

DIVERSIDADE DE MORCEGOS EM CAVERNAS DE SÃO FÉLIX DO XINGU, PARÁ: ANÁLISE ESPACIAL E DINÂMICA SAZONAL

BAT DIVERSITY IN CAVES IN SÃO FÉLIX DO XINGU, PARÁ: SPATIAL ANALYSIS AND SEASONAL DYNAMICS

Sebastião Maximiano Corrêa Genelhú

Laboratório de Diversidade e Sistemática de Mamíferos, e
Departamento de Ecologia e Conservação da Universidade
Federal de Lavras, MG, Brasil.
E-mail: sebastiao Genelhum@gmail.com

Matheus Henrique Simões

VALE - Gerência de Espeleologia e Tecnologia Ferrosos, Nova
Lima, MG, Brasil.
E-mail: matheus.simoes@vale.com

Miguel Angelo Cançado Assis

AMPLO Engenharia e Gestão de projetos LTDA.
E-mail: cancadoassis@gmail.com

Mariane Soares Ribeiro

VALE - Gerência de Espeleologia e Tecnologia Ferrosos, Nova
Lima, MG, Brasil.
E-mail: mariane.ribeiro@vale.com

Xavier Prous

VALE - Gerência de Espeleologia e Tecnologia Ferrosos, Nova
Lima, MG, Brasil.
E-mail: xavier.prous@vale.com

William Douglas Carvalho

Terrestrial Ecology Group (TEG-UAM) e Centro de Investigación
en Biodiversidad y Cambio Global (CIBC-UAM) da Universidad
Autónoma de Madrid – UAM
Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical (PPG-
BIO) da Universidade Federal do Amapá - UNIFAP
E-mail: william.mustin@uam.es

RESUMO

Morcegos desempenham papéis cruciais nos ecossistemas, com muitas espécies utilizando cavernas como refúgios. A riqueza e composição de suas comunidades são influenciadas por características físicas das cavernas e condições ambientais. Este estudo investigou os fatores que determinam a dissimilaridade entre comunidades de morcegos cavernícolas no município de São Félix do Xingu, Pará, Brasil, questionando se existe variação na composição de espécies entre as estações seca e chuvosa, se a dissimilaridade entre as assembleias está relacionada à distância geográfica e às características das cavernas, e quais características das cavernas explicam a presença e composição das assembleias de morcegos. Foram amostradas 90 cavernas durante as estações seca e chuvosa, identificando 11 espécies em 83 cavernas (93,3% do total). As espécies *Peropteryx kappleri* e *Glossophaga soricina* foram as mais frequentes, e análises confirmaram a influência da sazonalidade na composição das comunidades. A diversidade beta total foi moderada ($\beta_{total} = 0,282$). A análise de múltiplas regressões mostrou que a distância geográfica teve impacto mínimo e estatisticamente não significativo, enquanto o volume das cavernas demonstrou uma influência marginalmente significativa na diferença de riqueza ($p = 0,06$). Modelos de mínimos quadrados generalizados indicaram que cavernas maiores estão associadas a maior riqueza de espécies ($p = 0,02$). A Redundância Parcial (RDAP) e redundância parcial baseada em distâncias (dbRDAP) destacou variáveis como altitude e desenvolvimento horizontal como fatores significativos para a variação na composição de espécies, especialmente durante a estação chuvosa. Os resultados sugerem que a sazonalidade

ABSTRACT

Bats play crucial roles in ecosystems, with many species using caves as refuges. The richness and composition of their communities are influenced by the physical characteristics of caves and environmental conditions. This study investigated the factors that determine the dissimilarity between cave bat communities in the municipality of São Félix do Xingu, Pará, Brazil. It was questioned whether there is variation in species composition between the dry and rainy seasons, whether the dissimilarity between assemblages is related to geographical distance and cave characteristics, and which cave characteristics explain the presence and composition of bat assemblages. Ninety caves were sampled during the dry and rainy seasons, identifying 11 species in 83 caves (93.3% of the total). *Peropteryx kappleri* and *Glossophaga soricina* species were the most frequent, and analyses confirmed the influence of seasonality on community composition. Total beta diversity was moderate ($= 0.282$). Multiple regression analysis showed that geographical distance had a minimal and statistically insignificant impact, while cave volume had a marginally significant influence on species richness ($p = 0.06$). Generalized least squares models indicated that larger caves are associated with greater species richness ($p = 0.02$). Partial redundancy analysis (RDAP) and distance-based partial redundancy analysis (dbRDAP) highlighted variables such as altitude and horizontal development as significant factors for variation in species composition, especially during the rainy season. The results suggest that seasonality and physical characteristics of caves, such as volume, play essential roles in structuring bat communities. This study contributes to a more comprehensive understanding of the ecology of cave metacommunities, highlighting the impor-

dade e características físicas das cavernas, como volume, desempenham papéis essenciais na estruturação das comunidades de morcegos. Este estudo contribui para uma compreensão mais abrangente da ecologia de metacomunidades cavernícolas, ressaltando a importância de múltiplos fatores ambientais e espaciais na conservação destes habitats.

PALAVRAS-CHAVE: Autocorrelação espacial, Diversidade beta, Cavernas, Ecologia de poleiros, Morcegos.

INTRODUÇÃO

A primeira lei da geografia de Tobler (1970) afirma que tudo está relacionado, mas a proximidade intensifica essas relações. Esse princípio fundamenta os conceitos de dependência e autocorrelação espacial, que são cruciais para compreender padrões, fluxos e interações em escalas geográficas variadas (Legendre, 1993; Fortin & Dale, 2014). No estudo de comunidades ecológicas, essas ideias têm sido amplamente empregadas para desvendar padrões de composição de espécies, ajudando a quantificar a influência de fatores como distância geográfica, frequentemente associada a menor similaridade entre comunidades devido a limitações na dispersão das espécies (Nekola & White, 1999; Soininen, 2010).

Dentro desse contexto, os padrões de diversidade beta (β) são uma abordagem poderosa para investigar a variação na composição de espécies entre diferentes locais (Baselga, 2010). A diversidade β reflete dois processos principais: turnover e perda ou ganho de espécies (Carvalho et al., 2013). Enquanto o turnover captura mudanças na identidade das espécies entre locais, a perda ou ganho está associada a diferenças na riqueza de espécies, frequentemente relacionadas a pa-

tance of multiple environmental and spatial factors in the conservation of these habitats.

KEYWORDS: *Spatial autocorrelation, Beta diversity, Caves, Roost ecology, Bats.*

INTRODUCTION

Tobler's first law of geography (1970) states that everything is related, but proximity intensifies these relationships. This principle underpins the concepts of spatial dependence and autocorrelation, which are crucial for understanding patterns, flows, and interactions at various geographic scales (Legendre, 1993; Fortin & Dale, 2014). In the study of ecological communities, these ideas have been widely used to uncover patterns of species composition, helping to quantify the influence of factors such as geographic distance, often associated with lower similarity between communities due to limitations in species dispersal (Nekola & White, 1999; Soininen, 2010).

Within this context, beta diversity (β) patterns are a powerful approach for investigating variation in species composition between different locations (Baselga, 2010). Beta diversity reflects two main processes: turnover and species loss or gain (Carvalho et al., 2013). While turnover captures changes in species identity between sites, loss or gain is associated with differences in species richness, often related to nesting patterns (Atmar & Patterson, 1993; Almeida-Neto et al., 2008). These processes occur in combination in nature, creating complex patterns of dissimilarity between communities (Carvalho et al., 2013; Stevens, 2022).

drões de aninhamento (Atmar & Patterson, 1993; Almeida-Neto et al., 2008). Esses processos ocorrem de forma combinada na natureza, criando padrões complexos de dissimilaridade entre comunidades (Carvalho et al., 2013; Stevens, 2022).

A aplicação desses conceitos em estudos ecológicos é particularmente promissora em grupos que desempenham papéis fundamentais nos ecossistemas, como os morcegos (Kunz et al., 2011). Esses mamíferos, ao combinarem alta mobilidade, diversidade funcional e sensibilidade às mudanças ambientais, tornam-se modelos ideais para investigar padrões de diversidade β em diferentes escalas espaciais e temporais (Kunz et al., 2011; Burgin et al., 2018). Além disso, as comunidades de morcegos que utilizam cavernas como abrigos são moldadas por uma interação complexa de fatores ambientais e estruturais, como temperatura, umidade, área e complexidade das cavernas (Ávila-Flores & Medellín, 2004; Oliveira et al., 2018; Barros et al., 2020).

As características físicas das cavernas, como área e volume, não apenas influenciam a riqueza e abundância das espécies, mas também determinam a oferta de microhabitats e a conectividade entre populações (Brunet & Medellín, 2001; Rodríguez-Durán & Soto-Centeno, 2003; Ávila-Flores & Medellín, 2004; Luo et al., 2013; Bu et al., 2014; Torqueti et al., 2017; Oliveira et al., 2018; Vargas-Mena et al., 2020; Barros et al., 2020, 2023). Essas dinâmicas são moduladas por fatores sazonais que afetam a disponibilidade de recursos e as condições ambientais (Leal & Bernard, 2021; Barros et al., 2023). Apesar de sua relevância, ainda há lacunas significativas no entendimento sobre a ecologia de comunidades cavernícolas de morcegos, especialmente no Brasil, incluindo padrões de uso entre diferentes cavernas e a influência da paisagem do entorno sobre a com-

The application of these concepts in ecological studies is particularly promising in groups that play key roles in ecosystems, such as bats (Kunz et al., 2011). These mammals, combining high mobility, functional diversity, and sensitivity to environmental changes, are ideal models for investigating patterns of β diversity at different spatial and temporal scales (Kunz et al., 2011; Burgin et al., 2018). In addition, bat communities that use caves as shelters are shaped by a complex interaction of environmental and structural factors, such as temperature, humidity, area, and cave complexity (Ávila-Flores & Medellín, 2004; Oliveira et al., 2018; Barros et al., 2020).

The physical characteristics of caves, such as area and volume, not only influence species richness and abundance, but also determine the availability of microhabitats and connectivity between populations (Brunet & Medellín, 2001; Rodríguez-Durán & Soto-Centeno, 2003; Ávila-Flores & Medellín, 2004; Luo et al., 2013; Bu et al., 2014; Torqueti et al., 2017; Oliveira et al., 2018; Vargas-Mena et al., 2020; Barros et al., 2020, 2023). These dynamics are modulated by seasonal factors that affect resource availability and environmental conditions (Leal & Bernard, 2021; Barros et al., 2023). Despite their relevance, there are still significant gaps in the understanding of the cave-dwelling bat communities' ecology, especially in Brazil, including patterns of use among different caves and the influence of the surrounding landscape on the composition of assemblages (Trajano, 1984; Gomes & Uieda, 2004; Vargas-Mena et al., 2020; Barros et al., 2023).

Therefore, this study aims to explore how the physical characteristics of caves and seasonal factors influence the composition and diversity of bats. Our research questions include: (1) Is there variation in species composition between the dry and rainy seasons? (2) Is the dissimilarity between bat

posição das assembleias (Trajano, 1984; Gomes & Uieda, 2004; Vargas-Mena et al., 2020; Barros et al., 2023).

Diante disso, este estudo tem como objetivo explorar como as características físicas das cavernas e fatores sazonais influenciam a composição e a diversidade de morcegos. Nossas questões de pesquisa incluem: (1) Existe variação na composição de espécies entre as estações seca e chuvosa? (2) A dissimilaridade entre as assembleias de morcegos está relacionada com a distância geográfica e as características das cavernas? (3) Quais características das cavernas explicam a presença e a composição das assembleias de morcegos? Prevemos que (i) a composição das assembleias de morcegos varia significativamente entre as estações do ano devido a fatores sazonais; (ii) a dissimilaridade aumenta com a distância entre cavernas, refletindo limitações de dispersão; e que (iii) variáveis das cavernas são determinantes para a ocorrência de diferentes espécies, fornecendo os microhabitats necessários para suas demandas ecológicas e fisiológicas.

METODOLOGIA

Área de estudo

As 90 cavernas estão inseridas na cidade de São Félix do Xingu, entre os povoados da Vila Canaã e Tancredo Neves, este último a cerca de 20 km das cavernas. Localmente a maior parte está inserida na Sub-bacia Igarapé - Araraquara. No entanto, algumas cavernas estão na divisa com a Sub-bacia Igarapé - São Sebastião, todas pertencentes à Bacia Hidrográfica do Rio Xingu. A Unidade de Conservação mais próxima é a Área de Proteção Ambiental Triunfo do Xingu, sendo estadual e

assemblages related to geographical distance and cave characteristics? (3) Which cave characteristics explain the presence and composition of bat assemblages? We predict that (i) the composition of bat assemblages varies significantly between seasons due to seasonal factors; (ii) dissimilarity increases with distance between caves, reflecting dispersal limitations; and that (iii) cave variables are determinants for the occurrence of different species, providing the necessary microhabitats for their ecological and physiological demands.

METHODOLOGY

Study area

The 90 caves are located in the city of São Félix do Xingu, between the villages of Vila Canãa and Tancredo Neves, the latter about 20 km from the caves. Most of them are located in the Igarapé - Araraquara sub-basin. However, some caves are on the border with the Igarapé-São Sebastião sub-basin, which all belong to the Xingu River Basin. The nearest Conservation Unit is the Triunfo do Xingu Environmental Protection Area, which is state-owned and sustainably used (Figure S1 - Supplementary

de uso sustentável (Figura S1 - Material Suplementar). Cada caverna foi georreferenciada utilizando aparelho de GPS, com o qual verificamos e registramos as coordenadas e altitude. Para caracterizar a estrutura física de cada uma das cavernas, medimos o desenvolvimento horizontal máximo e o volume. Dentre as 90 cavernas avaliadas, somente a caverna SFX_0050 não foi aferida, pois havia riscos de desabamento, sendo consequentemente excluída das análises. Todas as medidas foram feitas em metros. Além disso, para cada uma destas cavernas amostradas, criamos um *buffer* de 250 m a partir da coordenada para o cálculo da proporção florestal. Embora a delimitação precisa da área de influência de cavernas demande estudos específicos, o raio de 250 m é uma medida comumente utilizada em estudos espeleológicos, com base na Resolução CONAMA nº 347/2004, servindo como referência inicial. (Brasil, CONAMA, 2004).

A vegetação natural corresponde às regiões de floresta ombrófila densa e aberta, com três grupos de formação, aluvial das terras baixas e submontana, juntamente com áreas de savana arborizada/parque sem florestas de galeria (IBGE, 2006). Na região do estudo o uso de solo é ainda composto por pastagens e vegetação secundária. Em relação ao clima, apresenta clima tropical úmido (Am), com temperatura média anual de 26°C, precipitação anual de aproximadamente 2.400 mm, sendo que o semestre mais chuvoso vai de novembro a abril, e um período seco que vai de maio a setembro (Piló et al., 2015).

Amostragem de quirópteros

As 90 cavernas naturais avaliadas foram amostradas em duas ocasiões, uma na estação chuvosa e outra na seca (Tabela 2 Material suplementar).

Material). Each cave was georeferenced using a GPS device, from which the coordinates and altitude were verified and recorded. To characterize the physical structure of each cave, the maximum horizontal development and volume was measured. Of the 90 evaluated caves, only SFX_0050 cave was not measured, as there was a risk of collapse, and it was therefore excluded from the analysis. All measurements were made in meters. In addition, for each of these sampled caves, a 250 m buffer from the coordinate was created in order to calculate the forest proportion. Although the precise delimitation of the area of influence of caves requires specific studies, the 250 m radius is a measure commonly used in speleological studies, serving as an initial reference based on CONAMA Resolution No. 347/2004. (Brazil, CONAMA, 2004).

The natural vegetation corresponds to regions of dense and open rainforest, with three formation groups: alluvial lowlands and submontane, together with areas of wooded savanna/park without gallery forests (IBGE, 2006). In the study region, land use also includes pastures and secondary vegetation. In terms of climate, it has a humid tropical climate (Am), with an average annual temperature of 26°C and annual precipitation of approximately 2,400 mm. The rainiest season is from November to April, and the dry season is from May to September (Piló et al., 2015).

Chiroptera sampling

The 90 natural caves evaluated were sampled on two occasions, one during the rainy season and the other during the dry season (Table 2 Supplemen-

Somente em sete (SFX_0013, SFX_0023, SFX_0032, SFX_0046, SFX_0050, SFX_0051, SFX_0062 e SFX_0079) não foram encontradas quaisquer evidências de ocupação por morcegos. Na estação chuvosa, a amostragem ocorreu entre os meses de janeiro e março de 2018, e na estação seca em julho do mesmo ano, com exceção da caverna SFX_0071, amostrada em maio de 2019. Os procedimentos foram realizados com autorização emitida pelo IBAMA (ABIO N°885/2017).

O uso diurno das cavernas por morcegos foi verificado por meio de vistorias completas em cada caverna, período em que os animais permanecem em seus abrigos. A captura dos morcegos foi realizada com puçás e redes-de-neblina, seguindo as diretrizes do Guia da *American Society of Mammalogists* para o uso de mamíferos silvestres em pesquisas (Sikes et al., 2016). Os animais capturados tiveram as medidas biométricas aferidas (massa corporal, com dinamômetro de precisão de 0,1 g, e comprimento do antebraço, com paquímetro de precisão de 0,01 mm), peso e condição reprodutiva (testículos evidentes/inativos em machos; fêmea inativa, gestante ou lactante em fêmeas). A classificação em guildas alimentares seguiu Kalko et al. (1996), e a identificação das espécies foi baseada em Díaz et al. (2016). O status de conservação das espécies foi consultado nas listas de espécies ameaçadas de extinção estadual (COEMA, 2007), nacional (MMA, 2018) e global (IUCN, 2019). As cavernas foram classificadas de acordo com a riqueza de espécies, variando de baixa (1-3 espécies), média (4-6 espécies), alta (7-9 espécies), e elevada (≥ 10 espécies), e as espécies foram classificadas como essencialmente cavernícolas, cavernícola oportunista ou não cavernícolas, conforme proposto por Guimarães & Ferreira (2014).

tary material). Only in seven (SFX_0013, SFX_0023, SFX_0032, SFX_0046, SFX_0050, SFX_0051, SFX_0062, and SFX_0079) was no evidence of bat occupation found. Sampling during the rainy season took place between January and March 2018, and during the dry season in July of the same year, with the exception of cave SFX_0071, which was sampled in May 2019. The procedures were carried out with authorization issued by IBAMA (ABIO No. 885/2017).

The daytime use of caves by bats was verified through complete inspections of each cave, during which time the animals remain in their shelters. The bats were captured using hand nets and mist nets, following the guidelines of the American Society of Mammalogists' Guide for the Use of Wild Mammals in Research (Sikes et al., 2016). The captured animals had their biometric measurements taken (body mass, with a dynamometer accurate to 0.1 g, and forearm length, with a caliper accurate to 0.01 mm), weight, and reproductive status (evident/inactive testicles in males; inactive, pregnant, or lactating in females). Classification into feeding guilds followed Kalko et al. (1996), and species identification was based on Díaz et al. (2016). The conservation status of the species was consulted in the lists of endangered species at the state (COEMA, 2007), national (MMA, 2018), and global (IUCN, 2019) levels. Caves were classified according to species richness, ranging from low (1-3 species), medium (4-6 species), high (7-9 species), and elevated (≥ 10 species), and the species were classified as essentially cave-dwelling, opportunistic cave-dwelling, or non-cave-dwelling, as proposed by Guimarães & Ferreira (2014).

Análise da diversidade β

Para analisar a diversidade β , empregamos a abordagem de particionamento proposta por Podani & Schmera (2011), utilizando as funções *beta* e *beta.multi* do pacote “BAT” (Cardoso et al., 2024). A função *beta* foi utilizada para calcular a diversidade β par a par, decompondo a dissimilaridade entre cada par de sítios em componentes de turnover e diferença de riqueza. A função *beta.multi* foi utilizada para calcular a diversidade β entre múltiplos sítios simultaneamente, calculando a média e a variância das comparações par a par. Em ambos os casos, a diversidade β foi calculada com base no índice de dissimilaridade de Jaccard. A diversidade β mede a diferença na composição de espécies, variando de 0 a 1, em que o valor 0 indica maior similaridade na composição de espécies, e o valor 1 indica que as assembleias são completamente diferentes. A diversidade β também pode ser dividida em turnover, quando uma espécie substitui outra em uma assembleia, e diferença de riqueza, quando uma assembleia perde espécies em relação a outra (Baselga, 2010; Cardoso et al., 2014).

Análise de dados

Primeiramente, calculamos a riqueza total de espécies para todas as cavernas combinadas e, em seguida, a riqueza por caverna (Tabela S1). Para responder à nossa primeira questão, comparamos a composição de morcegos entre as estações seca e chuvosa utilizando a Análise de Variância Multivariada Permutacional (PERMANOVA) (Anderson, 2001). Esse método, implementado no pacote ‘PERMANOVA’ (Vicente-Gonzalez & Vicente-Villardón, 2021), baseia-se na partição da soma de quadrados da matriz de dissimilaridade entre os grupos, com 9.999 permutações restri-

β diversity analysis

To analyze β diversity, the partitioning approach proposed by Podani & Schmera (2011), employing the beta and beta.multi functions from the “BAT” package (Cardoso et al., 2024) was used. The beta function was used to calculate pair-wise β diversity, decomposing the dissimilarity between each pair of sites into turnover and richness difference components. The beta.multi function was used to calculate β diversity between multiple sites simultaneously, calculating the mean and variance of pair-wise comparisons. In both cases, β diversity was calculated based on the Jaccard dissimilarity index. β diversity measures the difference in species composition, ranging from 0 to 1, where 0 indicates greater similarity in species composition, and 1 indicates that the assemblages are completely different. β diversity can also be divided into turnover, when one species replaces another in an assembly, and difference in richness, when one assembly loses species in relation to another (Baselga, 2010; Cardoso et al., 2014).

Data Analysis

First, the total species richness for all caves combined and then the richness per cave were calculated (Table S1). To answer the first question, the bat composition between the dry and rainy seasons was compared using Permutation Multivariate Analysis of Variance (PERMANOVA) (Anderson, 2001). This method, implemented in the ‘PERMANOVA’ package (Vicente-Gonzalez & Vicente-Villardón, 2021), is based on partitioning the sum of squares of the dissimilarity matrix between groups, with 9,999 restricted permutations ($\alpha = 0.05$). To verify the homogeneity of dispersion between groups, the PERMDISP2

tas ($\alpha = 0,05$). Para verificar a homogeneidade da dispersão entre os grupos, aplicamos o teste PERMDISP2 (Anderson, 2006) usando o pacote 'vegan' (Oksanen et al., 2020).

Para responder à segunda questão, que investiga a influência da distância geográfica, e das características das cavernas sobre a dissimilaridade entre comunidades de morcegos, aplicamos a Regressão Múltipla em Matrizes de Distância (MRM) no pacote 'ecodist' (Goslee & Urban, 2023). A matriz de distância geográfica foi gerada com base nas coordenadas das cavernas, utilizando uma matriz euclidiana normalizada como variável explicativa. Como variáveis resposta, relacionadas à dissimilaridade entre comunidades, consideramos três componentes da diversidade beta: diversidade beta total (β_{total}), turnover (β_{repl_total}) e diferença de riqueza (β_{rich_total}). As métricas foram calculadas com base na composição de espécies entre as cavernas. As variáveis preditoras incluíram distância geográfica, altitude, volume e desenvolvimento horizontal das cavernas. Os modelos MRM foram ajustados separadamente para cada métrica de diversidade beta, adotando método linear e 1.000 permutações para determinar a significância estatística. Adicionalmente, conduzimos análises de autocorrelação espacial nos resíduos dos modelos utilizando o índice I de Moran, garantindo a robustez das inferências ao descartar efeitos espaciais não modelados.

Para investigar a relação entre a composição e riqueza de espécies de morcegos, características das cavernas (altitude, desenvolvimento horizontal e volume) e sazonalidade, aplicamos análises de redundância parcial (RDAP) e redundância parcial baseada em distâncias (dbRDAP) aos dados, considerando as estações seca e chuvosa separadamente e em conjunto. As análises

test (Anderson, 2006) using the 'vegan' package was applied (Oksanen et al., 2020).

To answer the second question, which investigates the influence of geographical distance and cave characteristics on the dissimilarity between bat communities, the Multiple Regression on Distance Matrices (MRM) in the 'ecodist' package was applied (Goslee & Urban, 2023). The geographic distance matrix was generated based on cave coordinates, using a normalized Euclidean matrix as the explanatory variable. As response variables related to dissimilarity between communities, three components of beta diversity were considered: total beta diversity (β_{total}), turnover (β_{repl_total}), and difference in richness (β_{rich_total}). The metrics were calculated based on the species composition between caves. The predictor variables included geographic distance, altitude, volume, and horizontal development of the caves. The MRM models were adjusted separately for each beta diversity metric, adopting a linear method and 1,000 permutations to determine statistical significance. Additionally, spatial autocorrelation analyses were conducted on the model residuals using Moran's I index, ensuring the robustness of the inferences by discarding unmodeled spatial effects.

To investigate the relationship between bat species composition and richness, cave characteristics (altitude, horizontal development, and volume), and seasonality, partial redundancy analysis (RDAP) and distance-based partial redundancy analysis (dbRDAP) were applied to the data, considering the dry and rainy seasons separately and together. The analyses were conducted with the 'vegan' package, using a dissimilarity matrix transformed by the Hellinger function and including a matrix of spatial eigenvectors generated by PCNM as a covariate to control for spatial dependence (Table S4) (Borcard et al., 2011). The significance of the spatial axes was assessed using Moran's I test (adespatial pack-

foram conduzidas com o pacote 'vegan', utilizando uma matriz de dissimilaridade transformada pela função de Hellinger e incluindo uma matriz de autovetores espaciais gerados por PCNM como covariável para controlar a dependência espacial (Tabela S4) (Borcard et al., 2011). A significância dos eixos espaciais foi avaliada pelo teste I de Moran (pacote "adespatial"; Dray et al., 2024). A influência das características das cavernas na riqueza de espécies foi investigada por modelos de mínimos quadrados generalizados (GLS; pacote "nlme"; Pinheiro et al., 2023), incorporando latitude e longitude para controlar a autocorrelação espacial. A ausência de autocorrelação espacial nos resíduos dos modelos GLS foi verificada pelo índice I de Moran, com $p > 0,05$ para os modelos globais e para cada estação separadamente (seca: $p = 0,32$; chuvosa: $p = 0,72$), indicando que a estrutura espacial dos dados foi adequadamente considerada.

Para todos os modelos, a proporção de floresta no entorno das cavernas foi incluída como uma covariável, reconhecendo a influência positiva da cobertura florestal na diversidade de morcegos (Estrada & Coates-Estrada, 2002; Carvalho et al., 2023a). Assim, nós conseguimos controlar seus efeitos, garantindo que o foco principal da análise permaneça nas variáveis intrínsecas às cavernas, como seu volume, desenvolvimento horizontal e altitude. Todas as análises neste estudo foram conduzidas no ambiente R (R Core Team, 2024). As figuras foram feitas utilizando os pacotes 'ggplot2' (Wickham, 2016), 'ggord' (Beck, 2024) e 'ggrepel' (Slowikowski, 2024).

RESULTADOS

Em 83 das 90 cavernas amostradas (93,3%), foram registradas 11 espécies de morcegos, distri-

age; Dray et al., 2024). The influence of cave characteristics on species richness was investigated using generalized least squares (GLS; "nlme" package; Pinheiro et al., 2023), incorporating latitude and longitude to control for spatial autocorrelation. The absence of spatial autocorrelation in the residuals of the GLS models was verified by Moran's I index, with $p > 0.05$ for the global models and for each season separately (dry: $p = 0.32$; rainy: $p = 0.72$), indicating that the spatial structure of the data was adequately considered.

For all models, the proportion of forest surrounding the caves was included as a covariate, recognizing the positive influence of forest cover on bat diversity (Estrada & Coates-Estrada, 2002; Carvalho et al., 2023a). Thus, it was possible to control its effects, ensuring that the main focus of the analysis remained on caves intrinsic variables, such as their volume, horizontal development, and altitude. All analyses in this study were conducted in the R environment (R Core Team, 2024). The figures were made using the packages 'ggplot2' (Wickham, 2016), 'ggord' (Beck, 2024), and 'ggrepel' (Slowikowski, 2024).

RESULTS

In 83 of the 90 sampled caves (93.3%), 11 bat species were recorded, distributed across two families:

buídas em duas famílias: Phyllostomidae (nove espécies) e Emballonuridae (duas espécies) (Tabela 1). As espécies com maior frequência de ocorrência foram *Peropteryx kappleri* (71 cavernas, 78,8%) e *Glossophaaga soricina* (49 cavernas). Outras espécies registradas foram: *Carollia* sp. (40 cavernas), *Micronycteris microtis* (nove cavernas), *Diphylla ecaudata* (cinco cavernas) e *Trachops cirrhosus* (duas cavernas). Quatro espécies foram registradas em apenas uma caverna: *Anoura geoffroyi*, *Desmodus rotundus*, *Lonchorhina aurita* e *Saccopteryx* sp. As cavernas com maior riqueza de espécies foram SFX_0078 (seis espécies) e SFX_0002 e SFX_0014 (cinco espécies cada). Onze das 90 cavernas apresentaram riqueza média de espécies (4-6 espécies). Quanto à classificação sobre o uso de cavernas, quatro das 11 espécies foram consideradas essencialmente cavernícolas e seis oportunistas. Embora *Carollia brevicauda* e *Micronycteris microtis* não possuam uma classificação específica, utilizamos a de seus congêneres, *Carollia perspicillata*, *M. megalotis* e *M. minuta* classificadas como oportunistas. No que se refere ao status de conservação, *Lonchorhina aurita* é classificada como “vulnerável” na lista Nacional (MMA, 2018), mas foi reclassificada como “quase ameaçada” (NT) na avaliação nacional mais recente realizada pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), publicada em 2023 na plataforma do Sistema de Avaliação do Risco de Extinção da Biodiversidade (SALVE) (Bernard et al., 2023).

Phyllostomidae (nine species) and Emballonuridae (two species) (Table 1). The most frequently occurring species were Peropteryx kappleri (71 caves, 78.8%) and Glossophaaga soricina (49 caves). Other species recorded were: Carollia sp. (40 caves), Micronycteris microtis (nine caves), Diphylla ecaudata (five caves), and Trachops cirrhosus (two caves). Four species were recorded in only one cave: Anoura geoffroyi, Desmodus rotundus, Lonchorhina aurita, and Saccopteryx sp. The caves with the greatest species richness were SFX_0078 (six species), SFX_0002 and SFX_0014 (five species each). Eleven of the 90 caves had average species richness (4-6 species). Regarding the classification of cave use, four of the 11 species were considered essentially cave-dwelling and six opportunistic. Although Carollia brevicauda and Micronycteris microtis do not have a specific classification, that of their congeners was used, Carollia perspicillata, M. megalotis, and M. minuta, classified as opportunistic. Regarding conservation status, Lonchorhina aurita is classified as “vulnerable” on the national list (MMA, 2018), but was reclassified as “near threatened” (NT) in the most recent national assessment conducted by the Chico Mendes Institute for Biodiversity Conservation (ICMBio), published in 2023 on the Biodiversity Extinction Risk Assessment System (SALVE) platform (Bernard et al., 2023).

Tabela 1 - Lista de espécies registradas durante diagnóstico de quirópteros em cavernas no município de São Félix do Xingu, Pará. As espécies estão classificadas quanto ao hábito alimentar (Kalko et al., 1996), uso das cavernas (Guimarães & Ferreira, 2014) e categoria de ameaça conforme as listas estadual (COEMA, 2007), nacional (MMA, 2018) e mundial (IUCN, 2019) de espécies ameaçadas de extinção. Legenda: Essencialmente cavernícola (EC), cavernícola oportunista (CO), não cavernícola (NC), PP = pouco preocupante, NA = não ameaçada, VU = vulnerável.

Táxon	Guilda	Nº cavernas	Uso	Categoria de Ameaça		
				Estadual	Nacional	Mundial
Família Emballonuridae						
<i>Peropteryx kappleri</i>	Insetívoro	71	EC	NA	NA	PP
<i>Saccopteryx sp.</i>	Insetívoro	1	NC	NA	NA	NA
Família Phyllostomidae						
Subfamília Carolliinae						
<i>Carollia brevicauda</i>	Frugívoro	12	CO	NA	NA	PP
<i>Carollia perspicillata</i>	Frugívoro	37	CO	NA	NA	PP
Subfamília Desmodontinae						
<i>Desmodus rotundus</i>	Hematófago	1	CO	NA	NA	PP
<i>Diphylla ecaudata</i>	Hematófago	5	EC	NA	NA	PP
Subfamília Glossophaginae						
<i>Glossophaga soricina</i>	Nectarívoro	49	EC	NA	NA	PP
<i>Anoura geoffroyi</i>	Nectarívoro	1	CO	NA	NA	PP
Subfamília Lonchorhininae						
<i>Lonchorhina aurita</i>	Insetívoro	1	EC	NA	VU	PP
Subfamília Micronycterinae						
<i>Micronycteris microtis</i>	Insetívoro	9	CO	NA	NA	PP
Subfamília Phyllostominae						
<i>Trachops cirrhosus</i>	Carnívoro	2	CO	NA	NA	PP

Table 1 - List of species recorded during the bats diagnosis in the municipality of São Félix do Xingu caves, Pará. The species are classified according to feeding habits (Kalko et al., 1996), cave use (Guimarães & Ferreira, 2014), and threat category according to state (COEMA, 2007), national (MMA, 2018), and global (IUCN, 2019) lists of endangered species. Legend: Essentially cave-dwelling (EC), opportunistic cave-dwelling (CO), non-cave-dwelling (NC), LC = least concern, NT = near threatened, VU = vulnerable.

Taxon	Guild	Number of caves	Use	Threat category		
				State	National	Global
Emballonuridae family						
Peropteryx kappleri	Insectivore	71	EC	NA	NA	PP
Saccopteryx sp.	Insectivore	1	NC	NA	NA	NA
Phyllostomidae family						
Carolliinae subfamily						
Carollia brevicauda	Frugivorous	12	CO	NA	NA	PP
Carollia perspicillata	Frugivorous	37	CO	NA	NA	PP
Desmodontinae subfamily						
Desmodus rotundus	Hemophagous	1	CO	NA	NA	PP
Diphylla ecaudata	Hemophagous	5	EC	NA	NA	PP
Glossophaginae subfamily						
Glossophaga soricina	Nectarivore	49	EC	NA	NA	PP
Anoura geoffroyi	Nectarivore	1	CO	NA	NA	PP
Lonchorhininae subfamily						
Lonchorhina aurita	Insectivore	1	EC	NA	VU	PP
Micronycterinae subfamily						
Micronycteris microtis	Insectivore	9	CO	NA	NA	PP
Phyllostominae subfamily						
Trachops cirrhosus	Carnivore	2	CO	NA	NA	PP

A análise PERMANOVA indicou diferenças sazonais significativas entre as estações seca e chuvosa ($F = 3,93$ e $p < 0,01$). No entanto, a análise PERMDISP2 não revelou diferenças na dispersão entre os grupos ($F = 0,12$ e $p = 0,72$), sugerindo que a variação observada entre as estações não

The PERMANOVA indicated significant seasonal differences between the dry and rainy seasons ($F = 3.93$ and $p < 0.01$). However, PERMDISP2 analysis revealed no differences in dispersion between groups ($F = 0.12$ and $p = 0.72$), suggesting that the variation observed between seasons cannot be at-

pode ser atribuída a diferenças na dispersão das amostras (Figura S4).

A análise da diversidade beta entre as cavernas ($\beta_{total} = 0,56$) demonstrou que a variação na composição de espécies é impulsionada principalmente por diferenças na riqueza ($\beta_{rich_total} = 0,36$) em relação ao turnover ($\beta_{repl_total} = 0,20$). A modelagem entre a diferença de riqueza e as características das cavernas evidenciou que quanto maior a diferença entre o volume das cavernas, maior a diferença de riqueza de morcegos entre elas ($p = 0,06$), ou seja, há perda de espécies, embora esse efeito seja fraco (R^2 do modelo = 0,03 – Tabela 2). A análise de Redundância Parcial (RDAP) mostrou que as variáveis ambientais, como altitude ($p = 0,03$) e DH ($p = 0,01$), contribuem significativamente para a variação na composição das espécies. A RDAP explicou 4,51% da variação total na composição das espécies (R^2 do modelo RDAP = 0,04) (Figura 1). A análise dbRDAP corroborou esses resultados, indicando associação significativa entre essas variáveis e a estrutura das assembleias. A RDAP para a estação chuvosa revelou que as variáveis ambientais mais significativas para a variação na composição das espécies foram a altitude ($F = 3,09$, $p = 0,02$) e o DH ($F = 2,94$, $p = 0,02$). A dbRDAP para esse mesmo período confirmou a influência dessas variáveis (Tabelas S6 e S7).

tributed to differences in sample dispersion (Figure S4).

The beta diversity analysis between caves ($\beta_{total} = 0.56$) showed that variation in species composition is mainly driven by differences in richness ($\beta_{rich_total} = 0.36$) rather than turnover ($\beta_{repl_total} = 0.20$). Modeling the difference in richness and cave characteristics showed that the greater the difference in cave volume, the greater the difference in bat richness between them ($p = 0.06$), i.e., there is a loss of species, although this effect is weak (model $R^2 = 0.03$ – Table 2). Partial Redundancy Analysis (PRA) showed that environmental variables such as altitude ($p = 0.03$) and DH ($p = 0.01$) contribute significantly to the variation in species composition. RDAP explained 4.51% of the total variation in species composition (R^2 of the RDAP model = 0.04) (Figure 1). The dbRDAP analysis corroborated these results, indicating a significant association between these variables and the structure of the assemblages. The RDAP for the rainy season revealed that the most significant environmental variables for variation in species composition were altitude ($F = 3.09$, $p = 0.02$) and DH ($F = 2.94$, $p = 0.02$). The dbRDAP for this same period confirmed the influence of these variables (Tables S6 and S7).

Tabela 2 - Resultados do modelo estatístico Regressão Múltipla em Matrizes de Distância avaliando os efeitos de variáveis ambientais (distância, altitude, desenvolvimento horizontal - DH e volume) sobre diferenças na riqueza (*Brich_total*) de morcegos em cavernas. Os coeficientes representam a direção e magnitude dos efeitos de cada variável, enquanto os valores de p indicam o nível de significância estatística. Apenas o volume apresentou uma tendência marginalmente significativa ($p = 0,06$), sugerindo sua importância potencial na determinação da riqueza de espécies.

	Coefficientes	p
Intercept	3.021222e-01	0.99
Distância	-2.072426e-08	0.55
Altitude	1.811858e-04	0.15
DH	5.649088e-04	0.28
Volume	1.114461e-04	0.06

Table 2 - Results of the Multiple Regression statistical model in Distance Matrices evaluating the effects of environmental variables (distance, altitude, horizontal development - DH, and volume) on differences in bat richness (*Brich_total*) in caves. The coefficients represent the direction and magnitude of the effects of each variable, while the p values indicate the level of statistical significance. Only volume showed a marginally significant trend ($p = 0.06$), suggesting its potential importance in determining species richness.

	Coefficients	p
Intercept	3.021222e-01	0.99
Distancy	-2.072426e-08	0.55
Altitude	1.811858e-04	0.15
DH	5.649088e-04	0.28
Volume	1.114461e-04	0.06

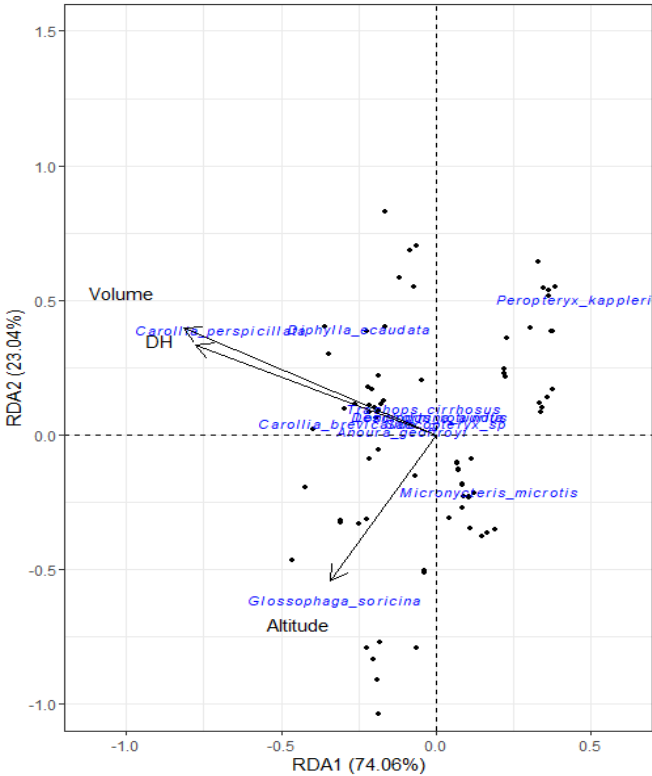


Figura 1 - Análise de Redundância (RDAp) mostrando a relação entre variáveis ambientais (volume, desenvolvimento horizontal - DH, altitude) e a composição de espécies de morcegos em cavernas de São Félix do Xingu, Pará. As setas indicam a direção e a magnitude da correlação das variáveis ambientais com os eixos da RDAp. Cada ponto preto representa uma caverna, enquanto os nomes das espécies representam sua associação com os gradientes ambientais. O eixo RDA1 explica 74,06% da variância e o eixo RDA2, 23,04%, indicando que o volume das cavernas e o DH são fatores importantes na determinação da composição das espécies.

Figure 1 - Partial redundancy analysis (RDAp) showing the relationship between environmental variables (volume, horizontal development – DH, altitude) and the composition of bat species in São Félix do Xingu caves, Pará. The arrows indicate the direction and magnitude of the correlation of environmental variables with the RDAp axes. Each black dot represents a cave, while the species names represent their association with environmental gradients. The RDA1 axis explains 74.06% of the variance and the RDA2 axis explains 23.04%, indicating that cave volume and DH are important factors in determining species composition.

Os resultados da análise de mínimos quadrados generalizados (GLS) para a riqueza das comunidades de morcegos indicou que quanto maior o volume das cavernas maior será a riqueza de espécies de morcegos ($p = 0,02$) (Tabela 3). As demais variáveis não influenciaram a riqueza de espécies. Ao analisar os dados separadamente por estação, na estação seca, somente o volume das cavernas influenciou a riqueza de espécies ($p < 0,01$), onde cavernas maiores apresentaram maior riqueza (Figura 2). Já na estação chuvosa, somente o volume das cavernas influenciou positivamente a riqueza de espécies, mas este efeito foi marginalmente significativo ($p = 0,07$) (Tabela S8).

Tabela 3 - Resultados das análises de Mínimos Quadrados Generalizados (GLS) para avaliar a relação entre variáveis ambientais (altitude, desenvolvimento horizontal - DH e volume das cavernas) e a riqueza de espécies de morcegos em São Félix do Xingu. São apresentados os coeficientes (Coef.), erros padrão (S. erro), valores do teste t, e valores de probabilidade (p). Valores de p significativos ($\alpha=0,05$) estão destacados. Os resultados indicam as variáveis que mais contribuem para explicar a variação na riqueza.

	Coef.	S. erro	t	p
Intercept	-2.14	1.57	-1.36	0.17
Altitude	0.37	0.24	1.53	0.12
DH	0.09	0.07	1.13	0.25
Volume	0.11	0.04	2.37	0.02

The results of the generalized least squares (GLS) analysis for bat community richness indicated that the larger the volume of the caves, the greater the bat species richness ($p = 0.02$) (Table 3). The other variables did not influence species richness. When analyzing the data separately by season, in the dry season, only cave volume influenced species richness ($p < 0.01$), with larger caves presenting greater richness (Figure 2). In the rainy season, only cave volume positively influenced species richness, but this effect was marginally significant ($p = 0.07$) (Table S8).

Table 3 - Results of Generalized Least Squares (GLS) analyses to evaluate the relationship between environmental variables (altitude, horizontal development - DH, and cave volume) and bat species richness in São Félix do Xingu. The coefficients (Coef.), standard errors (S. error), t-test values, and probability values (p) are presented. Significant p values ($\alpha=0.05$) are highlighted. The results indicate the variables that contribute most to explaining the variation in richness.

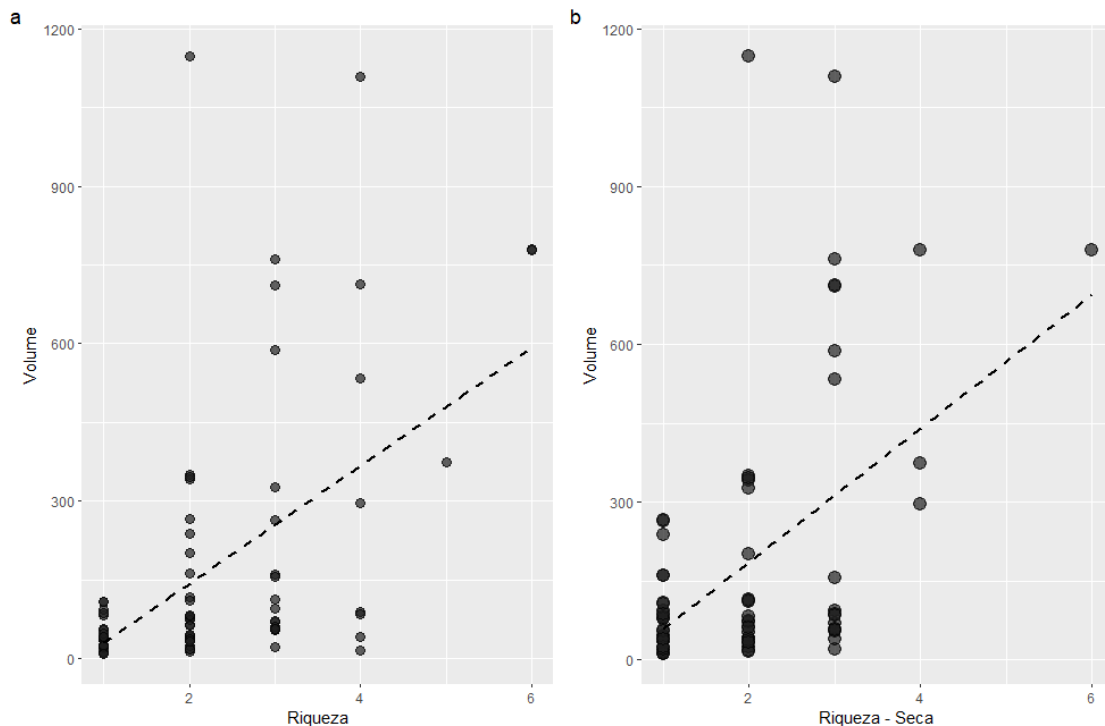


Figura 2 - Relação entre o volume das cavernas e a riqueza de espécies de morcegos em São Félix do Xingu, Pará. (a) Riqueza total de espécies ao longo do ano; (b) Riqueza de espécies durante a estação seca. Os resultados mostram uma tendência de maior riqueza de espécies em cavernas de maior volume.

Figure 2 - Relationship between cave volume and bat species richness in São Félix do Xingu, Pará. (a) Total species richness throughout the year; (b) Species richness during the dry season. The results show a trend toward greater species richness in larger caves.

DISCUSSÃO

Este estudo investigou os preditores da riqueza e dissimilaridade entre assembleias de morcegos cavernícolas em São Félix do Xingu, estado do Pará, sudeste da Amazônia brasileira. Através de uma abordagem multianalítica para as diversidades α e β , nós encontramos mudanças significativas na composição das assembleias entre as estações seca e chuvosa, corroborando nossa hipótese. Embora esperássemos que a dissimilaridade aumentasse com a distância entre as cavernas, os resultados indicaram um padrão contrastante, sugerindo que as assembleias de morcegos das cavernas analisadas são homogêneas. Entretanto, nós também encontramos que altitude e desenvolvimento horizontal desempenham um papel fundamental para determinar diferenças na composição de espécies entre as

DISCUSSION

This study investigated predictors of richness and dissimilarity among cave bat assemblages in São Félix do Xingu, Pará state, southeastern Brazilian Amazon. Using a multi-analytical approach for α and β diversities, significant changes in the composition of assemblages between the dry and rainy seasons were found, corroborating the initial hypothesis. Although dissimilarity was expected to increase with distance between caves, the results indicated a contrasting pattern, suggesting that the bat assemblages of the caves analyzed are homogeneous. However, it was also found that altitude and horizontal development play a key role in determining differences in species composition between assemblages, especially during the rainy season, confirming the influence of climatic conditions on communities. In addition, caves with greater volume

assembleias, principalmente durante a estação chuvosa, confirmando a influência de condições climáticas sobre as comunidades. Além disso, cavernas que apresentam maior volume também apresentam maior riqueza de espécies, com o aumento na diferença de volume entre cavernas sendo um preditor da perda de espécies.

Composição de espécies e sazonalidade

Em São Félix do Xingu, *Peropteryx kappleri* foi a espécie mais abundante nas cavernas estudadas, embora a família Phyllostomidae tenha apresentado a maior representatividade, corroborando outros levantamentos de quirópteros realizados nos Neotrópicos (Bredt et al., 1999; Sampaio et al., 2003; Faria et al., 2006; Vargas-Mena et al., 2020). A baixa riqueza observada na maioria das cavernas pode estar associada à degradação do habitat no entorno, resultante do desmatamento e da expansão agropecuária, o que pode estar levando espécies oportunistas a utilizarem mais intensamente esses ambientes (Barros et al., 2020). Embora voltado a invertebrados, estudo realizado por Fraga et al. (2023) mostra que pressões antrópicas podem simplificar comunidades subterrâneas, um padrão que, embora não diretamente testado para morcegos, levanta hipóteses relevantes sobre seus possíveis efeitos também nesse grupo.

As variações sazonais nas assembleias de morcegos, observadas através da análise PERMANOVA, indicaram que as flutuações climáticas entre as estações seca e chuvosa impactam a composição das espécies, principalmente devido a mudanças na disponibilidade de recursos, como alimento e água (Bobrowiec et al., 2014; Carvalho et al., 2023b; Genelhú et al., 2023). Os resultados da PERMDISP2 não mostraram a existência de dife-

also have greater species richness, with the increase in volume difference between caves being a predictor of species loss.

Species composition and seasonality

In São Félix do Xingu, Peropteryx kappleri was the most abundant species in the studied caves, although the Phyllostomidae family was the most representative, corroborating other surveys of bats conducted in the Neotropics (Bredt et al., 1999; Sampaio et al., 2003; Faria et al., 2006; Vargas-Mena et al., 2020). The low species richness observed in most caves may be associated with habitat degradation in the surrounding area, resulting from deforestation and agricultural expansion, which may be leading opportunistic species to use these environments more intensively (Barros et al., 2020). Although focused on invertebrates, a study by Fraga et al. (2023) shows that anthropogenic pressures can simplify underground communities, a pattern that, although not directly tested for bats, raises relevant hypotheses about its possible effects on this group as well.

Seasonal variations in bat assemblages, observed through PERMANOVA analysis, indicated that climatic fluctuations between the dry and rainy seasons affect species composition, mainly due to changes in resource availability, such as food and water (Bobrowiec et al., 2014; Carvalho et al., 2023b; Genelhú et al., 2023). The PERMDISP2 results showed no differences in dispersion between assemblages, suggesting that the observed changes are not attributed to variations in the internal variability of communities (Anderson, 2006).

renças na dispersão entre as assembleias, sugerindo que as mudanças observadas não são atribuídas a variações na variabilidade interna das comunidades (Anderson, 2006).

O papel da paisagem degradada ao redor das cavernas não pode ser subestimado. A perda de habitat, associada ao desmatamento e à pecuária, pode ter alterado a disponibilidade de abrigos alternativos, forçando as espécies a utilizar mais intensamente as cavernas, especialmente durante certas épocas do ano (Barros et al., 2020; Vargas-Mena et al., 2020). Entretanto, a ocorrência de apenas um indivíduo de *Desmodus rotundus* nas cavernas que estudamos contradiz estudos anteriores que associam essa espécie a paisagens fragmentadas e agrícolas (Campanhã & Fowler, 1993; Barros et al., 2020; Vargas-Mena et al., 2020; Genelhú et al., 2023). Também em nossa área de estudo, a ausência de espécies nectarívoras (*Lionycteris spurrelli*, por exemplo) e do *Furipterus horrens*, que são comumente registradas em cavernas de áreas preservadas (Genelhú et al., 2022; Monteiro et al., 2023), pode indicar uma maior sensibilidade dessas espécies às alterações ambientais do entorno, especialmente em contextos de elevada pressão antrópica.

Características ambientais das cavernas e estrutura das assembleias de morcegos

A análise da diversidade beta total revelou que a diferença na riqueza de espécies desempenhou o papel mais importante na variação entre as comunidades de morcegos nas cavernas. Isso contrasta com estudos que apontam o turnover como o principal componente da diversidade beta em habitats heterogêneos (Fortin & Dale, 2005; Baselga, 2010). Nossos resultados sugerem que a variação na riqueza observada entre as cavernas pode ser

*The role of the degraded landscape surrounding the caves cannot be underestimated. Habitat loss, associated with deforestation and livestock farming, may have altered the availability of alternative shelters, forcing species to use caves more intensively, especially during certain times of the year (Barros et al., 2020; Vargas-Mena et al., 2020). However, the occurrence of only one individual of *Desmodus rotundus* in the studied caves contradicts previous studies that associate this species with fragmented and agricultural landscapes (Campanhã & Fowler, 1993; Barros et al., 2020; Vargas-Mena et al., 2020; Genelhú et al., 2023). Also in the study area, the absence of nectarivorous species (*Lionycteris spurrelli*, for example) and *Furipterus horrens*, which are commonly recorded in caves in preserved areas (Genelhú et al., 2022; Monteiro et al., 2023), may indicate these species greater sensitivity to environmental changes in their surroundings, especially in contexts of high anthropic pressure.*

Environmental characteristics of caves and structure of bat assemblages

The analysis of total beta diversity revealed that the difference in species richness played the most important role in the variation between bat communities in caves. This contrasts with studies that point to turnover as the main component of beta diversity in heterogeneous habitats (Fortin & Dale, 2005; Baselga, 2010). Results suggest that the richness variation observed between caves can be explained by differences in available resources and specific en-

explicada por diferenças nos recursos disponíveis e nas condições ambientais específicas de cada caverna, como área, volume e desenvolvimento horizontal. Esse padrão já foi observado em outros estudos em ambientes cavernícolas e em habitats fragmentados, onde a heterogeneidade ambiental influencia diretamente o número de espécies presentes (Ávila-Flores & Medellín, 2004; Torqueti et al., 2017; Oliveira et al., 2018; Barros et al., 2020; Vargas-Mena et al., 2020).

A análise de múltiplas regressões revelou que a distância geográfica entre as cavernas teve influência limitada na variação da diversidade beta. Embora estudos prévios tenham associado maior dissimilaridade em distâncias geográficas maiores (Nekola & White, 1999; Soininen, 2010), o alcance relativamente curto entre as cavernas estudadas, combinado com a homogeneidade ambiental regional, pode explicar a baixa influência da distância. Em escalas maiores, onde as cavernas estão separadas por dezenas ou centenas de quilômetros, a distância geográfica tende a desempenhar um papel mais expressivo na estruturação das comunidades (Lomolino, 2001; Kraft et al., 2015).

As variáveis altitude, DH e volume das cavernas destacaram-se como fatores determinantes na composição e riqueza de espécies de morcegos. O DH e o volume estão relacionados ao tamanho e à complexidade estrutural das cavernas, que influenciam as condições microclimáticas e a estabilidade de microhabitats essenciais para os morcegos (Barros et al., 2020), especialmente em períodos de condições ambientais extremas (Carvalho et al., 2011). Cavernas maiores e mais complexas frequentemente oferecem zonas internas protegidas de variações climáticas externas, proporcionando constância de umidade e temperatura (Barros et al., 2020; Vargas-Mena et al., 2020; Badino, 2010). Essas condições fa-

vironmental conditions in each cave, such as area, volume, and horizontal development. This pattern has already been observed in other studies in cave environments and fragmented habitats, where environmental heterogeneity directly influences the number of species present (Ávila-Flores & Medellín, 2004; Torqueti et al., 2017; Oliveira et al., 2018; Barros et al., 2020; Vargas-Mena et al., 2020).

Multiple regression analysis revealed that the geographical distance between caves had a limited influence on beta diversity variation. Although previous studies have associated greater dissimilarity with greater geographic distances (Nekola & White, 1999; Soininen, 2010), the relatively short distance between the studied caves, combined with regional environmental homogeneity, may explain the low influence of distance. On larger scales, where tens or hundreds of kilometers separate caves, geographic distance tends to play a more significant role in community structure (Lomolino, 2001; Kraft et al., 2015).

The variables altitude, DH, and cave volume stood out as determining factors in the composition and richness of bat species. DH and volume are related to the size and structural complexity of caves, which influence microclimatic conditions and the stability of microhabitats essential for bats (Barros et al., 2020), especially during periods of extreme environmental conditions (Carvalho et al., 2011). Larger and more complex caves often offer internal zones protected from external climatic variations, providing constant humidity and temperature (Barros et al., 2020; Vargas-Mena et al., 2020; Badino, 2010). These conditions favor reproduction, allowing colonies to establish themselves in safer and more stable environments (Kunz, 1982). In addition, the diversity of microhabitats in large caves helps explain their greater species richness, reinforcing the importance of these characteristics for the structuring of com-

vorecem a reprodução, permitindo que colônias se estabeleçam em ambientes mais seguros e estáveis (Kunz, 1982). Além disso, a diversidade de microhabitats em cavernas volumosas ajuda a explicar sua maior riqueza de espécies, reforçando a importância dessas características para a estruturação das comunidades ao longo do ano. Os modelos estatísticos utilizados corroboraram que o volume exerce uma influência significativa, principalmente na estação seca, mas com efeitos consistentes ao longo do ano.

Implicações para a conservação

Este estudo destaca a importância das cavernas de São Félix do Xingu, estado do Pará, na preservação das comunidades de morcegos em uma paisagem severamente impactada pelo desmatamento. Cavernas maiores, devido à sua capacidade de abrigar maior riqueza de espécies e oferecer microhabitats estáveis, devem ser priorizadas em estratégias de conservação. Além disso, as cavernas menores são importantes por atuarem como pontos de passagem ("stepping stones") que facilitam o movimento dos morcegos entre cavernas maiores, especialmente para espécies que formam colônias menores ou têm menor capacidade de dispersão.

Embora este estudo tenha focado na análise das características físicas das cavernas e sua relação com a diversidade de morcegos, os resultados reforçam a necessidade de proteger tanto as cavernas individualmente quanto as áreas ao redor que mantêm sua funcionalidade ecológica. Em cenários de fragmentação extrema, como o de São Félix do Xingu, a perda de conectividade entre cavernas pode amplificar o risco de extinção local de espécies. Portanto, estratégias de manejo eficazes devem incluir não apenas a proteção das cavernas, mas também a conservação de

munities throughout the year. The statistical models used corroborated that volume has a significant influence, especially in the dry season, but with consistent effects throughout the year.

Implications for conservation

This study highlights the importance of the São Félix do Xingu caves, in the state of Pará, for the preservation of bat communities in a landscape severely impacted by deforestation. Larger caves, due to their capacity to harbor greater species richness and offer stable microhabitats, should be prioritized in conservation strategies. In addition, smaller caves are important because they act as stepping stones that facilitate the movement of bats between larger caves, especially for species that form smaller colonies or have a lower dispersal capacity.

Although this study focused on analyzing the physical characteristics of caves and their relationship with bat diversity, the results reinforce the need to protect both individual caves and the surrounding areas that maintain their ecological functionality. In scenarios of extreme fragmentation, such as that of São Félix do Xingu, the loss of connectivity between caves can amplify the risk of local species extinction. Therefore, effective management strategies should include not only the protection of caves, but also the conservation of corridors and adjacent natural areas that support the movement and long-term viability of bat populations.

corredores e áreas naturais adjacentes que sustentam a movimentação e a viabilidade a longo prazo das populações de morcegos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à VALE S.A. e à Ativo Ambiental pelo financiamento desta pesquisa. Expressamos nossa gratidão a Flávia Evangelista, Juliana Macaron e Leandro Maciel pelo apoio, incluindo a cessão de informações, mapas e fotografias. Nossos agradecimentos a todos os membros da equipe da Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos da Vale pelo incentivo contínuo ao desenvolvimento de pesquisas em prol do uso sustentável dos recursos naturais em áreas com cavernas. Nosso reconhecimento se estende a todos os colegas de campo e de escritório pela valiosa contribuição. SMCG agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida (processo 88887.805181/2023-00). WDC recebeu uma “Ayuda para contratos Ramón y Cajal (RYC) 2023” {RYC-2023-045231-I}, financiado pelo MCIU/AEI/<https://doi.org/10.13039/501100011033> e pelo FSE+.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank VALE S.A. and Ativo Ambiental for funding this research. We express our gratitude to Flávia Evangelista, Juliana Macaron, and Leandro Maciel for their support, including the provision of information, maps, and photographs. Our thanks to all members of Vale's Speleology and Ferrous Technology Management team for their continued encouragement of research into the sustainable use of natural resources in areas with caves. Our appreciation extends to all field and office colleagues for their valuable contributions. SMCG thanks the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) for the grant awarded (process 88887.805181/2023-00). WDC received an “Ayuda para contratos Ramón y Cajal (RYC) 2023” {RYC2023-045231-I}, funded by MCIU/AEI/<https://doi.org/10.13039/501100011033>, and FSE+.

REFERÊNCIAS / REFERENCES

- ALMEIDA-NETO, M.; GUIMARÃES, P.; GUIMARÃES, P. R.; LOYOLA, R. D.; ULRICH, W. A consistent metric for nestedness analysis in ecological systems: reconciling concept and measurement. *Oikos*, v. 117, n. 8, p. 1227-1239, 2008.
- ANDERSON, M. J. A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology*, v. 26, n. 1, p. 32-46, 2001.
- ANDERSON, M. J. Distance-based tests for homogeneity of multivariate dispersions. *Biometrics*, v. 62, n. 1, p. 245-253, 2006.
- ATMAR, W.; PATTERSON, B. D. The measure of order and disorder in the distribution of species in fragmented habitat. *Oecologia*, v. 96, n. 3, p. 373-382, 1993.

ÁVILA-FLORES, R.; MEDELLÍN, R. A. Ecological, taxonomic, and physiological correlates of cave use by Mexican Bats. *Journal of Mammalogy*, v. 85, n. 4, p. 675-687, 2004.

BADINO, G. Underground meteorology-“What’s the weather underground?”. *Acta Carsologica*, v. 39, n. 3, p. 427-448, 2010.

BARROS, J. S.; BERNARD, E.; FERREIRA, R. L. Ecological preferences of neotropical cave bats in roost site selection and their implications for conservation. *Basic and Applied Ecology*, v. 45, n. 1, p. 31-41, 2020.

BARROS, J. S.; BERNARD, E. Species richness, occurrence and rarity of bats in Brazilian caves. *Austral Ecology*, v. 48, n. 8, p. 2144-2170, 2023.

BASELGA, A. Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity. *Global Ecology and Biogeography*, v. 19, n. 1, p. 134-143, 2010.

BECK, M. *ggord: Ordination Plots with ggplot2*. R package version 1.1.8. 2024. Disponível em: <https://fawda123.github.io/ggord/>. Acesso em: 10 de dez. 2024.

BERNARD, E.; GAMA, A. R.; GOMES, A. M. E.; SANTOS, C. L. C.; FISCHER, E. A.; SCHMIDT, E. J. C.; ANDRADE, F. A. G.; FALCÃO, F. C.; GARBINO, G. S. T.; MENA, J. C. V.; LUZ, J. L.; TREVELIN, L. C.; AGUIAR, L.; PEREIRA, M. J. V. C. R.; DELGADO, M.; ZORTÉA, M.; ROCHA, P. A.; BOBROWIEC, P. E. D.; NOVAES, R. L. M.; TAVARES, V. C.; CARVALHO, W. D.; UIEDA, W. *Lonchorhina aurita* Tomes, 1863. Sistema de Avaliação do Risco de Extinção da Biodiversidade – SALVE. ICMBio. 2023. Acesso em: 06 jul. 2025.

BOBROWIEC, P. E. D.; ROSA, L. D. S.; GAZARINI, J.; HAUGAASEN, T. Phyllostomid bat assemblage structure in Amazonian flooded and unflooded forests. *Biotropica*, v. 46, n. 3, p. 312-321, 2014.

BORCARD, D.; GILLET, F.; LEGENDRE, P. *Numerical ecology with R*. New York, Springer, 306p, 2011.

BRASIL. *Resolução CONAMA N° 347/2004, de 10 de setembro de 2004*. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/cecav/images/stories/downloads/Legislacao/Res_CONAMA_347_2004.pdf. Acesso em: 10 dez. 2024.

BREDT, A.; UIEDA, W.; MAGALHÃES, E. D. Morcegos cavernícolas da região do Distrito Federal, centro-oeste do Brasil (Mammalia, Chiroptera). *Revista Brasileira de Zoologia*, v. 16, n. 3, p. 731-770, 1999.

BRUNET, A. K.; MEDELLIN, R. A. The species-area relationship in bat assemblages of tropical caves. *Journal of Mammalogy*, v. 82, n. 4, p. 1114-1122, 2001.

BU, Y.; WANG, Y.; ZHANG, C.; LIU, W.; ZHOU, H.; YU, Y.; NIU, H. Geographical distribution, roost selection, and conservation state of cave-dwelling bats in China. *Mammalia*, vol. 79, n. 4, pp. 409-417, 2015.

BURGIN, C. J.; COLELLA, J. P.; KAHN, P. L.; UPHAM, N. S. How many species of mammals are there? *Journal of Mammalogy*, v. 99, n. 1, p. 1-14, 2018.

CAMPANHA, R. A. D. C.; FOWLER, H. G. Roosting assemblages of bats in arenitic caves in remnant fragments of Atlantic Forest in southeastern Brazil. *Biotropica*, v. 25, n. 3, p. 362-365, 1993.

CARDOSO, P.; RIGAL, F.; CARVALHO, J. C.; FORTELIUS, M.; BORGES, P. A. V.; PODANI, J.; SCHMERA, D. Partitioning taxon, phylogenetic and functional beta diversity into replacement and richness difference components. *Journal of Biogeography*, v. 41, n. 4, p. 749-761, 2014.

CARDOSO, P.; RIGAL, F.; BORGES, P. A. V. *BAT: Biodiversity Assessment Tools*. R package version 2.7, 2024. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=BAT>. Acesso em: 10 de dez. de 2024.

CARVALHO, J. C.; CARDOSO, P.; BORGES, P. A. V.; SCHMERA, D.; PODANI, J. Measuring fractions of beta diversity and their relationships to nestedness: a theoretical and empirical comparison of novel approaches. *Oikos*, v. 122, n. 6, p. 825-834, 2013.

CARVALHO, W. D.; ROSALINO, L. M.; XAVIER, B. S.; CASTRO, I. J.; HILÁRIO, R.; MARQUES, T. M.; TOLEDO, J. J.; VIEIRA, M. V.; PALMEIRIM, J. M.; MUSTIN, K. The relative importance of forest cover and patch-level drivers for phyllostomid bat communities in the Amazonian savannas. *Landscape Ecology*, v. 38, p. 117-130, 2023a.

CARVALHO, W. D.; FLUCK, I. E.; DE CASTRO, I. J.; HILÁRIO, R. R.; MARTINS, A. C. M.; DE TOLEDO, J. J.; DA SILVA XAVIER, B.; DAMBROS, C.; BOBROWIEC, P. E. D. Elevation drives taxonomic, functional and phylogenetic β -diversity of phyllostomid bats in the Amazon biome. *Journal of Biogeography*, v. 50, n. 1, p. 70-85, 2023b.

CARVALHO, W. D.; FREITAS, L. N.; FREITAS, G. P.; LUZ, J. L.; COSTA, L. M.; ESBÉRARD, C. E. L. Efeito da chuva na captura de morcegos em uma ilha da costa sul do Rio de Janeiro, Brasil. *Chiroptera Neotropical*, vol. 17, n. 1, p. 808-816, 2011.

CONSELHO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE (COEMA). (2007, 24 de outubro). *Resolução nº 54, de 24 de outubro de 2007: Lista das espécies ameaçadas de extinção do Pará*. [Resolução]. Belém, PA: Secretaria de Estado de Meio Ambiente do Pará (SEMAS). Disponível em: <https://www.semas.pa.gov.br/legislacao/files/pdf/375.pdf>. Acesso em: 10 de dez. de 2024.

DÍAZ, M. M.; SOLARI, S.; AGUIRRE, L. F.; AGUIAR, L. M. S.; BARQUEZ, R. B. 2016. Clave de identificación de los murciélagos de Sudamérica. Publicación Especial nº 2, PCMA (Programa de Conservación de Murciélagos de Argentina), Argentina, 160 p., 2016.

DRAY, S.; PÉLISSIER, R.; JOMBART, T.; THIOULOUSE, J. *adespatial: Multivariate multiscale spatial analysis*. R package version 0.3-13, 2024. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=adespatial>. Acesso em: 10 de dez. de 2024.

ESTRADA, A.; COATES-ESTRADA, R. Bats in continuous forest, forest fragments and in an agricultural mosaic habitat at Los Tuxtlas, Mexico. *Biological Conservation*, v. 103, n. 3, p. 237-245, 2002.

FARIA, D.; SOARES-SANTOS, B.; SAMPAIO, E. Bats from the Atlantic rainforest of southern Bahia, Brazil. *Biota Neotropica*, v. 6, n. 2, 2006.

FORTIN, M. J., & DALE, M. R. T. *Spatial Analysis: A Guide for Ecologists*, 2.ed. Cambridge University Press, 438p., 2014.

FRAGA, R.; TAVARES, V.; SIMÕES, M. H.; PROUS, X.; GIROLAMO-NETO, C.; BRANDI, I. V.; OLIVEIRA, G.; TREVELIN, L. C. Caves as wildlife refuges in degraded landscapes in the Brazilian Amazon. *Scientific Reports*, v. 13 n. 6055, 2023.

GENELHÚ, S. M. C.; LAURINDO, R. DE S.; TAHARA, A. S.; OLIVEIRA, L. L.; GREGORIN, R. Seasonal dietary niche changes in Neotropical bats. *Journal of Tropical Ecology*, v. 39, n. e35, 2023.

GENELHÚ, S. M. C.; SIMÕES, M. H.; ASSIS, M. A. C.; RIBEIRO, M. S.; PROUS, X. First report of albinism in a lactating female of the chestnut long-tongued bat *Lionycteris spurrelli* Thomas, 1913 (Chiroptera, Phyllostomidae). *Mammalia*, v. 86, n. 3, p. 257-260. 2022.

GOMES, M. N.; UIEDA, W. Abrigos diurnos, composição de colônias, dimorfismo sexual e reprodução do morcego hematófago *Desmodus rotundus* (E. Geoffroy) (Chiroptera, Phyllostomidae) no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Zoologia*, v. 21, n. 3, p. 629-638, 2004.

GOSLEE, S. C.; URBAN, D. L. *ecodist: Dissimilarity-based functions for ecological analysis*. R package version 2.1.3. 2023. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=ecodist>. Acesso em: 10 dez. 2024.

GUIMARÃES, M. M.; FERREIRA, R. L. Morcegos cavernícolas do Brasil: novos registros e desafios para conservação. *Revista Brasileira de Espeleologia*, v. 2 n. 4, p. 1-33, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Manual técnico da vegetação brasileira* (2a ed.). Rio de Janeiro. 2012. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=263011>. Acesso em: 10 dez. 2024.

INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE (IUCN). *The IUCN Red List of Threatened Species*. Version 2019-3. 2019. Disponível em: www.iucnredlist.org. Acesso em: 28 out. de 2024.

KALKO, E. K. V.; HANDLEY, C. O., JR.; HANDLEY, D. Organization, diversity and long-term dynamics of a Neotropical bat community. In: CODY, M. L.; SMALLWOOD, J. A. (Ed.) *Long-term studies of vertebrate communities*. San Diego, Academic, cap. 16, p. 503-553, 1996.

KRAFT, N. J. B.; ADLER, P. B.; GODOY, O.; JAMES, E. C.; FULLER, S.; LEVINE, J. M. Community assembly, coexistence and the environmental filtering metaphor. *Functional Ecology*, v. 29, n. 5, p. 592-599, 2015.

KUNZ, T. H. Roosting ecology. In: KUNZ, T. H (Ed.). *Ecology of bats*. Plenum Press. New York & London, cap. 1, p. 1-55, 1982.

KUNZ, T. H.; TORREZ, E. B.; BAUER, D.; LOBOVA, T.; FLEMING, T. H. Ecosystem services provided by bats. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 1223, n. 1, p. 1-38, 2011.

LEAL, E. S. B.; BERNARD, E. Mobility of bats between caves: ecological aspects and implications for conservation and environmental licensing activities in Brazil. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, v. 58, n. 2, p. 373-383, 2021.

LEGENDRE, P. Spatial autocorrelation: trouble or new paradigm? *Ecology*, v. 74, n. 6, p. 1659-1673, 1993.

- LOMOLINO, M. V. Elevation gradients of species richness: historical and prospective views. *Global Ecology and Biogeography*, v. 10, n. 1, p. 3-13, 2001.
- LUO, J.; JIANG, T.; LU, G.; WANG, L.; WANG, J.; FENG, J. Bat conservation in China: should protection of subterranean habitats be a priority? *Oryx*, v. 47, n. 4, p. 526-531, 2013.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). *Lista Nacional Oficial de Espécies da Fauna Ameaçadas de Extinção*. Publicado no Diário Oficial da União nº 200, de 18 de outubro de 2018. Disponível em: https://www.gov.br/icmbio/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/publicacoes-diversas/livro_vermelho_2018_vol1.pdf. Acesso em: 28 de outubro de 2024.
- MONTEIRO, J. C. S.; OLIVEIRA, A. C. M.; ANDRADE, F. A. G.; SOUSA, L. S.; LIMA, R. S.; REIS, S. M. C.; SOUZA, C. A. C.; COSTA, Â. G. T. New record of *Furipterus horrens* (Cuvier, 1828) (Chiroptera, Furipteridae) in eastern Brazilian Amazonia. *Check List*, v. 20, n. 1, p. 29-39, 2023.
- NEKOLA, J. C.; WHITE, P. S. The distance decay of similarity in biogeography and ecology. *Journal of Biogeography*, v. 26, n. 5, p. 1013-1023, 1999.
- OKSANEN, J.; BLANCHET, F. G.; KINDT, R.; LEGENDRE, P.; MINCHIN, P. R.; O'HARA, R. B.; SIMPSON, G. L.; SOLYMOS, P.; STEVENS, M. H. H.; WAGNER, H. *vegan: Community Ecology Package* (Version 2.5-7). 2020. Available from: <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>. Acesso em: 28 out. de 2024.
- OLIVEIRA, H. F. M.; OPREA, M.; DIAS, R. I. Distributional patterns, and ecological determinants of bat occurrence inside caves: A broad scale meta-analysis. *Diversity*, v. 10, n. 3, p. 49, 2018.
- PILÓ, L.B.; AULER, A.S.; MARTINS, F. Carajás National Forest: Iron ore plateaus and caves in southeastern Amazon. In: VIEIRA, B.C.; SALGADO, A.R.; SANTOS, L.J.C. (Ed.). *Landscapes and Landforms of Brazil*. Springer, Dordrecht, cap. 25, p.273-283, 2015.
- PINHEIRO, J.; BATES, D.; DEBROY, S.; SARKAR, D.; R CORE TEAM. *nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models*. R package version 3.1-162, 2023. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>. Acesso em: 28 out. 2024.
- PODANI, J.; SCHMERA, D. A new conceptual and methodological framework for exploring and explaining pattern in presence-absence data. *Oikos*, v. 120, n. 11, p. 1625-1638, 2011.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. *R: a language and environment for statistical computing*. Vienna: R foundation for statistical computing, 2024. Disponível em: <https://www.Rproject.org/>. Acesso: 2 nov. 2024.
- RODRÍGUEZ-DURÁN, A.; SOTO-CENTENO, J. A. Temperature selection by tropical bats roosting in caves. *Journal of Thermal Biology*, v. 28, n. 6, p. 465-468, 2003.
- SAMPAIO, E. M.; KALKO, E. K. V.; BERNARD, E.; RODRIGUEZ-HERRERA, B.; HANDLEY, C. O. A biodiversity assessment of bats (Chiroptera) in lowland rain forest of Central Amazonia, including methodological and statistical considerations. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, v. 38, n. 1, p. 17-31, 2003.

SIKES, R. S., GANNON, W. L., & THE ANIMAL CARE AND USE COMMITTEE OF THE AMERICAN SOCIETY OF MAMMALOGISTS. Guidelines of the American Society of Mammalogists for the use of wild mammals in research and education. *Journal of Mammalogy*, v. 97, n. 3, p. 663-688, 2016.

SLOWIKOWSKI, K. *ggrepel: Repel Overlapping Text Labels in ggplot2*. R package version 0.9.3, 2023. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=ggrepel>. Acesso em: 28 out. 2024.

SOININEN, J. Species turnover along abiotic and biotic gradients: Patterns in space equal patterns in time? *BioScience*, v. 60, n. 6, p. 433-439, 2010.

STEVENS, R. D. Broad-scale gradients of resource utilization by phyllostomid bats in Atlantic Forest: patterns of dietary overlap, turnover and the efficacy of ecomorphological approaches. *Oecologia*, v. 198, n. 3, p. 785-799, 2022.

TOBLER, W.R. A Computer Model Simulation of Urban Growth in the Detroit Region. *Economic Geography*, v. 46, n. sup1, p. 234-240, 1970.

TORQUETTI, C. G.; SILVA, M. X.; TALAMONI S. Differences between caves with and without bats in a Brazilian karst habitat. *Zoologia*, v. 34, p. 1-7, 2017.

TRAJANO, E. Ecologia de populações de morcegos cavernícolas em uma região cárstica do sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Zoologia*, v. 2 n. 5, p. 255-320, 1984.

VARGAS-MENA, J. C.; CORDERO-SCHMIDT, E.; RODRIGUEZ-HERRERA, B.; MEDELLÍN, R. A.; BENTO, D. D. M.; VENTICINQUE, E. M. Inside or out? Cave size and landscape effects on cave-roosting bat assemblages in Brazilian Caatinga caves. *Journal of Mammalogy*, v. 101, n. 2, p. 464-475, 2020.

VICENTE-GONZALEZ, L.; VICENTE-VILLARDON, J.L. PERMANOVA: Multivariate Analysis of Variance Based on Distances and Permutations. R package version 0.2.0. 2021. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=PERMANOVA>. Acesso em: 2 nov. 2024.

WICKHAM, H. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. New York: Springer-Verlag New York, 2016.

MATERIAL SUPLEMENTAR

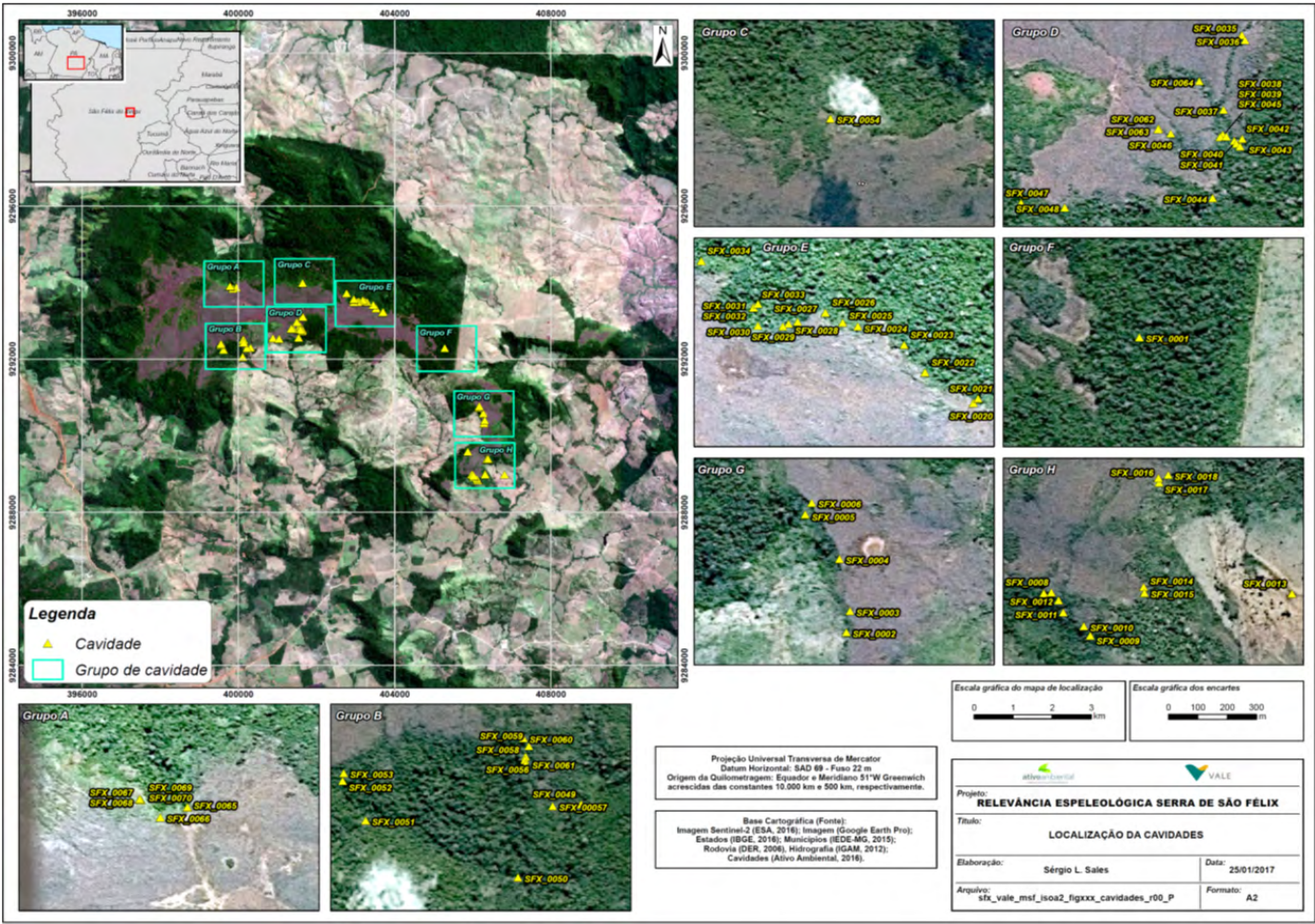


Figura S1 - Mapa com a localização da área de estudo e cavernas amostradas no município de São Félix do Xingu, Pará.



Figura S2 - Busca ativa por quirópteros nas cavernas.

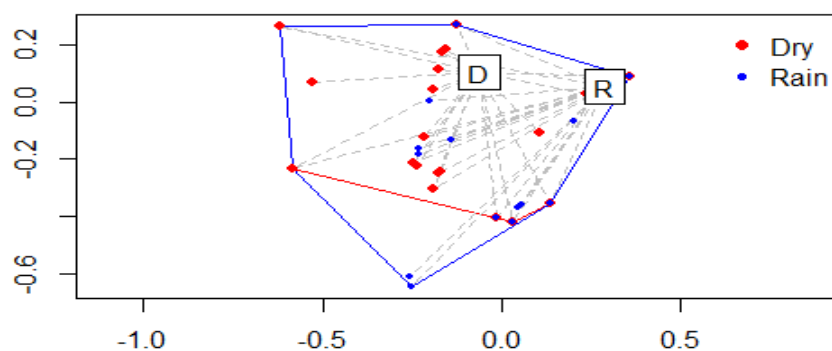


Figura S3 - Resultados do teste de homogeneidade da dispersão (PERMDISP2) para a composição de comunidades de morcegos entre as estações seca (Dry) e chuvosa (Rain). Os pontos representam as comunidades de morcegos em cada estação, conectados ao centróide correspondente, indicando a dispersão multivariada. Os polígonos delimitam a variação entre os grupos, enquanto as letras "D" e "R" destacam os centróides das estações seca e chuvosa, respectivamente.

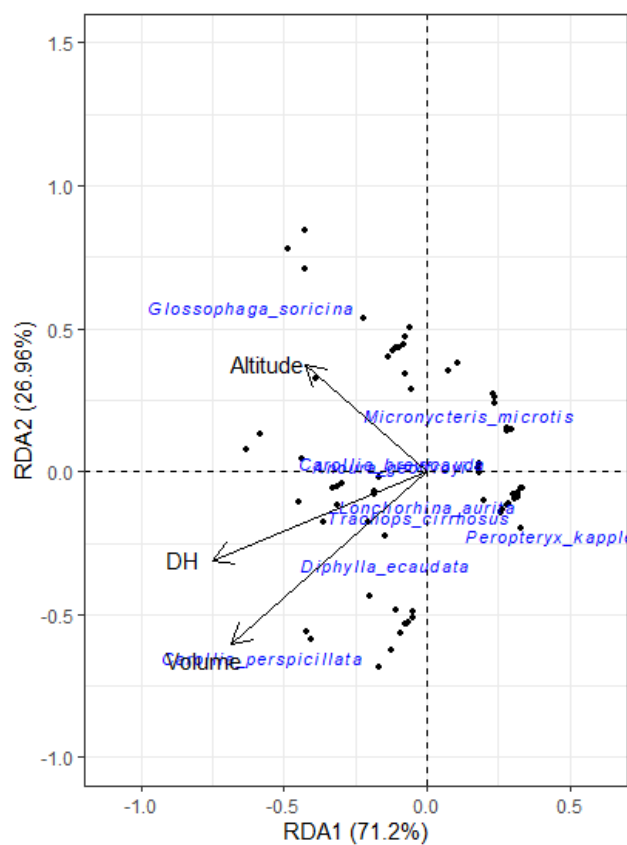


Figura S4 - Análise de Redundância (RDAP) mostrando a relação entre variáveis ambientais (volume, DH, altitude) e a composição de espécies de morcegos em cavernas de São Félix do Xingu para a estação chuvosa. As setas indicam a direção e a magnitude da correlação das variáveis ambientais com os eixos da RDAP. Cada ponto preto representa uma caverna, enquanto os nomes das espécies representam sua associação com os gradientes ambientais. O eixo RDA1 explica 71,2% da variância e o eixo RDA2, 26,96%.

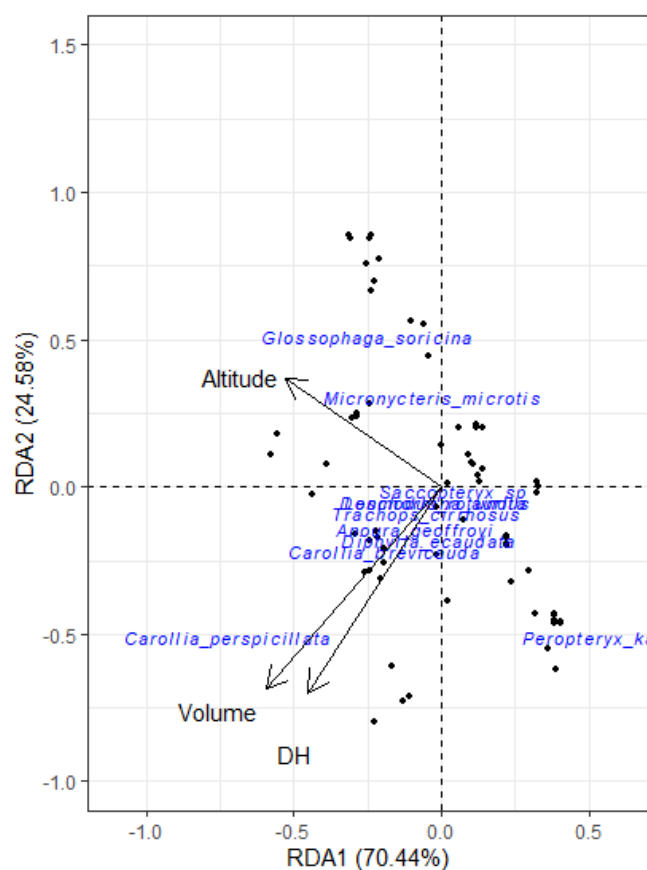


Figura S5 - Análise de Redundância (RDAP) mostrando a relação entre variáveis ambientais (volume, DH, altitude) e a composição de espécies de morcegos em cavernas de São Félix do Xingu para a estação seca. As setas indicam a direção e a magnitude da correlação das variáveis ambientais com os eixos da RDAP. Cada ponto preto representa uma caverna, enquanto os nomes das espécies representam sua associação com os gradientes ambientais. O eixo RDA1 explica 70.442% da variância e o eixo RDA2, 24,58.

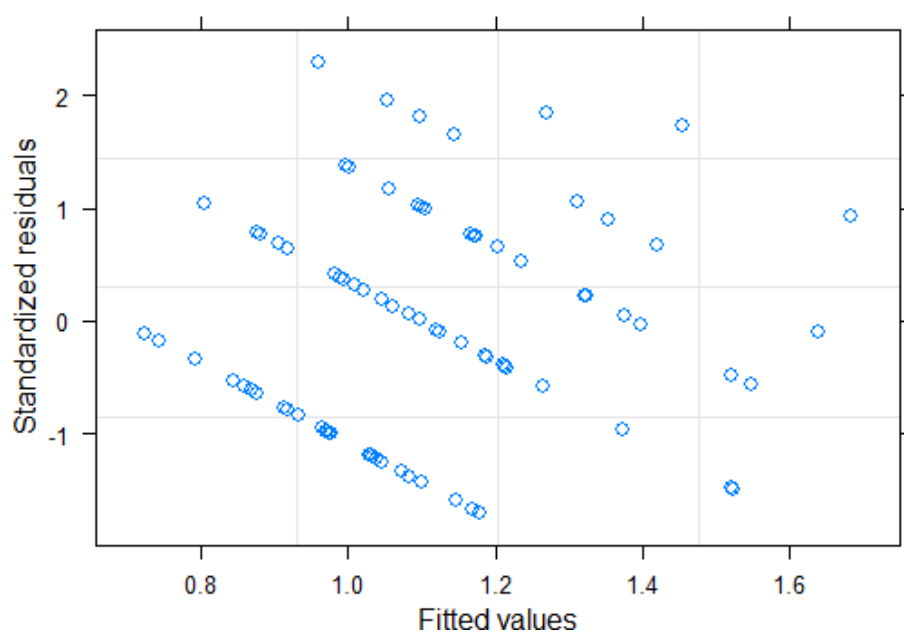


Figura S6 - Resíduos padronizados em função dos valores ajustados do modelo linear generalizado (GLS) utilizado para prever a riqueza de morcegos em função de variáveis ambientais e espaciais em São Félix do Xingu. O modelo incluiu as variáveis log-transformadas de floresta, altitude, desenvolvimento horizontal (DH) e volume, com uma estrutura de correlação espacial especificada como função das coordenadas (latitude e longitude). O método de máxima verossimilhança restrita (REML) foi utilizado para estimar os parâmetros.

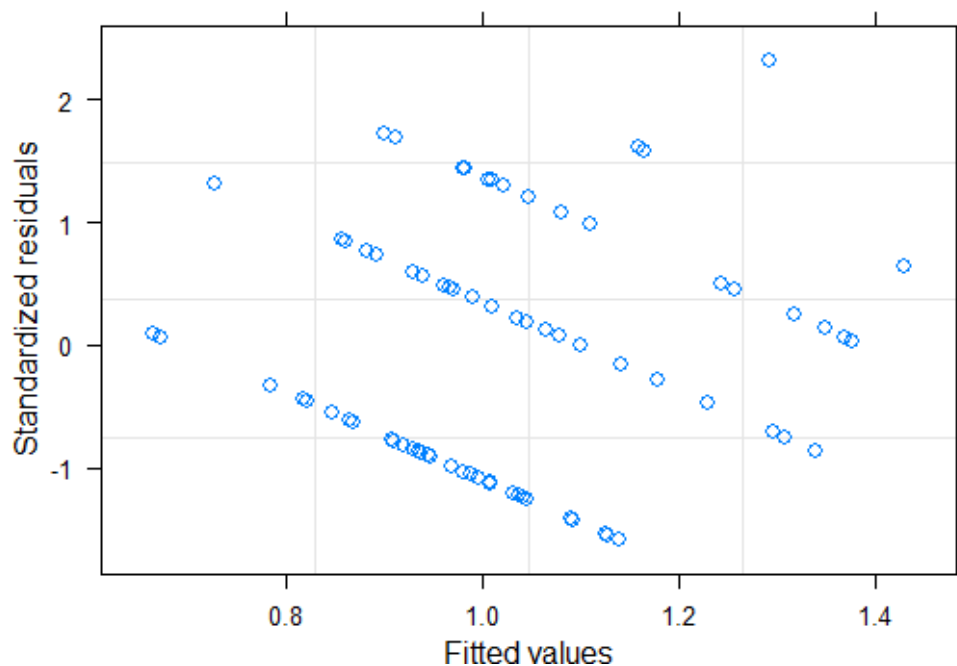


Figura S7 - Resíduos padronizados em função dos valores ajustados do modelo linear generalizado (GLS) utilizado para prever a riqueza de morcegos para a estação seca, em função de variáveis ambientais e espaciais em São Félix do Xingu. O modelo incluiu as variáveis log-transformadas de floresta, altitude, desenvolvimento horizontal (DH) e volume, com uma estrutura de correlação espacial especificada como função das coordenadas (latitude e longitude). O método de máxima verossimilhança restrita (REML) foi utilizado para estimar os parâmetros.

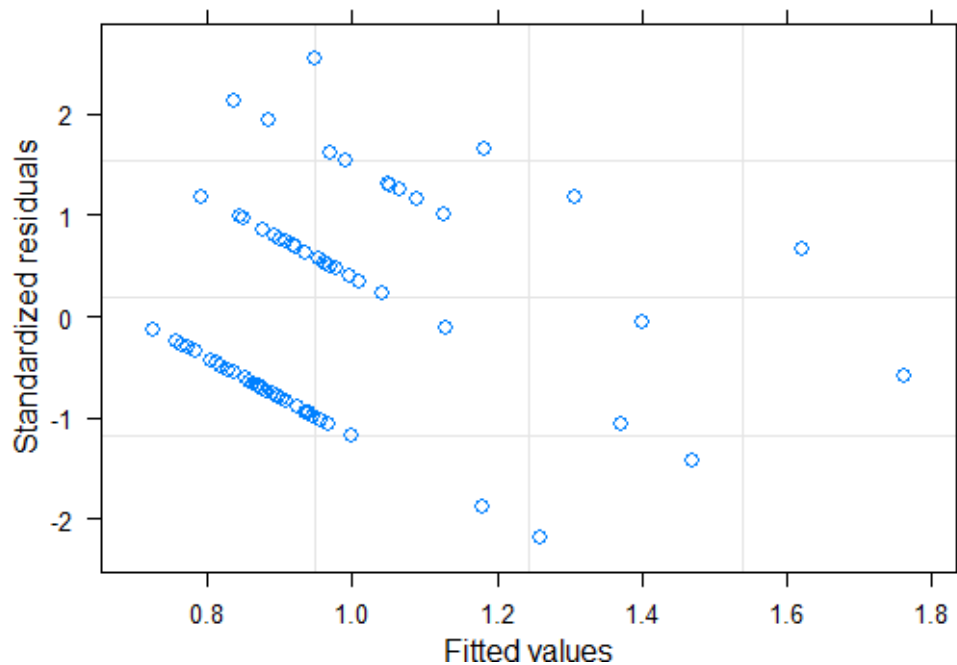


Figura S8 - Resíduos padronizados em função dos valores ajustados do modelo linear generalizado (GLS) utilizado para prever a riqueza de morcegos para a estação chuvosa, em função de variáveis ambientais e espaciais em São Félix do Xingu. O modelo incluiu as variáveis log-transformadas de floresta, altitude, desenvolvimento horizontal (DH) e volume, com uma estrutura de correlação espacial especificada como função das coordenadas (latitude e longitude). O método de máxima verossimilhança restrita (REML) foi utilizado para estimar os parâmetros.

Tabela S1 - Cavernas alvo do estudo localizadas no município de São Félix do Xingu, MG.

Nome	Datum SAD 69		Altitude	PH	Disnível	Area	Volume	Riqueza		
	Coord_E	Coord_N						Chuva	Seca	Total
SFX_0001	406286	9290293	622	67	3,12	183	351	1	2	2
SFX_0002	406294	9290326	637	145	9,66	384	780	5	4	6
SFX_0003	406305	9290401	625	23,26	2,54	61,01	64	2	2	2
SFX_0004	406269	9290583	615	14	1,38	25	21	2	3	3
SFX_0005	406153	9290738	641	12,92	2,09	29,29	38	1	1	1
SFX_0006	406176	9290779	621	13,8	2,34	27,2	40	2	3	4
SFX_0007	405973	9288985	507	12,1	4,34	36,55	82	1	1	1
SFX_0008	405997	9288987	502	58,8	3,61	218,9	588	1	3	3
SFX_0009	406130	9288836	478	13,6	1,47	16,24	13	2	1	2
SFX_0010	406108	9288870	486	29,5	2,95	77,3	78	1	1	2
SFX_0011	406039	9288918	469	8,89	1,6	13,6	11	0	1	1
SFX_0012	406022	9288959	502	17,78	1,52	15,04	17	0	2	2
SFX_0013	406819	9288683	320	20	1,15	32	20	0	0	0
SFX_0014	406314	9289007	472	37,5	5,54	154	373	3	4	5
SFX_0015	406316	9288986	453	17,5	2,29	35,5	34	1	0	1
SFX_0016	406367	9289369	523	66	7,76	186	342	2	2	2
SFX_0017	406364	9289385	525	12	1,51	33	41	1	2	2
SFX_0018	406396	9289397	505	20	2,63	83,5	202	2	2	2
SFX_0019	405874	9289583	582	10,5	0,98	40	41	1	2	2
SFX_0020	403685	9293221	649	26,5	1,21	50,01	39	1	1	1
SFX_0021	403703	9293236	650	21	1,22	35	24	2	2	2
SFX_0022	403523	9293329	651	9,5	1,71	17	18	2	2	2
SFX_0023	403453	9293425	659	9	2,09	17	18	0	0	0
SFX_0024	403297	9293491	645	10,5	1,95	60	94	1	3	3
SFX_0025	403247	9293505	641	40	5,18	148	533	3	3	5
SFX_0026	403188	9293540	642	14,5	1,74	22	22	1	0	1
SFX_0027	403093	9293508	652	16	6,27	47	93	1	1	1
SFX_0028	403063	9293503	661	27	1,28	49	70	1	3	3
SFX_0029	403043	9293493	651	29	1,46	82	81	2	1	2
SFX_0030	402960	9293496	639	15	3,35	36	38	1	1	1
SFX_0031	402943	9293559	628	11	4,57	30	43	2	1	2
SFX_0032	402945	9293559	632	10,5	1,37	29	29	0	0	0
SFX_0033	402960	9293572	610	15	4,7	60	56	3	3	3
SFX_0034	402768	9293723	657	14	1,72	32	23	1	1	1
SFX_0035	401647	9293124	583	53	3,36	104	160	3	1	3

	Datum SAD 69							Riqueza		
Nome	Coord_E	Coord_N	Altitude	PH	Disnível	Area	Volume	Chuva	Seca	Total
SFX_0036	401658	9293106	606	27	2,06	68	71	2	2	3
SFX_0037	401581	9292867	558	28	3,35	74	53	2	2	3
SFX_0038	401578	9292782	541	16	1,33	83	161	2	1	2
SFX_0039	401569	9292774	540	56	4,19	171	263	3	1	3
SFX_0040	401618	9292760	536	16	2,56	48	79	2	1	2
SFX_0041	401625	9292750	529	9	1,11	37	74	1	2	2
SFX_0042	401644	9292766	530	42	5,03	123	108	1	1	1
SFX_0043	401636	9292739	539	30	5,98	55	82	1	2	2
SFX_0044	401541	9292563	519	16	2,33	35	55	1	3	3
SFX_0045	401590	9292775	541	25	3,84	56	116	1	2	2
SFX_0046	401403	9292786	559	11	1,57	30,3	25	0	0	0
SFX_0047	400892	9292553	613	30	2,16	46	60	2	3	3
SFX_0048	401040	9292534	605	16,5	0,72	18	16	4	1	4
SFX_0049	400312	9292303	526	9	2,05	36	34	1	2	2
SFX_0050	400111	9292064	451	Não topografada				0	0	0
SFX_0051	399624	9292249	514	10	0,59	25	19	0	0	0
SFX_0052	399550	9292379	565	16	1,69	62	111	2	2	2
SFX_0053	399554	9292404	551	38	5,28	86	155	3	3	3
SFX_0054	401649	9293987	740	10	0,76	27	20	0	1	1
SFX_0055	401527	9293994	718	29	4,76	143	327	3	2	3
SFX_0056	400134	9292457	568	23	3,4	45	62	1	2	2
SFX_0057	400220	9292297	522	111,5	16,33	664	1148	2	2	2
SFX_0058	400132	9292447	562	12	3,67	23	35	1	1	1
SFX_0059	400143	9292491	583	30,5	2,79	74	112	2	2	3
SFX_0060	400126	9292518	585	21	3,07	65	88	1	3	4
SFX_0061	400135	9292434	575	18	1,56	42	46	2	1	2
SFX_0062	401361	9292804	573	8	1,46	16	12	0	0	0
SFX_0063	401360	9292802	565	11	1,11	16	13	1	1	1
SFX_0064	401500	9292967	568	12	1,92	20	41	1	1	1
SFX_0065	399948	9293879	642	15,5	3,07	61,5	56	2	3	3
SFX_0066	399855	9293842	635	8	1,08	34	37	1	2	2
SFX_0067	399789	9293904	639	15	1,68	18	35	1	1	1
SFX_0068	399784	9293906	644	8	1,6	15	11	1	1	1
SFX_0069	399706	9292475	557	24	1,4	56	57	3	1	1
SFX_0070	406692	9290002	620	78	7,85	408	711	1	3	3
SFX_0071	411904	9295964	560	9,5	2,46	22	21	1	1	1
SFX_0072	406715	9290004	609	63	9,54	413	761	2	2	3

Datum SAD 69								Riqueza		
Nome	Coord_E	Coord_N	Altitude	PH	Disnível	Area	Volume	Chuva	Seca	Total
SFX_0073	406737	9289955	585	192	25,1	697	1109	4	3	4
SFX_0074	406757	9289910	563	10	1,47	19	25	1	1	1
SFX_0075	406779	9289886	538	20	5,5	55	85	3	3	4
SFX_0076	406501	9289518	541	28	1,62	76	107	1	1	1
SFX_0077	406942	9289522	519	13	0,79	48	54	1	1	1
SFX_0078	406252	9289091	506	69,5	6	377	779	4	6	6
SFX_0079	413056	9295220	509	19	3,86	30	30	1	0	0
SFX_0080	413283	9295064	468	13	2,65	52	87	1	1	1
SFX_0081	413180	9295073	484	46	6,52	140	297	3	4	4
SFX_0082	413220	9295037	467	7	1,03	15	33	1	2	2
SFX_0083	413260	9295027	471	15	3,5	100	346	1	2	2
SFX_0084	413289	9295004	444	35,5	4,65	126	238	2	1	2
SFX_0085	413380	9294880	416	10	1,99	21	23	1	0	1
SFX_0086	413387	9294870	424	8	2,48	31	47	1	0	1
SFX_0087	413292	9294973	443	42,5	1,9	166	713	4	3	4
SFX_0088	413259	9294717	442	70	5,08	207	265	2	1	2
SFX_0089	413212	9294616	410	14	2,62	26	40	1	1	1
SFX_0090	413270	9295077	463	8,5	0,66	13	8	1	0	1

Tabela S2 - Datas de amostragem, nas estações chuvosa e seca, referentes ao diagnóstico de quirópteros em cavidades naturais localizadas no município de São Félix do Xingu, MG.

Cavidade	Data		Cavidade	Data		Cavidade	Data	
	Chuva	Seca		Chuva	Seca		Chuva	Seca
SFX_0001	01/03/18	25/07/18	SFX_0031	02/03/18	11/07/18	SFX_0061	29/01/18	20/07/18
SFX_0002	03/02/18	25/07/18	SFX_0032	02/03/18	11/07/18	SFX_0062	24/02/18	12/07/18
SFX_0003	01/03/18	24/07/18	SFX_0033	02/03/18	11/07/18	SFX_0063	24/02/18	12/07/18
SFX_0004	16/01/18	24/07/18	SFX_0034	30/01/18	18/07/18	SFX_0064	18/01/18	12/07/18
SFX_0005	16/01/18	24/07/18	SFX_0035	18/01/18	19/07/18	SFX_0065	17/01/18	17/07/18
SFX_0006	16/01/18	24/07/18	SFX_0036	18/01/18	19/07/18	SFX_0066	17/01/18	17/07/18
SFX_0007	03/03/18	21/07/18	SFX_0037	27/02/18	19/07/18	SFX_0067	17/01/18	17/07/18
SFX_0008	03/03/18	21/07/18	SFX_0038	27/02/18	12/07/18	SFX_0068	17/01/18	17/07/18
SFX_0009	21/02/18	21/07/18	SFX_0039	27/02/18	19/07/18	SFX_0069	24/02/18	17/07/18
SFX_0010	21/02/18	21/07/18	SFX_0040	26/02/18	12/07/18	SFX_0070	28/02/18	16/07/18
SFX_0011	21/02/18	21/07/18	SFX_0041	26/02/18	12/07/18	SFX_0071	25/01/18	21/05/19
SFX_0012	21/02/18	20/07/18	SFX_0042	26/02/18	12/07/18	SFX_0072	22/02/18	23/07/18
SFX_0013	23/02/18	23/07/18	SFX_0043	26/02/18	12/07/18	SFX_0073	28/02/18	23/07/18

SFX_0014	23/02/18	10/07/18	SFX_0044	26/02/18	12/07/18	SFX_0074	22/02/18	23/07/18
SFX_0015	23/02/18	10/07/18	SFX_0045	27/02/18	19/07/18	SFX_0075	22/02/18	21/07/18
SFX_0016	02/02/18	16/07/18	SFX_0046	24/02/18	12/07/18	SFX_0076	05/03/18	16/07/18
SFX_0017	02/02/18	16/07/18	SFX_0047	03/03/18	27/07/18	SFX_0077	05/03/18	10/07/18
SFX_0018	02/02/18	16/07/18	SFX_0048	03/03/18	27/07/18	SFX_0078	23/02/18	10/07/18
SFX_0019	05/03/18	16/07/18	SFX_0049	26/01/18	20/07/18	SFX_0079	23/01/18	31/07/18
SFX_0020	01/02/18	30/07/18	SFX_0050	26/01/18	23/07/18	SFX_0080	23/01/18	31/07/18
SFX_0021	01/02/18	30/07/18	SFX_0051	20/01/18	17/07/18	SFX_0081	25/01/18	31/07/18
SFX_0022	01/02/18	30/07/18	SFX_0052	20/01/18	17/07/18	SFX_0082	24/01/18	31/07/18
SFX_0023	01/02/18	18/07/18	SFX_0053	20/01/18	17/07/18	SFX_0083	24/01/18	31/07/18
SFX_0024	02/03/18	18/07/18	SFX_0054	19/01/18	11/07/18	SFX_0084	25/01/18	31/07/18
SFX_0025	02/03/18	18/07/18	SFX_0055	19/01/18	11/07/18	SFX_0085	24/01/18	31/07/18
SFX_0026	02/03/18	18/07/18	SFX_0056	29/01/18	20/07/18	SFX_0086	24/01/18	31/07/18
SFX_0027	30/01/18	18/07/18	SFX_0057	26/01/18	20/07/18	SFX_0087	23/01/18	31/07/18
SFX_0028	30/01/18	18/07/18	SFX_0058	29/01/18	20/07/18	SFX_0088	24/01/18	31/07/18
SFX_0029	30/01/18	18/07/18	SFX_0059	29/01/18	20/07/18	SFX_0089	24/01/18	31/07/18
SFX_0030	30/01/18	11/07/18	SFX_0060	29/01/18	20/07/18	SFX_0090	23/01/18	31/07/18

Tabela S3 - Resultados do modelo estatístico Regressão Múltipla em Matrizes de Distância avaliando os efeitos de variáveis ambientais (distância, altitude, Desenvolvimento Horizontal e volume) sobre a dissimilaridade entre comunidades de morcegos em cavernas. Os coeficientes representam a direção e magnitude dos efeitos de cada variável, enquanto os valores de p indicam o nível de significância estatística.

<i>β_{total}</i> (R2 = 0,0073; pval 0,663)		
	Coefficient	<i>p</i>
Intercept	5,291803e-01	0,91
Distância	1,380e-08	0,75
Altitude	2,652462e-04	0,18
DH	-6,958690e-05	0,93
Volume	7,341765e-05	0,49
<i>β_{repl_total}</i> (R2 = 0,0109, pval = 0,467)		
	Coefficient	<i>P</i>
Intercept	2,270581e-01	0,24
Distância	3,498806e-08	0,50
Altitude	8,406041e-05	0,71
DH	-6,344957e-04	0,50
Volume	-3,802850e-05	0,76

<i>Brich_total</i> (R2 = 0,036, pval = 0,002)		
	Coefficient	p
Intercept	3,021222e-01	0,99
Distância	-2,072426e-08	0,55
Altitude	1,811858e-04	0,15
DH	5,649088e-04	0,28
Volume	1,114461e-04	0,06

Tabela S4 - Matriz de autovetores espaciais gerados por PCNM e utilizados como covariável para controlar a dependência espacial

Cavidade	PCNM1	PCNM3	PCNM4	PCNM5
SFX_0001	-0,14936	8,37E-06	9,73E-07	-0,07831
SFX_0002	-0,14936	8,38E-06	9,66E-07	-0,07516
SFX_0003	-0,14936	8,40E-06	9,49E-07	-0,06799
SFX_0004	-0,14936	8,45E-06	9,06E-07	-0,05056
SFX_0005	-0,14936	8,50E-06	8,66E-07	-0,03566
SFX_0006	-0,14936	8,51E-06	8,55E-07	-0,03176
SFX_0007	-0,14936	7,97E-06	1,14E-06	-0,2032
SFX_0008	-0,14936	7,97E-06	1,14E-06	-0,20302
SFX_0009	-0,14936	7,92E-06	1,15E-06	-0,21756
SFX_0010	-0,14936	7,93E-06	1,15E-06	-0,21429
SFX_0011	-0,14936	7,95E-06	1,15E-06	-0,20965
SFX_0012	-0,14936	7,96E-06	1,14E-06	-0,20572
SFX_0014	-0,14936	7,97E-06	1,14E-06	-0,20132
SFX_0015	-0,14936	7,97E-06	1,14E-06	-0,20333
SFX_0016	-0,14936	8,09E-06	1,12E-06	-0,16673
SFX_0017	-0,14936	8,09E-06	1,11E-06	-0,1652
SFX_0018	-0,1474	-0,0002	1,28E-06	2,16E-09
SFX_0019	-0,14936	8,16E-06	1,09E-06	-0,14594
SFX_0020	-0,14936	9,09E-06	-1,91E-07	0,203449
SFX_0021	-0,14936	9,10E-06	-1,99E-07	0,204871
SFX_0022	-0,14936	9,11E-06	-2,55E-07	0,213884
SFX_0024	-0,14936	9,15E-06	-3,53E-07	0,229531
SFX_0025	-0,14936	9,15E-06	-3,62E-07	0,230903
SFX_0026	-0,14936	9,16E-06	-3,84E-07	0,23429
SFX_0027	-0,14936	9,15E-06	-3,65E-07	0,231289
SFX_0028	-0,14936	9,15E-06	-3,62E-07	0,230831

Cavidade	PCNM1	PCNM3	PCNM4	PCNM5
SFX_0029	-0,14936	9,15E-06	-3,56E-07	0,229888
SFX_0030	-0,14936	9,15E-06	-3,58E-07	0,230228
SFX_0031	-0,14936	9,16E-06	-3,97E-07	0,236266
SFX_0033	0,081758	0,043214	-0,07612	-8,80E-07
SFX_0034	0,081758	0,047806	-0,09173	-9,45E-07
SFX_0035	0,081757	0,07978	-0,05161	-8,24E-07
SFX_0036	0,081757	0,079549	-0,04989	-8,17E-07
SFX_0037	0,081757	0,082435	-0,02959	-7,41E-07
SFX_0038	0,081757	0,082811	-0,02209	-7,13E-07
SFX_0039	0,081757	0,083079	-0,02149	-7,11E-07
SFX_0040	0,081757	0,081822	-0,01968	-7,03E-07
SFX_0041	0,081757	0,08167	-0,01871	-6,99E-07
SFX_0042	0,081757	0,081107	-0,01991	-7,03E-07
SFX_0043	0,081757	0,081415	-0,01761	-6,94E-07
SFX_0044	0,081757	0,084561	-0,0031	-6,41E-07
SFX_0045	0,081757	0,082516	-0,02133	-7,10E-07
SFX_0047	0,081757	0,101898	-0,00974	-6,76E-07
SFX_0048	0,081757	0,098019	-0,00634	-6,61E-07
SFX_0049	0,081757	0,118232	0,005704	-6,22E-07
SFX_0052	0,078068	-2,95E-07	2,09E-11	1,85E-05
SFX_0053	0,081756	0,138089	-0,01204	-6,92E-07
SFX_0054	0,081757	0,076719	-0,1281	-1,11E-06
SFX_0055	0,081757	0,079947	-0,13014	-1,12E-06
SFX_0056	0,081757	0,122441	-0,01001	-6,83E-07
SFX_0057	0,081757	0,120706	0,005169	-6,24E-07
SFX_0058	0,081757	0,122529	-0,00915	-6,80E-07
SFX_0059	0,081757	0,122083	-0,01292	-6,95E-07
SFX_0060	0,081757	0,122442	-0,01551	-7,05E-07
SFX_0061	0,081757	0,122495	-0,00796	-6,75E-07
SFX_0063	0,081757	0,088553	-0,02639	-7,33E-07
SFX_0064	0,081757	0,084246	-0,0394	-7,80E-07
SFX_0065	0,081756	0,122444	-0,13824	-1,17E-06
SFX_0066	0,081756	0,125052	-0,13604	-1,16E-06
SFX_0067	0,081756	0,126596	-0,1423	-1,18E-06
SFX_0068	0,081756	0,126722	-0,14253	-1,19E-06
SFX_0069	0,081756	0,133789	-0,01657	-7,10E-07

Cavidade	PCNM1	PCNM3	PCNM4	PCNM5
SFX_0070	0,081757	-0,04384	0,283648	7,25E-07
SFX_0071	0,081754	-0,20357	-0,18453	-5,52E-07
SFX_0072	0,081757	-0,04446	0,283737	7,27E-07
SFX_0073	0,081757	-0,04488	0,288336	7,47E-07
SFX_0074	0,081757	-0,04525	0,292558	7,66E-07
SFX_0075	0,081757	-0,04575	0,29494	7,77E-07
SFX_0076	0,081757	-0,03706	0,324345	8,82E-07
SFX_0077	0,081757	-0,04883	0,329101	9,31E-07
SFX_0078	0,081757	-0,02893	0,359317	1,01E-06
SFX_0080	0,081753	-0,2372	-0,08875	-3,20E-08
SFX_0081	0,081753	-0,23448	-0,09074	-5,34E-08
SFX_0082	0,081753	-0,23542	-0,08709	-3,48E-08
SFX_0083	0,081753	-0,23645	-0,08574	-2,44E-08
SFX_0084	0,081753	-0,23715	-0,08336	-1,19E-08
SFX_0085	0,081753	-0,23914	-0,07131	4,40E-08
SFX_0086	0,081753	-0,23929	-0,07035	4,84E-08
SFX_0087	0,081753	-0,23712	-0,08058	-1,51E-09
SFX_0088	0,081753	-0,23535	-0,05827	7,41E-08
SFX_0089	0,081753	-0,23374	-0,04986	9,80E-08
SFX_0090	0,081753	-0,23689	-0,09005	-3,84E-08

Tabela S5 - Valores do Fator de Inflação da Variância (VIF) para as variáveis ambientais e espaciais utilizadas nas análises de Redundância Parcial (RDAp) em diferentes cenários: análise geral (RDAp - Geral), durante a estação chuvosa (RDAp - Chuva) e durante a estação seca (RDAp - Seca). Os valores de VIF indicam o grau de colinearidade entre as variáveis explicativas, sendo que valores acima de 5 sugerem possível multicolinearidade. As variáveis incluem componentes principais de matriz de distância (PCNM1, PCNM3, PCNM4, PCNM5), altitude, desenvolvimento horizontal (DH) e volume das cavernas.

	PCNM1	PCNM3	PCNM4	PCNM5	Altitude	DH	Volume
RDAp – Geral	1,110771	1,789282	1,177923	1,644285	2,486652	4,138644	4,240463
RDAp - chuva	1,165024	1,863688	1,168451	1,665263	2,677870	4,097495	4,176438
RDAp - seca	1,116811	1,608929	1,167616	1,576358	2,190868	4,056383	4,213863

Tabela S6 - Resultados das análises de Redundância Parcial (RDAP) realizadas para investigar a contribuição das variáveis ambientais (Altitude, Desenvolvimento Horizontal - DH e Volume das cavernas) na composição das comunidades de morcegos em São Félix do Xingu, considerando os cenários geral, estação chuvosa e estação seca. Os valores ajustados de R² indicam a proporção da variância explicada após ajuste pelos graus de liberdade. Para cada variável, são apresentados os graus de liberdade (Df), a variância explicada, o valor do teste F e o valor de probabilidade Pr(>F). Valores de p significativos ($\alpha=0,05$) estão indicados por asteriscos (*). Os resíduos representam a variância não explicada pelo modelo.

RDAP geral R² = 0,046				
	Df	Variance	F	Pr(>F)
Altitude	1	0,012	2,564	0,032 *
DH	1	0,015	3,387	0,014 *
Volume	1	0,004	0,904	0,476
Residual	74	0,347		
RDAP chuva R² = 0,052				
	Df	Variance	F	Pr(>F)
Altitude	1	0,016	3,109	0,027 *
DH	1	0,015	2,962	0,027 *
Volume	1	0,005	1,056	0,354
Residual	70	0,362		
RDAP seca R² = 0,041				
	Df	Variance	F	Pr(>F)
Altitude	1	0,016	3,132	0,016 *
DH	1	0,009	1,780	0,122
Volume	1	0,007	1,358	0,248
Residual	69	0,370		

Tabela S7 - Resultados das análises de Redundância Baseada em Distância Parcial (dbRDAP) realizadas para avaliar a influência das variáveis ambientais (Altitude, Desenvolvimento Horizontal - DH e Volume das cavernas) na composição das comunidades de morcegos em São Félix do Xingu, considerando os cenários geral, estação chuvosa e estação seca. Os valores ajustados de R² indicam a proporção da variância explicada após ajuste pelos graus de liberdade. Para cada variável, são apresentados os graus de liberdade (Df), a variância explicada, o valor do teste F e o valor de probabilidade Pr(>F). Valores de p significativos ($\alpha=0,05$) estão destacados com um asterisco (*) ou dois (**) para indicar significância mais forte. Os resíduos representam a variância não explicada pelo modelo.

dbRDAP geral R² = 0,077				
	Df	Variance	F	Pr(>F)
Altitude	1	0,501	2,465	0,048 *
DH	1	0,882	4,341	0,002 **
Volume	1	0,223	1,097	0,362
Residual	74	15,04		

dbRDap chuva R2 = 0,068				
	Df	Variance	F	Pr(>F)
Altitude	1	0,656	3,104	0,035 *
DH	1	0,887	4,198	0,005 **
Volume	1	0,244	1,156	0,304
Residual	70	14,791		
dbRDap seca R2 = 0,052				
	Df	Variance	F	Pr(>F)
Altitude	1	0,660	3,037	0,016 *
DH	1	0,470	2,166	0,076
Volume	1	0,4217	1,940	0,102
Residual	69	14,995		

Tabela S8 - Resultados das análises de Mínimos Quadrados Generalizados (GLS) para avaliar a relação entre variáveis ambientais (Altitude, Desenvolvimento Horizontal - DH e Volume das cavernas) e a riqueza de espécies de morcegos em São Félix do Xingu, considerando os cenários geral, estação chuvosa e estação seca. São apresentados os coeficientes (Coeff.), erros padrão (S, erro.), valores do teste t, e valores de probabilidade (p). Valores de p significativos ($\alpha=0,05$) estão destacados. Os resultados indicam as variáveis que mais contribuem para explicar a variação na riqueza em cada cenário analisado.

Geral				
	Coeff.	S, erro.	t	p
Intercept	-2,14	1,57	-1,36	0,17
Altitude	0,37	0,24	1,53	0,12
DH	0,09	0,07	1,13	0,25
Volume	0,11	0,04	2,37	0,02
Seca				
	Coeff.	S, erro.	t	p
Intercept	-2,098	1,7372	-1,2077	0,23
Altitude	0,3888	0,2703	1,4384	0,15
DH	-0,0532	0,0812	-0,6552	0,51
Volume	0,1621	0,0503	3,2236	0,001
Chuva				
	Coeff.	S, erro.	t	p
Intercept	0,53008	0,2528	2,0967	0,03
Altitude	0,00070	0,00045	1,5536	0,12
DH	0,00215	0,0019	1,1191	0,26
Volume	0,00042	0,00023	1,8205	0,07

SUPPLEMENTARY MATERIAL

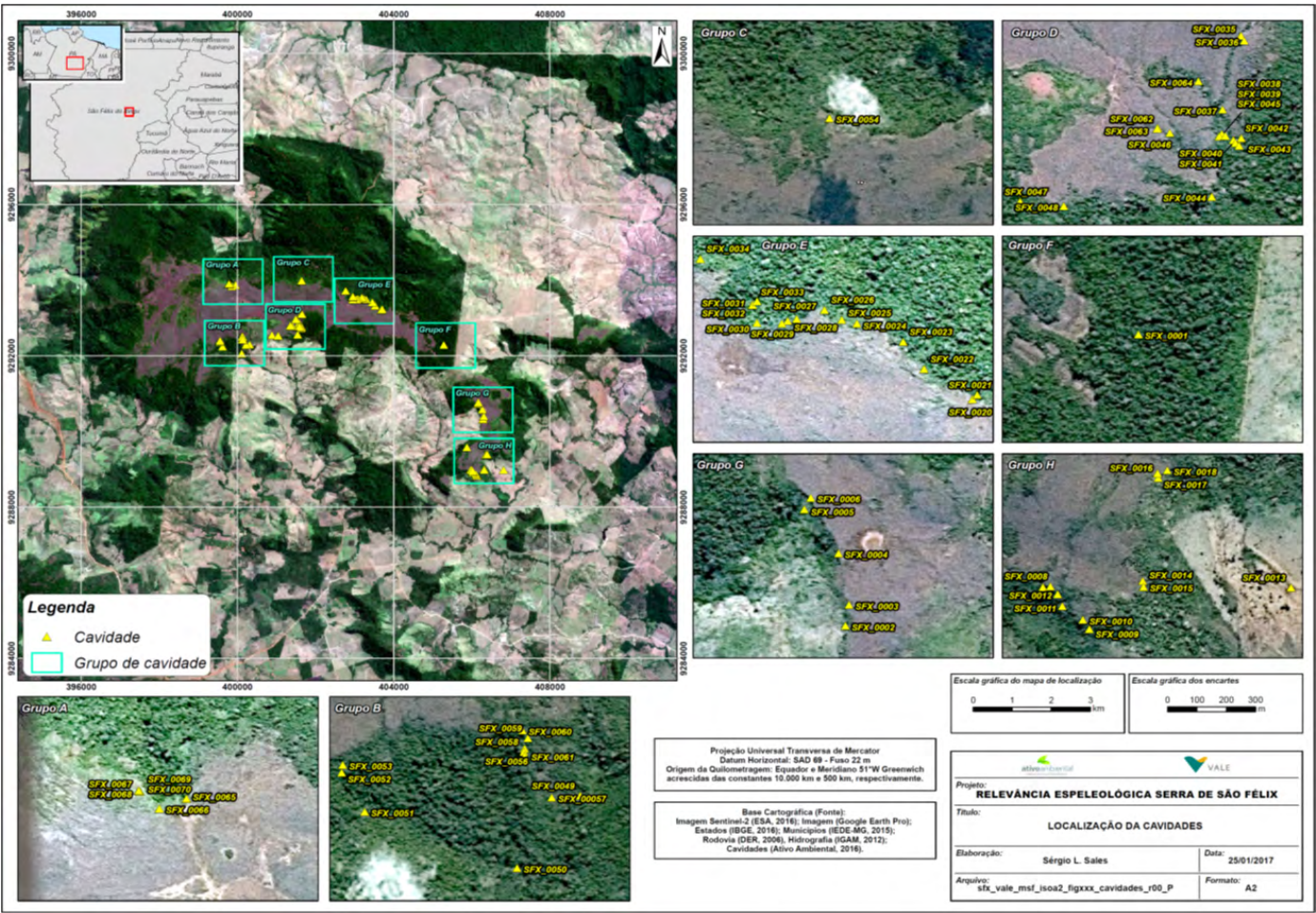


Figure S1 - Map showing the location of the study area and sampled caves in the municipality of São Félix do Xingu, Pará.



Figure S2 - Active search for bats in caves.

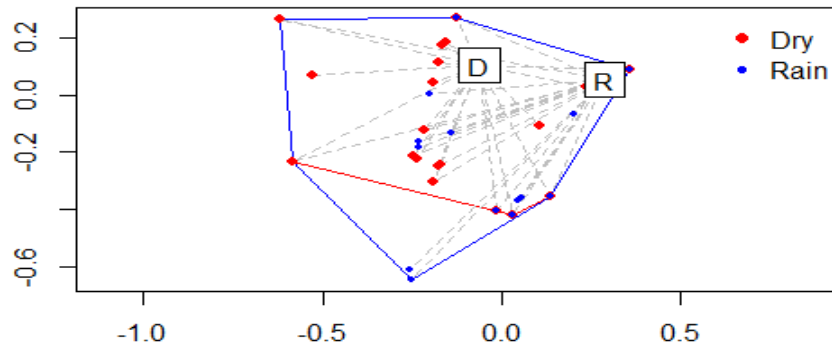


Figure S3 - Results of the dispersion homogeneity test (PERMDISP2) for the composition of bat communities between the dry (Dry) and rainy (Rain) seasons. The points represent the bat communities in each season, connected to the corresponding centroid, indicating multivariate dispersion. The polygons delimit the variation between groups, while the letters "D" and "R" highlight the centroids of the dry and rainy seasons, respectively.

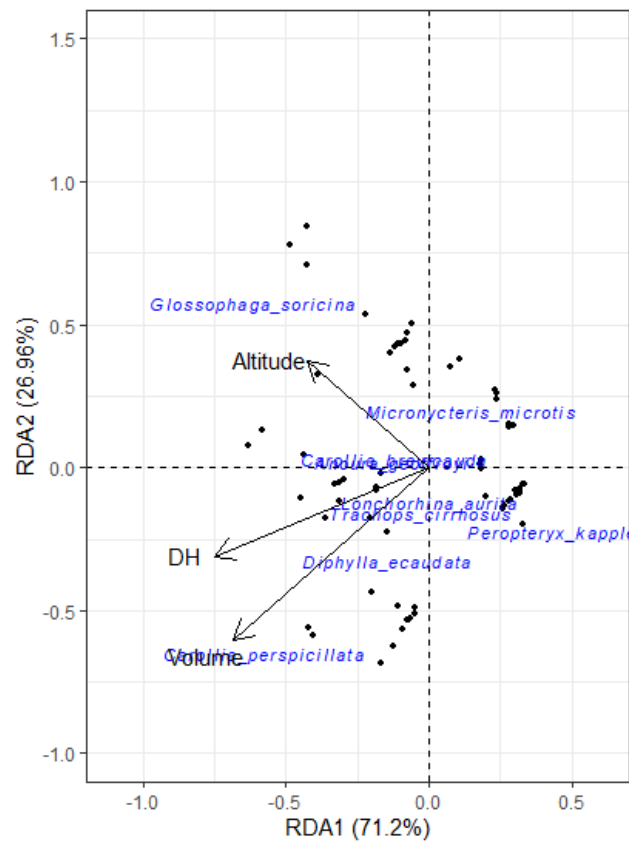


Figure S4 - Redundancy Analysis (RDAP) showing the relationship between environmental variables (volume, DH, altitude) and the composition of bat species in São Félix do Xingu caves during the rainy season. The arrows indicate the direction and magnitude of the correlation of environmental variables with the RDAP axes. Each black dot represents a cave, while the species names represent their association with environmental gradients. The RDA1 axis explains 71.2% of the variance and the RDA2 axis explains 26.96%.

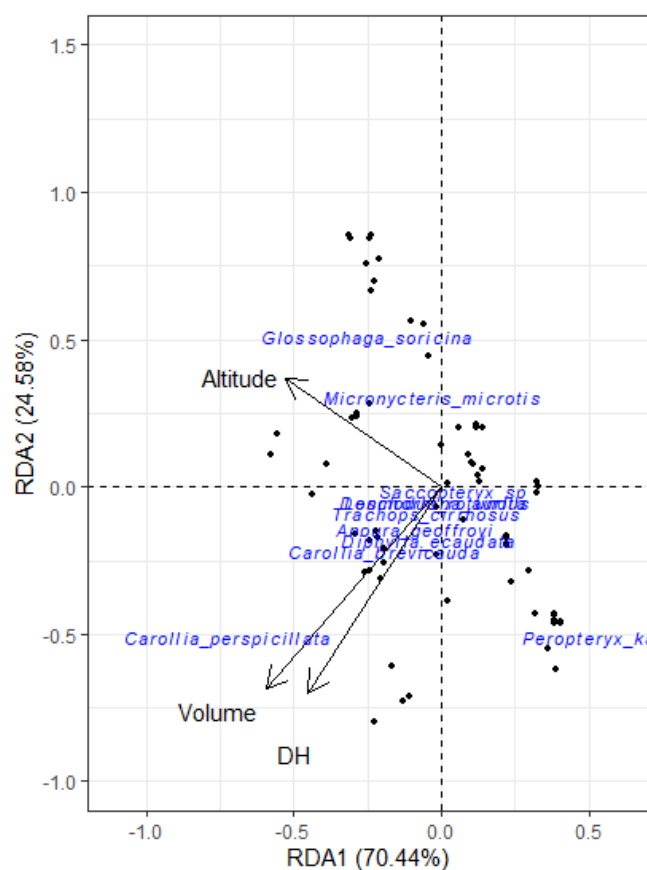


Figure S5 - Redundancy Analysis (RDA) showing the relationship between environmental variables (volume, DH, altitude) and the composition of bat species in São Félix do Xingu caves during the dry season. The arrows indicate the direction and magnitude of the correlation of environmental variables with the RDA axes. Each black dot represents a cave, while the species names represent their association with environmental gradients. The RDA1 axis explains 70.442% of the variance and the RDA2 axis explains 24.58%.

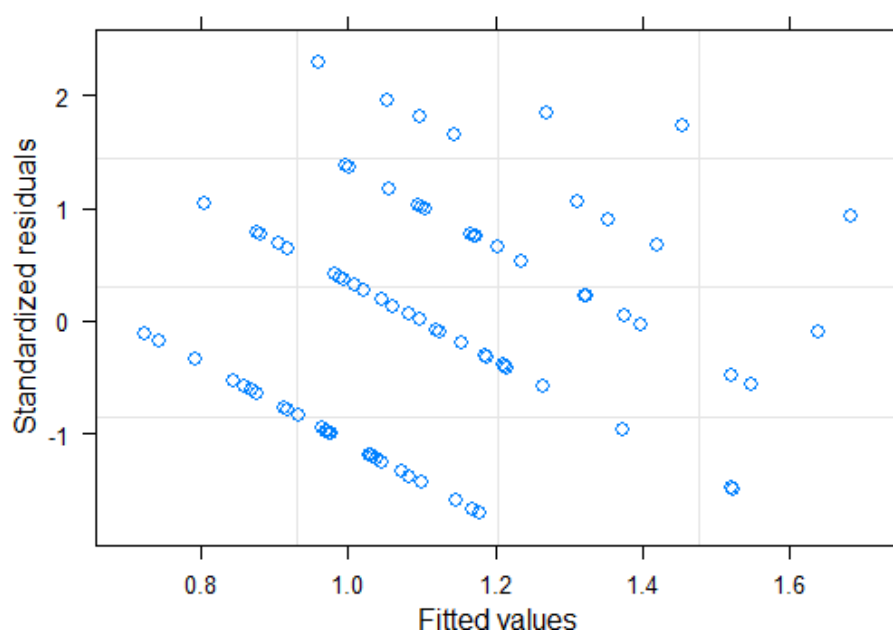


Figure S6 - Standardized residuals as a function of the adjusted values of the generalized linear model (GLS) used to predict bat richness as a function of environmental and spatial variables in São Félix do Xingu. The model included log-transformed variables of forest, altitude, horizontal development (DH), and volume, with a spatial correlation structure specified as a function of coordinates (latitude and longitude). The restricted maximum likelihood (REML) method was used to estimate the parameters.

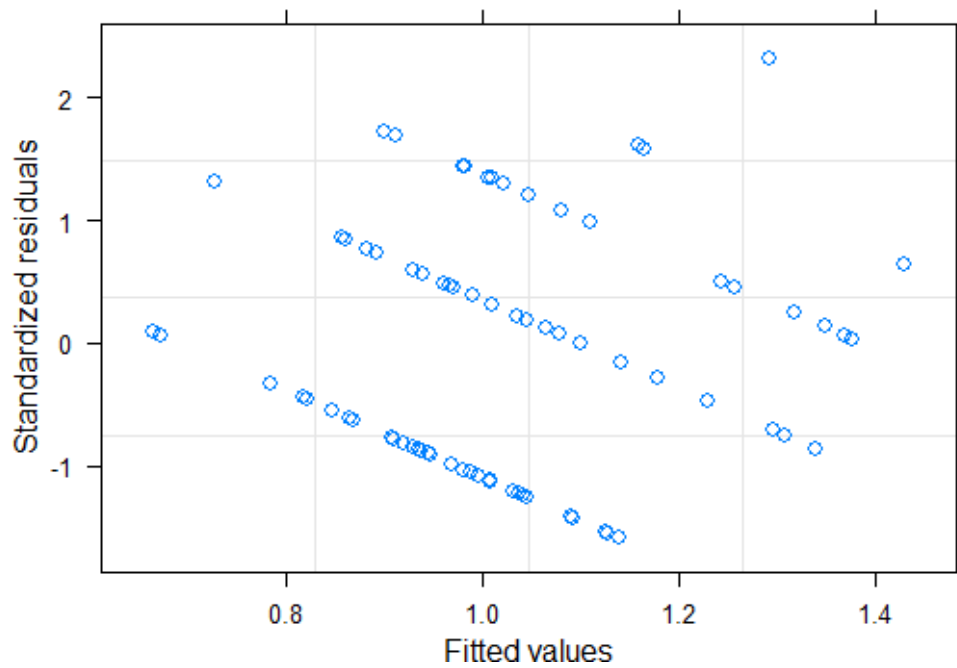


Figure S7 - Standardized residuals as a function of the adjusted values of the generalized linear model (GLS) used to predict bat richness for the dry season, as a function of environmental and spatial variables in São Félix do Xingu. The model included log-transformed variables of forest, altitude, horizontal development (DH), and volume, with a spatial correlation structure specified as a function of coordinates (latitude and longitude). The restricted maximum likelihood (REML) method was used to estimate the parameters.

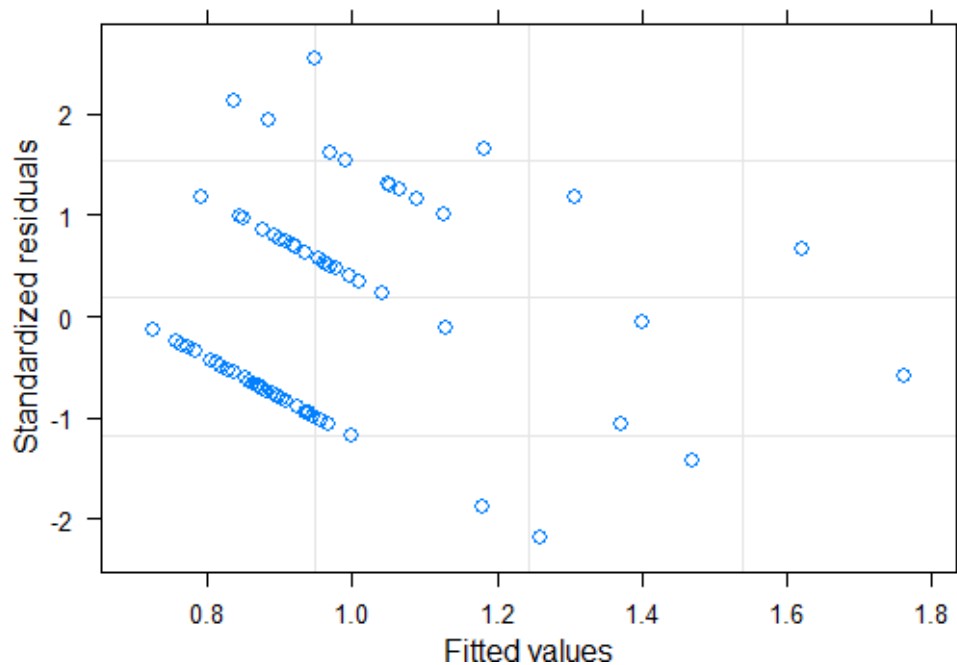


Figure S8 - Standardized residuals as a function of the adjusted values of the generalized linear model (GLS) used to predict bat richness for the rainy season, as a function of environmental and spatial variables in São Félix do Xingu. The model included log-transformed variables of forest, altitude, horizontal development (DH), and volume, with a spatial correlation structure specified as a coordinates function (latitude and longitude). The restricted maximum likelihood (REML) method was used to estimate the parameters.

Table S1 - Target caves located in the municipality of São Félix do Xingu, PA.

Name	Datum SAD 69		Altitude	HD	Level difference	Area	Volume	Richness		
	Coord_E	Coord_N						Rainy	Dry	Total
SFX_0001	406286	9290293	622	67	3,12	183	351	1	2	2
SFX_0002	406294	9290326	637	145	9,66	384	780	5	4	6
SFX_0003	406305	9290401	625	23,26	2,54	61,01	64	2	2	2
SFX_0004	406269	9290583	615	14	1,38	25	21	2	3	3
SFX_0005	406153	9290738	641	12,92	2,09	29,29	38	1	1	1
SFX_0006	406176	9290779	621	13,8	2,34	27,2	40	2	3	4
SFX_0007	405973	9288985	507	12,1	4,34	36,55	82	1	1	1
SFX_0008	405997	9288987	502	58,8	3,61	218,9	588	1	3	3
SFX_0009	406130	9288836	478	13,6	1,47	16,24	13	2	1	2
SFX_0010	406108	9288870	486	29,5	2,95	77,3	78	1	1	2
SFX_0011	406039	9288918	469	8,89	1,6	13,6	11	0	1	1
SFX_0012	406022	9288959	502	17,78	1,52	15,04	17	0	2	2
SFX_0013	406819	9288683	320	20	1,15	32	20	0	0	0
SFX_0014	406314	9289007	472	37,5	5,54	154	373	3	4	5
SFX_0015	406316	9288986	453	17,5	2,29	35,5	34	1	0	1
SFX_0016	406367	9289369	523	66	7,76	186	342	2	2	2
SFX_0017	406364	9289385	525	12	1,51	33	41	1	2	2
SFX_0018	406396	9289397	505	20	2,63	83,5	202	2	2	2
SFX_0019	405874	9289583	582	10,5	0,98	40	41	1	2	2
SFX_0020	403685	9293221	649	26,5	1,21	50,01	39	1	1	1
SFX_0021	403703	9293236	650	21	1,22	35	24	2	2	2
SFX_0022	403523	9293329	651	9,5	1,71	17	18	2	2	2
SFX_0023	403453	9293425	659	9	2,09	17	18	0	0	0
SFX_0024	403297	9293491	645	10,5	1,95	60	94	1	3	3
SFX_0025	403247	9293505	641	40	5,18	148	533	3	3	5
SFX_0026	403188	9293540	642	14,5	1,74	22	22	1	0	1
SFX_0027	403093	9293508	652	16	6,27	47	93	1	1	1
SFX_0028	403063	9293503	661	27	1,28	49	70	1	3	3
SFX_0029	403043	9293493	651	29	1,46	82	81	2	1	2
SFX_0030	402960	9293496	639	15	3,35	36	38	1	1	1
SFX_0031	402943	9293559	628	11	4,57	30	43	2	1	2
SFX_0032	402945	9293559	632	10,5	1,37	29	29	0	0	0
SFX_0033	402960	9293572	610	15	4,7	60	56	3	3	3
SFX_0034	402768	9293723	657	14	1,72	32	23	1	1	1
SFX_0035	401647	9293124	583	53	3,36	104	160	3	1	3

	Datum SAD 69							Richness		
Name	Coord_E	Coord_N	Altitude	HD	Level difference	Area	Volume	Rainy	Dry	Total
SFX_0036	401658	9293106	606	27	2,06	68	71	2	2	3
SFX_0037	401581	9292867	558	28	3,35	74	53	2	2	3
SFX_0038	401578	9292782	541	16	1,33	83	161	2	1	2
SFX_0039	401569	9292774	540	56	4,19	171	263	3	1	3
SFX_0040	401618	9292760	536	16	2,56	48	79	2	1	2
SFX_0041	401625	9292750	529	9	1,11	37	74	1	2	2
SFX_0042	401644	9292766	530	42	5,03	123	108	1	1	1
SFX_0043	401636	9292739	539	30	5,98	55	82	1	2	2
SFX_0044	401541	9292563	519	16	2,33	35	55	1	3	3
SFX_0045	401590	9292775	541	25	3,84	56	116	1	2	2
SFX_0046	401403	9292786	559	11	1,57	30,3	25	0	0	0
SFX_0047	400892	9292553	613	30	2,16	46	60	2	3	3
SFX_0048	401040	9292534	605	16,5	0,72	18	16	4	1	4
SFX_0049	400312	9292303	526	9	2,05	36	34	1	2	2
SFX_0050	400111	9292064	451		Not mapped			0	0	0
SFX_0051	399624	9292249	514	10	0,59	25	19	0	0	0
SFX_0052	399550	9292379	565	16	1,69	62	111	2	2	2
SFX_0053	399554	9292404	551	38	5,28	86	155	3	3	3
SFX_0054	401649	9293987	740	10	0,76	27	20	0	1	1
SFX_0055	401527	9293994	718	29	4,76	143	327	3	2	3
SFX_0056	400134	9292457	568	23	3,4	45	62	1	2	2
SFX_0057	400220	9292297	522	111,5	16,33	664	1148	2	2	2
SFX_0058	400132	9292447	562	12	3,67	23	35	1	1	1
SFX_0059	400143	9292491	583	30,5	2,79	74	112	2	2	3
SFX_0060	400126	9292518	585	21	3,07	65	88	1	3	4
SFX_0061	400135	9292434	575	18	1,56	42	46	2	1	2
SFX_0062	401361	9292804	573	8	1,46	16	12	0	0	0
SFX_0063	401360	9292802	565	11	1,11	16	13	1	1	1
SFX_0064	401500	9292967	568	12	1,92	20	41	1	1	1
SFX_0065	399948	9293879	642	15,5	3,07	61,5	56	2	3	3
SFX_0066	399855	9293842	635	8	1,08	34	37	1	2	2
SFX_0067	399789	9293904	639	15	1,68	18	35	1	1	1
SFX_0068	399784	9293906	644	8	1,6	15	11	1	1	1
SFX_0069	399706	9292475	557	24	1,4	56	57	3	1	1
SFX_0070	406692	9290002	620	78	7,85	408	711	1	3	3
SFX_0071	411904	9295964	560	9,5	2,46	22	21	1	1	1

Name	Datum SAD 69		Altitude	HD	Level difference	Area	Volume	Richness		
	Coord_E	Coord_N						Rainy	Dry	Total
SFX_0072	406715	9290004	609	63	9,54	413	761	2	2	3
SFX_0073	406737	9289955	585	192	25,1	697	1109	4	3	4
SFX_0074	406757	9289910	563	10	1,47	19	25	1	1	1
SFX_0075	406779	9289886	538	20	5,5	55	85	3	3	4
SFX_0076	406501	9289518	541	28	1,62	76	107	1	1	1
SFX_0077	406942	9289522	519	13	0,79	48	54	1	1	1
SFX_0078	406252	9289091	506	69,5	6	377	779	4	6	6
SFX_0079	413056	9295220	509	19	3,86	30	30	1	0	0
SFX_0080	413283	9295064	468	13	2,65	52	87	1	1	1
SFX_0081	413180	9295073	484	46	6,52	140	297	3	4	4
SFX_0082	413220	9295037	467	7	1,03	15	33	1	2	2
SFX_0083	413260	9295027	471	15	3,5	100	346	1	2	2
SFX_0084	413289	9295004	444	35,5	4,65	126	238	2	1	2
SFX_0085	413380	9294880	416	10	1,99	21	23	1	0	1
SFX_0086	413387	9294870	424	8	2,48	31	47	1	0	1
SFX_0087	413292	9294973	443	42,5	1,9	166	713	4	3	4
SFX_0088	413259	9294717	442	70	5,08	207	265	2	1	2
SFX_0089	413212	9294616	410	14	2,62	26	40	1	1	1
SFX_0090	413270	9295077	463	8,5	0,66	13	8	1	0	1

Table S2 - Sampling dates, during the rainy and dry seasons, for the diagnosis of bats in natural caves located in the municipality of São Félix do Xingu, PA.

Cave	Date		Cave	Date		Cave	Date	
	Rainy	Dy		Rainy	Dy		Rainy	Dy
SFX_0001	01/03/18	25/07/18	SFX_0031	02/03/18	11/07/18	SFX_0061	29/01/18	20/07/18
SFX_0002	03/02/18	25/07/18	SFX_0032	02/03/18	11/07/18	SFX_0062	24/02/18	12/07/18
SFX_0003	01/03/18	24/07/18	SFX_0033	02/03/18	11/07/18	SFX_0063	24/02/18	12/07/18
SFX_0004	16/01/18	24/07/18	SFX_0034	30/01/18	18/07/18	SFX_0064	18/01/18	12/07/18
SFX_0005	16/01/18	24/07/18	SFX_0035	18/01/18	19/07/18	SFX_0065	17/01/18	17/07/18
SFX_0006	16/01/18	24/07/18	SFX_0036	18/01/18	19/07/18	SFX_0066	17/01/18	17/07/18
SFX_0007	03/03/18	21/07/18	SFX_0037	27/02/18	19/07/18	SFX_0067	17/01/18	17/07/18
SFX_0008	03/03/18	21/07/18	SFX_0038	27/02/18	12/07/18	SFX_0068	17/01/18	17/07/18
SFX_0009	21/02/18	21/07/18	SFX_0039	27/02/18	19/07/18	SFX_0069	24/02/18	17/07/18
SFX_0010	21/02/18	21/07/18	SFX_0040	26/02/18	12/07/18	SFX_0070	28/02/18	16/07/18
SFX_0011	21/02/18	21/07/18	SFX_0041	26/02/18	12/07/18	SFX_0071	25/01/18	21/05/19

SFX_0012	21/02/18	20/07/18	SFX_0042	26/02/18	12/07/18	SFX_0072	22/02/18	23/07/18
SFX_0013	23/02/18	23/07/18	SFX_0043	26/02/18	12/07/18	SFX_0073	28/02/18	23/07/18
SFX_0014	23/02/18	10/07/18	SFX_0044	26/02/18	12/07/18	SFX_0074	22/02/18	23/07/18
SFX_0015	23/02/18	10/07/18	SFX_0045	27/02/18	19/07/18	SFX_0075	22/02/18	21/07/18
SFX_0016	02/02/18	16/07/18	SFX_0046	24/02/18	12/07/18	SFX_0076	05/03/18	16/07/18
SFX_0017	02/02/18	16/07/18	SFX_0047	03/03/18	27/07/18	SFX_0077	05/03/18	10/07/18
SFX_0018	02/02/18	16/07/18	SFX_0048	03/03/18	27/07/18	SFX_0078	23/02/18	10/07/18
SFX_0019	05/03/18	16/07/18	SFX_0049	26/01/18	20/07/18	SFX_0079	23/01/18	31/07/18
SFX_0020	01/02/18	30/07/18	SFX_0050	26/01/18	23/07/18	SFX_0080	23/01/18	31/07/18
SFX_0021	01/02/18	30/07/18	SFX_0051	20/01/18	17/07/18	SFX_0081	25/01/18	31/07/18
SFX_0022	01/02/18	30/07/18	SFX_0052	20/01/18	17/07/18	SFX_0082	24/01/18	31/07/18
SFX_0023	01/02/18	18/07/18	SFX_0053	20/01/18	17/07/18	SFX_0083	24/01/18	31/07/18
SFX_0024	02/03/18	18/07/18	SFX_0054	19/01/18	11/07/18	SFX_0084	25/01/18	31/07/18
SFX_0025	02/03/18	18/07/18	SFX_0055	19/01/18	11/07/18	SFX_0085	24/01/18	31/07/18
SFX_0026	02/03/18	18/07/18	SFX_0056	29/01/18	20/07/18	SFX_0086	24/01/18	31/07/18
SFX_0027	30/01/18	18/07/18	SFX_0057	26/01/18	20/07/18	SFX_0087	23/01/18	31/07/18
SFX_0028	30/01/18	18/07/18	SFX_0058	29/01/18	20/07/18	SFX_0088	24/01/18	31/07/18
SFX_0029	30/01/18	18/07/18	SFX_0059	29/01/18	20/07/18	SFX_0089	24/01/18	31/07/18
SFX_0030	30/01/18	11/07/18	SFX_0060	29/01/18	20/07/18	SFX_0090	23/01/18	31/07/18

Table S3 - Results of the Multiple Regression statistical model in Distance Matrices evaluating the effects of environmental variables (distance, altitude, Horizontal Development, and volume) on the dissimilarity between bat communities in caves. The coefficients represent the direction and magnitude of the effects of each variable, while the p values indicate the level of statistical significance.

β_{total} ($R^2 = 0,0073$; $pval$ 0,663)		
	Coefficient	p
Intercept	5,291803e-01	0,91
Distance	1,380e-08	0,75
Altitude	2,652462e-04	0,18
HD	-6,958690e-05	0,93
Volume	7,341765e-05	0,49
β_{repl_total} ($R^2 = 0,0109$, $pval = 0,467$)		
	Coefficient	P
Intercept	2,270581e-01	0,24
Distance	3,498806e-08	0,50
Altitude	8,406041e-05	0,71
HD	-6,344957e-04	0,50
Volume	-3,802850e-05	0,76

<i>Brich_total</i> ($R^2 = 0,036$, $pval = 0,002$)		
	Coefficient	p
<i>Intercept</i>	3,021222e-01	0,99
<i>Distance</i>	-2,072426e-08	0,55
<i>Altitude</i>	1,811858e-04	0,15
<i>HD</i>	5,649088e-04	0,28
<i>Volume</i>	1,114461e-04	0,06

Table S4 - Matrix of spatial eigenvectors generated by PCNM and used as covariates to control spatial dependence.

Cavidade	PCNM1	PCNM3	PCNM4	PCNM5
SFX_0001	-0,14936	8,37E-06	9,73E-07	-0,07831
SFX_0002	-0,14936	8,38E-06	9,66E-07	-0,07516
SFX_0003	-0,14936	8,40E-06	9,49E-07	-0,06799
SFX_0004	-0,14936	8,45E-06	9,06E-07	-0,05056
SFX_0005	-0,14936	8,50E-06	8,66E-07	-0,03566
SFX_0006	-0,14936	8,51E-06	8,55E-07	-0,03176
SFX_0007	-0,14936	7,97E-06	1,14E-06	-0,2032
SFX_0008	-0,14936	7,97E-06	1,14E-06	-0,20302
SFX_0009	-0,14936	7,92E-06	1,15E-06	-0,21756
SFX_0010	-0,14936	7,93E-06	1,15E-06	-0,21429
SFX_0011	-0,14936	7,95E-06	1,15E-06	-0,20965
SFX_0012	-0,14936	7,96E-06	1,14E-06	-0,20572
SFX_0014	-0,14936	7,97E-06	1,14E-06	-0,20132
SFX_0015	-0,14936	7,97E-06	1,14E-06	-0,20333
SFX_0016	-0,14936	8,09E-06	1,12E-06	-0,16673
SFX_0017	-0,14936	8,09E-06	1,11E-06	-0,1652
SFX_0018	-0,1474	-0,0002	1,28E-06	2,16E-09
SFX_0019	-0,14936	8,16E-06	1,09E-06	-0,14594
SFX_0020	-0,14936	9,09E-06	-1,91E-07	0,203449
SFX_0021	-0,14936	9,10E-06	-1,99E-07	0,204871
SFX_0022	-0,14936	9,11E-06	-2,55E-07	0,213884
SFX_0024	-0,14936	9,15E-06	-3,53E-07	0,229531
SFX_0025	-0,14936	9,15E-06	-3,62E-07	0,230903
SFX_0026	-0,14936	9,16E-06	-3,84E-07	0,23429
SFX_0027	-0,14936	9,15E-06	-3,65E-07	0,231289
SFX_0028	-0,14936	9,15E-06	-3,62E-07	0,230831

Cavidade	PCNM1	PCNM3	PCNM4	PCNM5
SFX_0029	-0,14936	9,15E-06	-3,56E-07	0,229888
SFX_0030	-0,14936	9,15E-06	-3,58E-07	0,230228
SFX_0031	-0,14936	9,16E-06	-3,97E-07	0,236266
SFX_0033	0,081758	0,043214	-0,07612	-8,80E-07
SFX_0034	0,081758	0,047806	-0,09173	-9,45E-07
SFX_0035	0,081757	0,07978	-0,05161	-8,24E-07
SFX_0036	0,081757	0,079549	-0,04989	-8,17E-07
SFX_0037	0,081757	0,082435	-0,02959	-7,41E-07
SFX_0038	0,081757	0,082811	-0,02209	-7,13E-07
SFX_0039	0,081757	0,083079	-0,02149	-7,11E-07
SFX_0040	0,081757	0,081822	-0,01968	-7,03E-07
SFX_0041	0,081757	0,08167	-0,01871	-6,99E-07
SFX_0042	0,081757	0,081107	-0,01991	-7,03E-07
SFX_0043	0,081757	0,081415	-0,01761	-6,94E-07
SFX_0044	0,081757	0,084561	-0,0031	-6,41E-07
SFX_0045	0,081757	0,082516	-0,02133	-7,10E-07
SFX_0047	0,081757	0,101898	-0,00974	-6,76E-07
SFX_0048	0,081757	0,098019	-0,00634	-6,61E-07
SFX_0049	0,081757	0,118232	0,005704	-6,22E-07
SFX_0052	0,078068	-2,95E-07	2,09E-11	1,85E-05
SFX_0053	0,081756	0,138089	-0,01204	-6,92E-07
SFX_0054	0,081757	0,076719	-0,1281	-1,11E-06
SFX_0055	0,081757	0,079947	-0,13014	-1,12E-06
SFX_0056	0,081757	0,122441	-0,01001	-6,83E-07
SFX_0057	0,081757	0,120706	0,005169	-6,24E-07
SFX_0058	0,081757	0,122529	-0,00915	-6,80E-07
SFX_0059	0,081757	0,122083	-0,01292	-6,95E-07
SFX_0060	0,081757	0,122442	-0,01551	-7,05E-07
SFX_0061	0,081757	0,122495	-0,00796	-6,75E-07
SFX_0063	0,081757	0,088553	-0,02639	-7,33E-07
SFX_0064	0,081757	0,084246	-0,0394	-7,80E-07
SFX_0065	0,081756	0,122444	-0,13824	-1,17E-06
SFX_0066	0,081756	0,125052	-0,13604	-1,16E-06
SFX_0067	0,081756	0,126596	-0,1423	-1,18E-06
SFX_0068	0,081756	0,126722	-0,14253	-1,19E-06
SFX_0069	0,081756	0,133789	-0,01657	-7,10E-07

Cavidade	PCNM1	PCNM3	PCNM4	PCNM5
SFX_0070	0,081757	-0,04384	0,283648	7,25E-07
SFX_0071	0,081754	-0,20357	-0,18453	-5,52E-07
SFX_0072	0,081757	-0,04446	0,283737	7,27E-07
SFX_0073	0,081757	-0,04488	0,288336	7,47E-07
SFX_0074	0,081757	-0,04525	0,292558	7,66E-07
SFX_0075	0,081757	-0,04575	0,29494	7,77E-07
SFX_0076	0,081757	-0,03706	0,324345	8,82E-07
SFX_0077	0,081757	-0,04883	0,329101	9,31E-07
SFX_0078	0,081757	-0,02893	0,359317	1,01E-06
SFX_0080	0,081753	-0,2372	-0,08875	-3,20E-08
SFX_0081	0,081753	-0,23448	-0,09074	-5,34E-08
SFX_0082	0,081753	-0,23542	-0,08709	-3,48E-08
SFX_0083	0,081753	-0,23645	-0,08574	-2,44E-08
SFX_0084	0,081753	-0,23715	-0,08336	-1,19E-08
SFX_0085	0,081753	-0,23914	-0,07131	4,40E-08
SFX_0086	0,081753	-0,23929	-0,07035	4,84E-08
SFX_0087	0,081753	-0,23712	-0,08058	-1,51E-09
SFX_0088	0,081753	-0,23535	-0,05827	7,41E-08
SFX_0089	0,081753	-0,23374	-0,04986	9,80E-08
SFX_0090	0,081753	-0,23689	-0,09005	-3,84E-08

Table S5 - Variance Inflation Factor (VIF) values for the environmental and spatial variables used in the Partial Redundancy Analysis (RDAP) in different scenarios: general analysis (RDAP - General), during the rainy season (RDAP - Rainy), and during the dry season (RDAP - Dry). VIF values indicate the degree of collinearity between explanatory variables, with values above 5 suggesting possible multicollinearity. The variables include principal components of distance matrix (PCNM1, PCNM3, PCNM4, PCNM5), altitude, horizontal development (HD), and cave volume.

	PCNM1	PCNM3	PCNM4	PCNM5	Altitude	HD	Volume
RDAP – General	1,110771	1,789282	1,177923	1,644285	2,486652	4,138644	4,240463
RDAP – rainy	1,165024	1,863688	1,168451	1,665263	2,677870	4,097495	4,176438
RDAP - dry	1,116811	1,608929	1,167616	1,576358	2,190868	4,056383	4,213863

Table S6 - Results of Partial Redundancy Analysis (RDAP) performed to investigate the contribution of environmental variables (Altitude, Horizontal Development - HD, and Cave Volume) to the composition of bat communities in São Félix do Xingu, considering the general, rainy season, and dry season scenarios. The adjusted R² values indicate the proportion of variance explained after adjustment for degrees of freedom. For each variable, the degrees of freedom (Df), explained variance, F-test value, and probability value Pr(>F) are presented. Significant p-values ($\alpha=0.05$) are indicated by asterisks (*). Residuals represent the variance not explained by the model.

RDAP general R² = 0,046				
	Df	Variance	F	Pr(>F)
Altitude	1	0,012	2,564	0,032 *
HD	1	0,015	3,387	0,014 *
Volume	1	0,004	0,904	0,476
Residual	74	0,347		
RDAP rainy R² = 0,052				
	Df	Variance	F	Pr(>F)
Altitude	1	0,016	3,109	0,027 *
HD	1	0,015	2,962	0,027 *
Volume	1	0,005	1,056	0,354
Residual	70	0,362		
RDAP dry R² = 0,041				
	Df	Variance	F	Pr(>F)
Altitude	1	0,016	3,132	0,016 *
HD	1	0,009	1,780	0,122
Volume	1	0,007	1,358	0,248
Residual	69	0,370		

Table S7 - Results of Partial Distance-Based Redundancy Analysis (dbRDAP) performed to assess the influence of environmental variables (Altitude, Horizontal Development - HD, and Cave Volume) on the composition of bat communities in São Félix do Xingu, considering the general, rainy season, and dry season scenarios. The adjusted R² values indicate the proportion of variance explained after adjustment for degrees of freedom. For each variable, the degrees of freedom (Df), explained variance, F-test value, and probability value Pr(>F) are presented. Significant p-values ($\alpha=0.05$) are highlighted with one asterisk (*) or two (***) to indicate stronger significance. Residuals represent the variance not explained by the model.

dbRDAP general R² = 0,077				
	Df	Variance	F	Pr(>F)
Altitude	1	0,501	2,465	0,048 *
HD	1	0,882	4,341	0,002 ***
Volume	1	0,223	1,097	0,362
Residual	74	15,04		

dbRDAp rainy R2 = 0,068				
	Df	Variance	F	Pr(>F)
Altitude	1	0,656	3,104	0,035 *
HD	1	0,887	4,198	0,005 **
Volume	1	0,244	1,156	0,304
Residual	70	14,791		
dbRDAp dry R2 = 0,052				
	Df	Variance	F	Pr(>F)
Altitude	1	0,660	3,037	0,016 *
HD	1	0,470	2,166	0,076
Volume	1	0,4217	1,940	0,102
Residual	69	14,995		

Table S8 - Results of Generalized Least Squares (GLS) analyses to evaluate the relationship between environmental variables (Altitude, Horizontal Development - HD, and Cave Volume) and bat species richness in São Félix do Xingu, considering the general, rainy season, and dry season scenarios. The coefficients (Coeff.), standard errors (S, error.), t-test values, and probability values (p) are presented. Significant p values ($\alpha=0.05$) are highlighted. The results indicate the variables that most contribute to explaining the richness variation in each analyzed scenario.

General				
	Coeff.	S, erro.	t	p
Intercept	-2,14	1,57	-1,36	0,17
Altitude	0,37	0,24	1,53	0,12
HD	0,09	0,07	1,13	0,25
Volume	0,11	0,04	2,37	0,02
Dry				
	Coeff.	S, erro.	t	p
Intercept	-2,098	1,7372	-1,2077	0,23
Altitude	0,3888	0,2703	1,4384	0,15
HD	-0,0532	0,0812	-0,6552	0,51
Volume	0,1621	0,0503	3,2236	0,001
Rainy				
	Coeff.	S, erro.	t	p
Intercept	0,53008	0,2528	2,0967	0,03
Altitude	0,00070	0,00045	1,5536	0,12
HD	0,00215	0,0019	1,1191	0,26
Volume	0,00042	0,00023	1,8205	0,07