

ISA-CERRADO: MODELO EMPÍRICO PARA MENSURAÇÃO DO POTENCIAL DE PRESTAÇÃO DE SERVIÇOS AMBIENTAIS NO CERRADO

ISA-CERRADO: EMPIRICAL MODEL FOR MEASURING THE POTENTIAL FOR PROVIDING ENVIRONMENTAL SERVICES IN THE BRAZILIAN CERRADO

ISA-CERRADO: MODELO EMPÍRICO PARA MEDIR EL POTENCIAL DE PRESTACIÓN DE SERVICIOS AMBIENTALES EN EL CERRADO BRASILEÑO

Alécio Perini Martins

Doutor em Geografia, Universidade Federal de Jataí, alecioperini@ufj.edu.br
<https://orcid.org/0000-0002-4485-0336>

Cleonice Batista Regis Soares

Mestra em Geografia, Universidade Federal de Jataí, cleoniceregis@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4115-9854>

RESUMO: Os serviços ecossistêmicos desempenham papel fundamental na manutenção da qualidade ambiental e no bem-estar humano, especialmente aqueles associados às funções de regulação climática, dinâmica hidrológica, conservação dos solos e suporte aos ecossistemas. No Cerrado, a intensificação do uso agropecuário tem comprometido essas funções, demandando instrumentos operacionais capazes de subsidiar políticas públicas de conservação. Este artigo tem como objetivo apresentar o ISA-CERRADO, um modelo empírico conservacionista para mensuração do potencial de prestação de serviços ambientais de regulação e suporte em escala municipal, fundamentado em técnicas de inteligência geoespacial e no uso de bases públicas acessíveis via *Google Earth Engine*. A metodologia integra indicadores biofísicos da vegetação derivados de sensoriamento remoto, fatores de modulação do uso e cobertura da terra e indicadores de fragilidade geoambiental, estruturados em uma equação empírica simples e replicável. O modelo foi aplicado no município de Serranópolis (GO), gerando mapas sazonais e anuais do potencial de serviços ambientais em resolução de 30 m. Os resultados evidenciaram maiores valores associados às formações florestais, savânicas, áreas úmidas e fundos de vale, enquanto áreas agropecuárias intensivas apresentaram baixos potenciais, mesmo com elevado vigor vegetativo. A incorporação da fragilidade do ambiente mostrou-se decisiva para o caráter conservacionista do índice, destacando áreas prioritárias para conservação e recuperação. O ISA-CERRADO constitui uma ferramenta operacional eficiente para planejamento ambiental e programas de pagamento por serviços ambientais, com potencial de geração de renda a partir da conservação do Cerrado, embora ainda passível de aprimoramentos por meio de validações de campo e incorporação de novos indicadores.

Palavras-chave: Pagamento por Serviços Ambientais; Inteligência Geoespacial; Sensoriamento Remoto; Planejamento Territorial.

ABSTRACT: Ecosystem services play a central role in sustaining environmental quality and human well-being, particularly those related to climate regulation, hydrological processes, soil conservation, and ecosystem support functions. In the Brazilian Cerrado, the intensification of agricultural land use has progressively disrupted these functions, increasing the demand for operational tools capable of informing conservation-oriented public policies. This study presents ISA-CERRADO, a conservation-focused empirical model developed to quantify the spatial potential of regulating and supporting ecosystem services at the municipal scale, grounded in geospatial intelligence techniques and publicly available datasets processed in Google Earth Engine. The methodology integrates remote-sensing-derived biophysical vegetation proxies, land-use and land-cover modulation factors, and geoenvironmental fragility indicators within a simple, transparent, and replicable empirical framework. The model was applied to the municipality of Serranópolis, Goiás State, producing seasonal and annual ecosystem service potential maps at 30 m spatial resolution. Results indicated higher potential values in forest formations, savanna ecosystems, wetlands, and valley bottoms, whereas intensively managed agricultural areas exhibited consistently low potential, even under high vegetation vigor conditions. Incorporating environmental fragility proved critical to reinforcing the conservation-oriented nature of the index, enabling the identification of priority areas for conservation and ecological restoration. ISA-CERRADO constitutes an effective operational tool for environmental planning and payment for ecosystem services schemes, with strong potential to support conservation-based income generation in the Cerrado, while remaining amenable to further refinement through field validation and the integration of additional indicators.

Keywords: Payment for Ecosystem Services; Geospatial Intelligence; Remote Sensing; Territorial Planning.

RESUMEN: Los servicios ecosistémicos desempeñan un papel central en el mantenimiento de la calidad ambiental y el bienestar humano, especialmente aquellos relacionados con la regulación climática, los procesos hidrológicos, la conservación del suelo y las funciones de soporte de los ecosistemas. En el Cerrado brasileño, la intensificación del uso agropecuario ha alterado progresivamente estas funciones, aumentando la necesidad de herramientas operativas que respalden políticas públicas orientadas a la conservación. Este estudio presenta el ISA-CERRADO, un modelo empírico de enfoque conservacionista desarrollado para cuantificar el potencial espacial de los servicios ecosistémicos de regulación y soporte a escala municipal, basado en técnicas de inteligencia geoespacial y en datos públicos procesados en Google Earth Engine. La metodología integra indicadores biofísicos de la vegetación derivados de la teledetección, factores de modulación del uso y cobertura del suelo, e indicadores de fragilidad geoambiental en un marco empírico simple y replicable. El modelo se aplicó en el municipio de Serranópolis, estado de Goiás, generando mapas estacionales y anuales con resolución espacial de 30 m. Los resultados mostraron mayores valores en formaciones forestales, ecosistemas savánicos, zonas húmedas y fondos de valle, mientras que las áreas agrícolas intensivas presentaron potenciales bajos, incluso bajo alto vigor vegetativo. La incorporación de la fragilidad ambiental reforzó el carácter conservacionista del índice, permitiendo identificar áreas prioritarias para la conservación y la restauración ecológica. El ISA-CERRADO constituye una herramienta eficaz para la planificación ambiental y los programas de pago por servicios ecosistémicos, con alto potencial para promover el desarrollo local basado en la conservación del Cerrado.

Palabras clave: Pago por Servicios Ecosistémicos; Inteligencia Geoespacial; Teledetección; Planificación Territorial.

1. INTRODUÇÃO

Os serviços ecossistêmicos correspondem aos benefícios diretos e indiretos que a sociedade obtém do funcionamento dos ecossistemas, resultantes da interação entre os componentes bióticos, abióticos e antrópicos das paisagens. Esses serviços sustentam processos essenciais à qualidade ambiental e ao bem-estar humano, incluindo a regulação do clima, a dinâmica hidrológica, o armazenamento de carbono, a formação e conservação dos solos, a ciclagem de nutrientes e a manutenção da produtividade primária (EMBRAPA, 2019). Já os serviços ambientais correspondem, em geral, à dimensão socioeconômica desses benefícios, sendo associados às ações humanas de conservação, manejo ou recuperação dos ecossistemas que permitem a manutenção ou ampliação desses serviços. Assim, enquanto os serviços ecossistêmicos dizem respeito ao funcionamento ecológico propriamente dito, os serviços ambientais relacionam-se à provisão ou manutenção desses benefícios no contexto de políticas públicas, instrumentos econômicos e mecanismos de incentivo. A pesquisa apresentada neste arquivo traz como conceito central o serviço ambiental, visto que pretende fornecer subsídios a programas de pagamento por estes serviços.

O reconhecimento da centralidade desses serviços para a sustentabilidade tem impulsionado a incorporação do conceito em políticas públicas, instrumentos econômicos e estratégias de conservação. No Brasil, esse movimento foi institucionalizado com a Lei nº 14.119/2021, que instituiu a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais, e no Estado de Goiás, pela Lei nº 23.314/2025, criando mecanismos formais de incentivo à conservação e ao uso sustentável dos recursos naturais.

No Cerrado, a conservação desses serviços assume caráter estratégico. A rápida conversão de áreas naturais em sistemas agropecuários, associada à fragmentação da vegetação nativa e às mudanças climáticas, tem comprometido funções ecológicas fundamentais, ampliando riscos ambientais e socioeconômicos (COLMAN et al., 2024; FUSHIMI et al., 2024).

Avanços expressivos têm sido registrados na modelagem espacial de serviços ambientais, especialmente por meio de modelos processuais que simulam fluxos biofísicos, como carbono, água e erosão do solo (MEACHAM et al., 2022). Ferramentas amplamente consolidadas, como o InVEST, o modelo CASA de produtividade primária, a Equação Universal Revisada de Perda de Solo (RUSLE) e o modelo hidrológico SWAT, vêm sendo empregadas para quantificar serviços de regulação climática, dinâmica hidrológica, conservação dos solos e qualidade de habitat. Embora apresentem elevado rigor ecológico, tais abordagens demandam grande volume de dados de entrada, parametrizações regionais e maior complexidade computacional, o que frequentemente limita sua aplicação em contextos de gestão local.

Em paralelo, consolidou-se uma vertente empírica fundamentada em indicadores biofísicos derivados do sensoriamento remoto, como o *Ecosystem Service Provision Index* (ESPI), proposto por Jullian et al. (2021) para o sul do Chile. Essa abordagem amplia significativamente a replicabilidade e a resolução espacial das análises, embora apresente limitações relacionadas à superestimação do potencial ecológico em áreas agrícolas intensivas. Outra linha metodológica amplamente utilizada baseia-se em matrizes de capacidade ou potencial de serviços ecossistêmicos associadas às classes de uso e cobertura da terra, conforme sistematizado por Burkhard et al. (2012) na Alemanha central. Estes métodos apresentam maior grau de generalização e menor sensibilidade à heterogeneidade ambiental intra-paisagem.

Abordagens de síntese estatística vêm sendo aplicadas por meio de pacotes de serviços ecossistêmicos, que identificam conjuntos recorrentes de sinergias e compensações entre múltiplos serviços, como sistematizado por Meacham et al. (2022). Esses métodos oferecem importantes interpretações integradas, porém dependem de análises multivariadas de maior complexidade (HAMEL; BRYANT, 2017).

Observa-se uma lacuna metodológica, sobretudo na literatura nacional, entre modelos altamente complexos e abordagens excessivamente simplificadas, reforçando a necessidade de índices que conciliem rigor ecológico, simplicidade operacional, alta resolução espacial e capacidade de integrar a análise biofísica da vegetação, uso da terra e sensibilidade ambiental das paisagens.

Nesse contexto, emergem questões científicas centrais que têm orientado a pesquisa: É possível estruturar índices empíricos, baseados em dados públicos, capazes de mensurar o potencial funcional dos ecossistemas de forma realista? Como evitar a superestimação de serviços em áreas agrícolas intensivas quando se utilizam indicadores vegetacionais? De que maneira incorporar explicitamente a fragilidade e a sensibilidade ambiental nos modelos de prestação de serviços ambientais?

Frente o exposto, este artigo tem como objetivo geral apresentar um modelo empírico conservacionista para mensuração do potencial de prestação de serviços ambientais de regulação e suporte no Cerrado, fundamentado em técnicas de inteligência geoespacial, especialmente o sensoriamento remoto, e em bases de dados acessíveis por meio do *Google Earth Engine*. A proposta integra indicadores biofísicos da vegetação, fatores de modulação do uso e cobertura da terra e indicadores de fragilidade geoambiental, estruturados em uma equação empírica simples e replicável. O modelo, ainda em processo de aprimoramento, busca superar limitações recorrentes de abordagens puramente vegetacionais ou excessivamente complexas, oferecendo um instrumento operacional capaz de subsidiar políticas públicas, estratégias conservacionistas e o planejamento ambiental das diversas fitofisionomias do Cerrado.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O município de Serranópolis (Figura 1), escolhido como área experimental para desenvolvimento do modelo, está localizado no Sudoeste de Goiás, apresenta uma área territorial de 5.531 km² e população estimada de 8.201 habitantes (IBGE, 2025), em região caracterizada por intensa dinâmica agropecuária e heterogeneidade geoambiental. O relevo é composto por superfícies regionais de aplainamento, zonas de erosão recuantes e planícies fluviais associadas às bacias dos rios Verde, Claro e Corrente, com altitudes variando entre 650 e 1.000 m (LATRUBESSE; CARVALHO, 2006). Predominam Latossolos Vermelhos com textura arenosa, além de significativa superfície recoberta por Neossolos Quartzarênicos em áreas de maior fragilidade ambiental. O clima tropical sazonal apresenta duas estações bem definidas, com período chuvoso entre novembro e abril e período seco entre maio e outubro, controlando fortemente os estoques de água no solo, a dinâmica da vegetação, os fluxos de carbono e os processos hidrológicos e erosivos (SOARES; MARTINS, 2025).

Historicamente voltado à pecuária extensiva, o município passou por acelerada expansão agrícola nos últimos 20 anos, com aumento de área cultivadas com soja, milho, cana-de-açúcar e eucalipto, promovendo a conversão e fragmentação da vegetação nativa. Como consequência, observam-se processos recorrentes de degradação ambiental, incluindo arenização, erosão dos solos, assoreamento de cursos d'água e pressão sobre áreas legalmente protegidas (SCOPEL et al., 2005; SOARES; MARTINS, 2025). Essa combinação de variabilidade ambiental, sazonalidade climática, intensificação do uso da terra, e presença ainda significativa de remanescentes de vegetação torna Serranópolis uma área representativa para aplicação do modelo empírico de mensuração do potencial de prestação de serviços ambientais em escala municipal.

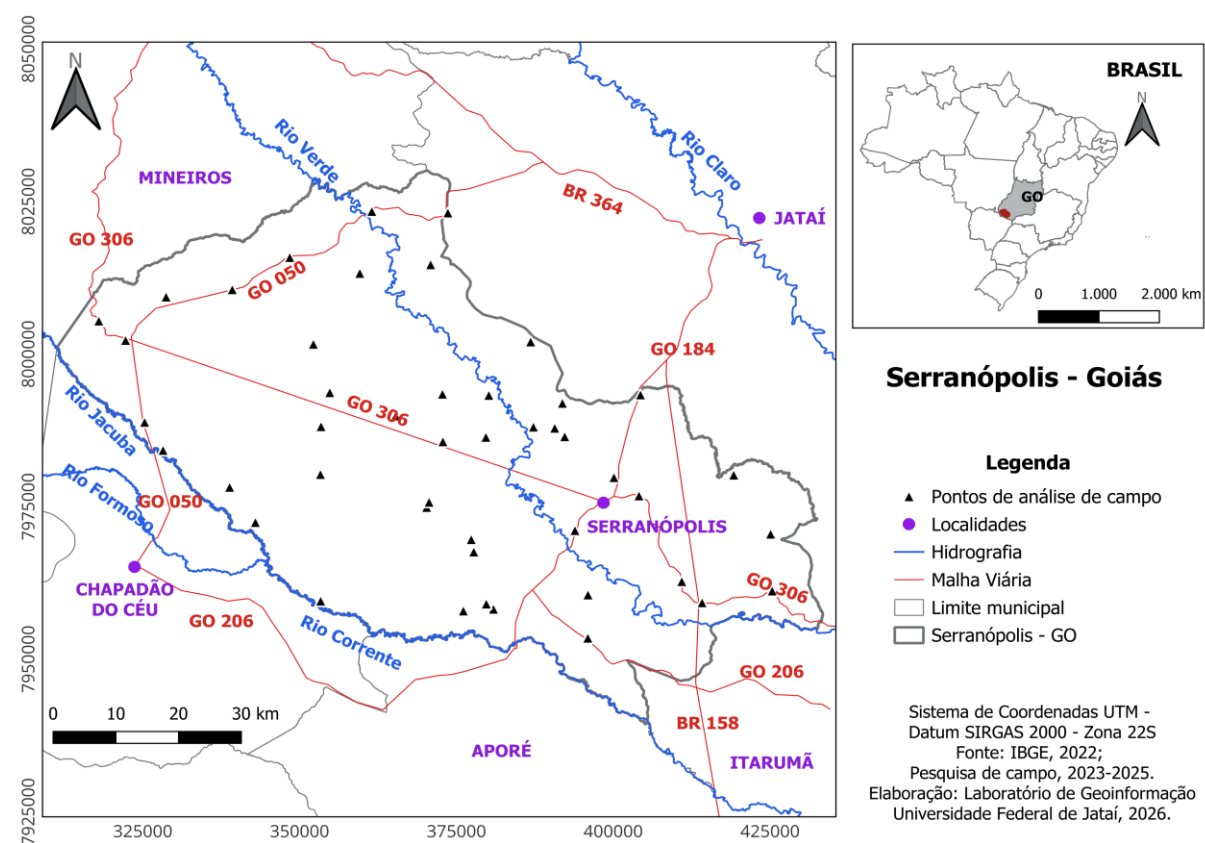


Figura 1 – Localização da área de estudo. Fonte: Autoria própria (2026).

Entre os anos de 2023 e 2025, foram realizadas diversas atividades de campo para validação dos mapas de uso da terra, potencial biofísico da vegetação, potencial geoambiental e índice de serviços ambientais, incluindo coleta de amostras de solos em diferentes paisagens para análise laboratorial. No município de Serranópolis foram visitados 225 pontos para registro fotográfico e análise de eficácia temática do mapeamento, sendo que em 48 foram coletadas amostras de solo para análise física, de fertilidade e de estoque de carbono (pontos identificados com triângulos pretos no mapa da Figura 1). Estas informações devem integrar artigos posteriores do grupo de pesquisa.

2.2. Síntese metodológica de referência

A literatura recente sobre mensuração espacial de serviços ambientais evidencia a consolidação de diferentes grupos metodológicos, que variam entre abordagens empíricas baseadas em indicadores biofísicos, modelos processuais, estruturas de oferta e demanda e técnicas de síntese estatística por meio de pacotes de serviços. Cada uma dessas vertentes apresenta contribuições relevantes, bem como limitações operacionais e conceituais que motivaram o desenvolvimento do modelo proposto neste estudo (Quadro 1).

Entre os métodos empíricos baseados em sensoriamento remoto, destaca-se o *Ecosystem Service Provision Index* (ESPI), proposto por Jullian et al. (2021), que utiliza o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) como indicador genérico da oferta de serviços ecossistêmicos. O estudo aponta a limitação recorrente de superestimação do potencial ecológico em áreas agrícolas intensivas, nas quais o vigor espectral não necessariamente reflete a conservação dos processos ecossistêmicos.

Outra vertente amplamente difundida é representada por modelos processuais, como o InVEST, desenvolvido pelo *Natural Capital Project*, que simula serviços específicos relacionados ao carbono, à hidrologia, à erosão e à qualidade de habitat. Esses modelos

apresentam forte fundamentação ecológica e ampla aplicação internacional, porém demandam grande volume de dados de entrada, parametrizações regionais e complexidade operacional.

Quadro 1 – Síntese de referências para a elaboração do modelo.

Referência	Método central	Categoria metodológica	Serviços foco	Principais variáveis	Limitações apontadas
Jullian, C.; Nahuelhual, L.; Larterra, P. (2021).	ESPI baseado em NDVI	Indicadores biofísicos	Regulação (oferta geral)	NDVI, uso da terra	Pode superestimar áreas agrícolas vigorosas
Meacham, M. et al. (2022).	Revisão conceitual e metodológica de pacotes de serviços	Pacotes de serviços (estrutura conceitual)	Multisserviços	Conjuntos de indicadores	Abordagem sintética, pouco operacional
Reader, M. O. et al. (2024).	Análise empírica de pacotes de serviços	Pacotes de serviços	Regulação/ suporte	Indicadores biofísicos e socioecológicos	Exige modelagem estatística
Li, H. et al. (2024).	Compensações e sinergias via pacotes de serviços	Oferta-Demanda / Pacotes de serviços	Regulação/ suporte	Sensoriamento remoto + uso da terra	Alta complexidade analítica
Natural Capital Project (2023).	Modelagem processual de múltiplos serviços	Orientado a modelos	Carbono, água, erosão, habitat	LULC, indicadores biofísicos, dados climáticos	Requer parametrização e calibração regional

Fonte: Autoria própria (2026).

Abordagens baseadas em pacotes de serviços ecossistêmicos vêm sendo utilizadas para identificar padrões recorrentes de sinergias e compensações entre múltiplos serviços. Estudos como os de Meacham et al. (2022) e Reader et al. (2024) demonstram que conjuntos consistentes de serviços emergem em diferentes sistemas socioecológicos, oferecendo importantes sínteses para o planejamento territorial. No entanto, tais métodos dependem fortemente de técnicas estatísticas multivariadas, o que pode dificultar sua interpretação operacional por gestores públicos. Estudos aplicados, como o de Li et al. (2024), também evidenciam como as compensações espaciais podem ser mapeadas por meio de integração entre sensoriamento remoto e agrupamentos de serviços. Ainda assim, essas abordagens nem sempre representam diretamente o funcionamento biofísico intrínseco dos ecossistemas.

Diante desse panorama, observa-se um predomínio de modelos simplificados, centrados apenas em indicadores espectrais, e abordagens altamente complexas, baseadas em simulações ecológicas e análises estatísticas. A proposta do ISA-CERRADO busca ocupar uma posição intermediária, integrando explicitamente o funcionamento biofísico da vegetação, a modulação conservacionista do uso da terra e a fragilidade geoambiental em uma equação empírica simples, replicável e orientada à aplicação em escala municipal.

2.3. Proposta Metodológica do Índice de Serviços Ambientais do Cerrado

O modelo foi concebido para operar exclusivamente com bases públicas de dados geoespaciais, de modo a garantir ampla replicabilidade, baixo custo de implementação e aplicabilidade por analistas ambientais de diferentes formações técnicas. Todas as bases são públicas e acessíveis via *Google Earth Engine* (Quadro 2).

Quadro 2 – Variáveis de entrada do modelo ISA-Cerrado.

Grupo	Variável	Fonte	Resolução	Finalidade no modelo
Biofísica da vegetação	NDVI	Landsat 8/9	30 m	Vigor vegetativo e produtividade primária
Biofísica da vegetação	EVI	Landsat 8/9	30 m	Estrutura do dossel e cobertura vegetal
Biofísica da vegetação	NDWI	Landsat 8/9	30 m	Condição hídrica da vegetação e umidade do solo
Biofísica derivada	fAPAR (indicador)	Derivado NDVI	30 m	Absorção de radiação fotossinteticamente ativa
Biofísica derivada	fCOVER (indicador)	Derivado EVI	30 m	Fração de cobertura vegetal
Biofísica derivada	LAI (indicador)	Derivado EVI	30 m	Estrutura foliar
Biofísica derivada	CO ₂ flux (indicador)	NDVI × NDWI	30 m	Potencial de armazenamento de carbono na vegetação
Uso da terra	Classes	MapBiomias Coleção 10	30 m	Modulação conservacionista
Relevo	Declividade	SRTM	30 m	Suscetibilidade erosiva
Solo	Percentual de areia	MapBiomias Solo	30 m	Fragilidade edáfica
Topografia	Indicador de fundo de vale	SRTM derivado	30 m	Sensibilidade hidrológica

Fonte: Autoria própria (2026).

Do ponto de vista cartográfico, a metodologia foi estruturada para operar em resolução espacial de até 30 metros, compatível com escalas de análise em torno de 1:100.000, adequadas ao planejamento ambiental municipal e regional. O enfoque empírico permite integrar variáveis biofísicas observadas por sensoriamento remoto, atributos territoriais e indicadores de fragilidade geoambiental em uma equação simples e de interpretação direta para fins de gestão pública.

A lógica central da proposta parte do pressuposto de que o potencial de prestação de serviços ambientais decorre da interação entre o funcionamento biofísico da vegetação, o grau de conservação do uso e cobertura da terra e a sensibilidade ambiental da paisagem, sendo insuficiente a análise isolada de qualquer desses componentes. A metodologia foi organizada em quatro etapas principais, culminando no cálculo do Índice de Serviços Ambientais do Cerrado (ISA-Cerrado).

2.3.1. Etapa 1 – Potencial Biofísico da Vegetação (PBV)

O PBV representa o funcionamento ecológico da vegetação, sendo calculado por meio da combinação ponderada de indicadores biofísicos derivados do sensoriamento remoto: fAPAR (indicador de absorção de radiação pela vegetação); fCOVER (indicador de cobertura vegetal); LAI (indicador estrutural da vegetação); CO₂ flux (indicador adimensional de potencial relativo de absorção de carbono pela vegetação). O PBV é expresso por:

$$PBV = 0,35*fAPAR + 0,25*LAI + 0,15*fCOVER + 0,25*CO_2 \text{ flux}$$

Todos os índices foram normalizados para a escala 0–1, e os pesos foram atribuídos com uso de matriz AHP (SAATY, 1980), entendendo que o fAPAR seja o índice mais dominante na equação. Essa etapa assegura o protagonismo do funcionamento biofísico dos ecossistemas na avaliação dos serviços ambientais, mas se avaliado sozinho, ampliará a discrepância das áreas agrícolas.

2.3.2. Etapa 2 – Modulação conservacionista do uso da terra (LUT)

A variável LUT corresponde à reclassificação das classes de uso e cobertura da terra do MapBiomas em pesos conservacionistas, refletindo o grau de naturalidade e sensibilidade ambiental das fitofisionomias do Cerrado. Foram atribuídos pesos mais elevados às formações florestais, áreas úmidas e corpos hídricos (3,0); valores intermediários às formações savânicas e campestres (2,5), considerando o efeito da sazonalidade; e pesos reduzidos às áreas agropecuárias (1,0), silvicultura (1,5), cana-de-açúcar (1,5) e usos antrópicos em geral (1,0). Essa etapa corrige a superestimação comum em índices puramente vegetacionais, penalizando áreas com alto vigor espectral, porém de baixo valor ecológico como as monoculturas.

2.3.3. Etapa 3 – Potencial Geoambiental (PGA)

O Potencial Geoambiental (PGA) foi estruturado para representar a sensibilidade físico-ambiental da paisagem, fundamentado no princípio da fragilidade ambiental (ROSS, 1994) como fator de amplificação do índice final. Para isso, inicialmente foi calculado um índice sintético de fragilidade (FRAG), derivado da integração de três indicadores geoambientais obtidos em bases públicas, todas em resolução de 30 m: (i) declividade do terreno (DEC); (ii) textura do solo, representada pelo percentual de areia (AREIA); e (iii) posição topográfica relativa, empregada como indicador de fundos de vale/ambientes de convergência de fluxo (VALE).

A declividade foi obtida a partir de um modelo digital de elevação (SRTM/30 m), convertida para graus e recortada para a área de estudo. O percentual de areia foi extraído da base pública de atributos do solo (MAPBIOMAS, 2023) e reamostrado/compatibilizado para 30 m. A posição topográfica relativa foi derivada do MDE por métrica de convergência/baixio local (indicador de fundo de vale), de forma a destacar áreas com maior tendência à saturação hídrica e acumulação de fluxo superficial/subsuperficial.

Para tornar as variáveis comparáveis e reduzir efeitos de escala, cada indicador foi padronizado para o intervalo 0–1 (min–max) e posteriormente convertido em pontuações ordinais (1–5), representando classes crescentes de fragilidade. A lógica de reclassificação seguiu a interpretação geomorfológica clássica: maior declividade implica maior suscetibilidade erosiva; maior teor de areia implica maior erodibilidade/instabilidade estrutural; e maior proximidade/condição de fundo de vale indica maior sensibilidade hidrológica e geoambiental.

O FRAG foi calculado como média ponderada dos escores das três variáveis, atribuindo-se maior peso à declividade por sua relação direta com processos erosivos e dinâmica morfogenética, peso intermediário ao teor de areia e peso complementar ao indicador de fundo de vale.

$$\text{FRAG} = 0,40 \cdot \text{DEC} + 0,35 \cdot \text{AREIA} + 0,25 \cdot \text{VALE}$$

O PGA foi definido como um fator multiplicativo não redutor, de forma que a fragilidade ambiental amplifique o potencial de serviços ambientais em áreas sensíveis, sem anular o papel do PBV e do LUT.

$$\text{PGA} = 1 + k \cdot \text{FRAG}$$

O fator k tem como finalidade modular a influência da fragilidade sobre o índice final de serviços ambientais, atuando como fator amplificador das áreas mais sensíveis da paisagem. Sua definição buscou equilibrar dois princípios metodológicos centrais: (i) assegurar que a fragilidade do ambiente exercesse papel efetivo na hierarquização conservacionista das áreas; e (ii) evitar distorções excessivas que suprimissem a contribuição do funcionamento biofísico da vegetação e do uso da terra.

A determinação do coeficiente k foi realizada por meio de análises exploratórias e testes de sensibilidade, nos quais diferentes valores ($k = 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$ e $1,2$) foram aplicados ao modelo, avaliando-se os efeitos sobre a distribuição espacial do ISA-Cerrado e sobre a hierarquização das áreas prioritárias. Os valores mais elevados de k ($\geq 1,0$) produziram amplificações excessivas, reduzindo a discriminação espacial entre classes de uso da terra e superponderando a fragilidade em detrimento da dinâmica biofísica da vegetação. Por outro lado, valores muito baixos ($\leq 0,4$) resultaram em influência marginal do PGA, limitando sua capacidade de diferenciar áreas prioritárias sob a ótica conservacionista. O valor $k = 0,8$ foi adotado por representar o melhor compromisso entre sensibilidade ambiental e estabilidade do índice, promovendo uma amplificação moderada, da ordem de até 80% nos ambientes de maior fragilidade, sem descaracterizar a contribuição das demais variáveis do modelo.

2.3.4. Etapa 4 – Cálculo do ISA-CERRADO

O índice final é obtido por:

$$\text{ISA-CERRADO} = (\text{PBV} \times \text{LUT}) \times \text{PGA}$$

Onde o PBV corresponde ao potencial biofísico da vegetação, o LUT à modulação conservacionista realizada sobre o mapeamento de uso da terra, e o PGA ao potencial geoambiental. Essa estrutura garante que se sobressaiam na paisagem as áreas com elevado funcionamento biofísico, mas com maior grau de conservação como formações florestais, savânicas e campestres (RIBEIRO; WALTER, 1998) e áreas úmidas, além de reforçar as áreas com maior sensibilidade ambiental, como declividades mais acentuadas, fundos de vale e solos arenosos. Assim, destacam-se as áreas com maior potencial de prestação de serviços ambientais, que devem ser incluídas em planos e políticas de conservação e/ou recuperação do Cerrado.

Todo o processamento espacial foi realizado na plataforma *Google Earth Engine* (GOOGLE, 2023), que permite o acesso direto às bases públicas de sensoriamento remoto, uso da terra e dados ambientais, bem como o processamento em nuvem de grandes volumes de dados. Os scripts foram desenvolvidos com apoio de inteligência artificial generativa (ChatGPT) para estruturação, depuração e otimização de rotinas (OPENAI, 2023).

Foram desenvolvidos scripts específicos para: composição sazonal de imagens Landsat (período úmido e seco); cálculo dos índices biofísicos e do PBV (período úmido e seco); reclassificação do uso da terra para o fator LUT; geração do PGA a partir de variáveis geoambientais; e integração final no cálculo do ISA-Cerrado. Considera-se aqui como composição sazonal do período úmido, imagens obtidas entre os meses de novembro de 2022 e abril de 2023 do sensor OLI/Landsat8/9, com resolução temporal de 8 dias a partir da alternância dos satélites. No Cerrado, considera-se como período úmido a janela entre os meses de outubro e abril, com início de reposição de água no solo e diminuição de déficits hídricos a partir de novembro. Para o período seco foram consideradas composições entre os meses de maio e outubro de 2023, considerando ser este o ano das informações fornecidas pela plataforma MapBiomas, com as mesmas configurações do período úmido para cálculo dos índices.

A metodologia foi aplicada como estudo amostral no município de Serranópolis (GO), permitindo a geração de mapas sazonais e anuais do potencial de prestação de serviços ambientais em resolução de 30 m. Todos os scripts para uso no *Google Earth Engine* podem ser acessados gratuitamente neste link: [Scripts-ISA-CERRADO](#)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme apresentado na Figura 2, os usos da terra dominantes no município ainda são as pastagens, com grande variabilidade entre pastagens de baixa qualidade, de boa qualidade e sombreadas (associadas a fitofisionomias de Cerrado), conforme Soares e Martins (2025). Com base nas informações da plataforma Mapbiomas, em 2023, Serranópolis apresentava 44,66% do seu território recoberto por pastagens, associadas a 9,74% enquadrados como mosaico de usos, onde as pastagens aparecem associadas a outras práticas agropecuárias. As áreas agrícolas correspondem a 12,07% do território, representadas por grãos/lavouras temporárias (8,79%) e cana-de-açúcar (3,28%), além de atividades silviculturais, especialmente cultivos de eucalipto, que representam 0,65% do território. Esta base foi utilizada para composição do fator LUT, onde considera-se o potencial de proteção que o uso da terra fornece aos ambientes.

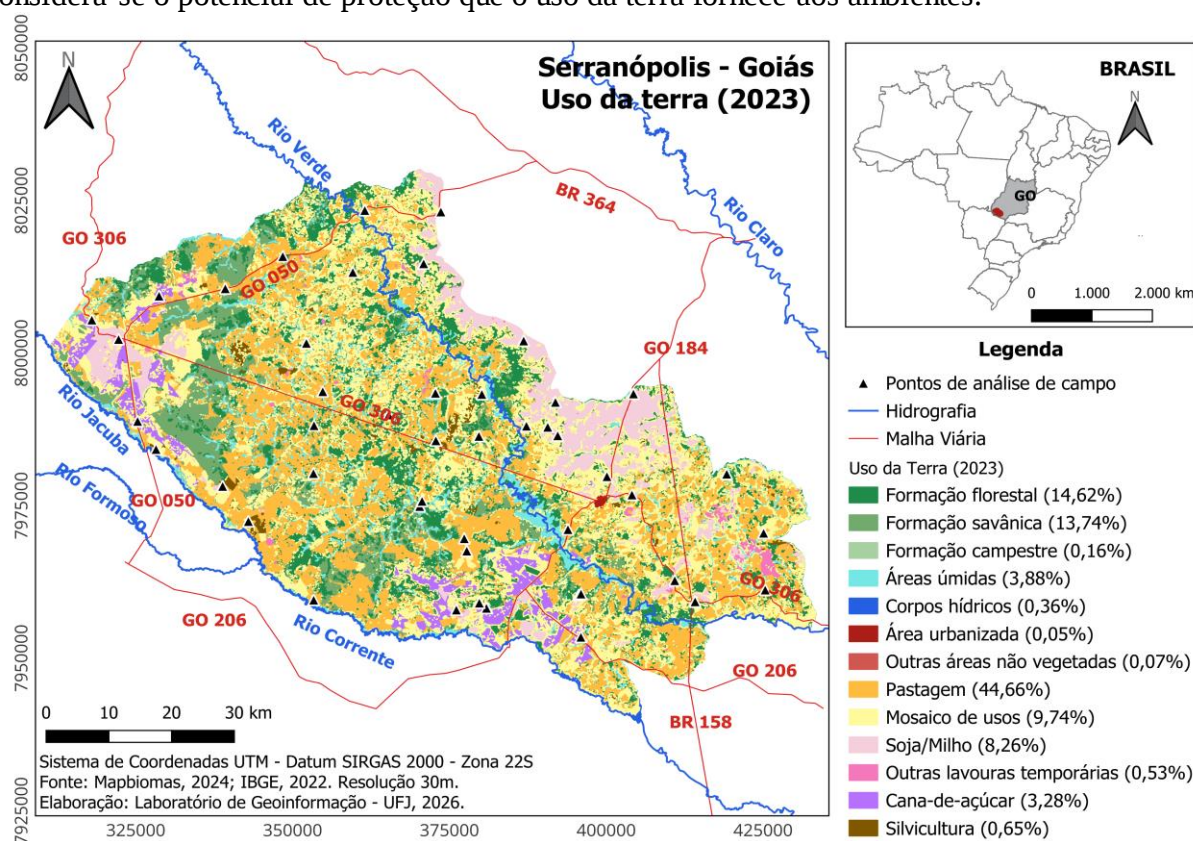


Figura 2 – Uso da terra e cobertura vegetal no município de Serranópolis – GO (2023). Fonte: Autoria própria (2026).

Um dos diferenciais do município reside no percentual de áreas ainda conservadas do Cerrado, representadas por Formações Florestais (14,62%), Formações Savânicas (13,74%), Formações Campestres (0,16%), Áreas Úmidas (3,88%) e Corpos Hídricos (0,36%), que somam 1.811,9 km² e representam um dos maiores quantitativos entre os municípios da região. Este número significativo de remanescentes de vegetação está associado a solos muito arenosos e relevo suave ondulado a ondulado, que dificultam a ocupação das terras por práticas agrícolas. Destaca-se, ainda, que o grande percentual de pastagens degradadas representa áreas potenciais para recuperação do Cerrado, tornando o município um importante prestador de serviços ambientais ao Estado de Goiás.

Quando comparado ao uso da terra, o mapa síntese do potencial biofísico da vegetação (PBV) anual demonstra valores coincidentes com áreas de formações florestais, savânicas e áreas úmidas nos dois quintis superiores, reforçando o potencial da vegetação do Cerrado para a proteção do ambiente e armazenamento do carbono atmosférico (Figura 3, Tabela 1), além de

valores significativos sobre áreas agrícolas, dentro do terceiro e do quarto quintil, o que é comum considerando os altos índices vegetativos apresentados por estes cultivos durante o período chuvoso.

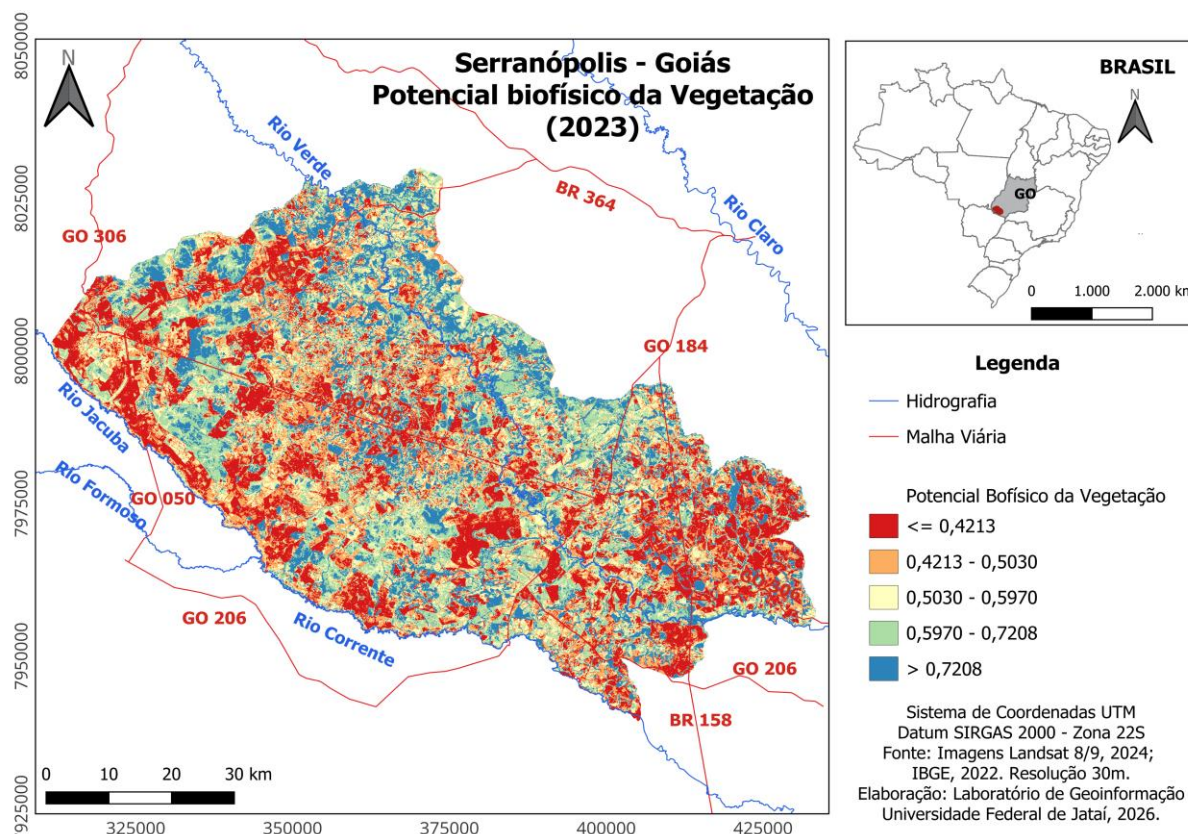


Figura 3 – Potencial Biofísico da Vegetação no município de Serranópolis – GO (2023). Fonte: Autoria própria (2026).

Tabela 1 – Valores médios do Potencial Biofísico da Vegetação – 2023.

Uso da Terra	PBV	PBV	PBV
	Maio a Outubro	Novembro a abril	Anual
Formação florestal	0,738	0,837	0,776
Formação savânica	0,604	0,721	0,651
Formação campestre	0,385	0,475	0,422
Áreas úmidas	0,580	0,624	0,606
Corpos hídricos	0,196	0,254	0,208
Áreas urbanizadas	0,248	0,326	0,277
Outras áreas não vegetadas	0,283	0,334	0,304
Pastagens	0,385	0,535	0,438
Mosaico de usos	0,531	0,622	0,570
Soja/ Milho	0,432	0,555	0,558
Outras lavouras temporárias	0,422	0,498	0,451
Cana-de-açúcar	0,467	0,585	0,522
Silvicultura	0,538	0,592	0,557

Fonte: Autoria própria (2026).

Já as menores médias coincidem com áreas com vegetação menos densa, sobretudo em pastagens de baixa qualidade, nos dois quintis inferiores. Todos os mapas foram classificados pela técnica de quantis, considerando que cada classe representa 20% dos valores obtidos (5 quintis). Na tabela 1, é apresentada a síntese de valores médios dos índices PBV, considerando

período seco, chuvoso e anual, visto que a análise sazonal é uma condição fundamental para compreender as dinâmicas ambientais no Cerrado.

Um dos principais diferenciais do ISA-CERRADO em relação a outras metodologias, está na adoção do índice PGA (Potencial Geoambiental), que confere caráter conservacionista à metodologia, elevando o índice em áreas com maior fragilidade, como solos arenosos, fundos de vale e relevos mais declivosos. Conforme pode ser observado na Figura 4, as áreas com valores mais baixos coincidem com áreas de relevo plano ou suave ondulado, ocupadas por cultivos de grãos e cana-de-açúcar. Já as áreas com potencial geoambiental mais elevado coincidem com fundos de vale, áreas de relevo suave ondulado e ondulado, além das regiões recobertas com latossolos arenosos e neossolos quartzarênicos, com teores de areia superiores a 80%, em zona de erosão recuante (LATRUBESSE; CARVALHO, 2006).

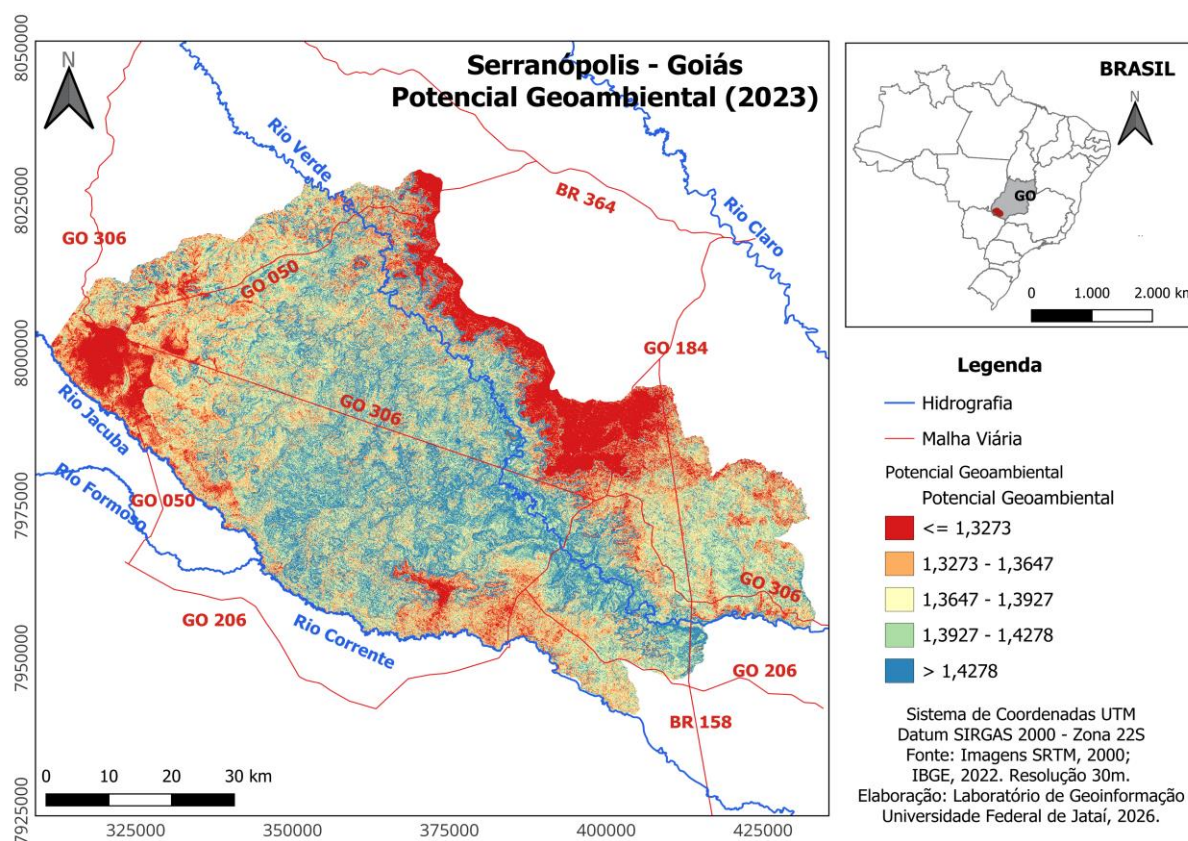


Figura 4 – Potencial Geoambiental no município de Serranópolis – GO (2023). Fonte: Autoria própria (2026).

Após a multiplicação dos fatores apresentados para o cálculo do índice ISA-CERRADO, chega-se ao mapa de Áreas Potenciais para Prestação de Serviços Ambientais no município de Serranópolis (Figura 5 e Tabela 2), onde os índices delimitados no primeiro, segundo e terceiro quintis (inferiores a 0,9) correspondem a áreas densamente ocupadas por atividades agropecuárias, relevos planos a suave ondulados e com maior nível de degradação, correspondendo ao que foi observado em trabalhos de campo realizados entre os anos de 2023 e 2025 no âmbito do projeto “Desenvolvimento de Índices de Serviços Ambientais das Paisagens do Cerrado Goiano visando a sustentabilidade dos sistemas agropecuários e a conservação dos recursos naturais”, com financiamento FAPEG (Figura 6).

As áreas delimitadas no quarto quintil, com valores entre 0,90 e 2,49 correspondem a superfícies de relevo suave ondulado a ondulado, caracterizadas por solos muito arenosos e coberturas savânicas, campestres, ou pastagens de baixa qualidade associadas a feições de Cerrado. Também foram incluídas nestas classes as áreas de cultivo de cana-de-açúcar, considerando o ciclo mais longo da cultura e potencial de cobertura do solo, e silvicultura, pelo

porte da vegetação. Considera-se que, além do alto potencial para prestação de serviços ambientais, também constituem áreas prioritárias para conservação e recuperação do Cerrado por apresentarem grandes riscos de conversão em atividades agropecuárias mais intensivas.

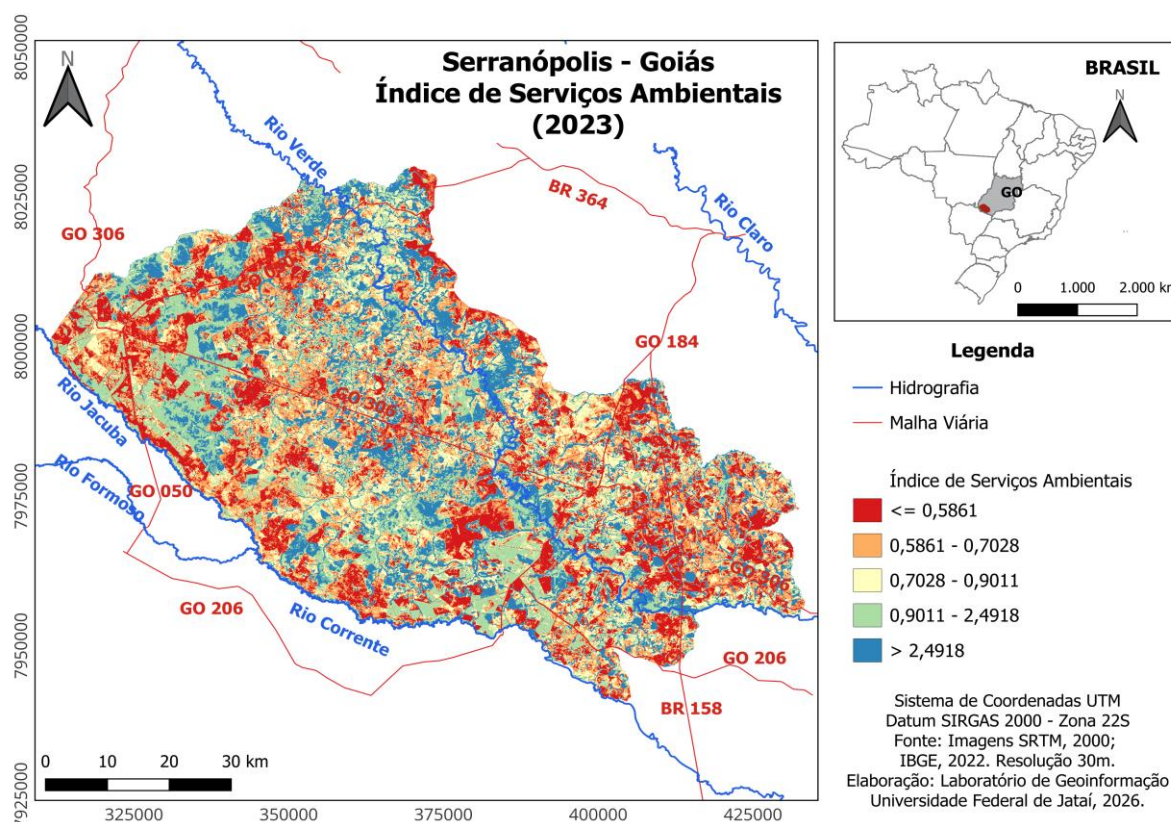


Figura 5– Espacialização das áreas potenciais para Prestação de Serviços Ambientais no município de Serranópolis – GO (2023). Fonte: Autoria própria (2026).

Tabela 2 – Valores médios do Índice de Serviços Ambientais calculado para os diferentes usos da terra no município de Serranópolis – 2023.

Uso da Terra	ISA-CERRADO Maio a Outubro	ISA-CERRADO Novembro a abril	ISA-CERRADO Anual
Formação florestal	3,11	3,52	3,31
Formação savânica	2,11	2,52	2,31
Formação campestre	1,38	1,70	1,54
Áreas úmidas	2,42	2,60	2,51
Corpos hídricos	2,11	2,31	2,21
Áreas urbanizadas	0,34	0,44	0,39
Outras áreas não vegetadas	0,38	0,45	0,42
Pastagens	0,54	0,75	0,64
Mosaico de usos	0,74	0,86	0,80
Soja/ Milho	0,56	0,71	0,63
Outras lavouras temporárias	0,57	0,70	0,64
Cana-de-açúcar	0,94	1,18	1,06
Silvicultura	1,12	1,23	1,18

Fonte: Autoria própria (2026).

Já as áreas classificadas no quinto quintil, com índices superiores a 2,49, coincidem com formações florestais, áreas úmidas e fundos de vale relativamente bem conservados, como todo o vale do Rio Verde, prioritárias para conservação. No mosaico de fotos da Figura 6 é possível observar diferentes paisagens do município de Serranópolis, classificadas de acordo com os 05 quintis de índices de serviços ambientais apresentados no mapa da Figura 5.



Quintil 1, ISA $< 0,5861$ – Área de pastagem degradada em neossolo quartzarênico e relevo suave ondulado.



Quintil 2, ISA de 0,5861 a 0,7028 – Área cultivada com milho em latossolo vermelho, e relevo plano e suave.



Quintil 3, ISA de 0,7028 a 0,9011 – Área cultivada com soja e irrigada por pivô central em latossolo vermelho textura média e relevo plano.



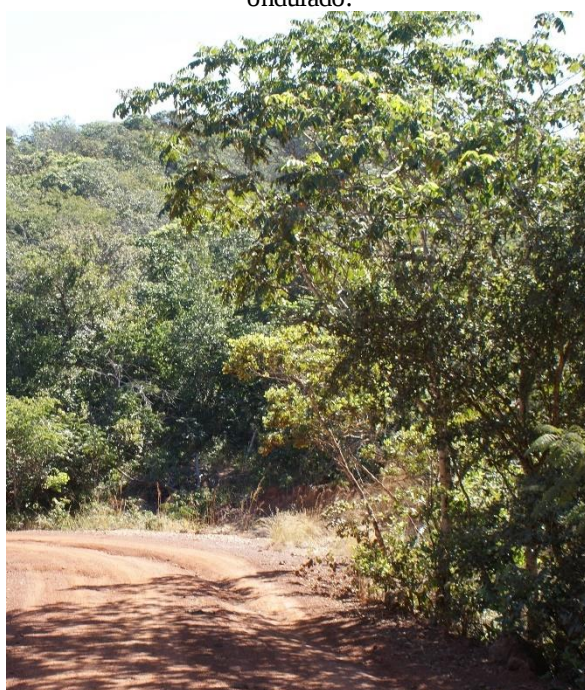
Quintil 4, ISA de 0,9011 a 2,4918 – Área cultivada com cana-de-açúcar em neossolo quartzarênico e relevo suave ondulado.



Quartil 4, ISA de 0,9011 a 2,4918 – Área de Silvicultura em neossolo quartzarênico, relevo suave ondulado.



Quartil 4, ISA de 0,9011 a 2,4918 – Área de Cerrado Stricto Sensu em neossolo quartzarênico, relevo suave ondulado.



Quartil 5, ISA > 2,4918 – Área de Formação Florestal em neossolo litólico, relevo estrutural.



Quartil 5, ISA > 2,4918 – Área úmida em plintossolo argilúvico, relevo plano.

Figura 6 – Validação de campo das áreas potenciais para Prestação de Serviços Ambientais no município de Serranópolis – GO (2023). Fonte: Autoria própria (2026).

Ao todo, são aproximadamente 1.000km² (18,5% do município) com alto potencial para prestação de serviços ambientais, que podem ser inseridas em programas como o PSA Cerrado em Pé, lançado pela SEMAD/Goiás e que só em 2025 investiu R\$ 8.265.944,28 para a conservação de quase 16 mil hectares no estado (GOIÁS, 2026). Se considerarmos o valor de

2,0 como limiar para as classes com maior potencial de prestação de serviços ambientais, estas áreas expandiriam para 32% da área total do município, ampliando as possibilidades de geração de renda com a conservação do Cerrado.

Os padrões espaciais obtidos pelo ISA-CERRADO apresentam consistência quando comparados às principais abordagens empíricas e processuais consolidadas na literatura de serviços ecossistêmicos. O comportamento do Potencial Biofísico da Vegetação (PBV), com maiores valores associados às formações florestais, savânicas e áreas úmidas, é consistente com resultados obtidos por índices baseados em indicadores biofísicos como o *Ecosystem Service Provision Index* (ESPI), proposto por Jullian, Nahuelhual e Laterra (2021), que demonstraram a forte relação entre vigor da vegetação e oferta potencial de serviços de regulação. Da mesma forma, estudos baseados em sensoriamento remoto têm evidenciado que indicadores espectrais, quando combinados com variáveis ambientais, são capazes de representar espacialmente a provisão de serviços ecossistêmicos (DEL RÍO-MENA et al., 2020).

Entretanto, assim como apontado nesses trabalhos, observa-se que áreas agrícolas intensivas frequentemente apresentam elevados valores espectrais, o que pode levar à superestimação do potencial ecológico quando se utilizam exclusivamente índices vegetacionais. O ISA-CERRADO avança metodologicamente ao incorporar explicitamente a modulação conservacionista do uso da terra (LUT), penalizando usos antrópicos intensivos e reforçando formações naturais, o que corrige esse viés recorrente nas abordagens puramente biofísicas.

Quando comparado aos modelos processuais amplamente empregados para simulação de serviços específicos, como InVEST (NATURAL CAPITAL PROJECT, 2023), CASA (POTTER et al., 1993) e SWAT (ARNOLD et al., 1998), o ISA-CERRADO apresenta padrões espaciais compatíveis na identificação de áreas de maior relevância ecológica, especialmente fundos de vale, áreas úmidas e remanescentes florestais.

Em relação às abordagens matriciais baseadas no potencial natural dos ecossistemas, como as propostas por Burkhard et al. (2012), o ISA-CERRADO substitui atribuições genéricas por indicadores biofísicos observados em alta resolução espacial, ampliando a sensibilidade à heterogeneidade ambiental intra-paisagem. Já quando comparado às metodologias de síntese estatística por meio de pacotes de serviços ambientais, que buscam identificar padrões de sinergias e compensações (MEACHAM et al., 2022), o modelo proposto prioriza a mensuração direta do potencial funcional da paisagem, oferecendo maior clareza operacional para aplicação em políticas públicas.

A incorporação do Potencial Geoambiental (PGA) constitui um dos principais diferenciais do ISA-CERRADO, aproximando-o das tradições da análise ecodinâmica e dos estudos de fragilidade ambiental ao amplificar áreas mais sensíveis da paisagem, como solos arenosos, fundos de vale e relevos declivosos. Esse componente, ausente na maioria dos índices empíricos contemporâneos, revelou padrões espacialmente consistentes com zonas críticas de conservação e recuperação ambiental.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo empírico conservacionista proposto demonstrou consistência espacial e coerência ecológica na mensuração do potencial de prestação de serviços ambientais de regulação e suporte no Cerrado. A integração entre funcionamento biofísico da vegetação, modulação do uso e cobertura da terra e sensibilidade geoambiental resultou em um índice capaz de discriminar áreas prioritárias para conservação e restauração, com resolução compatível ao planejamento territorial.

Do ponto de vista metodológico, o ISA-Cerrado posiciona-se entre abordagens puramente espectrais e modelos processuais de alta complexidade. Ao corrigir a superestimação recorrente de áreas agrícolas intensivas, frequentemente observada em índices baseados exclusivamente em vigor vegetativo, e incorporar explicitamente a fragilidade do ambiente

como fator amplificador, o modelo amplia o potencial interpretativo sem comprometer a simplicidade operacional. A utilização exclusiva de bases públicas e processamento em ambiente de computação em nuvem reforça sua replicabilidade em diferentes municípios do Cerrado.

Para além da contribuição acadêmica, o índice apresenta relevância estratégica para a gestão pública local. Ao identificar espacialmente áreas com maior potencial de prestação de serviços ambientais, o ISA-CERRADO pode subsidiar programas de pagamento por serviços ambientais, políticas de incentivo à conservação, zoneamentos ecológico-econômicos e iniciativas relacionadas a créditos de carbono e compensações ambientais. Nesse sentido, a ferramenta contribui para que municípios transformem a conservação do Cerrado em oportunidade concreta de geração de renda, fortalecendo economias locais a partir de ativos ambientais.

O caráter empírico do modelo impõe limitações associadas ao uso de indicadores biofísicos, à definição de pesos e à ausência de calibração direta com dados de campo específicos para cada serviço ambiental. A componente de fragilidade do ambiente, embora funcional, pode ser aprimorada mediante incorporação de variáveis hidrológicas, climáticas e pedológicas mais refinadas, bem como por meio de análises multitemporais de maior abrangência.

Por fim, salienta-se que esta não é uma proposta finalizada. O objetivo de publicá-la, neste estágio, é permitir que outros pesquisadores apresentem novas críticas e contribuições, propondo ajuste, exclusão ou acréscimo de variáveis. Atualmente, encontram-se em desenvolvimento na Universidade Federal de Jataí duas teses de doutorado e um projeto de pesquisa multidisciplinar visando o refinamento do ISA-CERRADO, sobretudo para aplicação em escalas superiores a 1:50.000, bacias hidrográficas e áreas densamente urbanizadas, que exigem um esforço maior de levantamento de dados em campo e validação dos resultados. Assim, pretende-se que o ISA-Cerrado constitua uma base metodológica sólida para avaliação territorial de serviços ambientais em paisagens savânicas tropicais, contribuindo simultaneamente para o avanço científico e para a consolidação de estratégias de desenvolvimento territorial orientadas pela conservação.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi financiada com recursos da Chamada FAPEG 03/2022, processo 202310267000870 (modalidade de auxílio à pesquisa), e com recursos da bolsa produtividade em pesquisa PQ-C do primeiro autor, processo 303602/2025-2. A segunda autora agradece ao financiamento da CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 (bolsa de doutorado).

REFERÊNCIAS

ARNOLD, J. G. et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 34, n. 1, p. 73–89, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>. Acesso em 30 jan. 2026.

BRASIL. **Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021**. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 14 jan. 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/14119.htm. Acesso em 30 jan. 2026.

BURKHARD, B.; KROLL, F.; NEDKOV, S.; MÜLLER, F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, v. 21, p. 17–29, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.019>. Acesso em 30 jan. 2026.

- COLMAN, C. B. et al. Modeling the Brazilian Cerrado land use change highlights the impact of agricultural expansion on native vegetation loss. **Scientific Reports**, v. 14, 2024. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-55207-1>. Acesso em: 08 mar. 2026.
- DEL RÍO-MENA, T.; WILLEMEN, L.; TEFAMARIAM, G.; BEUKES, O.; NELSON, A. Remote sensing for mapping ecosystem services to support evaluation of ecological restoration interventions in an arid landscape. **Ecological Indicators**, v. 113, 106182, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106182>. Acesso em 30 jan. 2026.
- EMBRAPA. **Serviços ecossistêmicos e ambientais: fundamentos e aplicações no Brasil**. Brasília: Embrapa, 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-servicos-ambientais/sobre-o-tema>. Acesso em 30 jan. 2026.
- FUSHIMI, M. et al. Changes in land use and cover and their environmental impacts in a Cerrado watershed in Brazil. **Sustainability**, v. 16, n. 10, 4266, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/10/4266>. Acesso em: 8 mar. 2026.
- GOIÁS. **Lei nº 23.314, de 31 de março de 2025**. Institui a Política Estadual de Serviços Ambientais e dá outras providências. Goiânia: Casa Civil do Estado de Goiás, 2025. Disponível em: https://legisla.casacivil.go.gov.br/pesquisa_legislacao/110543/lei-23314. Acesso em 30 jan. 2026.
- GOIÁS. **PSA Cerrado em Pé – Programa de Pagamento por Serviços Ambientais de Goiás**. Secretaria do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <https://goias.gov.br/meioambiente/psa-cerrado-em-pe/>. Acesso em: 22 fev. 2026.
- GOOGLE. **Google Earth Engine**: a planetary-scale platform for Earth science data and analysis. Mountain View, CA: Google, 2023. Disponível em: <https://earthengine.google.com/>. Acesso em 30 nov. 2025.
- HAMEL, P.; BRYANT, B. P. Uncertainty assessment in ecosystem services analyses: seven challenges and practical responses. **Ecosystem Services**, v. 24, p. 1–15, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.12.008>. Acesso em: 8 mar. 2026.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas da população residente nos municípios brasileiros – 2025**. Sistema IBGE Cidades. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br>. Acesso em: 22 fev. 2026.
- JULLIAN, C.; NAHUELHUAL, L.; LATERRA, P. (2021). The Ecosystem Service Provision Index as a generic indicator of ecosystem service supply for monitoring conservation targets. **Ecological Indicators**, 121, 107855. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107855>. Acesso em 30 jan. 2026.
- LATRUBESSE, Edgardo Manuel; CARVALHO, Thiago Morato de. **Geomorfologia do Estado de Goiás e Distrito Federal**. Goiânia: Secretaria de Indústria e Comércio do Estado de Goiás; Superintendência de Geologia e Mineração, 2006. 128 p. (Série Geologia e Mineração, n. 2).
- LI, H.; XU, Q.; QIU, H.; DU, J.; XU, Z.; LIU, L.; ZHAO, Z.; ZHU, Z.; HE, Y. Study on ecosystem service trade-offs and synergies in the Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area based on ecosystem service bundles. **Land**, v. 13, n. 12, p. 2086, 2024. DOI:10.3390/land13122086. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/land13122086>. Acesso em 30 jan. 2026.
- MAPBIOMAS – PROJETO DE MAPEAMENTO ANUAL DO USO E COBERTURA DA TERRA NO BRASIL. **Coleção 10 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil**. São Paulo: MapBiomias, 2024. Disponível em: <https://mapbiomas.org>. Acesso em 30 jan. 2026.
- MEACHAM, M. et al. Advancing research on ecosystem service bundles for comparative assessments and synthesis. **Ecosystems and People**, v. 18, n. 1, p. 99–111, 2022. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/26395916.2022.2032356> Acesso em 30 jan. 2026.
- NATURAL CAPITAL PROJECT. **InVEST (Integrated Valuation of Environmental Services and Trade-offs)**. Stanford, CA: Natural Capital Project, 2023. Disponível em: <https://naturalcapitalalliance.stanford.edu/software/invest>. Acesso em 30 jan. 2026.
- OPENAI. **ChatGPT**: large language model for natural language processing and code assistance. San Francisco:

OpenAI, 2023. Disponível em: <https://openai.com/pt-BR/index/chatgpt/>. Acesso em 30 nov. 2025.

POTTER, C. S. et al. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 7, n. 4, p. 811–841, 1993. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/93GB02725>. Acesso em 30 jan. 2026.

READER, M. O.; EPPINGA, M. B.; DE BOER, H. J.; PETCHEY, O. L.; SANTOS, M. J. Consistent ecosystem service bundles emerge across global mountain, island and delta systems. **Ecosystem Services**, v. 66, 101593, 2024. DOI:10.1016/j.ecoser.2023.101593. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2023.101593>. Acesso em 30 jan. 2026.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. Ma. T. **Fitofisionomias do bioma Cerrado**. In: SANO, Sueli Matiko; ALMEIDA, Semíramis Pedrosa de (org.). Cerrado: ambiente e flora. Planaltina: Embrapa-CPAC, 1998. p. 89-166. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/554094>. Acesso em: 8 mar. 2026.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n. 8, p. 63–74, 1994. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47327>. Acesso em 30 jan. 2026.

SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process**: planning, priority setting, resource allocation. New York: McGraw-Hill, 1980.

SCOPEL, I; PEIXINHO, D. M; SOUZA, M. S.; MARIANO, Z. F.; ASSUNÇÃO, H. F. Formação de areais e perspectivas de uso e manejo de Neossolos Quartzarênicos em Serranópolis (GO). **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 25, n. 1, p. 11–27, 2008. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/bgg/article/view/4108>. . Acesso em: 30 jan. 2026.

SOARES, C. B. R.; MARTINS, A. P. Cartografia Ambiental no Sudoeste Goiano. **Geoambiente On-line**, Goiânia, n. 53, 2025. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/geoambiente/article/view/77051>. Acesso em 30 jan. 2026.