ReGeo ISSN: 2177-3246

MODELAGEM AMBIENTAL NA REDEFINIÇÃO DE LIMITES DO PARQUE ESTADUAL DE MORRO DO CHAPÉU, BAHIA

INTEGRATED ENVIRONMENTAL MODELLING FOR BOUNDARY REDESIGN OF MORRO DO CHAPÉU STATE PARK, BAHIA, BRAZIL

MODELIZACIÓN AMBIENTAL INTEGRADA PARA LA REDEFINICIÓN DE LÍMITES DEL PARQUE ESTATAL DE MORRO DO CHAPÉU, BAHÍA, BRASIL

https://doi.org/10.56238/revgeov17n10-096

Data de submissão: 14/09/2026 **Data de publicação:** 14/10/2026

Washington de Jesus Sant'Anna da Franca Rocha
Doutor em Geologia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: wrocha@uefs.br

Jocimara Souza Britto Lobão
Doutora em Geografia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: juci.lobao@uefs.br

Flávio França
Doutorado em Ciências Biológicas (Botânica)
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: franca.flavio@gmail.com

Efigênia de Mello
Doutorado em Ciências Biológicas (Botânica)
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: **efidemelo@gmail.com**

Marjorie Cseko Nolasco
Doutorado em Geociências
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: mcn@uefs.br

Raquel de Matos Cardoso do Vale
Doutora em Geografia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: valeraquel@gmail.com

Rodrigo Nogueira de Vasconcelos
Doutor em Ecologia
Instituição: Universidade Estadual de Feira de Santana
E-mail: rnv@uefs.br

RESUMO
A redefinição de limites de unidades de conservação em paisagens ambientalmente heterogêneas exige integrar valor ecológico, pressões antrópicas e referências geográficas operacionalizáveis. Este estudo sistematiza o diagnóstico ambiental histórico elaborado para o Parque Estadual de Morro do Chapéu (PEMC), Bahia, com o objetivo de demonstrar como evidências fisiográficas, ecossistêmicas, socioambientais e histórico-culturais foram combinadas por geoprocessamento e lógica fuzzy para apoiar uma nova poligonal. O trabalho integrou levantamento bibliográfico, imagens Landsat ETM+ de 2001 e QuickBird de 2006, campanhas de campo e quatro linhas de modelagem. Na área ampliada de análise foram reconhecidos cinco geossistemas e 20 microbacias; o NDVI variou de -0,35 a 0,47, enquanto 74.170 ha foram mapeados como cobertura vegetal remanescente, 8.314 ha como afloramentos rochosos e 33.377 ha como áreas agropecuárias. O inventário registrou 257 espécies de plantas vasculares em 66 famílias, 16 espécies de anuros e lagartos, aproximadamente 14 espécies de pequenos mamíferos e quatro novos sítios/áreas rupestres. A integração fuzzy destacou um eixo NE-SW de elevada relevância ambiental e sustentou uma proposta de limite orientada por valores de conservação, feições naturais, acessibilidade e redução de conflitos de uso. Os resultados constituem uma linha de base histórica e evidenciam a utilidade de abordagens multicritério para planejamento de áreas protegidas, embora a geometria e o estado de conservação demandem atualização antes de uso normativo atual.

Palavras-chave: Geoprocessamento. Conservação da Biodiversidade. Semiárido. Sensoriamento Remoto. Planejamento Ambiental.

ABSTRACT
Redesigning protected-area boundaries in environmentally heterogeneous landscapes requires the integration of ecological value, anthropogenic pressures, and operational geographic references. This study systematizes the historical environmental diagnosis prepared for Morro do Chapéu State Park (PEMC), Bahia, Brazil, to demonstrate how physiographic, ecosystem, socio-environmental, and historical-cultural evidence was combined through geoprocessing and fuzzy logic to support a new boundary. The study integrated a literature survey, Landsat ETM+ imagery from 2001, QuickBird imagery from 2006, field campaigns, and four modelling lines. Five geosystems and 20 microbasins were recognized in the broader analysis area; NDVI ranged from -0.35 to 0.47, while 74,170 ha were mapped as remnant vegetation, 8,314 ha as rocky outcrops, and 33,377 ha as agricultural areas. Surveys recorded 257 vascular plant species in 66 families, 16 anuran and lizard species, approximately 14 small-mammal species, and four previously unrecorded rock-art sites/areas. Fuzzy integration highlighted a NE-SW axis of high environmental relevance and supported a boundary proposal guided by conservation value, natural features, accessibility, and reduced land-use conflicts. The results provide a historical baseline and demonstrate the usefulness of multicriteria approaches for protected-area planning, although the geometry and conservation status require updating before present-day regulatory use.

Keywords: Geoprocessing. Biodiversity Conservation. Semiarid Region. Remote Sensing. Environmental Planning.

RESUMEN
La redefinición de los límites de áreas protegidas en paisajes ambientalmente heterogéneos exige integrar el valor ecológico, las presiones antrópicas y referencias geográficas operativas. Este estudio sistematiza el diagnóstico ambiental histórico elaborado para el Parque Estatal de Morro do Chapéu (PEMC), Bahía, Brasil, con el objetivo de demostrar cómo las evidencias fisiográficas, ecosistémicas, socioambientales e histórico-culturales fueron integradas mediante geoprocesamiento y lógica difusa

para sustentar una nueva delimitación. El trabajo combinó revisión bibliográfica, imágenes Landsat ETM+ de 2001 y QuickBird de 2006, campañas de campo y cuatro líneas de modelización. En el área ampliada de análisis se reconocieron cinco geosistemas y 20 microcuencas; el NDVI varió de -0,35 a 0,47, mientras que 74.170 ha fueron cartografiadas como cobertura vegetal remanente, 8.314 ha como afloramientos rocosos y 33.377 ha como áreas agropecuarias. El inventario registró 257 especies de plantas vasculares de 66 familias, 16 especies de anuros y lagartos, aproximadamente 14 especies de pequeños mamíferos y cuatro nuevos sitios/áreas con arte rupestre. La integración difusa destacó un eje NE-SO de alta relevancia ambiental y sustentó una propuesta de límite orientada por valores de conservación, rasgos naturales, accesibilidad y reducción de conflictos de uso. Los resultados constituyen una línea de base histórica y evidencian la utilidad de los enfoques multicriterio para la planificación de áreas protegidas, aunque la geometría y el estado de conservación requieren actualización antes de cualquier uso normativo contemporáneo.

Palabras clave: Geoprocesamiento. Conservación de la Biodiversidad. Región Semiárida. Teledetección. Planificación Ambiental.

1 INTRODUÇÃO

As áreas protegidas constituem um dos principais instrumentos para conter a perda de biodiversidade, manter processos ecológicos e limitar a conversão de habitats naturais. Entretanto, a efetividade desses territórios não depende apenas da extensão formalmente protegida. Representatividade ecológica, conectividade, integridade da paisagem, intensidade das pressões antrópicas e qualidade do desenho espacial condicionam a capacidade de uma unidade de conservação cumprir seus objetivos (Watson et al., 2014; Maxwell et al., 2020; Ward et al., 2020). Nesse contexto, a delimitação de limites deixa de ser uma operação estritamente cartográfica ou administrativa e passa a constituir uma decisão de planejamento da conservação: a posição, a forma e a relação da poligonal com a matriz de uso do solo determinam quais habitats, gradientes ambientais e processos ecológicos permanecem efetivamente protegidos.

Essa dimensão espacial ganhou maior relevância com evidências de que redes de áreas protegidas podem apresentar lacunas mesmo quando metas quantitativas de cobertura são alcançadas. O planejamento sistemático da conservação demonstra que a seleção e o desenho de áreas devem buscar complementaridade, representatividade e persistência dos alvos de conservação, em vez de reproduzir oportunidades territoriais residuais (Margules; Pressey, 2000). Avaliações globais recentes mostram, ainda, que parte expressiva das áreas protegidas permanece pouco conectada por paisagens intactas e que unidades pequenas, fragmentadas ou com elevada exposição às bordas tendem a ser mais vulneráveis às pressões do entorno (Ward et al., 2020; Schauman et al., 2024). De modo convergente, análises de alta resolução evidenciam que desmatamento, expansão agropecuária e outros processos de perda de habitat continuam ocorrendo dentro de muitas áreas protegidas, reforçando que a configuração espacial e a gestão do entorno são componentes centrais de sua efetividade (Li et al., 2024).

No Brasil, esse problema é agravado por uma rede de conservação historicamente marcada por vieses espaciais, distribuição desigual entre biomas e presença de unidades estabelecidas em áreas de menor conflito com usos produtivos, nem sempre coincidentes com as maiores prioridades de biodiversidade (Fonseca; Venticinque, 2018; Vieira; Pressey; Loyola, 2019). Na Caatinga, a situação é particularmente crítica: embora o bioma concentre elevada singularidade biológica, endemismos e forte heterogeneidade ambiental, seu sistema de áreas protegidas é desequilibrado e dominado por categorias menos restritivas, enquanto remanescentes de Floresta Tropical Sazonalmente Seca permanecem submetidos a pressões cumulativas de uso da terra e a cenários de mudança climática (Teixeira et al., 2021; Dória; Dobrovolski, 2021; Prieto-Torres et al., 2021). Assim, decisões sobre criação, expansão ou redefinição de unidades na Caatinga precisam considerar simultaneamente

biodiversidade, heterogeneidade fisiográfica, conectividade, pressões antrópicas e viabilidade de gestão.

O Parque Estadual de Morro do Chapéu (PEMC), situado na Chapada Diamantina Setentrional, sintetiza esse desafio. A unidade foi reservada pelo Decreto estadual nº 23.862/1973 e recriada pelo Decreto nº 7.413/1998 (Bahia, 1973, 1998), com área declarada de 46.000 ha, em uma paisagem onde caatinga, cerrado, florestas estacionais, campos, matas de grotão e complexos rupestres se distribuem ao longo de fortes gradientes de relevo, substrato e disponibilidade hídrica. Durante o diagnóstico ambiental que fundamenta este estudo, as coordenadas da poligonal legal mostraram-se de difícil ou impossível localização em campo, comprometendo sua monumentalização, fiscalização e operacionalização. Ao mesmo tempo, o território reunia espécies endêmicas, habitats geomorfológicos singulares, nascentes, remanescentes de vegetação e sítios rupestres, mas também pecuária extensiva, desmatamento, queimadas, abertura de estradas, retirada de madeira, extração de areia, ocupações rurais e sobreposições potenciais com assentamentos. Nessas condições, simplesmente substituir coordenadas inadequadas não resolveria o problema: era necessário reavaliar a coerência ambiental da própria poligonal e sua relação com os valores de conservação e os conflitos de uso.

Para responder a esse problema, o diagnóstico combinou uma leitura geossistêmica da paisagem com sensoriamento remoto, levantamentos de campo, análise de biodiversidade e patrimônio histórico-cultural e modelagem multicritério em Sistema de Informações Geográficas. Essa abordagem é particularmente adequada a paisagens de transição, nas quais variáveis ambientais apresentam continuidade espacial e diferentes graus de importância. A análise multicritério permite tornar explícitos os critérios de decisão e integrar evidências de natureza distinta, enquanto a lógica fuzzy representa transições graduais sem impor fronteiras booleanas artificiais (Burrough, 1989; Bonham-Carter, 1994; Malczewski, 2006; Geneletti; Van Duren, 2008). O sensoriamento remoto complementa esse arcabouço ao fornecer medidas espacialmente contínuas de cobertura vegetal e uso da terra, permitindo relacionar padrões biofísicos e pressões antrópicas no mesmo domínio espacial (Pettorelli et al., 2014). Dessa forma, a redefinição de limites pode ser tratada como um problema integrado de conservação e gestão territorial, no qual valor ecológico, condição ambiental e operacionalidade da fronteira precisam ser avaliados conjuntamente.

Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo geral analisar de que maneira evidências fisiográficas, hidrológicas, geomorfológicas, antrópicas, biológicas e histórico-culturais foram integradas para identificar áreas de maior relevância ambiental e fundamentar a redefinição da poligonal do PEMC. Para tornar esse objetivo operacional e coerente com a estrutura do diagnóstico, busca-se especificamente: (i) caracterizar a heterogeneidade ambiental do Parque e de seu entorno a

partir de geossistemas, microbacias, relevo e habitats geomorfológicos; (ii) avaliar como cobertura vegetal, NDVI, fragmentação e registros de uso da terra expressaram os principais gradientes de conservação e antropização; (iii) sintetizar a contribuição dos inventários de flora, fauna e patrimônio rupestre para a diferenciação espacial de áreas prioritárias; (iv) examinar como a padronização e a integração fuzzy das variáveis selecionadas produziram uma superfície contínua de relevância ambiental e orientaram os critérios de desenho da nova poligonal; e (v) discutir a coerência espacial, as implicações de gestão e as limitações da proposta, considerando que os dados foram obtidos predominantemente entre 2001 e 2006. Essa última condição é central para a interpretação dos resultados: o trabalho é apresentado como uma linha de base histórica e uma referência metodológica para futuras atualizações, e não como uma descrição do estado atual do território.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A literatura contemporânea sobre áreas protegidas tem deslocado a avaliação de desempenho de uma perspectiva predominantemente quantitativa centrada na porcentagem de território formalmente protegida para uma abordagem que considera representatividade ecológica, conectividade, integridade da paisagem, exposição às bordas e capacidade efetiva de conter pressões antrópicas. Assim, a delimitação de uma unidade de conservação não é uma etapa neutra: a posição e a geometria do limite condicionam quais habitats e gradientes ambientais permanecem no interior da unidade, a proporção de área sujeita a efeitos de borda, a continuidade com remanescentes externos e a viabilidade de fiscalização. Essa compreensão é consistente com avaliações globais que demonstram que a expansão da cobertura protegida, isoladamente, não assegura persistência da biodiversidade quando as áreas são mal representativas, pouco conectadas ou submetidas a perda de habitat e pressões no entorno (Watson et al., 2014; Ward et al., 2020; Maxwell et al., 2020; Schauman et al., 2024; Li et al., 2024). À luz do Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza SNUC (Brasil, 2000), esse problema assume também dimensão administrativa, porque parques de proteção integral precisam combinar objetivos de preservação com limites reconhecíveis e operacionalmente manejáveis.

No Brasil, o desafio da delimitação é agravado pela distribuição historicamente desigual das unidades de conservação entre biomas e por padrões de localização residual, nos quais áreas protegidas foram frequentemente estabelecidas onde os conflitos com usos econômicos eram menores, e não necessariamente onde a complementaridade e a irreplaceabilidade da biodiversidade eram maiores (Fonseca; Venticinque, 2018; Vieira; Pressey; Loyola, 2019). Esse padrão tem consequência direta sobre o cumprimento de metas internacionais: o esforço de conservação distribui-se de forma desigual entre biomas e categorias de manejo, de modo que o percentual agregado de território protegido

mascara lacunas expressivas de representatividade (Pacheco; Neves; Fernandes, 2018). Na Caatinga, esse problema é particularmente relevante porque a rede de áreas protegidas apresenta baixa representatividade de categorias mais restritivas e forte desequilíbrio espacial, ao mesmo tempo que o bioma reúne endemismos, elevada heterogeneidade ambiental e pressões persistentes de conversão e fragmentação (Teixeira et al., 2021; Dória; Dobrovolski, 2021). Projeções de mudança climática acrescentam uma dimensão dinâmica ao planejamento, pois a adequação futura de áreas protegidas depende da capacidade de incorporar gradientes ambientais, conectividade e possibilidades de deslocamento da biota (Malecha; Vale; Manes, 2023). Nesse contexto, revisar uma poligonal existente pode constituir uma ação de conservação tão relevante quanto ampliar formalmente a área protegida, desde que o redesenho seja guiado por evidências espaciais e por objetivos de persistência ecológica.

Uma base conceitual importante para esse tipo de planejamento é reconhecer que a biodiversidade responde não apenas à cobertura vegetal, mas também à heterogeneidade do meio físico. Variações de litologia, relevo, altitude, declividade, exposição, drenagem e solos controlam disponibilidade de água e nutrientes, formação de microclimas e diversidade de substratos, produzindo mosaicos de habitats e refúgios em escalas distintas. A abordagem geossistêmica organiza essas relações ao tratar a paisagem como resultado da interação entre componentes abióticos, bióticos e antrópicos, enquanto a noção de habitat geomorfológico permite traduzir compartimentação do relevo em unidades com significado ecológico (Bertrand, 1972; Christofoletti, 1999). A literatura recente de conservação reforça a necessidade de integrar geodiversidade às estratégias de proteção da natureza, sobretudo porque a diversidade abiótica pode funcionar como uma aproximação espacial da variedade de condições ecológicas e da capacidade de persistência da biodiversidade sob mudança ambiental (Tukiainen; Bailey, 2023). Na Caatinga, a combinação entre heterogeneidade ambiental, diversidade vegetal e padrões de ameaça tem se mostrado útil para identificar áreas de elevada importância para conservação (Koch; Almeida-Cortez; Kleinschmit, 2017).

A configuração da paisagem e a distribuição das pressões humanas constituem um segundo eixo teórico indispensável. Fragmentação, abertura de estradas, expansão agropecuária, queimadas, extração de recursos e ocupação rural não apenas reduzem a cobertura natural, mas alteram conectividade, aumentam exposição às bordas e criam vetores de acesso capazes de deslocar pressões para o interior das unidades. Estudos globais e sul-americanos mostram que a conectividade estrutural da rede protegida é limitada e que estradas dentro ou próximas às áreas protegidas representam um risco importante para sua integridade ecológica (Saura et al., 2018; Ward et al., 2020; Schauman et al., 2025). Por isso, a avaliação de uma poligonal deve ultrapassar a distinção binária entre área protegida e não protegida e considerar a relação do limite com remanescentes, acessos, zonas antropizadas,

assentamentos e feições naturais que possam funcionar como referências de campo ou como elementos de conectividade.

A conservação aplicada também exige integrar alvos biológicos e valores socioculturais. Inventários de flora e fauna, informações sobre endemismo e registros de espécies associadas a habitats específicos permitem verificar se a compartimentação físico-ambiental corresponde a diferenças biologicamente relevantes. Ao mesmo tempo, sítios arqueológicos, paisagens culturais, ocupações e formas de uso constituem componentes territoriais que não podem ser tratados como elementos externos ao planejamento. Avaliações internacionais indicam que resultados de conservação tendem a ser mais consistentes quando a governança e os contextos sociais são incorporados à tomada de decisão, em vez de serem considerados apenas após a definição espacial da área protegida (Oldekop et al., 2016). Para unidades como o PEMC, isso implica conciliar a proteção de biodiversidade e patrimônio rupestre com a redução de conflitos fundiários e com a possibilidade concreta de reconhecer, acessar e fiscalizar os limites.

Nesse processo, sensoriamento remoto e Sistemas de Informações Geográficas fornecem a infraestrutura analítica para transformar evidências de natureza distinta em informação espacial comparável. Imagens orbitais permitem mapear cobertura vegetal, uso da terra, fragmentação e indicadores espectrais em extensões nas quais levantamentos de campo isolados seriam insuficientes, enquanto dados topográficos, hidrológicos, geológicos e registros georreferenciados permitem representar dimensões complementares da paisagem. O valor do sensoriamento remoto para ecologia aplicada reside justamente na capacidade de produzir observações espacialmente contínuas e repetíveis, embora sua interpretação dependa da resolução, do período de aquisição e da validação de campo (Pettorelli et al., 2014). Em estudos históricos, essas bases adquirem ainda função de linha de base, possibilitando reconstruir as condições e os critérios disponíveis no momento em que decisões de planejamento foram formuladas.

A integração dessas camadas configura um problema clássico de decisão espacial multicritério. Variáveis como NDVI, tamanho de fragmentos, habitats geomorfológicos, ocorrência de espécies, pressão antrópica e patrimônio cultural são expressas em unidades, escalas e níveis de incerteza diferentes; por isso, precisam ser padronizadas antes de sua combinação. A análise multicritério em SIG torna explícitos critérios, pesos e regras de agregação, favorecendo transparência e rastreabilidade na comparação entre alternativas (Malczewski, 2006; Geneletti; Van Duren, 2008). A teoria dos conjuntos fuzzy (Zadeh, 1965) é particularmente adequada quando a transição entre baixa e alta importância ambiental é gradual, porque permite atribuir graus de pertinência contínuos entre 0 e 1, em vez de impor limiares booleanos rígidos (Burrough, 1989; Bonham-Carter, 1994). O tratamento da

imprecisão em análise espacial por conjuntos fuzzy e a sua articulação com procedimentos de ponderação multicritério foram formalizados ainda na consolidação dos SIG (Banai, 1993; Altman, 1994), e a definição das funções de pertinência, dos operadores de agregação e dos parâmetros de compensação constitui, desde então, a etapa que determina o comportamento do modelo (Cox, 1994). Aplicações posteriores demonstram que modelos fuzzy em SIG também podem integrar dimensões ecológicas e sociais, sendo úteis quando a decisão espacial precisa representar simultaneamente valores biofísicos, percepções e conflitos de uso (Noble; Harasti; Pittock, 2021).

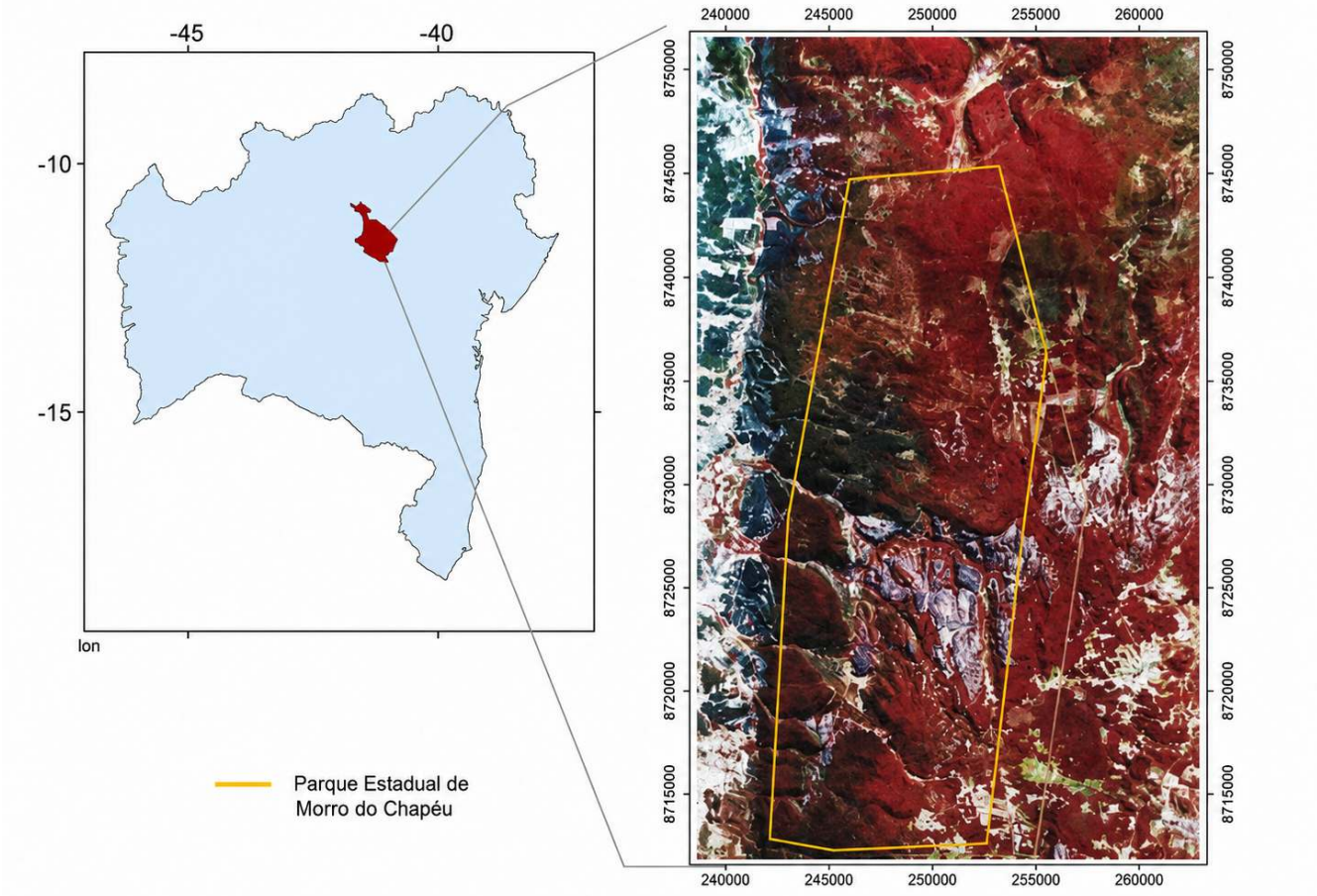
Sob essa perspectiva, a superfície multicritério não deve ser interpretada como uma delimitação automática. Seu papel é sintetizar evidências, revelar gradientes, áreas de convergência e zonas de conflito e, a partir daí, apoiar uma decisão espacial que também considere continuidade ecológica, feições naturais reconhecíveis, acessibilidade, ocupações e restrições de gestão. Essa distinção é fundamental para o PEMC: a modelagem fuzzy organiza o valor relativo do território, mas a redefinição da poligonal exige confrontar o resultado integrado com hidrografia, serras, vales, estradas, assentamentos, registros biológicos e patrimônio cultural. Em termos teóricos, o estudo situa-se, portanto, na interface entre planejamento sistemático da conservação, análise integrada da paisagem e apoio multicritério à decisão, usando a incerteza e a heterogeneidade como propriedades a serem representadas, e não eliminadas, no processo de redesenho de uma área protegida (Margules; Pressey, 2000; Geneletti; Van Duren, 2008; Tukiainen; Bailey, 2023).

3 METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO E RECORTE TEMPORAL

O PEMC situa-se no município de Morro do Chapéu, Bahia, na porção setentrional da Chapada Diamantina. A poligonal legal considerada no diagnóstico possuía 46.000 ha e abrangia setores das serras do Badeco, Estreito, Carnaíbas, Isabel Dias, Candial e Martin Afonso. O contexto regional corresponde a um planalto sedimentar constituído principalmente por rochas das formações Morro do Chapéu e Caboclo, com arenitos, conglomerados, siltitos e argilitos, e altitudes superiores a 1.100 m em alguns setores. A localização do PEMC e o recorte espacial ampliado adotado na análise são apresentados na Figura 1.

Figura 1. Localização do Parque Estadual de Morro do Chapéu (PEMC) e contexto espacial da área ampliada de análise.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

A área insere-se em contexto semiárido, mas apresenta contrastes de altitude, relevo e exposição que condicionam mosaicos de caatinga, cerrado, florestas estacionais e vegetação rupestre. A área de análise ultrapassou os limites legais do Parque para incorporar o entorno e permitir a avaliação de alternativas de delimitação, considerando o contexto físico e ecorregional da Caatinga (Rocha; Costa, 1995; Velloso; Sampaio; Pareyn, 2002; Lobão, 2006).

A coleta e o processamento correspondem ao período histórico do diagnóstico. Foram utilizadas imagens Landsat ETM+ de 2001 e QuickBird de 2006, além de dados cartográficos preexistentes e campanhas de campo realizadas em 2006. Essa temporalidade é explicitamente preservada para evitar que a presente síntese seja interpretada como avaliação do estado atual da unidade de conservação.

3.2 UNIDADES GEOSSISTÊMICAS E DESENHO AMOSTRAL

Os levantamentos foram orientados por cinco geossistemas definidos para o Parque e seu entorno: planaltos recobertos por caatinga; afloramentos rochosos; planaltos recobertos por cerrado e floresta; planalto com contato caatinga-cerrado e formações associadas; e área densamente antropizada

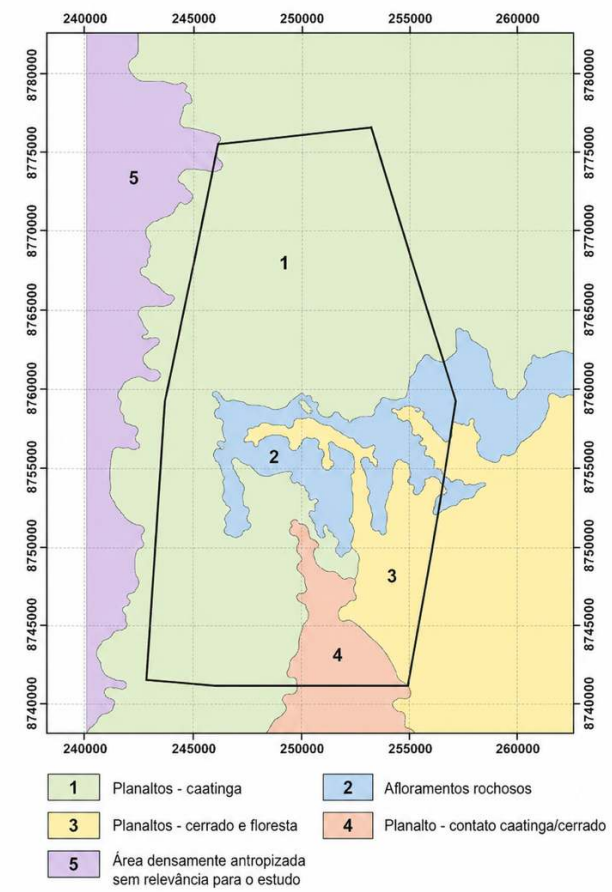
sobre depressão calcária. O quinto geossistema foi excluído das coletas de fauna e flora em razão do elevado grau de transformação. As áreas informadas no documento referem-se ao recorte ampliado de análise e, em conjunto, somam 130.577 ha, não devendo ser interpretadas como equivalentes à área legal do PEMC (46.000 ha). A caracterização sintética dessas unidades é apresentada na Tabela 1, e sua distribuição espacial no Parque e no entorno é mostrada na Figura 2.

Tabela 1. Síntese dos geossistemas empregados como unidades espaciais de apoio às coletas e à modelagem ambiental.

Geossistema	Descrição dominante	Área informada (ha)	Uso na coleta
1	Planaltos recobertos por caatinga	75.597	Amostragem prioritária
2	Afloramentos rochosos com cerrado rupestre e matas de grotão	9.722	Amostragem prioritária
3	Planaltos com cerrado e floresta estacional	21.773	Amostragem prioritária
4	Contato caatinga/cerrado, caatinga e cerrado	9.609	Amostragem prioritária
5	Depressão calcária densamente antropizada	13.876	Excluído das coletas de fauna e flora

Fonte: Elaborada pelos próprios autores, a partir do documento-fonte.

Figura 2. Distribuição espacial dos geossistemas utilizados para orientar os levantamentos de campo no PEMC e em seu entorno.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

3.3 LEVANTAMENTOS DE CAMPO, DADOS BIOLÓGICOS E PATRIMÔNIO CULTURAL

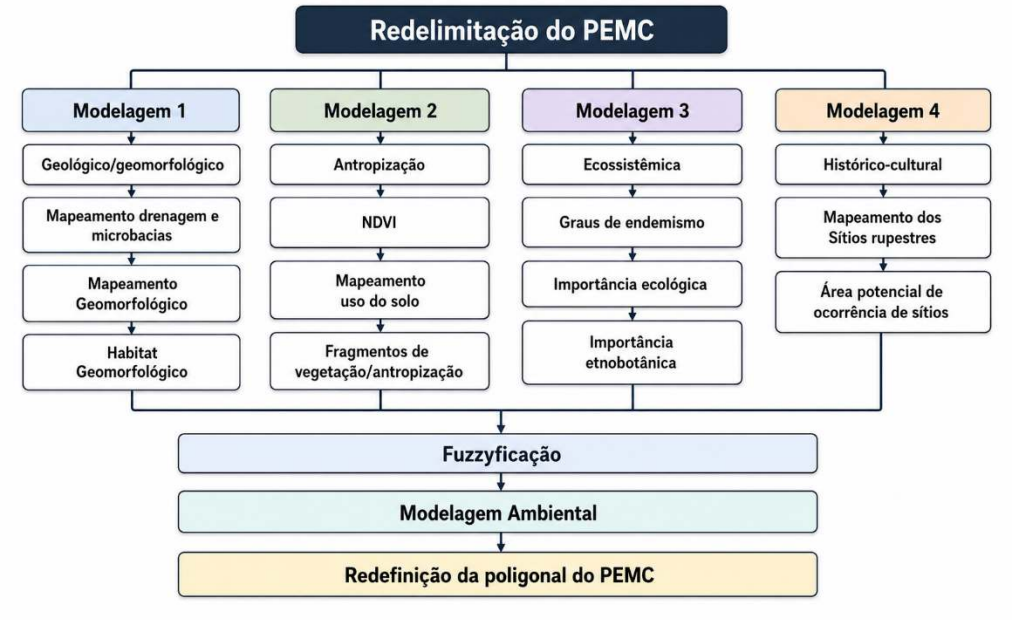
O plano de trabalho combinou levantamento bibliográfico e documental, campanhas de campo, divulgação institucional e processamento laboratorial e cartográfico. Foram realizadas oito campanhas de coleta por duas equipes de biólogos uma dedicada à flora e outra à fauna e cinco atividades de campo pela equipe de mapeamento, composta por profissionais de geografia, geologia e estudantes. Os trabalhos registraram condições físicas e socioambientais, flora, fauna e relatos de ocupação. A flora vascular foi coletada e herborizada segundo procedimentos usuais, com depósito no Herbário da Universidade Estadual de Feira de Santana (HUEFS); a organização taxonômica seguiu as referências utilizadas no diagnóstico (Mori et al., 1989; Souza; Lorenzi, 2005; Smith et al., 2006). As espécies foram categorizadas quanto ao endemismo, ocorrência ruderal e amplitude de distribuição.

A avaliação rápida de fanerófitos utilizou parcelas e subparcelas sorteadas em geossistemas selecionados. A diversidade foi estimada pelo índice de Shannon-Wiener (Shannon, 1948) e a similaridade pelo índice de Sørensen/Dice, com processamento nos programas Species Diversity and Richness IV e NTSYS (Mueller-Dombois; Ellenberg, 1974; Rohlf, 1997; Seaby; Henderson, 2006). Na mastofauna, transecções foram instaladas em diferentes habitats, com armadilhas Sherman, armadilhas dobráveis e sistemas pitfall, complementadas por registros de pegadas e observações. A herpetofauna foi avaliada por coletas de campo e confrontada com inventários regionais (Rodrigues, 2003; Juncá, 2005). O patrimônio histórico-cultural foi investigado mediante georreferenciamento de sítios rupestres e comparação de suas características físicas com áreas potencialmente semelhantes.

3.4 MODELAGENS TEMÁTICAS EM SIG

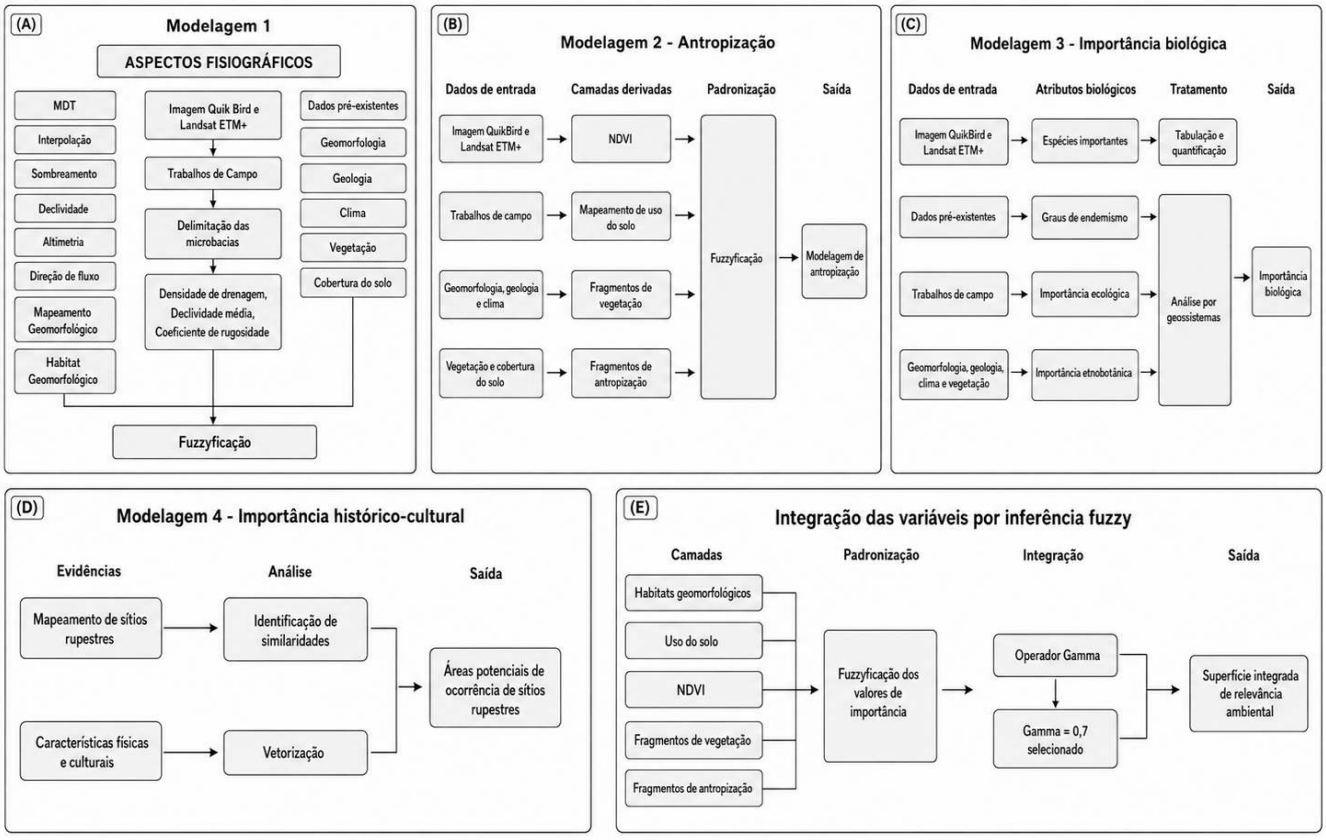
Foram estruturadas quatro linhas de modelagem temática. A Modelagem 1 reuniu hidrografia, geologia e geomorfologia e produziu mapas de declividade, altimetria, sombreamento, direção de fluxo, microbacias, unidades geomorfológicas e habitats geomorfológicos. A Modelagem 2 representou a antropização por meio de cobertura e uso do solo, NDVI, fragmentos de vegetação e fragmentos de áreas antropizadas. A Modelagem 3 integrou informações de fauna e flora, com ênfase em endemismo, importância ecológica e uso etnobiológico. A Modelagem 4 espacializou a importância histórico-cultural e o potencial de ocorrência de sítios rupestres. O encadeamento geral do diagnóstico é sintetizado na Figura 3, enquanto a Figura 4 detalha as quatro modelagens temáticas e sua convergência para a integração ambiental e a redefinição da poligonal.

Figura 3. Fluxo geral do diagnóstico ambiental integrado do PEMC.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Figura 4. Modelagens temáticas reconstruídas a partir do documento-fonte: (a) aspectos fisiográficos (Modelagem 1); (b) antropização (Modelagem 2); (c) importância biológica (Modelagem 3); (d) importância histórico-cultural (Modelagem 4); (e) integração fuzzy.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

3.5 PADRONIZAÇÃO FUZZY E CRITÉRIOS PARA A NOVA POLIGONAL

As variáveis espaciais selecionadas para a integração — habitats geomorfológicos, uso do solo, NDVI, fragmentos de vegetação e fragmentos de áreas antropizadas (Figura 4e) — foram convertidas para uma escala fuzzy de importância entre 0 e 1. O quadro linguístico adotou valores intermediários para representar pertinência parcial e o valor -99 para ausência de dados. A integração testou operadores de soma e gama, evitando o uso exclusivo dos operadores máximo e mínimo para não produzir cenários deliberadamente otimistas ou pessimistas. O documento registra testes com valores de $\gamma = 0{,}7$ e $\gamma = 0{,}5$ e indica o cenário $\gamma = 0{,}7$ como o mais coerente com a realidade observada. A escolha do operador gama, em lugar dos operadores máximo e mínimo, segue a orientação consolidada para álgebra de mapas em suporte à decisão, segundo a qual operadores compensatórios preservam a contribuição relativa de cada plano de informação, enquanto operadores extremos tendem a ser governados por uma única variável (Moreira; Câmara; Almeida Filho, 2001; Bonham-Carter, 1994).

$$\mu_{\gamma} = (\mu_{soma})^{\gamma} \times (\mu_{produto})^{(1-\gamma)} \quad (1)$$

em que $\mu\gamma$ representa o valor integrado, μsoma a soma algébrica fuzzy, μproduto o produto algébrico fuzzy e γ o parâmetro de compensação entre esses componentes (Bonham-Carter, 1994).

A poligonal proposta foi digitalizada mediante confronto entre a superfície de relevância ambiental e os demais produtos cartográficos. Cinco critérios foram explicitados: priorizar áreas de maior valor ambiental; não reduzir a área protegida; seguir preferencialmente limites naturais, como rios, serras e vales; manter o menor número possível de pessoas e usos incompatíveis dentro do Parque; e assegurar acessibilidade aos limites externos. Nesta síntese, não foram adicionados dados contemporâneos nem reprocessadas as geometrias originais.

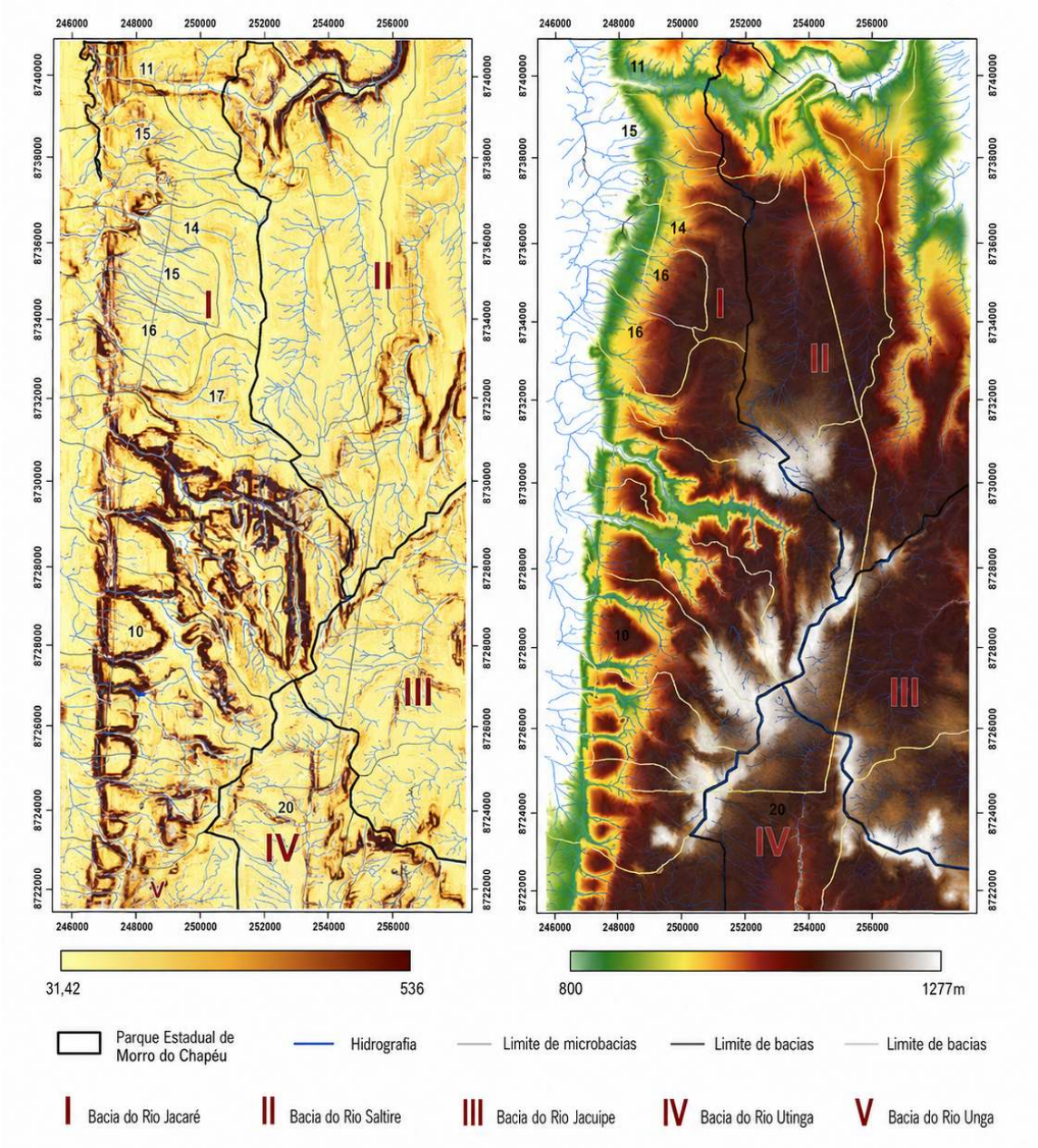
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ORGANIZAÇÃO FISIOGRÁFICA, HIDROLÓGICA E GEOMORFOLÓGICA

A compartimentação fisiográfica revelou um planalto que atua como divisor de águas entre sub-bacias tributárias dos rios São Francisco e Paraguaçu. Foram reconhecidas 20 microbacias: três associadas ao Salitre, 13 ao Jacaré, duas ao Jacuípe e duas ao Utinga. O quadro morfométrico do diagnóstico totaliza 546 nascentes estimadas e indica maior dissecação e rugosidade na borda oeste, especialmente nas microbacias que drenam para o Rio Jacaré. As microbacias 18 e 19 foram destacadas como prioritárias por combinarem elevados coeficientes de rugosidade, maior energia do relevo e

maior potencial de diversidade de habitats. A organização espacial das microbacias, da drenagem e do relevo utilizada nessa leitura é sintetizada na Figura 5.

Figura 5. Síntese da análise hidrológica e morfométrica: direção de fluxo, microbacias, declividade e altimetria.

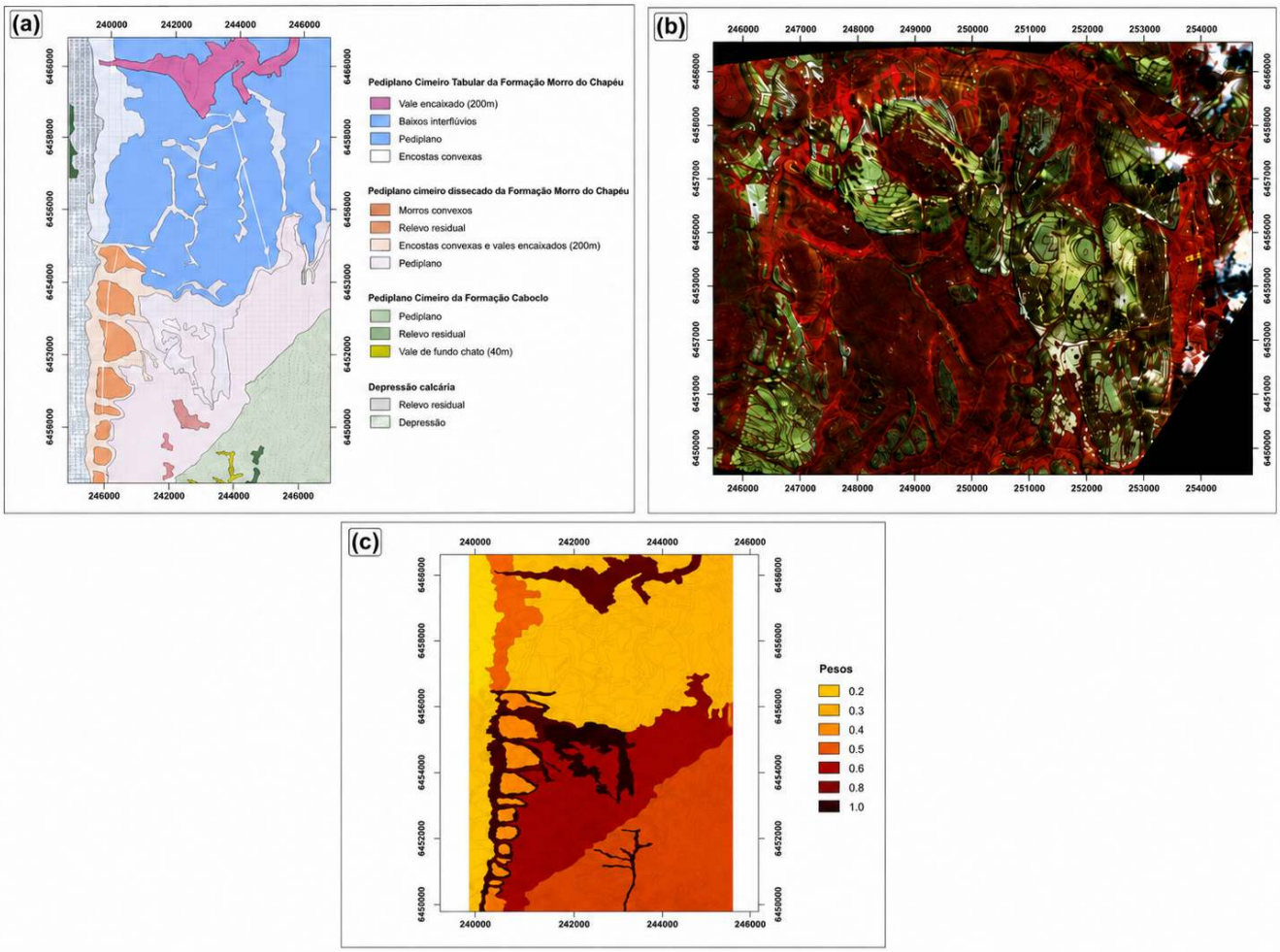


Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

O mapeamento geomorfológico identificou pediplanos cimeiros, setores dissecados, vales, encostas, relevos residuais, morros e uma depressão calcária. A maior complexidade foi atribuída ao pediplano dissecado da Formação Morro do Chapéu, onde vales profundos e fraturas isolam compartimentos menores, favorecem matas de grotão e galerias e coincidem com afloramentos e sítios rupestres. Os habitats geomorfológicos receberam pesos de 0,2 a 1,0 conforme a fragmentação e o

potencial de heterogeneidade ambiental; vales encaixados da Serra Isabel Dias e setores da borda oeste receberam os valores máximos. A associação entre relevo compartimentado e diversidade de microambientes é coerente com o papel da heterogeneidade espacial na manutenção da biodiversidade em paisagens fragmentadas (Cerqueira et al., 2003) e com abordagens que combinam diversidade e padrões de ameaça para identificar áreas prioritárias na Caatinga (Koch; Almeida-Cortez; Kleinschmit, 2017). Em escala de rede, a manutenção de conectividade entre áreas de alta relevância constitui ainda um atributo decisivo da conservação espacial (Saura et al., 2018). A Figura 6 reúne as unidades geomorfológicas, a expressão da compartimentação do relevo na imagem de alta resolução e a ponderação dos habitats geomorfológicos utilizada no diagnóstico.

Figura 6. Evidências geomorfológicas: (a) unidades e tipos de relevo; (b) detalhe de imagem QuickBird evidenciando a compartimentação do relevo e as matas de grotão; (c) habitats geomorfológicos ponderados.

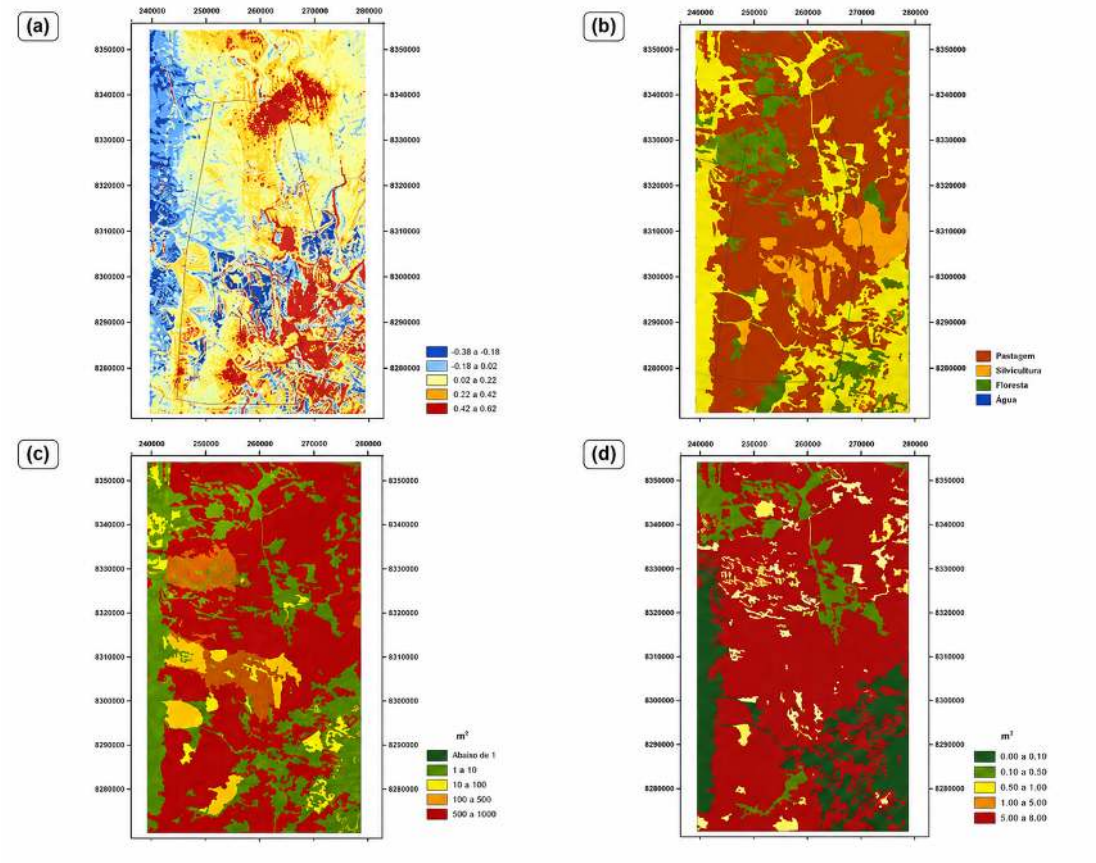


Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

4.2 COBERTURA VEGETAL, ANTROPIZAÇÃO E PRESSÕES DE USO

O NDVI (Tucker, 1979) calculado para a área variou de -0,35 a 0,47. Os maiores valores corresponderam a manchas de vegetação mais densa, especialmente florestas estacionais e caatinga arbórea, enquanto valores negativos foram associados a afloramentos e áreas antropizadas, associação que deve ser lida com cautela, uma vez que valores negativos de NDVI correspondem tipicamente a água, sombras de relevo e superfícies muito úmidas, enquanto rocha e solo expostos tendem a valores próximos de zero (Tucker, 1979); no produto histórico, o sombreamento das escarpas e o tratamento radiométrico da imagem podem ter contribuído para esse resultado. O diagnóstico adotou cinco classes de NDVI e atribuiu maior importância relativa aos intervalos positivos relacionados a maior biomassa. A combinação do índice com a interpretação das imagens permitiu distinguir 74.170 ha de cobertura vegetal remanescente na área ampliada de estudo, 8.314 ha de afloramentos rochosos e 33.377 ha de áreas agropecuárias. Esses números não correspondem à área legal do Parque, mas ao recorte espacial utilizado na modelagem. A utilização de índices espectrais como informação complementar é consistente com o papel do sensoriamento remoto na produção de indicadores espacialmente contínuos para monitoramento ecológico (Pettorelli et al., 2014). A distribuição espacial do NDVI, das classes de cobertura e uso e dos padrões de fragmentação é apresentada conjuntamente na Figura 7.

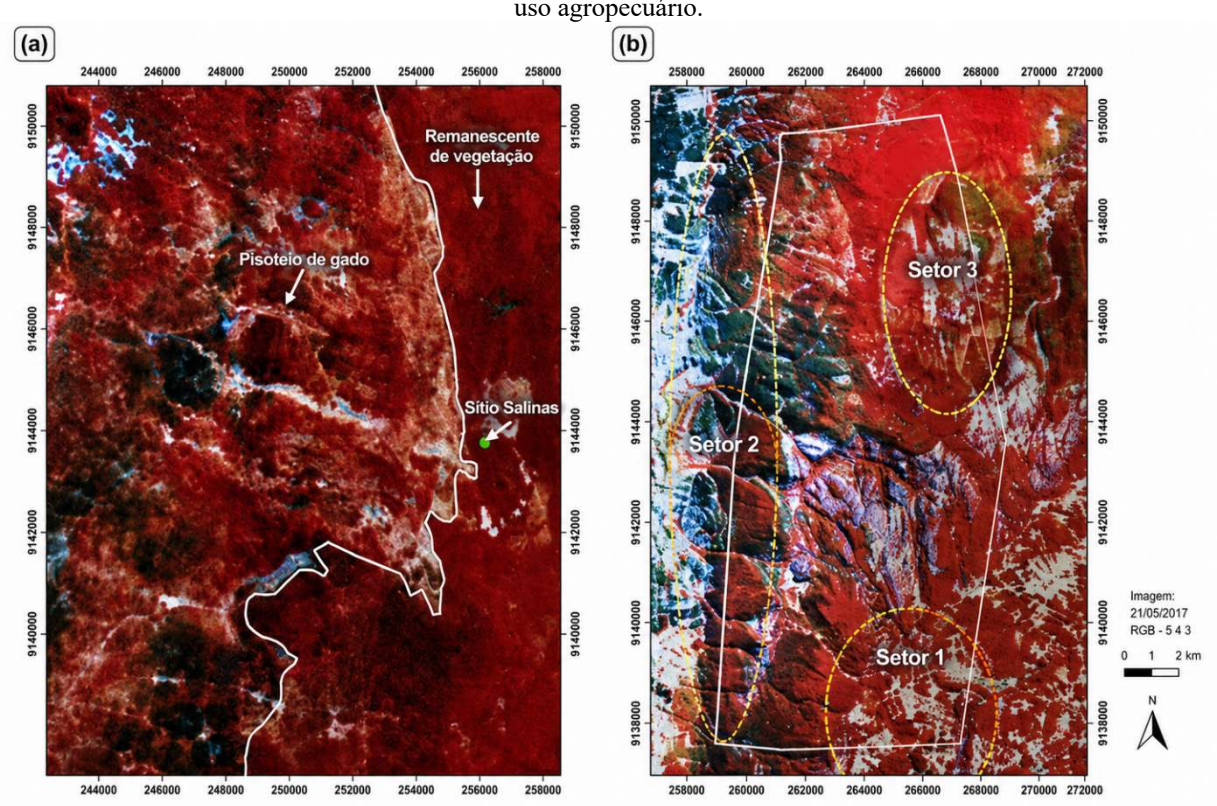
Figura 7. Indicadores de cobertura, uso e fragmentação da paisagem: (a) NDVI; (b) cobertura e uso do solo; (c) fragmentos de vegetação; (d) fragmentos de áreas antropizadas.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

A pecuária extensiva foi apontada como pressão espacialmente difusa. O pisoteio do gado produziu trilhas, exposição e compactação do solo, enquanto a agropecuária temporária, associada a desmatamento e queimadas, elevou a vulnerabilidade dos solos arenosos. A análise dos fragmentos adotou duas lógicas complementares: remanescentes maiores e contínuos receberam maior peso por seu potencial de manter espécies exigentes em área; entre as áreas antropizadas, fragmentos menores receberam maior valor de recuperação por serem considerados mais reversíveis. A estrada do Barracão recebeu peso mínimo devido ao seu papel como vetor de fragmentação e expansão das ocupações. Essa leitura reforça que área protegida, qualidade do habitat e conectividade devem ser avaliadas de forma conjunta, e não como dimensões independentes (Saura et al., 2018; Maxwell et al., 2020). Essas pressões e sua expressão espacial são ilustradas na Figura 8.

Figura 8. Pressões de uso registradas no diagnóstico: (a) áreas submetidas ao pisoteio por gado bovino; (b) setores com uso agropecuário.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Os registros socioambientais evidenciaram três setores de ocupação, com maior consolidação de propriedades no sudeste, ocupações na borda oeste e ocupação recente ao longo da estrada do Barracão. Neste último setor, foram descritas 14 propriedades, além de abertura e alargamento de estrada, desmatamento, queimadas e retirada de madeira. Os diferentes contextos de ocupação e suas evidências de campo são apresentados na Figura 9.

Figura 9. Contexto da ocupação rural: (a) distribuição das comunidades e propriedades registradas; (b) estruturas e ocupações ao longo da estrada do Barracão; (c) assentamentos Santa Ernestina e Lagoinha/Boa Vista.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores, a partir do documento-síntese do diagnóstico ambiental do PEMC; cartografia, fotografias e cores temáticas originais preservadas; imagens remasterizadas para inserção no manuscrito.

O diagnóstico também registrou os assentamentos Santa Ernestina, ao sul, e Lagoinha/Boa Vista, ao norte (Figura 17b), com pequenas interferências sobre a poligonal proposta. A coexistência de áreas ambientalmente relevantes e usos rurais reforça a necessidade de que o redesenho de limites seja acompanhado de regularização fundiária, fiscalização e coordenação interinstitucional, e não tratado como solução isolada. Avaliações globais mostram que resultados sociais e de conservação em áreas protegidas são influenciados pela forma como a governança e os meios de vida locais são incorporados ao planejamento e à gestão (Oldekop et al., 2016). A Figura 10 complementa essa leitura ao reunir evidências de abertura de acesso, queimadas e retirada de vegetação e ao espacializar o traçado da estrada e os sítios e fazendas registrados em sua proximidade.

Figura 10. Evidências de degradação e expansão do acesso: (a) desmatamento e abertura de estrada em direção à Gruta de Brejões; (b) queimadas e retirada de vegetação e madeira; (c) traçado da estrada para o Barracão.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores, a partir do documento-síntese do diagnóstico ambiental do PEMC; cartografia, fotografias e cores temáticas originais preservadas; imagens remasterizadas para inserção no manuscrito.

4.3 BIODIVERSIDADE E DIFERENCIAÇÃO ENTRE GEOSSISTEMAS

O inventário florístico registrou 257 espécies de plantas vasculares distribuídas em 66 famílias, com aproximadamente 74% das amostras determinadas até o nível de espécie. Leguminosae apresentou 36 espécies, seguida por Cactaceae (23), Asteraceae (21), Myrtaceae (16), Euphorbiaceae (12) e Malvaceae (10). O conjunto correspondia a cerca de 33,4% da riqueza vascular então conhecida para o município. O diagnóstico registrou uma espécie citada como endêmica do próprio Parque, *Mimosa morroensis*, pelo menos duas outras endêmicas do município, 12 endêmicas da Chapada Diamantina e 56 espécies consideradas endêmicas do bioma Caatinga, com base nas fontes taxonômicas utilizadas (Giulietti et al., 2002; Queiroz et al., 2005). Cerca de 6,6% da flora amostrada foi classificada como ruderal e 30,7% como de ampla distribuição. A relevância de afloramentos no semiárido baiano para a diversidade vegetal também foi registrada em estudos regionais (França; Melo; Gonçalves, 2006). Em perspectiva contemporânea, análises espaciais na Caatinga demonstram que

áreas de alta diversidade e elevada ameaça nem sempre coincidem com a rede formal de proteção, reforçando a pertinência de integrar endemismo, heterogeneidade ambiental e pressões de uso na priorização territorial (Koch; Almeida-Cortez; Kleinschmit, 2017; Teixeira et al., 2021).

Os grupos selecionados reforçaram a diversidade regional: foram catalogadas 26 espécies de pteridófitas em 19 gêneros e 11 famílias, 52 espécies de Asteraceae em 32 gêneros e 14 espécies de Solanaceae em cinco gêneros. A diversidade de fanerófitos variou de 3,02 a 3,47 nats.indivíduo^{-1}, e as similaridades entre geossistemas foram baixas, entre aproximadamente 14% e 35%, corroborando a diferenciação ambiental indicada pela compartimentação espacial. No entorno do sítio arqueológico das Lages, a diversidade foi substancialmente menor, entre 0,77 e 2,25 nats.indivíduo^{-1}, resultado interpretado no documento como associado à forte antropização local e a históricos de incêndio e extração de areia.

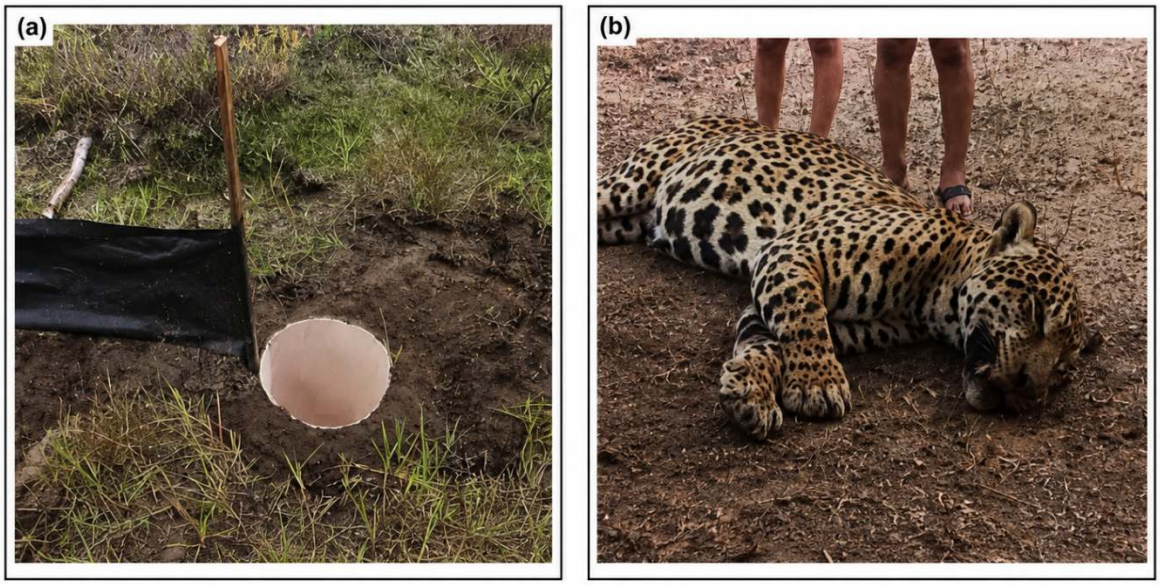
Na herpetofauna, foram coletadas 11 espécies de anuros e cinco de lagartos; cinco das 16 espécies apresentaram algum grau de endemismo, isto é, mais de 30% do conjunto. O diagnóstico destaca espécies associadas à Caatinga, à Chapada Diamantina e a habitats específicos, além de registrar a relevância de ambientes aquáticos e matas ciliares para anuros. Registros taxonômicos e biogeográficos em campos rupestres baianos já apontavam a singularidade regional da herpetofauna (Heyer, 1999; Rodrigues, 2003; Juncá, 2005). Na mastofauna, foram constatados representantes de três famílias, 12 gêneros e aproximadamente 14 espécies de pequenos mamíferos terrestres, incluindo 12 roedores e dois didelfimorfos. Entre os registros de maior interesse estão *Wiedomys pyrrhorhinos*, roedor endêmico da Caatinga, e *Cryptonanus sp.*, então não registrado para o bioma no conjunto de dados utilizado. A amostragem também registrou *Cerdocyon thous* e vestígios de felídeos, além do registro fotográfico de um felídeo de grande porte compatível com onça-pintada (Panthera onca) (Figura 11b), espécie ameaçada cuja ocorrência reforça a importância da manutenção de remanescentes extensos e conectados. O próprio documento reconhece, entretanto, que os inventários foram incompletos; por isso, esses números devem ser interpretados como riqueza mínima observada, e não como inventário exaustivo (Voss et al., 2005). A necessidade de ampliar a representatividade da rede de conservação para vertebrados da Caatinga permanece demonstrada por avaliações mais recentes (Dória; Dobrovolski, 2021). Os principais indicadores quantitativos do diagnóstico são consolidados na Tabela 2, enquanto a Figura 11 documenta o sistema de amostragem de pequenos mamíferos e registros de carnívoros obtidos em campo.

Tabela 2. Indicadores quantitativos selecionados do diagnóstico ambiental histórico do PEMC.

Componente	Indicador	Resultado
Hidrografia	Microbacias identificadas	20
Hidrografia	Nascentes estimadas no quadro morfométrico	546
Cobertura	NDVI observado	-0,35 a 0,47
Cobertura	Vegetação remanescente no recorte ampliado	74.170 ha
Cobertura	Afloramentos rochosos	8.314 ha
Uso da terra	Áreas agropecuárias	33.377 ha
Flora	Plantas vasculares	257 espécies / 66 famílias
Flora	Espécies citadas como endêmicas da Caatinga	56
Herpetofauna	Anuros + lagartos	16 espécies; >30% com algum endemismo
Mastofauna	Pequenos mamíferos terrestres	aprox. 14 espécies

Fonte: Elaborada pelos próprios autores, a partir do documento-fonte.

Figura 11. Registros de mastofauna: (a) sistema de armadilhamento empregado na amostragem de pequenos mamíferos; (b) registros de carnívoros e vestígios documentados em campo.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

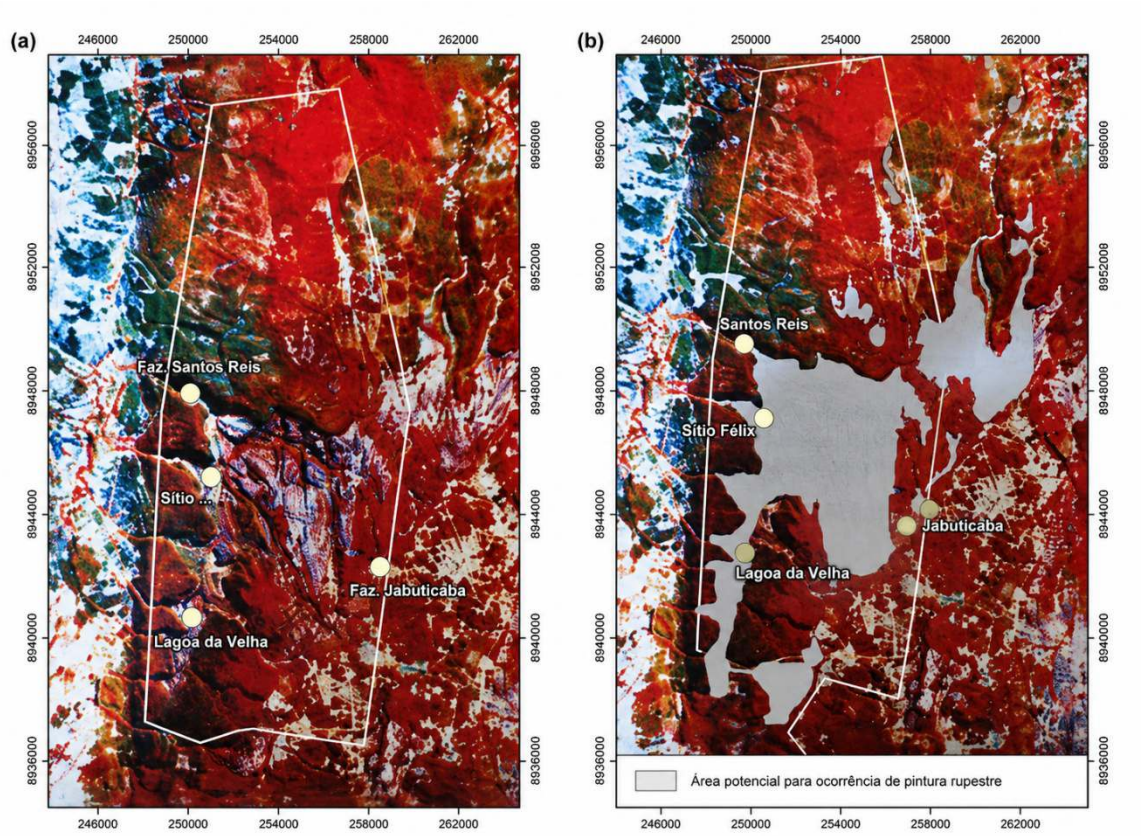
4.4 PATRIMÔNIO ARQUEOLÓGICO E IMPORTÂNCIA HISTÓRICO-CULTURAL

O patrimônio rupestre constituiu uma dimensão independente da modelagem. O diagnóstico registrou ampla ocorrência de pinturas e inscrições em afloramentos areníticos e quartzíticos da Formação Morro do Chapéu e indicou quatro novos sítios/áreas que ainda não haviam sido incorporados aos registros utilizados pela equipe. A distribuição dos sítios conhecidos e a área modelada como potencial para ocorrência de pintura rupestre são apresentadas na Figura 12.

A análise espacial buscou identificar similaridades entre substrato, afloramentos, relevo e sítios conhecidos para delimitar áreas potenciais. Os resultados indicaram associação frequente com blocos soltos, feições ruiniformes e paredões em vales encaixados, mas reconheceram que paredes íngremes poderiam apresentar baixa detectabilidade automática.

Os sítios Fazenda Santos Reis e Félix foram descritos como exemplos de elevada diversidade de painéis. No primeiro, predominam pinturas vermelhas e composições geométricas, com ocorrências bicromáticas. No Sítio Félix foram observados painéis em diferentes alturas, motivos antropomorfos, zoomorfos e geométricos, além de bicromia e policromia.

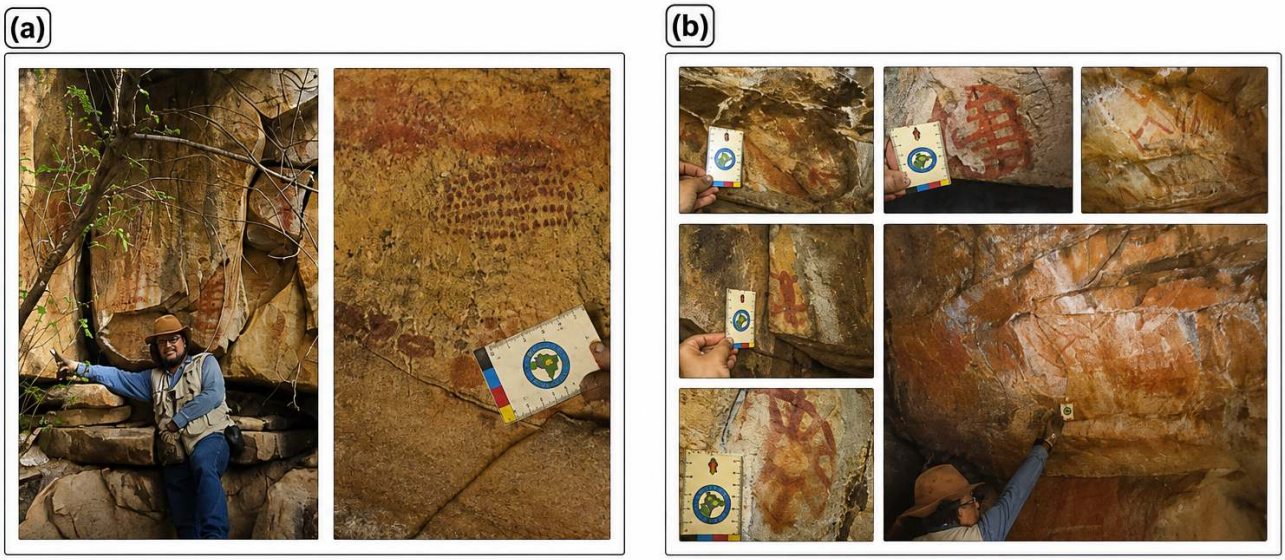
Figura 12. Patrimônio rupestre: (a) distribuição dos sítios e áreas mapeadas; (b) setores com potencial de ocorrência de novos sítios.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

O diagnóstico enfatizou a necessidade de estudos arqueológicos sistemáticos, cadastro nos órgãos competentes, preparação para visitação controlada e incorporação desses atributos ao plano de manejo. Os registros do Sítio Fazenda Santos Reis são apresentados na Figura 13, enquanto o contexto dos afloramentos e a diversidade de painéis do Sítio Félix são documentados nas Figuras 14 e 15.

Figura 13. Registros do Sítio Fazenda Santos Reis: (a) painel bicromático e contexto do afloramento; (b) segundo conjunto de pinturas, com predominância de motivos vermelhos e geométricos.



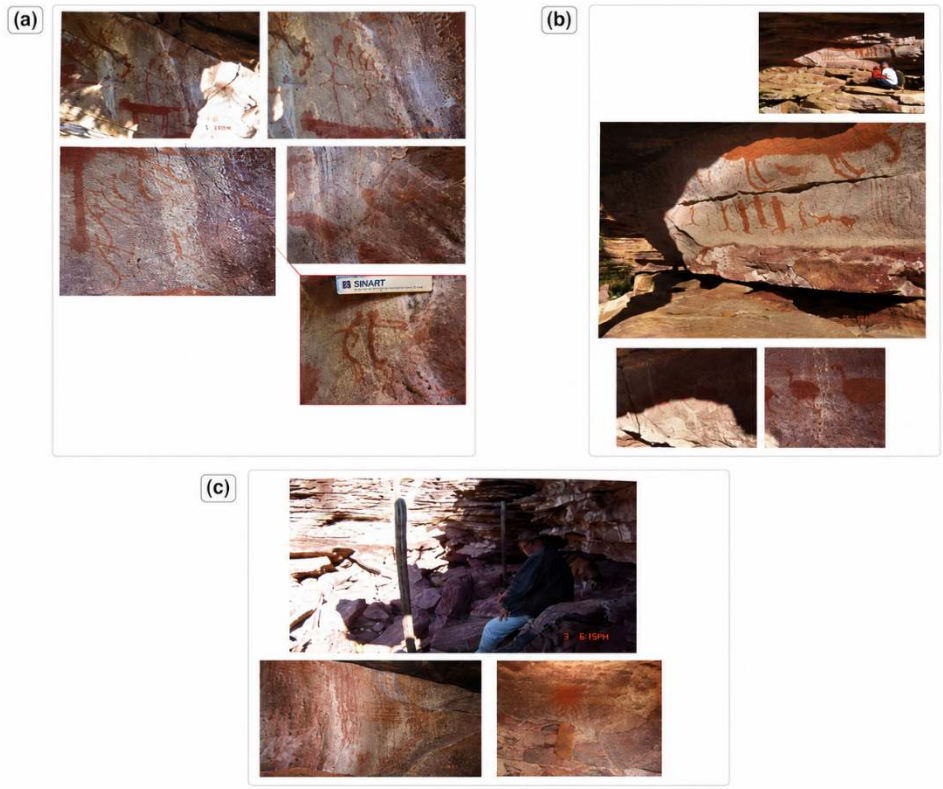
Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Figura 14. Sítio Félix: (a) contexto geral dos afloramentos e blocos; (b) Painel 1; (c) Painel 2.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Figura 15. Sítio Félix: (a) Painel 3; (b) Painel 4; (c) Painel 5, evidenciando a diversidade de motivos rupestres.



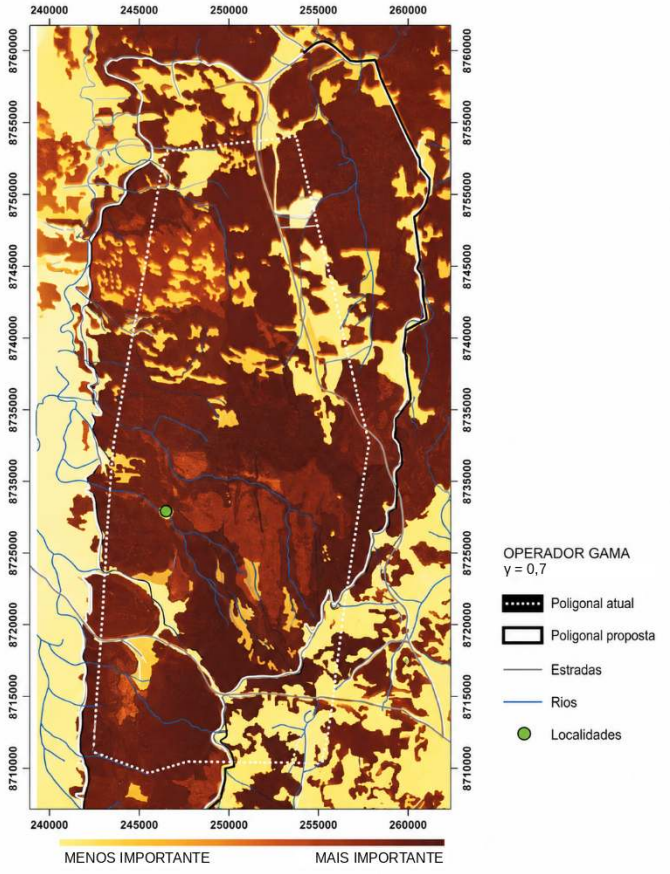
Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

4.5 INTEGRAÇÃO AMBIENTAL E REDEFINIÇÃO DA POLIGONAL

A superfície integrada pelo operador gama destacou áreas com relevância ambiental diferenciada em escala contínua de 0 a 1. O cenário selecionado evidenciou um eixo de maior conservação no sentido NE-SW, iniciando em caatinga arbórea densa, atravessando o cordão central de afloramentos rochosos e alcançando novos setores de caatinga. A Serra Isabel Dias e seu entorno emergiram como núcleo de elevada importância por combinar complexidade geomorfológica, matas de grotão, vegetação rupestre, endemismos e patrimônio arqueológico. Cabe precisar que a superfície fuzzy integrou cinco planos de informação — habitats geomorfológicos, uso do solo, NDVI, fragmentos de vegetação e fragmentos de áreas antropizadas (Figura 4e) —, de modo que endemismos e patrimônio arqueológico não compuseram a superfície integrada, mas foram confrontados com ela na etapa de desenho da poligonal; a coincidência espacial entre esses registros e os setores de maior relevância constitui, portanto, uma verificação independente do resultado do modelo. Em sentido oposto, os setores mais transformados situaram-se na depressão calcária a oeste, no sudeste e ao longo da estrada do Barracão. A convergência de múltiplas evidências espaciais para identificar setores prioritários é compatível com princípios de planejamento sistemático da conservação, especialmente em regiões com lacunas de representatividade (Fonseca; Venticinque, 2018; Dória; Dobrovolski,

2021). A distribuição espacial desse gradiente e sua relação com a poligonal vigente e a proposta são apresentadas na Figura 16, na qual as tonalidades mais escuras correspondem aos setores de maior relevância ambiental.

Figura 16. Superfície contínua de relevância ambiental obtida pela integração fuzzy das variáveis selecionadas.

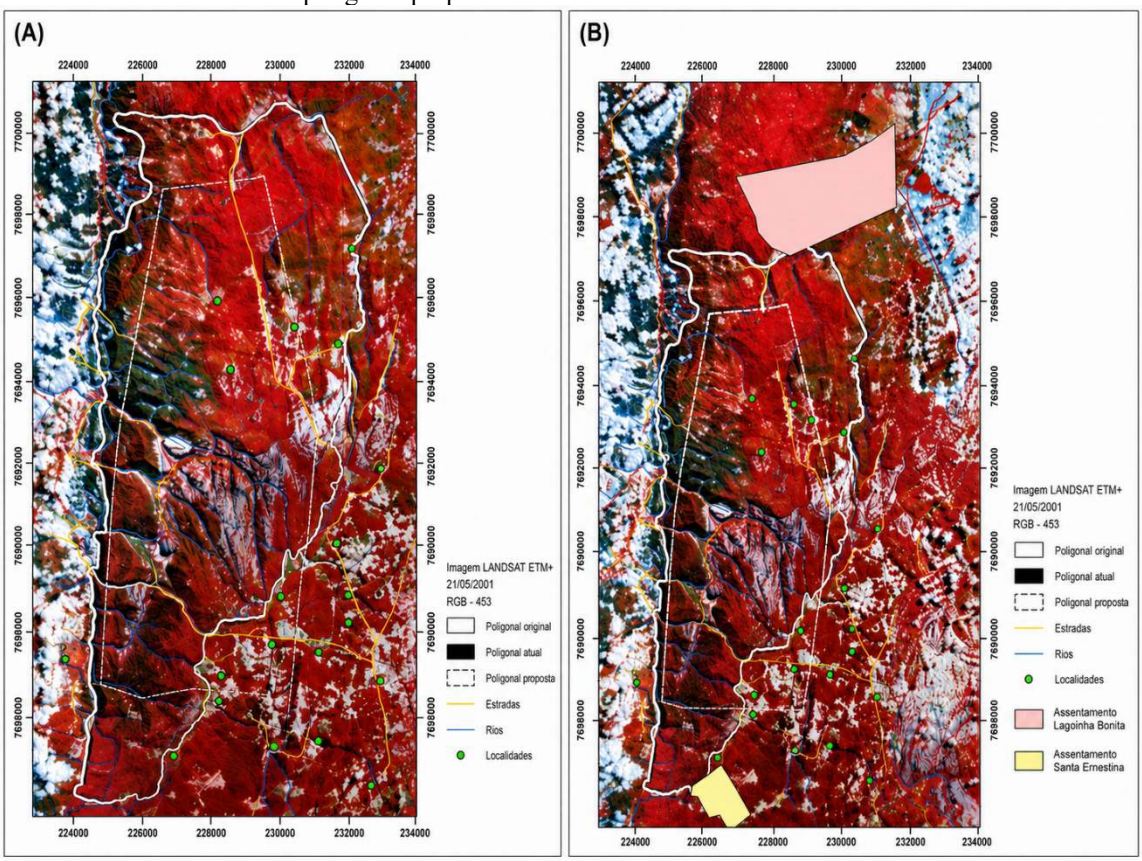


Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

A poligonal proposta buscou incorporar áreas de alto valor ambiental situadas fora do limite original, excluir setores periféricos densamente antropizados quando isso não implicasse perda de relevância e adotar feições naturais reconhecíveis como limites. A proposta também procurou minimizar o número de ocupações internas, embora tenha mantido sobreposições pontuais com os assentamentos Lagoinha/Boa Vista e Santa Ernestina, conflito que o documento recomenda tratar conjuntamente com o INCRA. Essa orientação dialoga com evidências de que a localização residual de áreas protegidas pode reduzir sua representatividade e com a necessidade de incorporar critérios de biodiversidade às decisões espaciais (Vieira; Pressey; Loyola, 2019; Fonseca; Venticinque, 2018). Ao mesmo tempo, a consideração explícita de ocupações e governança é coerente com avaliações que relacionam resultados de conservação a contextos sociais e institucionais (Oldekop et al., 2016). A geometria final foi descrita por um memorial com perímetro aproximado de 148 km e coordenadas de

pontos sucessivos. Há, contudo, uma inconsistência interna que precisa ser explicitada: uma frase do memorial informa 11 pontos, enquanto a descrição subsequente enumera pontos de P1 a P14. Essa divergência documental impede que a contagem seja tratada como dado validado e recomenda conferência dos arquivos vetoriais originais antes de qualquer aplicação normativa. A comparação cartográfica entre a poligonal original, a poligonal então vigente, a proposta de redefinição, a rede de drenagem, as estradas, as localidades e os assentamentos é apresentada na Figura 17.

Figura 17. Síntese cartográfica da redefinição de limites: (a) proposta de nova poligonal do PEMC; (b) relação entre a poligonal proposta e os assentamentos do entorno.



Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

4.6 IMPLICAÇÕES, CONTRIBUIÇÃO METODOLÓGICA E LIMITAÇÕES

A principal contribuição do diagnóstico reside na integração de evidências que, com frequência, são tratadas de forma setorial. A superfície fuzzy não substituiu a decisão técnica; ela organizou informações heterogêneas em uma escala comum e permitiu confrontar valor ambiental, uso da terra e operacionalidade dos limites. A adoção de feições naturais como referência aproxima o desenho espacial da capacidade de gestão, enquanto a combinação de NDVI, fragmentação, habitats geomorfológicos e biodiversidade reduz a dependência de um único indicador. Essa lógica é coerente com a finalidade da modelagem ambiental de representar sistemas complexos por meio de variáveis

selecionadas e relações explícitas (Christofoletti, 1999; Bonham-Carter, 1994) e com a análise multicritério espacial, que busca tornar transparentes critérios, pesos e regras de agregação (Malczewski, 2006). Estudos de zoneamento de áreas protegidas mostram, de modo convergente, a utilidade de combinar avaliação multicritério e objetivos de conservação e uso em ambiente SIG (Geneletti; Van Duren, 2008).

À luz do referencial teórico atualizado, os resultados do PEMC antecipam três dimensões que hoje são tratadas como centrais no desenho de áreas protegidas: a incorporação da heterogeneidade abiótica como suporte à biodiversidade; a consideração simultânea de conectividade, bordas e vetores de pressão; e a integração de restrições sociais e operacionais à decisão espacial. A forte correspondência entre setores de maior complexidade geomorfológica, remanescentes de vegetação, registros biológicos e patrimônio rupestre reforça o valor de abordagens que integram geodiversidade e biodiversidade (Tukiainen; Bailey, 2023). Ao mesmo tempo, a presença de estradas, ocupações e assentamentos nas proximidades dos limites evidencia que a geometria da unidade e sua inserção na matriz de uso não são atributos secundários, mas componentes da efetividade da conservação (Ward et al., 2020; Schauman et al., 2024; Schauman et al., 2025). A contribuição metodológica do diagnóstico está, portanto, menos em produzir uma fronteira 'ótima' e mais em tornar explícita a convergência e, em alguns setores, o conflito entre valor ambiental, pressão antrópica e viabilidade de gestão.

Quatro limitações devem orientar o uso científico atual dos resultados. Primeiro, as imagens e campanhas de campo são históricas, concentradas entre 2001 e 2006; portanto, não descrevem transformações posteriores. Segundo, os inventários biológicos são reconhecidamente incompletos e desiguais entre geossistemas. Terceiro, o documento não apresenta métricas independentes de validação nem análise formal de sensibilidade da superfície fuzzy, além da comparação qualitativa entre cenários. Quarto, a inconsistência entre o número declarado e o número enumerado de vértices do memorial exige revisão cartográfica. Assim, a proposta deve ser entendida como uma base técnica robusta para sua época e como referência metodológica e histórica, mas necessita atualização com sensoriamento remoto recente, novo levantamento fundiário e revalidação de campo. A disponibilidade contemporânea de séries de observação da Terra amplia as possibilidades de monitoramento ecológico e atualização espacial (Pettorelli et al., 2014), enquanto análises recentes destacam que a rede brasileira de áreas protegidas precisa responder também às mudanças climáticas e à representatividade futura da biodiversidade (Malecha; Vale; Manes, 2023). Em conjunto, esses avanços reforçam a necessidade de revisar periodicamente a efetividade e a configuração espacial das áreas protegidas (Maxwell et al., 2020).

5 CONCLUSÃO

A síntese demonstra que a redefinição de limites do Parque Estadual de Morro do Chapéu foi sustentada por uma abordagem ambiental integrada, capaz de relacionar fisiografia, hidrologia, cobertura e uso da terra, biodiversidade e patrimônio rupestre em uma estrutura espacial comum. A compartimentação em geossistemas organizou os levantamentos, enquanto a modelagem temática permitiu reconhecer a importância dos setores dissecados, das matas de grotão, dos remanescentes de caatinga arbórea e dos afloramentos rochosos, bem como localizar focos de antropização associados principalmente à pecuária extensiva, ao desmatamento e à abertura de estradas.

A integração fuzzy, particularmente o cenário com $\gamma = 0,7$ selecionado no diagnóstico, sintetizou as evidências fisiográficas e de antropização em uma superfície contínua de relevância ambiental e forneceu suporte explícito à nova poligonal. Os resultados biológicos reforçaram a decisão ao documentar elevada diversidade vegetal, endemismos e registros faunísticos relevantes, enquanto a modelagem histórico-cultural incorporou sítios rupestres ao planejamento. A proposta final privilegiou áreas de maior valor ambiental, limites naturais e acessibilidade, procurando reduzir conflitos de uso sem diminuir a proteção espacial.

Como contribuição científica, o estudo exemplifica uma estratégia multicritério replicável para o planejamento de unidades de conservação em paisagens de transição e elevada heterogeneidade. Entretanto, seu uso em decisões atuais depende de atualização temporal, validação da geometria, ampliação dos inventários e avaliação contemporânea das ocupações e pressões ambientais. Nesse sentido, o diagnóstico deve ser preservado como linha de base histórica e como estrutura metodológica para uma nova rodada de planejamento baseada em dados recentes.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), por meio do Edital CNPq/MCTI nº 441271/2023-5 Presente, Passado e Futuro da Biodiversidade do Semiárido: Inventários, Monitoramento, Impactos das Mudanças Climáticas e Implicações para o Uso e Conservação da Flora, Fauna e Fungos. W.J.F.R. foi apoiado por bolsa de produtividade em pesquisa do CNPq (processo nº 314954/2021-0) e pelo projeto CTBIO-FINEP, associado ao Centro Temático de Bioeconomia do Semiárido (UEFS/CTBio-CIMATEC Sertão). Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estudos Interdisciplinares e Transdisciplinares em Ecologia e Evolução (INCT IN-TREE), financiado pelo CNPq (408930/2024-1), pela CAPES (88887.195651/2025-00) e pela FAPESP.

Financiamento adicional foi fornecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), por meio do programa Bioeconomia, Recursos Hídricos e Sustentabilidade Ambiental na Bahia, no âmbito da Chamada nº 38/2022, Acordo de Cooperação Técnica nº 294/2023 e Termo de Outorga nº PPF0003/2023. Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente (PPGM/UEFS) pelo apoio institucional, bem como ao SENAI CIMATEC pela contribuição ao desenvolvimento científico e tecnológico voltado à inovação aplicada. R.N.V. foi apoiado pelo INCT IN-TREE e agradece a bolsa SET-G 30202010010121001 CTBIO-FINEP, associada ao Centro Temático de Bioeconomia do Semiárido (UEFS/CTBio-CIMATEC Sertão), vinculado a Projetos Especiais.

REFERÊNCIAS

ALTMAN, D. Fuzzy set theoretic approaches for handling imprecision in spatial analysis. International Journal of Geographical Information Systems, v. 8, n. 3, p. 271-289, 1994. DOI: https://doi.org/10.1080/02693799408902000.

BAHIA. Decreto nº 23.862, de 12 de outubro de 1973. Reserva área destinada ao Parque Estadual de Morro do Chapéu. Bahia, 1973.

BAHIA. Decreto nº 7.413, de 17 de agosto de 1998. Recria o Parque Estadual de Morro do Chapéu. Bahia, 1998.

BANAI, R. Fuzziness in geographical information systems: contributions from the analytic hierarchy process. International Journal of Geographical Information Systems, v. 7, n. 4, p. 315-329, 1993. DOI: https://doi.org/10.1080/02693799308901964.

BERTRAND, G. Paisagem e geografia global. São Paulo: IGEOG-USP, 1972.

BONHAM-CARTER, G. F. Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS. Ontario: Pergamon, 1994.

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 19 jul. 2000.

BURROUGH, P. A. Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. Journal of Soil Science, v. 40, n. 3, p. 477-492, 1989. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1989.tb01290.x.

CERQUEIRA, R. et al. Fragmentação: alguns conceitos. In: RAMBALDI, D. M.; OLIVEIRA, D. A. S. (org.). Fragmentação de ecossistemas: causas, efeitos sobre a biodiversidade e recomendações de políticas públicas. Brasília: Ministério do Meio Ambiente/SBF, 2003.

CHRISTOFOLETTI, A. Modelagem de sistemas ambientais. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

COX, E. The fuzzy systems handbook: a practitioner's guide to building, using, and maintaining fuzzy systems. London: Academic Press, 1994.

DÓRIA, T. A. F.; DOBROVOLSKI, R. Improving post-2020 conservation of terrestrial vertebrates in Caatinga. Biological Conservation, v. 253, art. 108894, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108894.

FONSECA, C. R.; VENTICINQUE, E. M. Biodiversity conservation gaps in Brazil: a role for systematic conservation planning. Perspectives in Ecology and Conservation, v. 16, n. 2, p. 61-67, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pecon.2018.03.001.

FRANÇA, F.; MELO, E.; GONÇALVES, J. M. Aspectos da diversidade da vegetação no topo de um inselbergue no semiárido da Bahia. Sitientibus, série Ciências Biológicas, v. 6, n. 1, p. 30-35, 2006.

GENELETTI, D.; VAN DUREN, I. C. Protected area zoning for conservation and use: a combination of spatial multicriteria and multiobjective evaluation. Landscape and Urban Planning, v. 85, n. 2, p. 97-110, 2008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.10.004.

GIULIETTI, A. M. et al. Espécies endêmicas da Caatinga. In: SAMPAIO, E. et al. Vegetação e flora da Caatinga. Recife: APNE/CNIP, 2002.

HEYER, W. R. A new genus and species of frog from Bahia, Brazil (Amphibia: Anura: Leptodactylidae) with comments on the zoogeography of the Brazilian campos rupestres. Proceedings of the Biological Society of Washington, v. 112, n. 1, p. 19-39, 1999.

JUNCÁ, F. A. Anfíbios e répteis. In: JUNCÁ, F. A.; FUNCH, L. S.; FRANCA-ROCHA, W. Biodiversidade e conservação da Chapada Diamantina. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2005.

KOCH, R.; ALMEIDA-CORTEZ, J. S.; KLEINSCHMIT, B. Revealing areas of high nature conservation importance in a seasonally dry tropical forest in Brazil: combination of modelled plant diversity hot spots and threat patterns. Journal for Nature Conservation, v. 35, p. 24-39, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jnc.2016.11.004.

LI, G.; FANG, C.; WATSON, J. E. M.; SUN, S.; QI, W.; WANG, Z.; LIU, J. Mixed effectiveness of global protected areas in resisting habitat loss. Nature Communications, v. 15, art. 8389, 2024. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-024-52693-9.

LOBÃO, J. S. Análise socioambiental no município de Morro do Chapéu-BA baseada em geotecnologias. 2006. 232 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2006.

MALCZEWSKI, J. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. International Journal of Geographical Information Science, v. 20, n. 7, p. 703-726, 2006. DOI: https://doi.org/10.1080/13658810600661508.

MALECHA, A.; VALE, M. M.; MANES, S. Increasing Brazilian protected areas network is vital in a changing climate. Biological Conservation, v. 288, art. 110360, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.110360.

MARGULES, C. R.; PRESSEY, R. L. Systematic conservation planning. Nature, v. 405, p. 243-253, 2000. DOI: https://doi.org/10.1038/35012251.

MAXWELL, S. L. et al. Area-based conservation in the twenty-first century. Nature, v. 586, p. 217-227, 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-020-2773-z.

MOREIRA, F. R.; CÂMARA, G.; ALMEIDA FILHO, R. Técnicas de suporte à decisão para modelagem geográfica por álgebra de mapas. Relatório Técnico Programa de Ciência e Tecnologia para Gestão de Ecossistemas. 2001.

MORI, S.; MATTOS-SILVA, L.; LISBOA, G.; CORADIN, L. Manual de manejo do herbário fanerogâmico. 2. ed. Ilhéus: CEPEC, 1989.

MUELLER-DOMBOIS, D.; ELLENBERG, H. Aims and methods of vegetation ecology. New York: John Wiley & Sons, 1974.

NOBLE, M. M.; HARASTI, D.; PITTOCK, J. Using GIS fuzzy-set modelling to integrate social-ecological data to support overall resilience in marine protected area spatial planning: a case study. Ocean & Coastal Management, v. 212, art. 105745, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105745.

OLDEKOP, J. A.; HOLMES, G.; HARRIS, W. E.; EVANS, K. L. A global assessment of the social and conservation outcomes of protected areas. Conservation Biology, v. 30, n. 1, p. 133-141, 2016. DOI: https://doi.org/10.1111/cobi.12568.

PACHECO, A. A.; NEVES, A. C. O.; FERNANDES, G. W. Uneven conservation efforts compromise Brazil to meet the Target 11 of Convention on Biological Diversity. Perspectives in Ecology and Conservation, v. 16, n. 1, p. 43-48, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.12.001.

PETTORELLI, N. et al. Satellite remote sensing for applied ecologists: opportunities and challenges. Journal of Applied Ecology, v. 51, n. 4, p. 839-848, 2014. DOI: https://doi.org/10.1111/1365-2664.12261.

PRIETO-TORRES, D. A.; NORI, J.; ROJAS-SOTO, O. R.; NAVARRO-SIGÜENZA, A. G. Challenges and opportunities in planning for the conservation of Neotropical seasonally dry forests into the future. Biological Conservation, v. 257, art. 109083, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109083.

QUEIROZ, L. P. et al. Caatinga. In: JUNCÁ, F. A.; FUNCH, L.; FRANCA-ROCHA, W. Biodiversidade e conservação da Chapada Diamantina. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2005. p. 95-120.

ROCHA, A. J. D.; COSTA, I. V. G. (org.). Projeto Mapas Municipais: Município de Morro do Chapéu-BA. Ministério de Minas e Energia; CPRM; Prefeitura de Morro do Chapéu, 1995.

RODRIGUES, M. T. Herpetofauna da Caatinga. In: LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. (org.). Ecologia e conservação da Caatinga. Recife: Editora Universitária UFPE, 2003. p. 181-236.

ROHLF, F. J. NTSYS-pc: numerical taxonomy and multivariate analysis system. Version 1.80. Setauket, NY: Exeter Software, 1997.

SAURA, S.; BERTZKY, B.; BASTIN, L.; BATTISTELLA, L.; MANDRICI, A.; DUBOIS, G. Protected area connectivity: shortfalls in global targets and country-level priorities. Biological Conservation, v. 219, p. 53-67, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.12.020.

SCHAUMAN, S. A.; PEÑUELAS, J.; JOBBÁGY, E. G.; BALDI, G. The geometry of global protected lands. Nature Sustainability, v. 7, n. 1, p. 82-89, 2024. DOI: https://doi.org/10.1038/s41893-023-01243-0.

SCHAUMAN, S. A.; JOBBÁGY, E. G.; PEÑUELAS, J.; LAURANCE, W. F.; BALDI, G. Roads imperil South American protected areas. Perspectives in Ecology and Conservation, v. 23, n. 4, p. 281-289, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pecon.2025.08.005.

SEABY, R. M.; HENDERSON, P. A. Species diversity and richness. Version 4. Hampshire: Pisces Conservation, 2006.

SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. Bell System Technical Journal, v. 27, n. 3, p. 379-423, 1948. DOI: https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.

SMITH, A. R. et al. A classification for extant ferns. Taxon, v. 55, n. 3, p. 705-731, 2006. DOI: https://doi.org/10.2307/25065646.

SOUZA, V.; LORENZI, H. Botânica sistemática. Nova Odessa: Editora Plantarum, 2005.

TEIXEIRA, M. G.; VENTICINQUE, E. M.; LION, M. B.; PINTO, M. P. The Brazilian Caatinga protected areas: an extremely unbalanced conservation system. Environmental Conservation, v. 48, n. 4, p. 287-294, 2021. DOI: https://doi.org/10.1017/S0376892921000308.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979. DOI: https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0.

TUKIAINEN, H.; BAILEY, J. J. Enhancing global nature conservation by integrating geodiversity in policy and practice. Conservation Biology, v. 37, n. 3, art. e14024, 2023. DOI: https://doi.org/10.1111/cobi.14024.

VELLOSO, A.; SAMPAIO, E.; PAREYN, F. Ecorregiões propostas para o bioma Caatinga. Recife: The Nature Conservancy/PNE, 2002.

VIEIRA, R. R. S.; PRESSEY, R. L.; LOYOLA, R. The residual nature of protected areas in Brazil. Biological Conservation, v. 233, p. 152-161, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.02.010.

VOSS, R. L.; LUNDE, D. P.; JANSA, S. A. On the contents of Gracilinanus Gardner & Creighton, 1989, with the description of a previously unrecognized clade of small didelphid marsupials. American Museum Novitates, n. 3482, p. 1-34, 2005.

WARD, M.; SAURA, S.; WILLIAMS, B.; RAMÍREZ-DELGADO, J. P.; ARAFEH-DALMAU, N.; ALLAN, J. R.; VENTER, O.; DUBOIS, G.; WATSON, J. E. M. Just ten percent of the global terrestrial protected area network is structurally connected via intact land. Nature Communications, v. 11, art. 4563, 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-020-18457-x.

WATSON, J. E. M.; DUDLEY, N.; SEGAN, D. B.; HOCKINGS, M. The performance and potential of protected areas. Nature, v. 515, n. 7525, p. 67-73, 2014. DOI: https://doi.org/10.1038/nature13947.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. Information and Control, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965. DOI: https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X.