

Geotecnologías aplicadas al análisis de la fragilidad ambiental a los procesos erosivos

Edson Rodrigo dos Santos da Silva * Víncler Fernandes Ribeiro de Oliveira + Erivelton Pereira Vick ° César Gustavo da Rocha Lima Δ Vitor Matheus Bacani ◊ Eduardo Salinas Chávez † 

Resumen

Los procesos erosivos tienen graves impactos sobre el ambiente, generando importantes pérdidas económicas, sociales y de biodiversidad. Este trabajo tiene como objetivo analizar la fragilidad ambiental asociada a los procesos erosivos en la cuenca del arroyo La Onça, en Coxim, Mato Grosso do Sul-Brasil. La metodología se sustenta en la cartografía de los suelos, la inclinación de las pendientes, las áreas prioritarias para la conservación de la biodiversidad y la intensidad de la lluvia, con vistas a evaluar la fragilidad potencial que, unida al mapa del uso y cobertura de la tierra por la superposición booleana ponderada, permite obtener la fragilidad ambiental. Para validar este modelo se realizó la identificación de los sitios con erosión, a partir de una imagen de alta resolución y el levantamiento de las áreas llamadas “suelos con exposición extrema” mediante la identificación de áreas que presentan el menor grado de protección del suelo. Los resultados muestran el predominio en la cuenca de las zonas con fragilidad ambiental media (59,61 %) y alta (23,66 %), asociada a una gran concentración de los procesos erosivos en áreas de baja cobertura vegetal, identificadas en el mapa de uso y cobertura de la tierra como áreas de pastos.

Palabras clave: cuenca hidrográfica, degradación ambiental, geoprocesamiento, manejo y conservación del suelo, Mato Grosso do Sul.

Ideas destacadas: artículo de investigación que tiene como premisa el análisis de la fragilidad ambiental asociada a los procesos erosivos dentro de la cuenca del arroyo La Onça (Coxim-MS). Se utilizaron geotecnologías para el análisis sistémico, estableciendo medidas dirigidas a ayudar en la toma de decisiones para el manejo y conservación del área.



RECIBIDO: 16 DE MARZO DE 2020. | EVALUADO: 28 DE OCTUBRE DE 2020. | ACEPTADO: 20 DE SEPTIEMBRE DE 2021.

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO

Silva, Edson Rodrigo dos Santos da; Oliveira, Víncler Fernandes Ribeiro de; Vick, Erivelton Pereira; Lima, César Gustavo da Rocha; Bacani, Vitor Matheus; Salinas Chávez, Eduardo. 2022. “Geotecnologías aplicadas al análisis de la fragilidad ambiental a los procesos erosivos.” *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 31 (1): 222-240. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v31n1.85654>.

- * Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Três Lagoas – Brasil. ✉ edson.r.silva@ufms.br – ORCID: 0000-0001-6655-5269.
+ Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Três Lagoas – Brasil. ✉ vinclerfernandes@hotmail.com – ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0099-0991>.
o Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Três Lagoas – Brasil. ✉ e.vick@hotmail.com – ORCID: 0000-0003-2005-5765.
Δ Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira – Brasil. ✉ cesar.lima@unesp.br – ORCID: 0000-0003-1878-2912.
◊ Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Três Lagoas – Brasil. ✉ vitor.bacani@ufms.br – ORCID: 0000-0002-8650-0780.
† Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Três Lagoas – Brasil. ✉ esalinasc@yahoo.com – ORCID: 0000-0001-5976-0475.
✉ Correspondencia: Edson Rodrigo dos Santos da Silva, Campus Três Lagoas-Av. Ranulpho Marques Leal, Três Lagoas, Mato Grosso do Sul, Brasil.

Geotechnologies Applied to Analysis of Environmental Fragility to Erosive Processes

Abstract

Erosive processes cause severe impacts on the environment, causing economic, social, and biodiversity losses. This paper aims to analyze the fragility of the environment to erosive processes in the Onça river basin, in Coxim-MS. The methodology was based on soil mapping, slope, priority areas for biodiversity conservation, and rainfall intensity to evaluate the potential fragility and land use and land cover, that by means of a boolean weighted overlap with the potential fragility resulted in the mapping of the environmental fragility. To validate the environmental fragility model, the erosive features were identified from a high-resolution image and a making, focusing on the areas named “soils with extreme exposure” from a classification, which had as its only aim to identify areas with the lowest degree of protection/ground cover. The results pointed to the predominance of medium (59.61 %) and high (23.66 %) environmental fragility, associated with high concentrations of erosive processes in “soil with extreme exposure” area, which are areas of low vegetation cover, classified by use. and land cover with the pasture classes.

Keywords: watershed, ambiental degradation, geoprocessing, soil management and conservation, Mato Grosso do Sul.

Main ideas: Research article that has as premise the analysis of environmental fragility to erosive processes within the watershed of the Onça stream (Coxim-MS), using geotechnologies for the systemic analysis of the environment, establishing propositional measures that assist in taking decisions for the management and conservation of the area.

Geotecnologias aplicadas à análise da fragilidade ambiental aos processos erosivos

Resumo

Os processos erosivos ocasionam severos impactos ao ambiente, gerando perdas econômicas, sociais e de biodiversidade. Este trabalho analisa a fragilidade do ambiente a processos erosivos na bacia hidrográfica do córrego da Onça, em Coxim-MS. A metodologia se fundamentou em mapeamentos de solos, declividade, áreas prioritárias à conservação da biodiversidade e na intensidade pluviométrica para avaliar a fragilidade potencial e no mapeamento de uso e cobertura da terra que, por meio de sobreposição booleana ponderada resultou um mapeamento da fragilidade ambiental. Para validar esse modelo, foram identificados, pontualmente, as feições erosivas a partir de uma imagem de alta resolução e também um levantamento, com enfoque nas áreas nominadas de “solos com exposição extrema”, que teve como objetivo a identificação de áreas que apresentam o menor grau de proteção/cobertura do solo. Os resultados apontaram o predomínio de média (59,61 %) e alta (23,66 %), associadas a grandes concentrações de processos erosivos em área de “solo com exposição extrema”, áreas de baixa cobertura vegetal, classificadas no uso e cobertura da terra com as classes de pastagem.

Palavras-chave: bacia hidrográfica, degradação ambiental, geoprocessamento, manejo e conservação do solo, Mato Grosso do Sul.

Ideias destacadas: artigo de investigação que tem como premissa a análise da fragilidade ambiental associada aos processos erosivos na bacia do córrego da Onça (Coxim-MS), empregando-se as geotecnologias para a análise sistêmica do ambiente, estabelecendo medidas propositivas, que auxiliem na tomada de decisões para o manejo e conservação da área.

Introducción

La influencia de la acción antrópica sobre la naturaleza, especialmente en las cuencas de los ríos, ha sido objeto creciente de investigación, con vistas a gestionar su ocupación e, incluso, a evaluar el estado de conservación del territorio. Para esto, es necesario la utilización de herramientas que apoyen la planificación y gestión adecuada de los recursos naturales de manera sostenible, especialmente cuando la discusión se centra en la fragilidad de estos ambientes frente a la degradación del suelo y sus pérdidas por los procesos erosivos.

Con respecto a la degradación de los suelos, el informe denominado *Status of the World's Soil Resources*, elaborado en 2015 por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación —en adelante, FAO— señala que, aproximadamente, el 33 % de los suelos del mundo presentan algún estado de degradación, ya sea por procesos de erosión, salinización, sellado, compactación, acidificación y contaminación, causando esto innumerables pérdidas ambientales, sociales y económicas (FAO 2015). Una conclusión similar fue presentada en el proyecto coordinado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) llamado *Global Assessment of Soil Degradation* (GLASOD), que estimó que la pérdida anual de los suelos agrícolas por los procesos erosivos en todo el mundo alcanza entre 6 y 7 millones de toneladas (Guerra 2005).

Comprender la fragilidad de los ambientes naturales de forma integrada, superando el pensamiento dualista cartesiano, ha sido destacado en diversos enfoques teórico-metodológicos aplicados en la geografía, como son: la concepción sistémica y holística de los paisajes y los geosistemas, que comenzó su desarrollo a fines del siglo XIX y continuo durante todo el siglo XX (Dokuchaev 1948; Troll 1971; Isachenko y Massey 1973; Sotchava 1977; Bertrand 2004; Salinas et ál. 2019); la concepción de la ecodinámica (Tricart 1977; Tricart y Kilian 1982) que unida a los trabajos de estabilidad geomorfológica (Panizza 1973, 1975) sentó las bases en Brasil para los estudios de la fragilidad (Ross 1994, 2012) y vulnerabilidad ambiental (Crepani et ál. 2001), relacionados con los trabajos del *Department of Agriculture, Agricultural Research Service y Soil Conservation Service* de los EE.UU. que culminaron con la propuesta de la *Universal Soil Loss Equation* (Wischmeier y Smith 1978).

Estos enfoques teórico-metodológicos han sido ampliamente difundidos e incorporados en las evaluaciones de impacto ambiental (Conesa 2009), en los trabajos de

degradación de los suelos de la FAO (FAO 1976) y en los estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgos (OEA 1993) que buscan explorar el potencial y las restricciones naturales de un territorio, a partir de un análisis complejo e integrado, destacando que la cuenca hidrográfica se constituye como una excelente unidad de estudio y planificación, ya que presenta propiedades específicas que convergen en la misma.

La cuenca hidrográfica como unidad físico-geográfica presenta características únicas derivadas de las relaciones e interacciones de sus componentes naturales como son: suelos, geología, relieve, vegetación, hidrografía y clima, entre otros, siendo posible, además, evaluar la acción antrópica en esta, mediante el análisis del uso y cobertura de la tierra. Lo que permite, entonces, mediante la representación cartográfica de algunas de dichas características, el análisis ambiental de la cuenca, con vistas a su ordenamiento y planificación ambiental.

En este contexto, las técnicas de geoprosamiento, asociadas con el desarrollo de las ciencias de la información (Camara 2013), permiten una amplia gama de aplicaciones prácticas para el análisis y la comprensión de las potencialidades y restricciones de los territorios, ya sean rural o urbano, natural o artificial, conservado o degradado, dando como resultado una serie de procedimientos metodológicos capaces de evaluar los diferentes ambientes, cada uno de ellos, tomando en cuenta un conjunto de variables diferentes, entre las cuales se puede destacar el análisis de la fragilidad ambiental, originalmente propuesto por Ross (1994, 2012) y adaptado por Cunha et ál. (2013) y Bacani y Luchiarri (2014), y el análisis de la vulnerabilidad ambiental, propuesto por Crepani et ál. (2001).

Aunque muchos investigadores han adoptado esta metodología para determinar la fragilidad ambiental de un territorio, existe aún una falta de trabajos que vinculen las afectaciones observadas por la ocurrencia de los eventos de degradación del suelo, como una forma de validar la cartografía elaborada. En este sentido, siendo el suelo, el componente natural que más sufre los resultados de la explotación inadecuada de sus potenciales naturales y, siendo los procesos erosivos el evento más destacado de la degradación del suelo, el estudio de los sitios con erosión y su correlación espacial con las diferentes clases de fragilidad ambiental obtenidas, puede servir como un indicador importante de la confiabilidad del mapa final elaborado, un hecho que es esencial para que este producto tenga credibilidad y pueda ser utilizado por las instituciones y agentes interesados.

El presente trabajo tiene como objeto de estudio la cuenca hidrográfica del arroyo de La Onça, cuenca que presenta una amplia diversidad físico-geográfica y en la cual la historia de la ocupación humana ha condicionado el desarrollo de importantes procesos erosivos, principalmente, asociados con el predominio de la ganadería como principal actividad económica, que fue el resultado de proyectos impulsados por el gobierno brasileiro, para la ocupación de la sabana brasileña (Bioma Cerrado), como el Polocentro (Abdon 2004). Esta cuenca se caracteriza por una alta diversidad en su geología, relieve y suelos, distribuidos en un ambiente de pendientes irregulares y alta susceptibilidad natural a los procesos erosivos, formando parte integral de la cuenca del Alto Taquari, el mayor proveedor de sedimentos en suspensión para la cuenca sedimentaria del Pantanal (Carvalho 1994; Ministério do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e da Amazonia Legal 1997; Padovani 1998; Oliveira y Calheiro 1998; Assine et ál. 2015).

Se pretende, con este trabajo, analizar la fragilidad ambiental de la cuenca hidrográfica del arroyo La Onça, ubicado en el municipio de Coxim, Mato Grosso do Sul, mediante la adaptación de la metodología elaborada por Ross (1994), incorporando las modificaciones propuestas por diversos autores más recientemente (Crepani et ál. 2001; Cunha et ál. 2013; Bacani y Luchiari 2014), así como validar los resultados obtenidos mediante su comparación con los procesos erosivos que realmente ocurren en la cuenca, que fueron determinados por el análisis de imágenes de satélite y trabajo de campo.

Área de estudio

La cuenca hidrográfica del arroyo La Onça, tiene un área de 593 km² y está situada en el interior del municipio de Coxim (Figura 1). El arroyo de La Onça tiene 54 km de curso, desde sus orígenes en las tierras mesozoicas del Planalto Taquari-Itiquira hasta su desembocadura en la margen izquierda del río Taquari. El arroyo forma parte de la cuenca del río Paraguay y, por lo tanto, de la cuenca del río de la Plata, quinta cuenca hidrográfica más extensa del mundo (Silva 2010). Sus principales afluentes son los arroyos Barreiro y Pedra en la margen derecha, y el arroyo Curizal en la margen izquierda.

Geológicamente la cuenca de este arroyo se desarrolla sobre seis formaciones geológicas, en las cuales predomina la presencia de areniscas de diferentes edades y procesos de formación, las formaciones son: Grupo Caiuá, Formación Botucatu, Aquidauana, Palermo,

Furnas y Ponta Grossa. El Grupo Caiuá se caracteriza por la presencia de areniscas cuarcíticas finas y medias, de baja selección, originarias de un ambiente continental desértico durante el Cretácico Superior (IBGE 2018). La formación Botucatu presenta areniscas medias a finas, de color marrón rojizo con estratificación cruzada de tamaño medio a grande del Jurásico superior (Alvarenga, Brasil y Melo 1982). A su vez, la Formación Aquidauana está constituida por areniscas rojas a rosadas de medianas a gruesas, con estratificación cruzada de tamaño pequeño a medio del Carbonífero Pensilvaniano, en las que también están presentes conglomerados (IBGE 2018). La Formación Palermo presenta areniscas de color gris violáceo del Silurico Cúnguriano, mientras que la Formación Furnas presenta areniscas conglomeráticas con presencia de arcillas y limolitas, constituidas en un ambiente de deposición fluvial relacionado con deltas costeros y ríos entrelazados del Silúrico y el Pérmico (CPRM 2006). La excepción es la Formación Ponta Grossa, compuesta por rocas arcillosas, esquistos y areniscas limosas, formadas a lo largo de la parte baja del periodo Devónico (Figura 2).

Tomando en cuenta las categorías del relieve de la cuenca, según IBGE (2018), esta se puede subdividir en relieves de disección homogénea de cima tabular (Dt) y de cima convexa (Dc), superficies de aplanamiento con Pediplano degradado desnudo (Pgi) y Pediplano retocado desnudo (Pru) y, finalmente, la llanura fluvial (Apf) (véase figura 2c). Según el IBGE (2009), el relieve de disección homogénea se define de acuerdo con la forma de las cimas, la densidad y profundidad de la red de drenaje, en la cual las cimas convexas se caracterizan por presentar valles bien definidos, con pendientes de diferente inclinación, mientras que las cimas tabulares presentan baja densidad de drenaje, valles poco profundos y ligeras pendientes. En líneas generales, la profundidad de la red de drenaje (disección vertical) en la cuenca se puede clasificar de muy débil a débil, con valores que van de 0 a 100 metros (IBGE 2018).

A pesar de que la hipsometría de la cuenca varía entre alturas de 200 a 500 metros (véase figura 2b), los relieves diseccionados se distribuyen entre los 210 y 350 metros de altitud, con las superficies de disección homogénea con cimas convexas (Dc) entre 300 y 350 metros y las superficies con disección homogénea con cimas tabulares (Dt) con alturas más bajas, entre los 210 y 300 metros.

Las superficies de aplanamiento, por otro lado, se caracterizan por ser geomorfológicamente maduras, y van desde una topografía plana a suavemente ondulada,

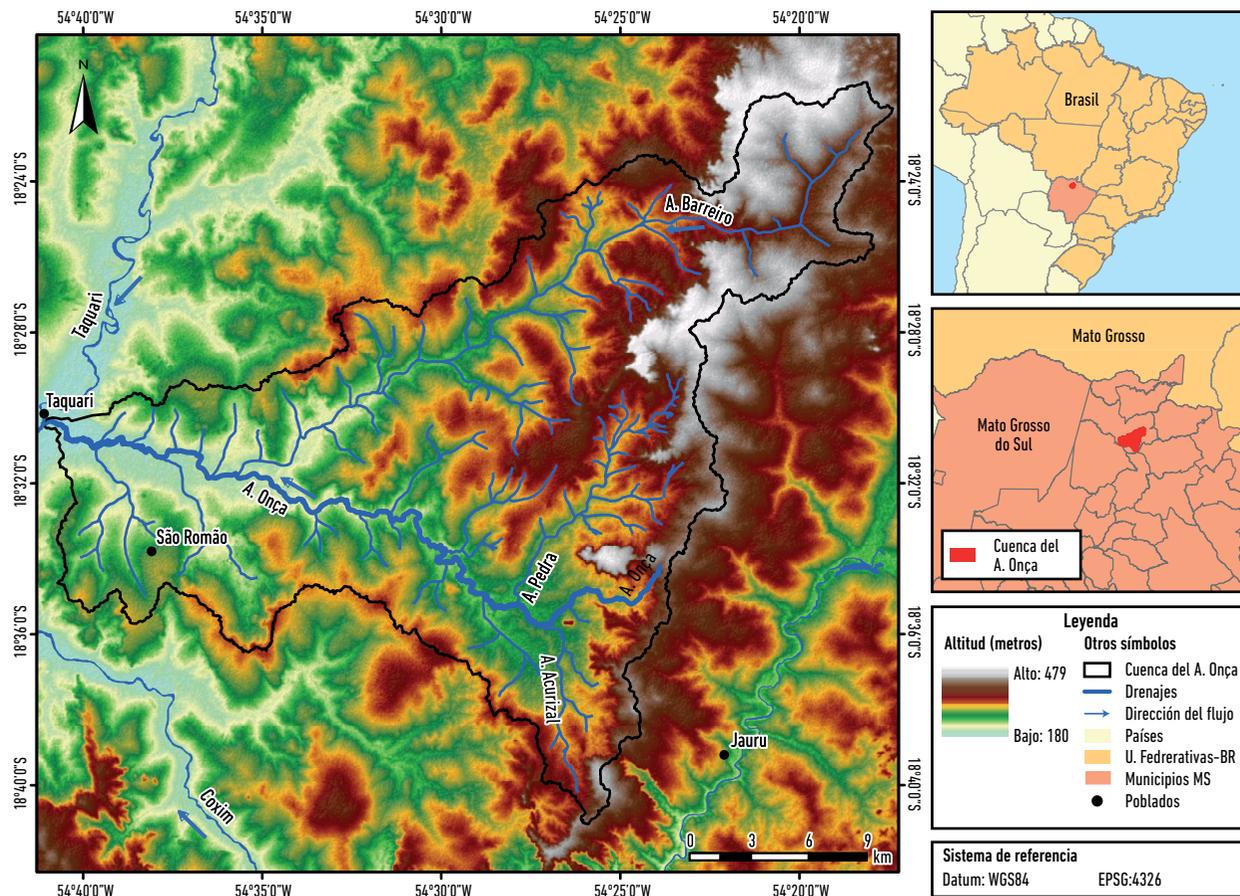


Figura 1. Localización de la cuenca hidrográfica del arroyo La Onça.
 Datos: Shuttle Radar Topography Mission (SRTM, 2020); Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE, 2019).

en la que el Pediplano degradado denudado se conserva o disecciona poco y/o se separa por escarpes o crestas de otros modelos de aplanamiento, mientras que los Pediplanos retocados denudados se originan en terrenos poco inclinados, a veces cóncavos, que son el resultado de sucesivas fases de reactivación erosiva (IBGE 2018). Las altitudes registradas en los terrenos de aplanamiento varían entre los 350 y 500 metros, con el Pediplano retocado denudado (Pru) con altitudes intermedias (300 a 350 metros) y el Pediplano degradado denudado (Pgi) con alturas superiores a los 450 metros.

En relación con los suelos, la cuenca está constituida (según la clasificación brasileira) por los suelos siguientes: Neossol quartzarênico ortico (RQo), Neossol litólico distrófico (RLd), Argissol vermelho-amarelo distrófico (PVad), Argissol vermelho eutrófico (Pve), Latossolo vermelho distrófico (LVD) y Gleissolo háplico distrófico (GXbd) (Figura 2d). Una correspondencia entre la clasificación brasileira, la de la FAO y la *Soil Taxonomy* de los EE.UU. puede ser visto en la Tabla 1.

Tabla 1. Correspondencia entre la clasificación brasileira, FAO y *Soil Taxonomy*

Clasificación brasileira ¹	WRB ²	Soil Taxonomy ³
GXbd–Gleissolo Háplico Distrófico	Gleysols; Stagnosols (some)	Entisols (Aqu-alf-and-ent-ept-)
LVD–Latossolo Vermelho Distrófico	Ferralsols	Oxisols
PVad–Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	Acrisols Lixisols Alisols	Ultisols; some Oxisols (Kandic)
Pve–Argissolo Vermelho Eutrófico		
RLd–Neossolo Litólico Distrófico	Leptosols	(Lithic...Orthents) (Lithic...Psamments)
RQo–Neossolo Quartzarenico Órtico	Arenosols	(Quartzipsamments)

Datos: IBGE (2015), IUSS (2015), (USDA, 1999, 2014).

Nota: ¹Clases de suelo según IBGE (2015); ²IUSS (2015); ³Soil Taxonomy.

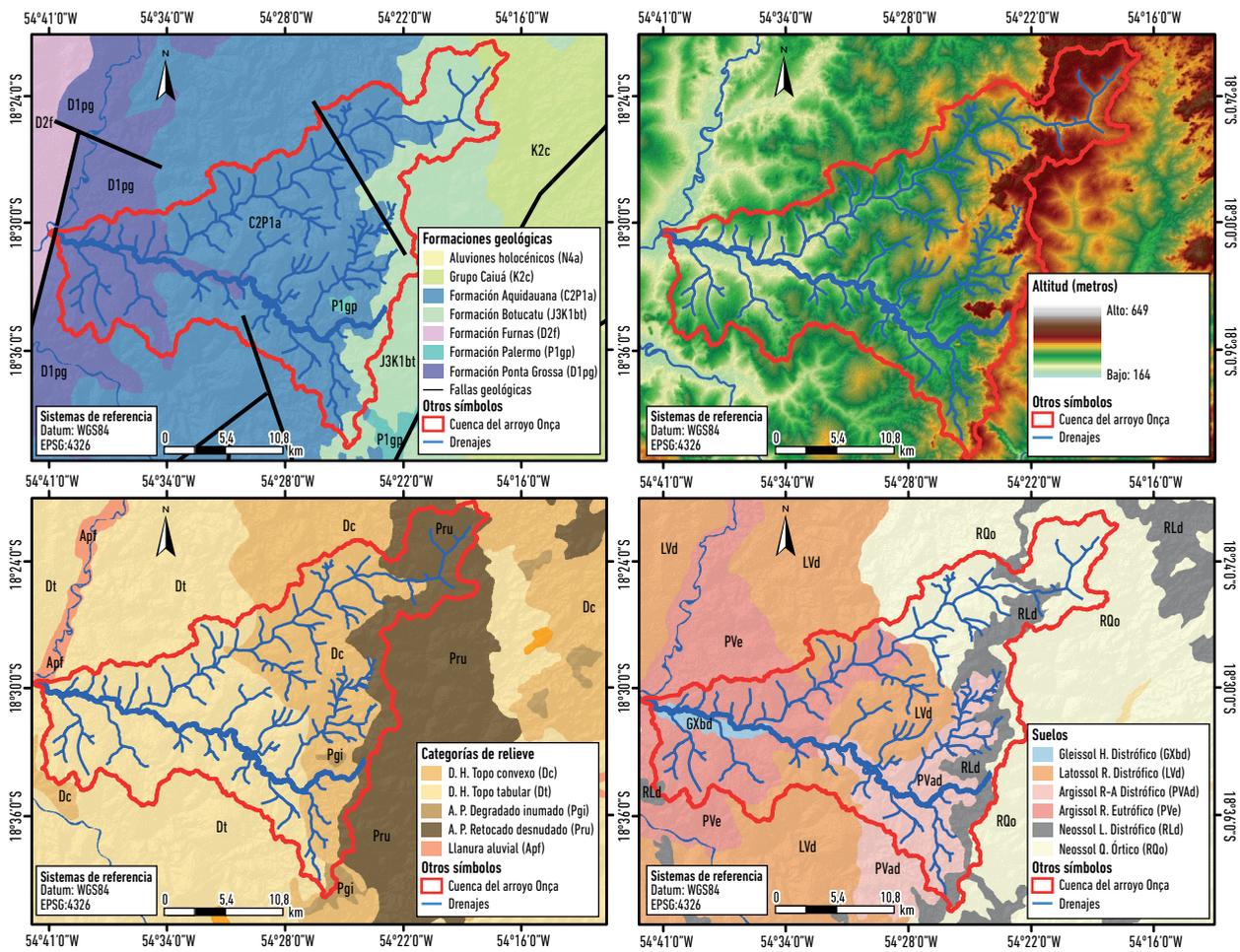


Figura 2. Geología (a), Hipsometría (b), Relieve (c) y Suelos (d) de la cuenca del arroyo La Onça.

Datos: Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE, 2018); Shuttle Radar Topography Mission (SRTM, 2020).

Nota: en la leyenda de la figura 2c, las iniciales D.H significan relieves de disección homogénea y las A.P. significan superficies de aplanamiento.

Procedimientos metodológicos

Para alcanzar los objetivos de la investigación se creó una base de datos geográficos que contenía archivos en formato vectorial y matricial: en el caso de los archivos en formato matricial se utilizó la escena orbital del satélite Sentinel-2B (T21KYD), sensor MSI, con 10 metros de resolución espacial, con fecha de abril del 2018, adquiridos en el portal *Earth Explorer* (USGS) y la escena orbital del satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), sensor PALSAR (*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*) con 12,5 metros de resolución espacial, disponible en el portal *Alaska Satellite Facility's*; en términos de archivos vectoriales, se utilizaron los datos de geología, relieve y suelos de la cartografía de los recursos naturales

de Brasil (IBGE 2018), hoja SE-21, disponible en formato *Shapefile* en el portal Geociencias. También, en este mismo portal, se adquirieron los archivos vectoriales de los límites territoriales de los países de América del Sur, de las Unidades Federativas de Brasil y de los municipios del estado de Mato Grosso do Sul para el año 2019.

En términos metodológicos, la estructura de este trabajo se basa en la adaptación de la propuesta metodológica para el análisis de la fragilidad ambiental de Ross (1994), incorporando las contribuciones (ya mencionadas) realizadas con posterioridad por otros autores. Sobre la base de estos trabajos se definieron un conjunto de cinco variables a utilizar, que fueron: áreas prioritarias para la conservación de la biodiversidad, inclinación de la pendiente, precipitación, suelos y el uso y cobertura

de la tierra. Cada una de estas variables fue procesada y reajustada de acuerdo con los objetivos de este trabajo, siendo luego reclasificadas y ponderadas atendiendo a su importancia, según la propuesta metodológica de Ross (1994), buscando estandarizar sus pesos. Este proceso se realizó en el SIG ArcGis 10.6® (Esri 2018), utilizando la herramienta *reclassify*.

Los procedimientos adoptados para el procesamiento de cada una de las variables seleccionadas para determinar la fragilidad ambiental en la cuenca se detallan a continuación.

Áreas prioritarias para la conservación de la biodiversidad

Esta constituye una nueva variable (Cunha y Bacani 2016), agregada para la evaluación de la fragilidad potencial de un territorio por su importancia y, según MMA (2016), se define como aquella área destinada a la conservación de la biodiversidad y que puede ser clasificada como de alta y muy alta prioridad. Son áreas caracterizadas por su amplitud geográfica y diversidad biológica, siendo definidas a partir del grado de amenaza y presión antrópica (Conabio 2005). Estas áreas constituyen importantes elementos para la conservación de la biodiversidad brasilera con criterios definidos según MMA (2007) tomando en cuenta lo dispuesto en Brasil (1998, 2004).

Adaptando la metodología para la determinación de la fragilidad ambiental (Ross 1994), las áreas de alta prioridad se clasificaron con un peso de cuatro, y las áreas de muy alta prioridad recibieron un peso de cinco. En el caso de nuestra cuenca, se identificó una sola clase de prioridad para la conservación de la biodiversidad, las áreas de prioridad muy alta, que ocupan el 81,37 % del área total, siendo en el resto de la cuenca esta variable clasificada como nula (Tabla 2). Así, esta variable se reclasificó en el SIG ArcGis 10.6® utilizando la herramienta *reclassify* (*ArcToolbox-Spatial Analyst Tools-reclassify*).

Tabla 2. Clasificación de las áreas prioritarias para la conservación de la biodiversidad según Ross (1994)

Área Prioritaria	Categoría Jerárquica	Área (km ²)	Área (%)
No existe prioridad	Nula	110,46	18,63
Prioridad muy alta	Muy alta	482,54	81,37
Total	593	100	

Datos: MMA (2016).

Inclinación de la pendiente

La pendiente está relacionada con la formación de procesos erosivos, siendo que las tierras con mayores pendientes tienen un mayor potencial para el escurrimiento del agua de lluvia y, como consecuencia, para generar procesos erosivos, ya que hay una transformación de la energía potencial en energía cinética. En vista de esta característica, la cartografía de la inclinación de la pendiente se generó en el SIG ArcGis 10.6® a partir de la escena orbital del satélite ALOS, sensor PALSAR, utilizando la herramienta *Slope* (*ArcToolbox-Spatial Analyst Tools-Surface-Slope*). La reclasificación del grado de fragilidad de las pendientes identificadas en la región se realizó según la metodología de Ross (1994) presentada en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de la inclinación de la pendiente

Pendiente (%)	Peso	Categoría jerárquica	Área (km ²)	Área (%)
0-6	1	Muy baja	325,44	54,88
6-12	2	Baja	208,09	35,09
12-20	3	Media	46,81	7,89
20-30	4	Alta	8,20	1,38
>30	5	Muy alta	4,46	0,75
TOTAL			593	100

Datos: Procesado a partir de ALOS - PALSAR; clasificación de Ross (1994).

La clasificación de la inclinación de la pendiente en la cuenca de estudio, según Ross (1994), permite identificar su concentración en intervalos que varían entre muy baja y baja fragilidad, representando respectivamente el 54,88 % y el 35,09 % del total, esto es, un 89,97 % del área de la cuenca está ocupada por pendientes que no exceden el 12 % de inclinación. Sin embargo, se registran áreas con una inclinación fuerte y muy fuerte, especialmente en las regiones escarpadas entre el relieve Pediplano retocado denudado (Pru) y la superficie de Disecación homogénea de cima convexa (Dc), con Neosolos litólicos distróficos (RLd), principalmente.

Precipitación

El análisis de las precipitaciones fue realizado de acuerdo con Crepani et al. (2001), ya que Ross (1994) no propuso en su metodología una ponderación para esta variable. La precipitación está vinculada con los sistemas morfodinámicos y contribuye al desarrollo de los procesos erosivos, luego la característica estudiada en esta investigación es la intensidad de la lluvia

que analiza cuánto y cuándo llueve. Esta característica resulta en la disponibilidad de energía potencial y su transformación en energía cinética, es decir, cuanto mayor es la intensidad de la lluvia, mayor será su poder erosivo.

Para la clasificación de los datos pluviométricos se utilizaron las isoyetas extraídas de la base de datos de la Compañía de Investigación de Recursos Minerales (CPRM 2019), los que se agruparon en el SIG ArcGis 10.6®, con una interpolación de distancia inversa, utilizando la herramienta *Inverse Distance Weighted* (IDW). A partir del recorte de la interpolación de esta variable para la cuenca, mediante la herramienta *Clip* (*ArcToolbox – Analysis Tools – Extract – Clip*), se calculó la precipitación promedio y luego la intensidad de la lluvia, que es la división de la media de la precipitación total anual entre el número de meses lluviosos que, según el IBGE (1993) y Crepani et ál. (2001), para el centro oeste de Brasil (donde se encuentra situada nuestra cuenca) son nueve.

Sobre la base del resultado del análisis de la intensidad de la lluvia, fue posible ajustar la vulnerabilidad del área, según Crepani et ál. (2001). Sin embargo, fue necesario estandarizar los pesos de acuerdo con la propuesta metodológica para determinar la fragilidad ambiental de Ross (1994) que varía en intervalos entre 1 y 5. Posteriormente, para la reclasificación de la intensidad de la lluvia ya convertida por la regla de tres simples, fue adoptada la herramienta *Reclass*.

Suelos

Estos juegan un papel importante en términos de resistencia a los procesos erosivos, lo que está vinculado a diversas características como son: textura, porosidad y profundidad. Los suelos más profundos y maduros tienen, en general, una mayor resistencia a los procesos erosivos, en nuestro caso los Latossoles. Así, los datos del suelo tomados, de IBGE (2018) se cortaron en el SIG ArcGis 10.6® para la cuenca utilizando la herramienta *Clip* y, posteriormente, se reclasificaron con la herramienta *reclassify*. Los colores y la nomenclatura de los suelos se estandarizaron de acuerdo con el IBGE (2015).

Se encontraron seis clases de suelos en la cuenca, a saber: Neossolos quartzarenicos orticos (RQo), Neossolos litólicos distróficos (RLd), Argissolos vermelho-amarelos distróficos (PVAd), Argissolos vermelhos eutróficos (PVe), Latossoles vermelhos distróficos (LVd) y Gleissolos háplicos distróficos (Gxbd), que fueron reclasificados según la metodología de Ross (1994) presentada en la Tabla 4.

Tabla 4. Reclasificación de los suelos identificados en la cuenca

Clase de suelo	Categoría jerárquica	Peso	Área (km ²)	Área (%)
Gxbd–Gleissolo Háptico Distrófico	Muy alta	5	13,19	2,22
LVd–Latossolo Vermelho Distrófico	Muy baja	1	112,78	19,02
PVAd–Argissolo Vermelho- Amarelo Distrófico	Alta	4	113,13	19,08
PVe–Argissolo Vermelho Eutrófico	Media	3	153,57	25,90
RLd–Neossolo Litólico Distrófico	Muy alta	5	67,55	11,39
RQo–Neossolo Quartzarenico Órtico	Muy alta	5	132,78	22,39
Total			593	100

Datos: IBGE (2018), clasificación de Ross (1994).

Uso y cobertura de la tierra

El análisis de esta variable es fundamental para la determinación de la fragilidad ambiental, ya que el uso desordenado, o el tipo de cobertura vegetal puede causar una serie de daños al ambiente y contribuir al desarrollo de procesos de erosión, sedimentación de los canales fluviales y cambios en la cantidad y calidad de las aguas subterráneas y superficiales, entre otros.

La clasificación del uso y cobertura de la tierra se realizó en el SIG *eCognition Developer 9.2*® (Trimble 2018), de la escena orbital del satélite Sentinel 2-B, sensor MSI, con 10 metros de resolución espacial, de abril de 2018. Las bandas utilizadas se sometieron a su corrección atmosférica en el SIG QGIS (QGIS 2019). Estas imágenes, ya corregidas, fueron sometidas al proceso de segmentación multiresolución y, luego, al algoritmo clasificador “vecino más cercano” (*nearest neighbor*, “NN”). Las clases temáticas utilizadas para esto siguieron, en parte, las definidas por el manual técnico para el uso de la tierra (IBGE 2013). Sin embargo, la vegetación ciliar y las zonas húmedas de la cuenca se agruparon en la misma clase, mientras que fueron creadas dos nuevas clases llamadas suelo impermeabilizado (correspondiente a los caminos pavimentados) y caminos rurales. Así, las clases definidas fueron: agricultura de temporal (caña de azúcar), cuerpos de agua, pastos, caminos rurales (suelo expuesto), suelo impermeabilizado, vegetación ciliar y vegetación natural (sabana).

Después de clasificar el uso y la cobertura de la tierra, los datos se exportaron al SIG ArcGis 10.6®, siendo estas clases reclasificadas posteriormente de acuerdo con Ross (1994), mediante la herramienta *Reclassify*. Las áreas ocupadas por cada categoría de fragilidad, así como su área, se pueden apreciar en la Tabla 5.

Tabla 5. Uso y cobertura de la tierra en la cuenca

Categoría	Peso	Área (km ²)	Área (%)
Muy baja	1	220,75	37,23
Baja	2	-	-
Media	3	367,9	62,04
Alta	4	1,58	0,27
Muy alta	5	2,77	0,47
Total		593	100

Datos: clasificación de Ross (1994).

Fragilidad potencial

Esta fue calculada, entonces, a partir de la superposición booleana ponderada de las variables: áreas prioritarias para la conservación de la biodiversidad, inclinación de la pendiente, precipitación y suelos que, en conjunto, conforman la fragilidad natural del ambiente. Esta superposición de las variables fue realizada utilizando la herramienta *Weighted Overlay*, adoptándose un valor de importancia similar para todas.

Fragilidad ambiental

Finalmente, la fragilidad ambiental fue obtenida por la superposición booleana ponderada de los mapas de fragilidad potencial y el de uso y cobertura de la tierra, con el empleo de la herramienta *Weighted Overlay*, adoptando, también, un valor de importancia similar para todos, diferenciando solo los pesos atribuidos a cada clase, según Ross (1994).

Validación de la fragilidad obtenida

Para la fase de validación del mapa de fragilidad ambiental fue utilizada la teledetección remota, donde fueron identificados 143 sitios con erosión en el área de la cuenca, cartografiados mediante la interpretación visual (Novo 2010) en imágenes de alta resolución del mismo año, disponibles en la plataforma Google Earth (Sullivan 2009), utilizando para esta identificación los patrones espaciales que se muestran en la Figura 3.

Aún en el sentido de agregar esfuerzos para validar el mapa de fragilidad ambiental obtenido, se realizó un levantamiento más detallado en las imágenes, buscando las áreas llamadas “suelos con exposición extrema” tratando

de identificar áreas que presentan el menor grado de protección/cobertura del suelo. Para este levantamiento, se realizó una segunda clasificación buscando identificar dichas áreas. La diferencia entre esta clasificación y la primera (la clasificación del uso y cobertura de la tierra) está en el objeto a clasificar, teniendo en cuenta para esto diferentes valores para los parámetros de la segmentación multirresolución y el algoritmo clasificador, con la forma, escala y compactación, definido en el SIG *eCognition Developer 9.2*® (Trimble 2018).

Se prestó especial atención al proceso de segmentación, ya que tiene una importancia única para la discriminación de las características analizadas. Por lo tanto, mientras que para una clasificación general los valores de forma, escala y compactación deben ajustarse para adaptarse a los objetivos previstos, en una clasificación específica, dirigida a identificar una sola clase, definiendo se para identificar con precisión los suelos con exposición extrema, lo que resulta en un producto más preciso y apreciado.

Resultados y Discusión

Fragilidad potencial

La cartografía de la fragilidad potencial (Figura 4 y Tabla 6) permitió la identificación de cuatro clases, a saber: baja, media, alta y muy alta.

Tabla 6. Clasificación de la fragilidad potencial

Categoría	Peso	Área (km ²)	Área (%)
Muy baja	1	-	-
Baja	2	99,45	16,77
Media	3	232,72	39,24
Alta	4	256,86	43,31
Muy alta	5	3,97	0,67
Total		593	100

Datos: superposición ponderada de variables según clasificación de Ross (1994).

La fragilidad potencial baja es la tercera clase con mayor incidencia en la cuenca, ocupando aproximadamente el 16 % del área total, con una mayor distribución en su porción occidental en terrenos de pendientes muy bajas a bajas (entre el 0 % y el 12 %), cubiertos principalmente por argissoles vermelhos eutróficos con grado medio de fragilidad. Otro elemento importante para comprender la distribución espacial de las áreas con fragilidad potencial baja es su inserción en áreas que no son una prioridad para la conservación de la biodiversidad (véase figura 4 y la tabla 6).

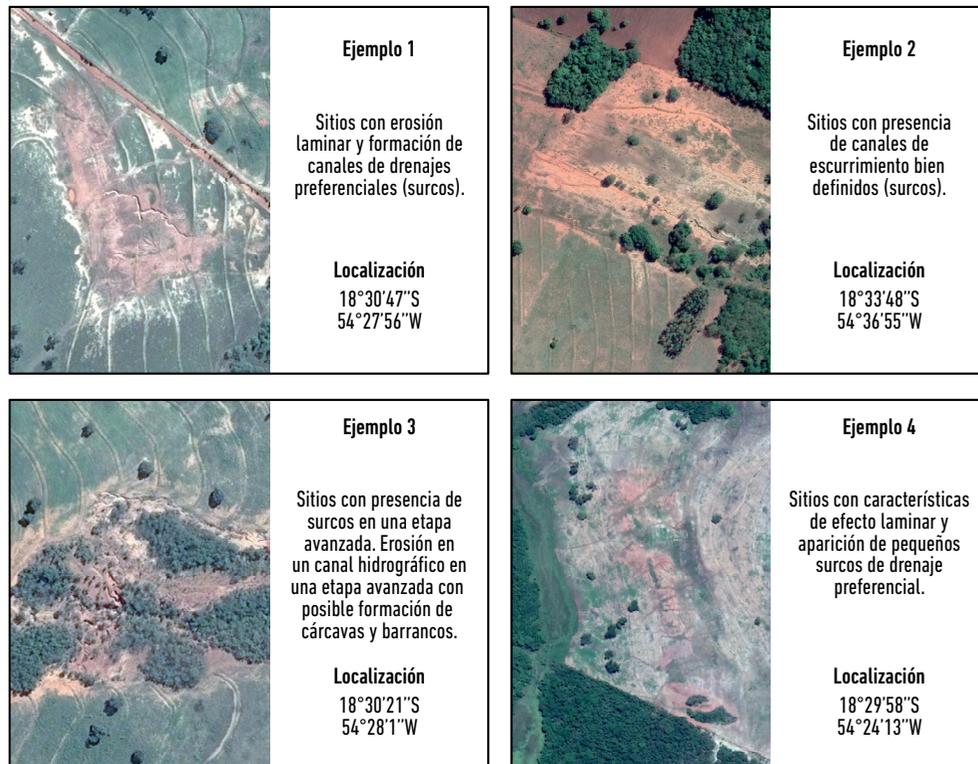


Figura 3. Claves para la interpretación de los sitios con erosión. Datos: imágenes de Google Earth (Sullivan 2009).

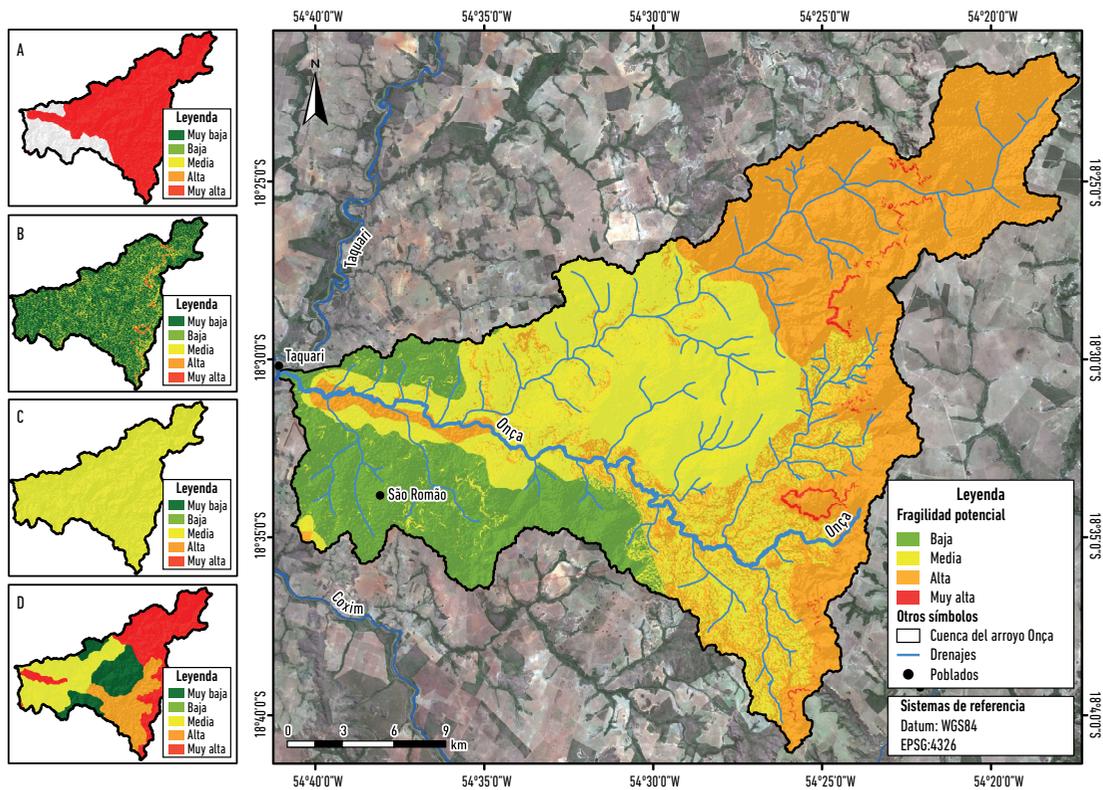


Figura 4. Fragilidad potencial de la cuenca del arroyo La Onça. Áreas prioritarias para la conservación de la biodiversidad (a); inclinación de la pendiente (b); precipitación (c) suelos (d). Datos: superposición ponderada de variables áreas prioritarias (MMA 2016); inclinación de la pendiente (ALOS-PALSAR); precipitación (CPRM 2019) y suelos (IBGE 2018). Imagen satelital Sentinel 2-B.

La fragilidad potencial media (véase figura 4 y la tabla 6) ocupa, aproximadamente, el 39 % de la cuenca, estando distribuida principalmente en su región central, así como en parches hacia el sur y el oeste estas áreas están cubiertas principalmente por Latosolos vermelhos distróficos (con muy baja fragilidad) y en menor medida por Argissoles vermelhos-amarelos distróficos (alta fragilidad) y Argissoles vermelhos eutróficos (fragilidad media), en relieves diseccionados de cima tabular y convexa con pendientes poco pronunciadas (hasta 20 %).

La fragilidad potencial alta (véase figura 4 y la tabla 6) constituye la principal clase representada en la cuenca y está distribuida en, aproximadamente, el 43,32 % de la cuenca, principalmente en las regiones este y oeste (en las cercanías del curso bajo del arroyo La Onça). Se concentra en tres áreas principales: la primera situada al este, en tierras cubiertas por Neossolos quartzarénicos orticos y Neossolos litólicos distroficados, ambos con muy alta fragilidad, con pendientes irregulares a lo largo de los Pediplanos degradado denudado y retocado denudado; la segunda área está al oeste, en una porción cubierta básicamente por Gleissolos háplicos (con alta fragilidad) dispuestos en pendientes entre muy bajas y medias (hasta 20 %) y el resto están esparcidas por toda la cuenca, en áreas significativas, pero no continuas, en las que predominan las pendientes altas (más del 20 %) y los suelos con un alto grado de fragilidad.

La fragilidad potencial muy alta (véase figura 4 y tabla 6) ocupa solo el 0,67 % del área total de la cuenca, sobre Neossolos litólicos distróficos, coincidiendo con las pendientes más altas del territorio (más del 30 %), clasificadas como de alta y muy alta fragilidad en relieves de aplanamiento en Pediplano retocado denudado y superficies de Disección homogénea con cima convexa.

Uso y cobertura de la tierra

La cartografía del uso y cobertura de la tierra identificó siete clases diferentes a lo largo de cuenca, a saber: agricultura de temporal, cuerpos de agua, pastos, caminos rurales, suelo impermeabilizado, vegetación ciliar y vegetación natural (sabana).

La agricultura de temporal, llamada así por el IBGE (2013), se refiere a cultivos no anuales que, en el caso de la cuenca hidrográfica del arroyo de La Onça, se refieren a plantaciones de caña de azúcar, un patrón de cultura semi-perenne. Así, la agricultura de temporal, dadas sus características intrínsecas, se define como de alto grado de fragilidad para el desarrollo de los procesos erosivos. Por lo tanto, de acuerdo con la cartografía del uso

y cobertura de la tierra (Figura 5 y Tabla 7), esta clase ocupa solo 1,58 km², es decir, un 0,27 % de la cuenca, en su porción centro-oriental, asociada con dos sistemas de riego de pivote central ubicados cerca del arroyo Pedra. Los cuerpos de agua se refieren a cualquier tipo de reservorio de agua natural o artificial, en un sistema léntico o lótico, que no sea de origen marino (IBGE 2013). En el caso de la cuenca estudiada, esta clase se refiere a ríos, arroyos, lagos, y pequeñas represas, totalizando un área de unos 0,48 km² (0,08 % del área total).

Tabla 7. Uso y cobertura de la tierra en la cuenca

Uso y cobertura de la tierra	Área (km ²)	Área (%)
Cuerpos de agua	0,48	0,08
Agricultura detemporal	1,58	0,27
Vegetación natural	127,65	21,53
Vegetación ciliar	93,1	15,7
Pasto	367,9	62,03
Caminos rurales (suelo expuesto)	2,14	0,36
Suelo impermeabilizado	0,15	0,03
Total	593	100

Datos: Uso y cobertura de la tierra generado a partir de la imagen satelital Sentinel 2-B

Las áreas de pasto (véanse figura 5 y tabla 7) son áreas para rebaños de ganado vacuno, básicamente compuestos por gramíneas, ya sea naturales, mejoradas o incluso plantadas. Por lo tanto, esta clase se define como de un grado medio de fragilidad potencial. En el caso de la cuenca, estos pastos están destinados al ganado de carne, ocupando un área de 367,9 km², esto es, el 62,03 % del área total, distribuyéndose por toda la cuenca con mayor concentración en las áreas bajas de la misma, con pendientes menos pronunciadas.

Los caminos rurales (véanse figura 5 y tabla 7), como su nombre lo indica, sintetizan la clase de uso de la tierra destinada a la conexión entre las propiedades rurales, centros urbanos y aldeas. Estos son principalmente de tierra "apisonada", donde la capa superior del suelo está desprotegida de cualquier cobertura. En el caso de la cuenca del arroyo de La Onça, los caminos de tierra están sometidos al desarrollo de procesos erosivos, por lo que fueron clasificados con fragilidad muy alta, ocupando aproximadamente 2,14 km², lo que representa el 0,36 % del área total.

El suelo impermeabilizado, como fue descrito en los procedimientos metodológicos, se refiere a las carreteras pavimentadas que atraviesan la cuenca, con un nivel muy alto de fragilidad potencial, ya que concentran un alto

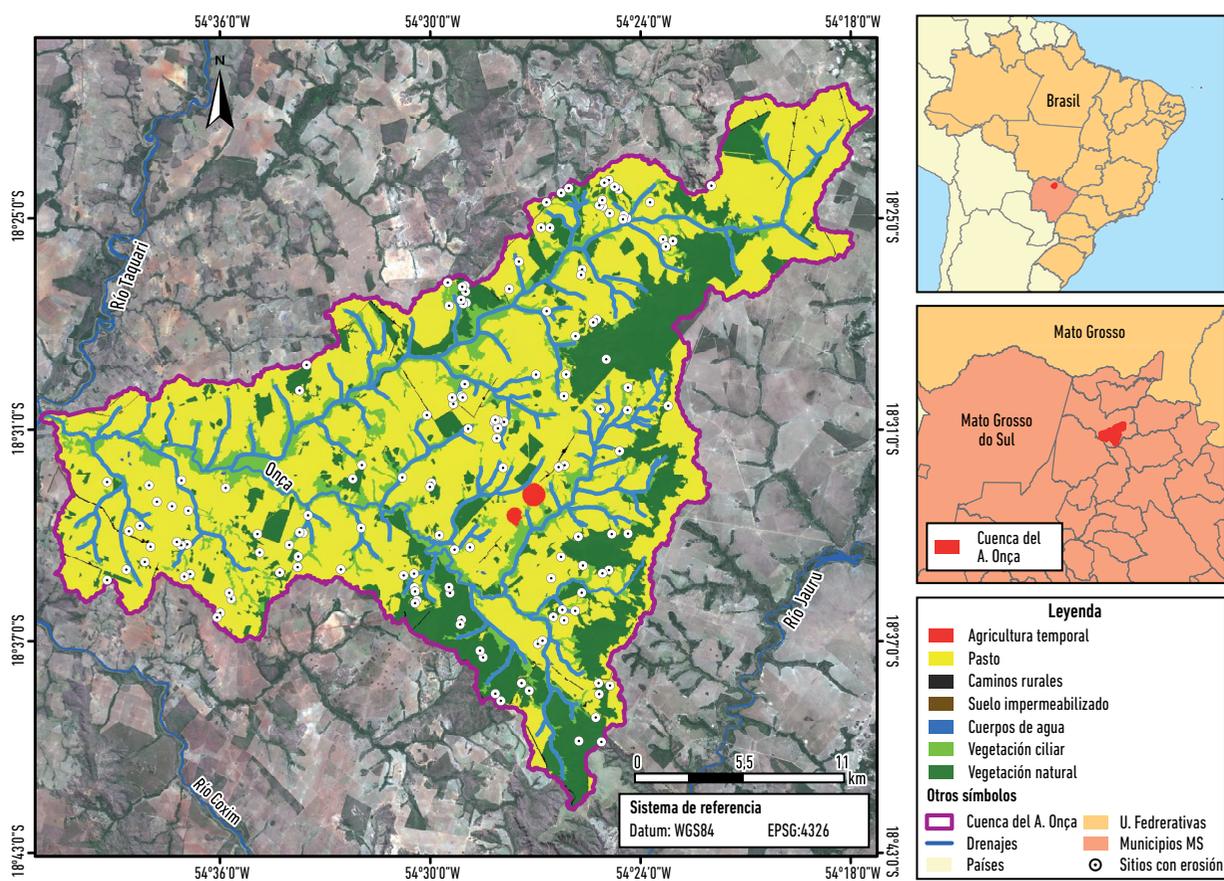


Figura 5. Uso y cobertura de la tierra en la cuenca del arroyo La Onça (2019).
 Datos: imagen satelital Sentinel 2-B; Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE).

volumen de agua que se drena hacia las áreas circundantes y puede causar la génesis y el desarrollo de procesos erosivos. En la cuenca esta clase se extiende en solo 0,15 km², es decir, un 0,03 % del área total de la misma.

La vegetación ciliar (también conocida como vegetación ribereña o ripícola) consiste en la vegetación que se encuentra cerca de los cuerpos de agua, manteniendo un grado significativo de conectividad con ella, diferenciándola de otras formaciones vegetales situadas en sus alrededores (véanse figura 5 y tabla 7). La vegetación ciliar tiene gran importancia para la conservación de los cuerpos de agua, ya sea manteniendo la calidad del agua, protegiendo los suelos de la erosión, filtrando los sedimentos de áreas adyacentes y conservando la biodiversidad, comportándose, además, como corredores naturales, con conexión a los restos de la sabana (Vogel, Zawadzki y Metri 2009).

Dado su papel para la conservación del medio ambiente, la vegetación ciliar fue clasificada de muy bajo grado de fragilidad, constituyendo, junto a la vegetación

natural (sabana), la clase de mayor protección del suelo en relación con los procesos de erosión. De acuerdo con el mapa del uso y cobertura de la tierra (véanse figura 5 y tabla 7), la vegetación ciliar ocupa aproximadamente 93,1 km² (15,7 %), mientras que la vegetación natural (formaciones típicas de la sabana brasilera) cubre 127,65 km², es decir, el 21,53 % del área total de la cuenca, concentrada principalmente en las áreas con pendientes más inclinadas, especialmente en el escarpe que limita el relieve del Pediplano retocado denudado y la superficie de disección homogénea de cima convexa. Porque la suma de la vegetación ciliar y vegetación natural (sabana) cubre 220,75 km², lo esto nos permite concluir que el 37,23 % de la cuenca del arroyo La Onça está cubierto por vegetación que proporciona un alto nivel de protección del suelo.

Fragilidad Ambiental

La cartografía de la fragilidad ambiental (superposición ponderada booleana de la fragilidad potencial y el uso y cobertura de la tierra) permitió la identificación

de cuatro categorías jerárquicas, a saber: fragilidad ambiental baja, media, alta y muy alta (Figura 6 y Tabla 8).

La fragilidad ambiental media también tiene una amplia distribución espacial a lo largo de la cuenca y consiste en la clase espacialmente mayor, con un área de unos 353,48 km², es decir, 59,61 % de la extensión territorial de la cuenca. Tiene una correlación significativa con la fragilidad potencial media (42,45 %) y alta (33,63 %), pero también registra el 22,81 % de áreas de fragilidad potencial baja y poco más del 1 % de las áreas con fragilidad potencial muy alta. Esta variación de las clases de fragilidad potencial correspondientes con una fragilidad ambiental media se puede entender al analizar el uso y cobertura de la tierra, compuesto por pastos (65 %), vegetación natural (24 %) y vegetación ciliar (11 %). Mientras que las áreas de fragilidad potencial alta están ocupadas por vegetación natural (reduciendo así su fragilidad ambiental), las áreas de fragilidad potencial baja están cubiertas por pastos, lo que resulta en un efecto inverso, aumentando su fragilidad ambiental.

Tabla 8. Clasificación de la fragilidad ambiental

Categoría	Peso	Área (km ²)	Área (%)
Muy baja	1	-	-
Baja	2	98,22	16,56
Media	3	353,48	59,61
Alta	4	140,32	23,66
Muy alta	5	0,98	0,17
Total		593	100

Datos: superposición ponderada de la fragilidad potencial y uso y cobertura de la tierra según intervalos de Ross (1994).

Por lo tanto, está claro que, aunque extensas áreas de fragilidad ambiental media están localizadas en el escarpe entre el relieve retocado denudado y el de cimas convexas, con altos niveles de fragilidad potencial, el uso y la cobertura de la tierra atenúa su fragilidad ambiental, ya que las áreas escarpadas (así como aquellas con pendientes más fuertes) están básicamente cubiertas por vegetación natural, con un alto nivel de protección de los suelos y la biodiversidad. Por otro lado, las áreas con fragilidad potencial baja, situadas principalmente en la región central de la cuenca, registran un aumento en su índice de fragilidad ambiental cuando se introduce el análisis del uso y cobertura de la tierra, pues están ocupadas principalmente por pastos, que son clasificados como de fragilidad ambiental media.

La fragilidad ambiental alta es la segunda clase más extendida en la cuenca, ocupando un área de 140,32 km²,

lo que representa el 23,66 %, de la misma, y está distribuida principalmente en las áreas altas, con pendientes fuertes y suelos altamente friables (Figura 6 y Tabla 8). Esta clase está directamente relacionada con la fragilidad potencial alta, que representa el 96,26 % de la cuenca, y con la presencia de pastos que ocupan el 96 % del área de fragilidad ambiental alta. Otro aspecto a destacar se refiere a la presencia dentro de esta clase de una gran parte de las áreas de agricultura de temporal (con alta fragilidad) y los caminos rurales (con muy alta fragilidad), lo que indica su relevancia como elemento aglutinante de las variables con alto índice de fragilidad.

Finalmente, las áreas con fragilidad ambiental muy alta se limitan a solo 0,98 km² (0,17 % de la cuenca), en áreas donde la fragilidad potencial y el uso y cobertura de la tierra fueron los factores predominantes. Esta clase se refiere básicamente a los caminos rurales sin pavimentar, con una rara presencia de métodos de protección contra los procesos erosivos, tales como sumideros de flujo de lluvia y cajas de retención, entre otros.

Como forma de validar el modelo de fragilidad ambiental aquí elaborado se propuso la cartografía de los sitios con erosión y las áreas de suelos con exposición extrema, que se correlacionaron con las clases de fragilidad ambiental y con las clases de uso y cobertura de la tierra, como se muestra en la Tabla 9 (A y B, respectivamente).

De los 143 sitios con erosión cartografiados, 118 se localizan en áreas de suelos con exposición extrema, lo que indica la alta correlación entre ambas variables; las áreas ocupadas con pastos lideran los sitios con erosión y los suelos con exposición extrema; la clase media de fragilidad ambiental registró el mayor número de sitios con erosión (82), así como el área más extensa de suelos con exposición extrema, sin embargo, en términos relativos, esta constituyó solo la tercera clase más representativa, con los índices más alarmantes registrados de fragilidad ambiental alta y muy alta. También vale la pena mencionar que hay 33 sitios con erosión distribuidos entre la vegetación ribereña y natural, hecho que puede explicarse como consecuencia de las acciones antrópicas que se llevan a cabo a su alrededor.

Los resultados de esta validación (Tabla 9 A y B) indican, en general, que las áreas más frágiles o vulnerables tienen el mayor número de sitios con erosión y suelos con exposición extrema, lo que indica una correlación con los grados de fragilidad más altos, corroborando así la posible aplicación del mapa de fragilidad ambiental a la planificación y ordenamiento ambiental de un territorio. Por ejemplo, las áreas clasificadas como altamente frágiles,

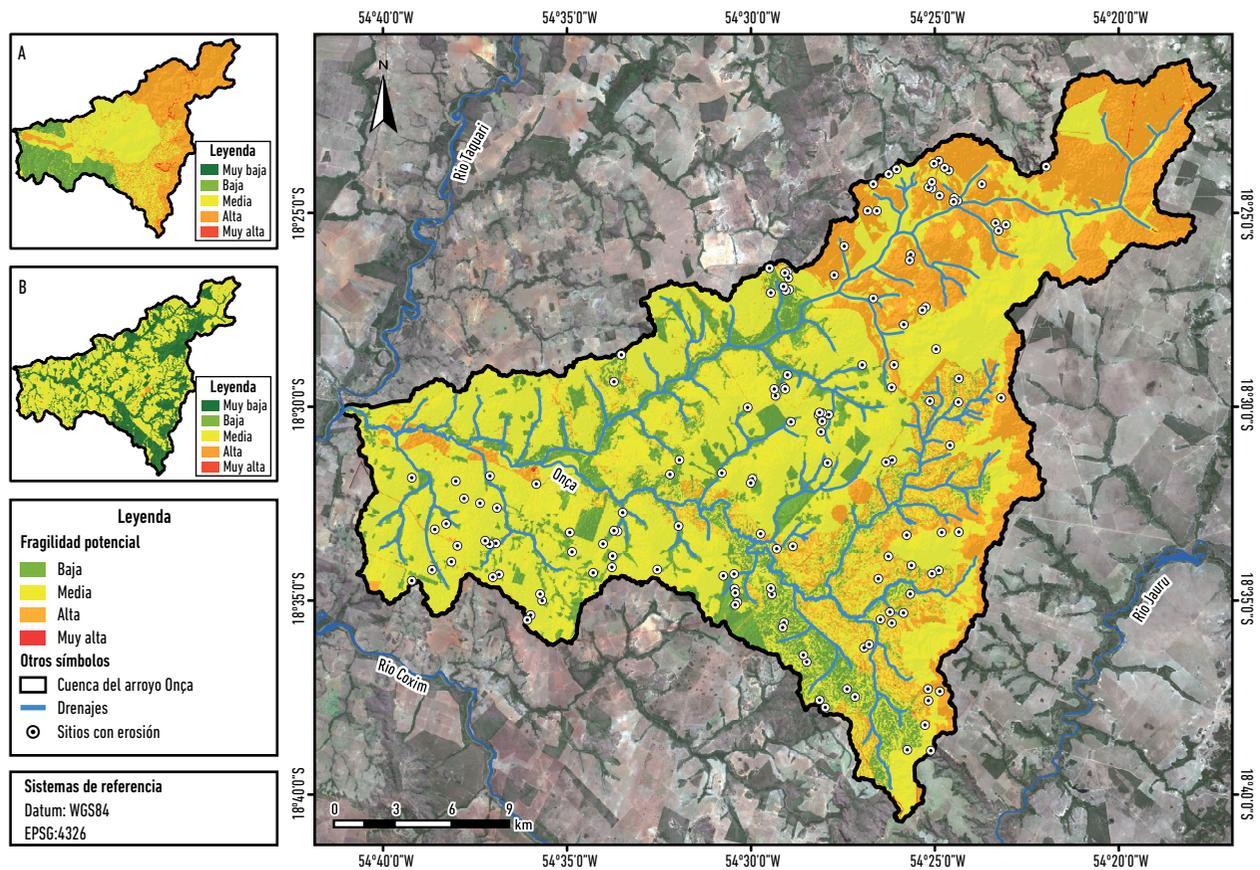


Figura 6. Fragilidad ambiental de la cuenca del Arroyo La Onça. Fragilidad potencial (a); uso y cobertura de la tierra (b). Datos: superposición ponderada de la fragilidad potencial y uso y cobertura de la tierra; imagen satelital Sentinel 2-B.

Tabla 9. Relación espacial entre la fragilidad ambiental y el uso y cobertura de la tierra, con los sitios con erosión y las áreas de suelos con exposición extrema

A Fragilidad ambiental					
Categoría de fragilidad	Área (km ²)	N° de sitios con erosión	Sitios de erosión/km ²	Suelos con exposición extrema (km ²)	Distribución relativa por clases de fragilidad (km ² /km ²)
Muy Baja	-	-	-	-	-
Baja	98,22	17	0,17	1,17	0,01
Media	353,48	82	0,23	11,70	0,03
Alta	140,32	43	0,31	8,38	0,06
Muy Alta	0,98	1	1,02	0,39	0,40
B Uso y cobertura de la tierra					
Uso y cobertura de la tierra	Área (km ²)	N° sitios con erosión	Sitios de erosión/km ²	Suelos con exposición extrema (km ²)	Distribución relativa por clases de fragilidad (km ² /km ²)
Cuerpos de agua	0,48	*	*	*	*
Agricultura de temporal	1,58	**	**	0,003	0,002
Vegetación natural***	127,65	22	0,17	1,556	0,012
Vegetación ciliar	93,10	11	0,12	0,790	0,008
Pasto	367,90	109	0,30	18,070	0,049
Caminos rurales	2,14	1	0,47	*	*
Suelo impermeabilizado	0,15	*	*	*	*

Notas: * no se aplica; ** no encontrado; *** formaciones típicas de la sabana brasilera.

determinadas no solo por sus condiciones naturales, sino también por el uso y cobertura de la tierra, mostraron un alto número de sitios con erosión y áreas degradadas (suelos con exposición extrema), lo que demuestra la validez de la cartografía de la fragilidad de la zona.

Dichos hallazgos son un excelente indicador del valor del mapa final de fragilidad ambiental para la cuenca hidrográfica del arroyo de La Onça, lo que hace de este

producto una herramienta para la gestión ambiental de la misma, pudiendo ser utilizada por las instituciones y actores interesados. Por lo tanto, para apoyar la toma de decisiones sobre la planificación ambiental de la cuenca, proponemos el análisis de los diferentes aspectos analizados, así como las medidas a tomar en relación con cada uno de estos, ver Tabla 10.

Tabla 10. Síntesis de los resultados de la cartografía de la fragilidad ambiental

Fragilidad ambiental	Factores de influencia	Resultados y consecuencias	Medidas propuestas
Baja	Pendientes poco pronunciadas, con un 95 % del área con valores inferiores al 12 %. Predominio de la vegetación natural (sabana) (41 %) y la vegetación ciliar (55 %).	Área poco susceptible al desarrollo de procesos erosivos. Formación de corredores ecológicos y distribución de fragmentos de vegetación natural preservando la biodiversidad y la riqueza del Cerrado brasileño. Protección de canales y las llanuras fluviales contra la erosión (vegetación ciliar).	Mantenimiento y conservación de la cubierta vegetal asociada a esta clase, ya que el 12 % de los sitios con erosión delimitados, se encuentran en las áreas de esta clase.
Media	Pendientes poco pronunciadas, con un 88 % del área, con valores inferiores al 12 %. Predominio de pastos para ganado vacuno, que ocupan el 65 % del área.	Áreas de riesgo medio a los procesos erosivos, que pueden desarrollarse debido al uso y manejo inadecuado de la tierra. Con respecto a la cuenca, hay un predominio de los pastos con manejo inadecuado, hecho confirmado por el número de sitios de erosión por km ² en una tasa de 0,23.	Medidas de conservación y gestión del uso del suelo: establecimiento de terrazas; curvas de nivel; renovación de los pastos (cuando corresponda); alternancia de extensas áreas de pastoreo; reducción de la densidad animal por hectárea para reducir el pisoteo intenso. Medidas de contención puntual para los sitios con erosión según corresponda.
Alta	Pendientes poco pronunciadas, en las cuales el 91 % del área, tiene valores inferiores al 12 %. Predominio de los pastos para el ganado, representando el 96 % del área total. Predominio de Neossolos quartzarênicos y Litólicos, que ocupan aproximadamente el 76 % del área.	Las áreas de alta fragilidad ambiental tienen una alta susceptibilidad al desarrollo de procesos erosivos, identificados por la distribución espacial de los sitios con erosión por km ² , con una tasa de 0,31. La falta de un manejo adecuado de los pastos, asociado con suelos friables, favorece el desarrollo de procesos erosivos, generando la pérdida y empobrecimiento del suelo, reducción de la calidad del agua superficial y la sedimentación en los canales de los ríos.	Dado que en las áreas con fragilidad ambiental alta hay una alta correlación de los pastos para el ganado en áreas de suelos frágiles, se deben adoptar medidas conservacionistas y de contención de los procesos erosivos existentes, como se mencionó anteriormente, así como la recomposición de la vegetación natural en las áreas cercanas a los manantiales de los canales fluviales de primer orden.
Muy alta	Pendientes poco pronunciadas, en las cuales el 95 % del área tiene valores inferiores al 12 %. Predominio de caminos rurales, distribuidos en un 55 % del área. Predominio de Neossolos quartzarênicos y litólicos, que corresponden a aproximadamente el 76 % del área.	Las áreas de muy alta fragilidad ambiental tienen una susceptibilidad muy alta a los procesos erosivos, presentando en la cuenca la mayor distribución de los sitios con erosión por km ² , con tasas de 1,02. En la cuenca estas áreas están relacionadas con los caminos rurales.	Dado que esta clase está principalmente relacionada con los caminos rurales, se sugiere: la instalación de sumideros de flujo de lluvia, cajas de retención y el mantenimiento regular de los caminos.

Consideraciones finales

La metodología original de fragilidad ambiental, adaptada de acuerdo con la propuesta descrita en este trabajo, presentó resultados muy favorables, especialmente en comparación con los procesos erosivos en desarrollo y las áreas degradadas, entendidas en este trabajo como una propuesta para validar la cartografía de la fragilidad del ambiente frente a los procesos erosivos.

Los resultados de la validación demostraron que no siempre las clases de mayor peso atribuidas por la metodología original presentan procesos o sitios con erosión (ejemplo de la agricultura), lo que nos permite sugerir una nueva propuesta de ponderación para el análisis de la fragilidad ambiental basada en estos resultados, mediante la aplicación del método *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Por otro lado, las clases con limitaciones inferiores mostraron una concentración significativa de los sitios con erosión y las áreas degradadas, como los pastos, lo que indica la necesidad de revisar el peso asignado en esta metodología a cada clase.

Se identificó que la fragilidad ambiental media constituye la clase mejor representada en la cuenca (59,61 %), seguida de la fragilidad ambiental alta (23,66 %), baja (16,56 %) y muy alta (0,17 %). Cada una de estas clases mostró un alto nivel de correlación con la susceptibilidad natural de la tierra y/o con el uso y cobertura de la tierra, expresando la fragilidad del medio ambiente al desarrollo de los procesos erosivos.

La Figura 6 de fragilidad ambiental de la cuenca del arroyo La Onça presenta elementos satisfactorios para estos estudios, haciendo de este producto una herramienta de gestión importante y confiable, que los agentes interesados pueden utilizar.

Finalmente, es importante enfatizar que el análisis del mapa de fragilidad debe entenderse como una herramienta de apoyo para la planificación ambiental, con la perspectiva de contribuir al mejor uso de la tierra, aprovechando de manera más adecuada sus potencialidades, al tiempo que se adoptan las medidas de mitigación cuando sea necesario.

Agradecimientos

Este trabajo se llevó a cabo con el apoyo de la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior–Brasil (CAPES)–Código de Financiamento 001. Así mismo también contó con el apoyo de la Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul–UFMS/MEC, Brasil.

Referencias

- Abdon, Myrian de Moura. 2004. “Os impactos ambientais no meio físico: erosão e assoreamento na bacia hidrográfica do rio Taquari, MS, em decorrência da pecuária.” Tesis de doctorado en Ciências de Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Alvarenga, Silvia Maria, Antonia Eloisa Brasil, y Diana Melo Del’arco. 1982. “Geomorfologia.” En *Projeto Radam brasil, ibge. Hoja SF-21, 28*.
- Assine, Mário Luis, Hudson de Azevedo Macedo, José Cândido Stevaux, Ivan Bergier, Carlos Roberto Padovani, y Aguinaldo Silva. 2015. “Avulsive Rivers in the Hydrology of the Pantanal Wetland.” En *Dynamics of the Pantanal Wetland in South America*, editado por Ivan Bergier y Mário Assine, 83-110. https://doi.org/10.1007/698_2015_351
- Bacani, Vitor Matheus, y Ailton Luchiari. 2014. “Geoprocessamento aplicado ao zoneamento ambiental da bacia do alto rio Coxim-MS.” *geosp–Espaço e Tempo (en línea)* 18 (1): 184-197. <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2014.81098>
- Bertrand, Georges. 2004. “Paisagem e geografia física global: esboço metodológico.” *Revista Ra’ega* 8: 141-152. <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v8i0.3389>
- Carvalho, Newton de Oliveira. 1994. *Hidrossedimentologia Prática*. Rio de Janeiro: CPRM–ELETROBRAS.
- Conesa, Vicente Fernandez-Vitora. 2009. *Guía Metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental*. Madrid: Editorial Mundi Prensa.
- Crepani, Edison, José Simeão de Medeiros, Pedro Hernandez Filho, Florenzano, Teresa Gallotti Duarte, Barbosa Valdete, y Cláudio Clemente Faria Barbosa. 2001. *Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico Econômico e ao Ordenamento Territorial*. Consultado el 12 de septiembre del 2021. <http://www.dsr.inpe.br/laf/sap/artigos/CrepaneEtAl.pdf>
- Cunha, Elias Rodrigues de, Vitor Matheus Bacani, y Lucy Ribeiro Ayach. 2013. “Geoprocessamento aplicado à análise da fragilidade ambiental.” *Revista da anpege* 9 (12): 89-105. <https://doi.org/10.5418/RA2013.0912.0006>
- Cunha, Elias Rodrigues de, y Vitor Matheus Bacani. 2016. “Caracterização da Fragilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Córrego Come Onça, Água Clara/MS.” *Acta Geográfica* 10 (22). <http://dx.doi.org/10.5654/acta.v10i22.2456>
- Dokuchaev, Vasili Vasilievich. 1948. *La teoría sobre las zonas naturales* Moscú: Geografiz.

- Equipe de Desenvolvimento do QGIS. 2019. *Sistema de Informações Geográficas do qgis*. Projeto Código Aberto Geospatial Foundation.
- Esri. 2018. *ArcGIS Desktop: release 10. Redlands*. California: Environmental Systems Research Institute.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1976. *A Framework for Land Evaluation. Soils Bulletin* 52. Roma: FAO
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2015. *Status of the World's Soil Resources*. Roma: FAO
- Guerra, Antonio José Teixeira. 2005. "Experimentos e monitoramentos em erosão dos solos." *Revista do Departamento de Geografia* 16: 32-37. <https://doi.org/10.7154/RDG.2005.0016.0003>
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). 1993. Recursos naturais e meio ambiente: uma visão do Brasil. <https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo.html?id=27704&view=detalhes>
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). 2009. Manuais Técnicos em Geociências: Manual Técnico de Geomorfologia. <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv66620.pdf>
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). 2013. Manuais Técnicos em Geociências: Manual Técnico de Uso da Terra. <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv81615.pdf>
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). 2015a. Manuais Técnicos em Geociências: Manual Técnico de Pedologia. <https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo?id=295017&view=detalhes>
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). 2015b. Manual técnico de pedologia. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?id=281613&view=detalhes>
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). 2018. *Mapeamento de Recursos Naturais do Brasil*. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). 2019. *Base Cartográfica Contínua do Brasil*. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/bases-cartograficas-continuas/15759-brasil.html?=&t=o-que-e>
- Isachenko, Anatoli Grigorievich, y John S. Massey. 1973. *Principles of Landscape Science and Physical Geographic Regionalization*. Melbourne: University Press.
- IUSS Working Group WRB. 2015. *World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports n.º 106. Consultado el 14 de septiembre del 2021. <http://www.fao.org/3/i3794en/I3794en.pdf>
- Jensen, John Jack Robert. 2009. *Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. São José dos Campos: Parêntese.
- MMA (Ministério do Meio Ambiente). 1997. *Plano de Conservação da Bacia do Alto Paraguai (Pantanal) pcbap*. Brasília: PNMA.
- Novo, Evlyn Márcia Leão de Moraes. 2010. *Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações*. São Paulo: Edgard Blucher Ltda.
- OEA (Organización de Estados Americanos). 1993. *Manual sobre el manejo de peligros naturales en la planificación para el desarrollo regional integrado*. Washington D.C.: Organización de Estados Americanos.
- Oliveira, Márcia Divina de, y Débora Fernandes Calheiros. 1998. "Transporte de nutrientes e sólidos suspensos na bacia do rio Taquari (Mato Grosso do Sul)." *Acta Limnológica Brasiliensia* 10 (2): 35-45.
- Padovani, Carlos Roberto. 1998. "Deposição de sedimentos e perda de água do Rio Taquari no Pantanal." En *Encontro de Engenharia de Sedimentos. Anais*, 127-134. Belo Horizonte.
- Panizza, Mario. 1973. "Proposta di legenda per carte della stabilita geomorfologica." *Bollettino della Societa Geologica Italiana* 92: 303-306.
- Panizza, Mario. 1975. "Ricerchedi geomorfologia applicata Allá pianificazione territoriale." *Mem. Soc. Geol. It.* 14.
- Ross, Jurandy Luciano Sanches. 1994. "Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados." *Revista do Departamento de Geografia* 8: 63-74. <https://doi.org/10.7154/RDG.1994.0008.0006>
- Ross, Jurandy Luciano Sanches. 2012. "Landforms and Environmental Planning: potentialities and fragilities." *Revista do Departamento de Geografia* Volume Especial RDG 30 anos: 38-51. <https://doi.org/10.7154/RDG.2012.0112.0003>
- Salinas, Eduardo; Mateo, José Manuel; Cavalcanti, Lucas Costa de Souza; Braz, Adalto Moreira. 2019. "Cartografía de los paisajes: teoría y aplicación." *Physis Terrae* 1 (1): 7-29. <https://doi.org/10.21814/physisterrae.402>
- Silva, Aguinaldo. 2010. "Geomorfologia do megaleque do rio Paraguai, Quaternário do Pantanal Mato-Grossense, centro-oeste do Brasil." Tesis doctoral em Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro-SP.
- Sotchava, Viktor Borisovich. 1977. *O Estudo de Geossistemas*. São Paulo: Instituto de Geografia, USP.
- Sullivan, D. 2009. "Google Earth Pro." *EContent* 32 (3): 16-18.
- Tricart, Jean. 1977. *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro: IBGE-SUPREN (Recursos Naturais e Meio Ambiente).
- Tricart, Jean; Kilian, Jean. 1982. *La Eco-geografia y la ordenacion del medio natural*. Barcelona: Editorial Anagrama.

- Troll, Carl. 1971. "Landscape Ecology (Geoecology) and Biogeocenology—A terminological study." *Geoforum* 1 (4): 43-46. [https://doi.org/10.1016/0016-7185\(71\)90029-7](https://doi.org/10.1016/0016-7185(71)90029-7)
- USDA (United States Department of Agriculture). 1999. Soil Taxonomy: a Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. Consultado el 14 de septiembre del 2021. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051232.pdf
- USDA (United States Department of Agriculture). 2014. Keys to Soil Taxonomy Twelfth Edition. Consultado el 14 de septiembre del 2021. https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/class/taxonomy/?cid=nrcs142p2_053580
- Wischmeier, Walter H., y Dwight David Smith. 1978. *Predicting rainfall erosion losses*. Washington, D.C.: Department of Agriculture, Science and Education Administration.

Edson Rodrigo dos Santos da Silva

Licenciado en Geografía por la Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campus do Pantanal, es magíster en Geografía por la Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campus de Três Lagoas, actualmente cursa el Doctorado en Geografía en la Universidade de Mato Grosso do Sul, Campus de Três Lagoas. Miembro del Laboratorio de Teledetección (LaSer-CPTL-UFMS), trabaja en Geoprocusamiento y Teledetección, principalmente, en áreas relacionadas con la Cuenca del Alto Paraguay (BAP), incluido el Pantanal.

Víncler Fernandes Ribeiro de Oliveira

Graduado en Ciencias Biológicas por la Universidade Estatal de Mato Grosso do Sul (2013). Estudiante de doctorado (2019) en el Programa de posgrado en Geografía de la UFMS, Campus Três Lagoas. Miembro del Laboratorio de Teledetección (LaSer) de la misma institución. Cuenta con una beca de la CAPES y trabaja científicamente en los temas: medio ambiente, cuencas hidrográficas, uso y cobertura del suelo, fragilidad ambiental, geoprocusamiento, además de tener experiencia operativa con diferente información geográfica. Sistemas (SIG).

Erivelton Pereira Vick

Licenciada en Geografía por la Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, FCT-UNESP (2013-2016). Magíster en Geografía de la Universidad Federal de Mato Grosso do Sul-UFMS (2017-2019). Actualmente es candidato a doctorado en Geografía en la Universidad Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Campus Três Lagoas. Miembro del Laboratorio de Teledetección (LaSer) de la misma institución. Activo en las áreas de Modelado de Sistemas Ambientales, Teledetección y Cuencas.

César Gustavo da Rocha Lima

Licenciado en Geografía por la UFMS-CPTL. Magíster y Doctorado en Agronomía por la Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS-UNESP). Postdoctoral en Geografía (UFMS) en el Área de Análisis Geoambiental. Es profesor adjunto del Área de Geotecnia de la Facultad de Ingeniería de Ilha Solteira. Tiene experiencia en Ciencias del Suelo con énfasis en Física de Suelos, Mecánica de Suelos, Manejo/Conservación de Suelos y Aguas, Medio Ambiente, Cuencas Hidrográficas, SIG y Análisis Geoestadístico.

Vitor Matheus Bacani

Profesor de la Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campus Três Lagoas. Licenciado en Geografía en la UFMS-CPTL (2005), magíster en Geografía de en la UFMS-CPAQ (2007) y doctor en Geografía Física (2010) en la Universidade de São Paulo (FFLCH-USP). Desarrolló su pasantía posdoctoral (2014-2015) en el Laboratorio LETG-Rennes-COSTEL de la Université de Rennes 2, Francia. Trabaja en las áreas de Teledetección, SIG, Modelización de Sistemas Ambientales, Cuencas Hidrográficas, Pedología, Zonificación Ambiental y Pantanal.

Eduardo Salinas Chávez

Licenciado en Geografía (1976) y doctor en Geografía (1991) por la Universidad de La Habana, Cuba. Magíster en Gestión Turística para el Desarrollo Local y Regional (2003) por la Universidad de Barcelona, España. Posdoctorado en Geografía por la Universidade Federal da Grande Dourados (2018), MS, Brasil. Profesor Titular jubilado de la Universidad de La Habana. Líneas de investigación: Geoecología, Ordenamiento Territorial y Turismo. Actualmente es Profesor Visitante en la Universidad Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil.