área (Ribeiro et al. 2009). Ou seja, é possível que nos elevados níveis locais de riqueza, a competição seja intensificada às custas do crescimento das árvores e portanto da produtividade florestal.

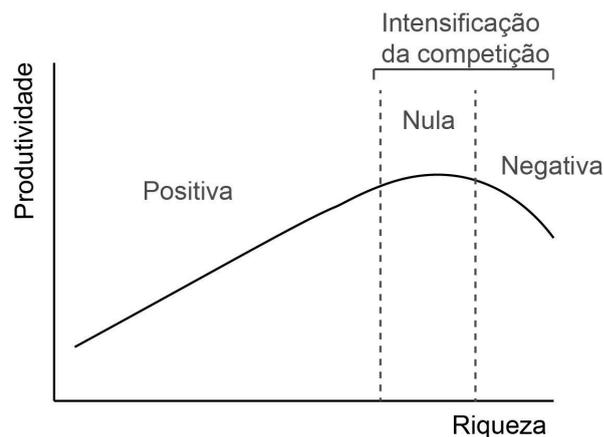


Figura 5. Modelo de relação entre riqueza e produtividade com intensificação da competição em altos níveis de riqueza, potencialmente explicando a existência de relações positivas, nulas e negativas encontradas na literatura.

As atividades antrópicas também podem ser uma das possíveis causas desse resultado na Mata Atlântica. Como aponta Foley et al. (2005), algumas práticas do uso da terra podem

prejudicar o ecossistema florestal, afetando a biomassa, a produtividade, a estrutura do povoamento e a composição de espécies. Durante as fases iniciais do processo de sucessão, é esperado uma relação positiva entre a riqueza e a produtividade, enquanto, nos estágios tardios é esperado que a biomassa continue a aumentar e a riqueza diminua devido à competição (Oliveira et al., 2024). Dessa forma, os resultados obtidos podem também estar relacionados com áreas que estão em fase de recuperação após sofrerem com algum distúrbio antropogênico, explicando esta relação negativa. A Mata Atlântica é um dos ecossistemas mais perturbados do planeta. Atualmente restam cerca de 10% da sua cobertura original, com perda acelerada e impactos de diversos tipos nas áreas ainda existentes (Ribeiro et al., 2009). Por exemplo, em áreas sujeitas a corte seletivo, os diversos indivíduos que começam a crescer apresentam uma área basal com tamanho reduzido. Na medida em que se desenvolvem, ocorre um aumento da competição entre as diferentes espécies, que por sua vez resulta na redução das suas abundâncias e eventual exclusão competitiva. Conforme destacou Higuchi (2008), florestas tropicais em situação de recuperação são caracterizadas pela redução do número de indivíduos e aumento ou estabilidade da área basal devido ao desenvolvimento de árvores sobreviventes. Assim, a fase de recuperação está diretamente ligada a esta relação negativa encontrada entre a riqueza e a área basal, refletindo a competição no desenvolvimento das espécies.

As explicações acima baseadas na competição, embora distintas, não são mutuamente exclusivas. Em todo caso, outro resultado dá suporte a essas explicações. É o caso da inversão do sinal de efeito da riqueza na regressão múltipla. Individualmente, a riqueza possui efeito positivo (Figura 3), mas no modelo com interação da riqueza com outros preditores, seu sinal foi invertido. Isso geralmente é resultado da própria interação entre as preditoras. Especificamente, esse resultado reflete a interação entre a riqueza de espécies e os níveis de precipitação, que reflete a disponibilidade de água nos solos. Ou seja, a competição é maior em áreas com mais espécies e maior volume de chuvas, resultando em uma menor área basal nas comunidades. Em relação a variável de precipitação, os resultados sugerem que a disponibilidade de chuva ao longo do ano é crucial para o desenvolvimento da área basal. Uma menor quantidade de chuva durante um período ou uma maior sazonalidade são prejudiciais para o crescimento da área basal. O estresse hídrico de forma prolongada pode afetar a capacidade fotossintética, o crescimento e a produtividade das plantas (Osakabe, 2014). O efeito negativo encontrado no pH indica que os solos mais alcalinos tendem a inibir o crescimento das plantas e conseqüentemente o desenvolvimento de sua área basal. De

acordo com Taiz (2017), os solos levemente ácidos com pH entre 5.5 e 6.5, favorecem o crescimento de raízes. A relação positiva entre a topografia e a área basal sugere que o aumento da área basal tem relação com um aumento da topografia. Uma menor variação da precipitação histórica é o ideal para um melhor desenvolvimento da área basal.

Em suma, nossos resultados indicam que para a área basal está relacionada a uma maior precipitação anual, solos levemente ácidos, maior variação na altitude, mas uma baixa competição entre espécies pois, a níveis de riqueza muito elevados como na Mata Atlântica, essa área basal pode ser menor. Nossos resultados em relação a área basal e riqueza (Figura 3) se alinham com a proposta de David Wardle, em que postula que o aumento da produtividade pode não está diretamente ligado à diversidade (Gurevitch et al., 2021). Os resultados obtidos sugerem que um aumento da diversidade provocaria também um aumento da competição, e consequentemente esta competição vai influenciar o desenvolvimento da área basal e a estrutura da comunidade. Portanto, embora o acréscimo de diversidade não aumente diretamente a área basal, os fatores climáticos e edáficos são fundamentais para o crescimento da área basal.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nosso estudo, apresentou como a riqueza e área basal se relacionam e indicou a possível presença de competição entre as espécies lenhosas encontradas nas análises. O estudo também destaca como os fatores climáticos são essenciais para o desenvolvimento das espécies, sendo o único grupo com mais de duas variáveis significativas. Além disso, enfatiza como a riqueza interagindo com a precipitação contribui para a redução da área basal de espécies na Mata Atlântica. Diante da atual situação de mudanças climáticas, que tem causado inúmeros impactos à biodiversidade e aos ecossistemas, este estudo destaca a importância das variáveis climáticas para a estabilidade nos processos do ecossistema. Apesar da diversidade ser importante nas florestas, não será apenas possuindo uma maior diversidade que contribuirá para uma maior produtividade.

Estudos como o BEF continuam sendo fundamentais para conseguir compreender os processos que ocorrem no meio ambiente, e dessa maneira elaborar estratégias que possam ser utilizadas na conservação da biodiversidade da Mata Atlântica. Portanto, é necessário mais estudos sobre como ocorrem os processos ecossistêmicos e sobre sua importância nos diferentes tipos de ecossistemas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALI, A. Biodiversity–ecosystem functioning research: Brief history, major trends and perspectives. *Biological Conservation*, v. 285, p. 110210–110210, 2023.
- BARROS, C. F. et al. Mata Atlântica - O desafio de transformar um passado de devastação em um futuro de conhecimento e conservação. In: PEIXOTO, A. L.; LUZ, J. R. P.; BRITO, M. A. (org.). *Conhecendo a biodiversidade*. Brasília: MCTIC, 2016. p. 50-67.
- BASTON, D. *exactextractr*: Fast extraction from raster datasets using polygons. R package version 0.10.0. 2023.
- BEGON, M.; TOWNSEND, C. R. *Ecologia: de indivíduos a ecossistemas*. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2023.
- BIVAND, R. R. R. Packages for analyzing spatial data: a comparative case study with areal data. *Geographical Analysis*, v. 54, n. 3, p. 488-518, 2022. DOI: 10.1111/gean.12319.
- BIVAND, R.; MILLO, G.; PIRAS, G. A review of software for spatial econometrics in R. *Mathematics*, v. 9, n. 11, 2021.
- BROCKERHOFF, E. G. et al. Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. *Biodiversity and Conservation*, v. 26, n. 13, p. 3005–3035, 2017.
- BURNHAM, K. P.; ANDERSON, D. R. *Model selection and multi-model inference: a practical information-theoretic approach*. 2. ed. Nova Iorque: Springer-Verlag, 2004. 488 p.
- DOHERTY, J.; ZEDLER, J. B. Biodiversity-Ecosystem Function (BEF) Theory and Wetland Restoration. In: Finlayson, C. M. et al. *The Wetland Book*. Springer, Dordrecht, 2018. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9659-3_325
- FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, 2017.
- FOLEY, Jonathan A. et al. Consequências globais do uso da terra. *Science*, v. 309, p. 570-574, 2005. DOI: 10.1126/science.1111772.
- FRANKE, C. R.; ROCHA, P. L. B.; KLEIN, W.; GOMES, S. L. (Orgs.). *Mata Atlântica e biodiversidade*. 1. ed. Salvador: Edufba, 2005. 461 p. ISBN 8523203478.
- FUREY, G. N.; TILMAN, D. Plant biodiversity and the regeneration of soil fertility. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 118, p. e2111321118, 2021. DOI: 10.1073/pnas.2111321118.
- GUREVITCH, J.; SCHEINER, S. M.; FOX, G. A. *The ecology of plants*. 3. ed. New York: Sinauer Associates/Oxford University Press, 2021.

HEBBALI, A. *olsrr*: Tools for building OLS regression models. R package version 0.6.0.9000. 2024.

HECTOR, A. et al. Plant diversity and productivity experiments in European grasslands. *Science*, v. 286, p. 1123-1127, 1999. DOI: 10.1126/science.286.5442.1123.

HENGL, T. et al. SoilGrids250m: global gridded soil information based on machine learning. *PLOS ONE*, v. 12, n. 2, e0169748, 16 fev. 2017. DOI: 10.1371/journal.pone.0169748.

HIGUCHI, P. et al. Dinâmica da comunidade arbórea em um fragmento de floresta estacional semidecidual montana em Lavras, Minas Gerais, em diferentes classes de solos. *Revista Árvore*, v. 32, n. 3, p. 417–426, 2008. DOI: 10.1590/S0100-67622008000300004.

HIJMANS, R. J.; VAN ETTEN, J. *Geographic analysis and modeling with raster data*. 2012.

HLAVAC, M. *Stargazer: Well-Formatted Regression and Summary Statistics Tables*. Social Policy Institute, Bratislava, Slovakia, 2022. R package version 5.2.3.

HUTCHINSON, G. E. *An Introduction to Population Ecology*. New Haven: Yale University Press, 1978. ISBN 9780300021554.

IBGE. Shapefile da Mata Atlântica. [S.l.]: IBGE, 2004. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/pt/inicio.html>.

ISBELL, F. et al. Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature*, v. 526, n. 7574, p. 574–577, 2015.

KASSAMBARA, A.; PATIL, I. *ggcorrplot: Visualization of a correlation matrix using 'ggplot2'*. R package version 0.1.4.1. 2023.

KOHYAMA, T. I. et al. Contribution of tree community structure to forest productivity across a thermal gradient in eastern Asia. *Nature Communications*, v. 14, n. 1, 2023.

LEONARDI, M.; HALLET, E. Y.; Beyer, R.; KRAPP, M.; MANICA, A. (2023). “*pastclim 1.2*: an R package to easily access and use paleoclimatic reconstructions.” *Ecography*, 2023, e06481. doi: 10.1111/ecog.06481.

LIANG, J. et al. Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests. *Science*, v. 354, p. aaf8957, 2016. DOI: 10.1126/science.aaf8957.

LOREAU, M. et al. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges. *Science*, v. 294, p. 804-808, 2001. DOI: 10.1126/science.1064088.

MCINTOSH, R. P. *The background of ecology: Concept and theory*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.

- MORAL, R. A. et al. Going beyond richness: Modelling the BEF relationship using species identity, evenness, richness and species interactions via the DImodels R package. *Methods in Ecology and Evolution*, v. 14, n. 9, p. 2250–2258, 2023.
- MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, v. 403, n. 6772, p. 853–858, 2000.
- O’CONNOR, M. I. et al. Grand challenges in biodiversity–ecosystem functioning research in the era of science–policy platforms require explicit consideration of feedbacks. *Proceedings of The Royal Society B: Biological Sciences*, v. 288, n. 1960, 2021.
- OLIVEIRA, E. V. da S. et al. Estoques aéreos de biomassa e carbono em remanescente de Caatinga no Estado de Sergipe, Brasil. *Pesquisa Florestal Brasileira*, [S. l.], v. 44, 2024. DOI: 10.4336/2024.pfb.44e202102214.
- OLIVEIRA-FILHO, A.T. 2017. NeoTropTree, Flora arbórea da Região Neotropical: Um banco de dados envolvendo biogeografia, diversidade e conservação. Universidade Federal de Minas Gerais. (<http://www.neotropree.info>).
- OSAKABE, Y.; OSAKABE, K.; SHINOZAKI, K.; TRAN, L.-S. P. Response of plants to water stress. *Frontiers in Plant Science*, v. 5, p. 86, 2014. DOI: 10.3389/fpls.2014.00086.
- PALO, M.; UUSIVUORI, J. (orgs.). *World Forests, Society and Environment*, v. 1. Dordrecht: Springer Netherlands, 1999. ISBN 978-0-7923-5321-8. ISBN 978-94-011-4746-0.
- PAN, Q. et al. Biodiversity–productivity relationships in a natural grassland community vary under diversity loss scenarios. *Journal of Ecology*, v. 110, p. 210–220, 2022. DOI: 10.1111/1365-2745.13797.
- PEBESMA, E.; BIVAND, R. *Spatial data science: with applications in R*. Chapman and Hall/CRC, 2023.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM. *QGIS Geographic Information System*. Versão 3.28.7-Firenze. QGIS Association. Disponível em: <<https://www.qgis.org>>.
- R Core Team (2023). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>.
- REUTER, H. I.; NELSON, A.; JARVIS, A. An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data. *International Journal of Geographic Information Science*, v. 21, n. 9, p. 983–1008, 2007.
- RIBEIRO, M. C.; METZGER, J. P.; MARTENSEN, A. C.; PONZONI, F. J.; HIROTA, M. M. The Brazilian Atlantic Forest: how much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biological Conservation*, v. 142, n. 6, p. 1141–1153, 2009.

SILVA, W. F. M. da et al. Capacidade produtiva de biomassa fresca em uma área de manejo florestal no oeste do Pará: Fresh biomass production capacity in a forest management area in the west of Pará. *Brazilian Journal of Development*, [S. l.], v. 8, n. 8, p. 58696–58710, 2022. DOI: 10.34117/bjdv8n8-249.

TABARELLI, M. et al. Prospects for biodiversity conservation in the Atlantic Forest: Lessons from aging human-modified landscapes. *Biological Conservation*, v. 143, n. 10, p. 2328–2340, 2010.

TAIZ, L. et al. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2017.

TILMAN, D. et al. Diversity and productivity in a long-term grassland experiment. *Science*, v. 294, p. 843-845, 2001. DOI: 10.1126/science.1060391.

VAN RUIJVEN, J.; BERENDSE, F. Diversity–productivity relationships: Initial effects, long-term patterns, and underlying mechanisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 102, n. 3, p. 695–700, 2005.

VENABLES, W. N.; RIPLEY, B. D. *Modern applied statistics with S*. 4. ed. New York: Springer, 2002. ISBN 0-387-95457-0.

VER HOEF, J. M.; PETERSON, E. E.; HOOTEN, M. B.; HANKS, E. M.; FORTIN, M. J. Spatial autoregressive models for statistical inference from ecological data. *Ecological Monographs*, v. 88, n. 1, p. 36-59, 2018.

WARDLE, D. A. *Communities and ecosystems: linking the aboveground and belowground components*. Princeton: Princeton University Press, 1999.. ISBN 0-691-07486-0; ISBN 0-691-07487-9.

WICKHAM, H. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York, 2016. ISBN 978-3-319-24277-4.