

PROJETO E APLICAÇÃO BASEADA EM SIG DE UM MODELO DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL PARA A BACIA DO ARROIO LUNAREJO EM RIVERA, URUGUAI

Gabriel Freitasⁱ

Licenciado em Recursos Naturais.
Máster em Ensino Universitário.
Facultad de Ciencias, Udelar

Marcel Achkarⁱⁱ

Licenciado em Geografia. Máster em Ciências Ambientais e Doutor em Ciências Agronómicas.
Facultad de Ciencias, Udelar

Rodrigo Childeⁱⁱⁱ

Licenciado em Recursos Naturais.
Estudante de Mestrado em Geografia (UFSM).
Centro Universitario de la Región Noreste, Udelar

ⁱ Endereço institucional:

Atilio Paiva, N°415, Rivera, Uruguay.

Endereço eletrônico:

gfreitas@fcien.edu.uy

ⁱⁱ Endereço institucional:

Iguá N°4225, andar 14. Montevideo, Uruguay

Endereço eletrônico:

achkar@fcien.edu.uy

ⁱⁱⁱ Endereço institucional:

Ituzaingó N°667, Rivera, Uruguay

Endereço eletrônico:

rchilde@fcien.edu.uy

Resumo

O uso de bacias hidrográficas como unidades de gestão do território na América Latina não é novo e remonta à década de 1930. Posteriormente e à luz de novos paradigmas de desenvolvimento, a bacia hidrográfica assume um papel central como unidade territorial em um sentido mais amplo, integrando os subsistemas biofísicos e sociais. O conceito de vulnerabilidade tem sido utilizado em diferentes áreas do conhecimento, como por exemplo a gestão do território, pois permite integrar diferentes variáveis e identificar pontos de suscetibilidade a ameaças, além de melhorar as estratégias de gestão, conservação e restauração de áreas degradadas. O objetivo deste trabalho foi desenhar e aplicar uma proposta metodológica que permitisse uma definição espacialmente explícita de vulnerabilidade ambiental para a bacia do Arroio Lunarejo, localizada na região nordeste do Uruguai. O modelo integrou diferentes variáveis relacionadas aos sistemas biofísico e antrópico. As informações foram organizadas em dois submodelos: um modelo de fragilidade e um modelo de ameaças. Os resultados permitiram identificar, quantificar e apresentar graficamente a variabilidade espacial da vulnerabilidade do ambiente para a bacia. Os resultados permitiriam concluir que tanto a fragilidade quanto as ameaças apresentam padrões heterogêneos de distribuição espacial, podendo destacar áreas e locais específicos de alto valor ambiental e também locais com níveis significativos de ameaças. O modelo gerado assim como a identificação dos impactos de atividades específicas podem apoiar a tomada de decisões em relação à planificação territorial geral na bacia.

Palavras-chave: Bacia Hidrográfica, Território, Vulnerabilidade, Ameaça, Fragilidade.

DISEÑO Y APLICACIÓN BASADA EM SIG DE UM MODELO DE VULNERABILIDAD TERRITORIAL PARA LA CUENCA DEL ARROYO LUNAREJO EM RIVERA, URUGUAY

Resumen

El uso de cuencas hidrográficas como unidad de gestión territorial en América Latina y el Caribe no es nuevo y se remonta a la década de 1930. A la luz de nuevos enfoques o paradigmas de desarrollo, la cuenca asume un papel central como unidad de gestión del territorio en un sentido más amplio, integrando los subsistemas biofísicos y social. El concepto de vulnerabilidad se ha utilizado en diferentes áreas del conocimiento. Se han realizado trabajos basados en este concepto sobre la gestión del territorio, ya que permite integrar variables e identificar puntos de susceptibilidad a amenazas, además de mejorar estrategias de gestión, conservación y restauración de áreas degradadas. El objetivo de este trabajo fue diseñar una propuesta metodológica que permitiera una definición espacial de la vulnerabilidad ambiental para la cuenca Arroyo Lunarejo, ubicada en la región noreste de Uruguay. El modelo integró variables relacionadas con los sistemas biofísico y antrópico. La información se organizó en un modelo de fragilidad y un modelo de amenazas. Los resultados permitieron identificar, cuantificar y presentar gráficamente la variabilidad espacial de la vulnerabilidad del medio ambiente a la cuenca. Los resultados permitieron concluir que tanto la fragilidad como las amenazas presentan patrones heterogéneos de distribución espacial en la cuenca, resaltando lugares específicos de alto valor ambiental y lugares con niveles significativos de amenazas. El modelo generado, así como la identificación de los impactos de actividades específicas pueden apoyar la toma de decisiones en relación con la planificación territorial general en la cuenca.

Keywords: Cuenca hidrográfica, Territorio, Vulnerabilidad, Amenaza, Fragilidad,

Introdução

A definição hidrológica de uma bacia hidrográfica não é nova. Consiste essencialmente em uma parte do território que drena superficialmente a água para um canal principal e é delimitada pelas partes superiores do território ou divisórias de água (ACHKAR et al, 2004). O uso de bacias hidrográficas como unidade de gestão do território na América Latina e no Caribe também não é novo e remonta à década de 1930 (DOUREJEANNI, 2000). No entanto, mais recentemente e à luz de novas abordagens ou paradigmas de desenvolvimento, a bacia hidrográfica assume um papel central como unidade de gestão em um sentido mais amplo, integrando a subsistemas biofísicos e sociais. Essa ferramenta ou abordagem conceitual busca gerar alternativas aos conceitos tradicionais na gestão de recursos naturais, com visões setoriais, utilitárias e atemporais, possibilitando a abordagem do território a partir de uma perspectiva ambiental, facilitando seu diagnóstico e manejo a partir de uma interpretação integral da operação do sistema.

No mesmo sentido, o conceito de vulnerabilidade tem sido utilizado em diferentes áreas do conhecimento, desde a sociologia até os recursos naturais (ADGER, 2006; TORO, 2012; TRAN, 2012). Existem várias definições para esse termo devido ao número de abordagens sobre o assunto (FÜSSEL, 2007), pelo que não há teorias ou modelos universais (JAMSHED et al, 2018). Para alguns autores, a vulnerabilidade é uma propriedade emergente de um sistema exposto a uma ameaça, que corresponde à predisposição a ser afetada ou suscetível a danos causados por um distúrbio (CARDONA, 2001; TURNER, 2003; LUERS, 2003).

Muitos trabalhos foram realizados com base nesse conceito sobre a gestão do território (FURLAN, 2011; TORO, 2012), sendo parte importante até em estudos de impacto ambiental (GÓMEZ, 2001; TORO, 2012). Além disso, o conceito é cada vez mais utilizado como ferramenta para a gestão de territórios, pois permite integrar diferentes variáveis e identificar pontos de suscetibilidade a ameaças (ADGER, 2006; TRAN, 2010; FURLAN, 2011), além de melhorar as estratégias de gestão, conservação e restauração de áreas degradadas.

Nesse sentido, o conceito de vulnerabilidade oferece uma visão abrangente e alternativa à abordagem tradicional de avaliação de impacto ambiental (TORO, 2012), permitindo a identificação de áreas particularmente sensíveis a impactos futuros (TRAN, 2010), devido à natureza acumulativa dessa característica do território (CEPAL, 2010). Também facilita a identificação de interações críticas no sistema ambiental (natural - humano), melhorando a capacidade dos tomadores de decisão (Turner, 2003).

Um dos desafios em torno ao conceito de vulnerabilidade está relacionado à definição conceitual de aspectos importantes sobre como abordar a sua avaliação (BERROUET et al. 2018). Conceitos como vulnerabilidade, fragilidade ou ameaça muitas vezes levam à confusão e à impossibilidade de fazer comparações entre diferentes estudos (BERROUET ET AL. 2018; FÜSSEL 2007). Por exemplo, o tipo de ameaça a ser estudada é um elemento central na avaliação da vulnerabilidade (ADGER 2006; BERROUET et al. 2018; FÜSSEL, 2007). Esse conceito frequentemente refere-se a um fator de estresse que pode causar alterações no sistema analisado. Cardona (2005), por exemplo, define “ameaça” como a probabilidade de ocorrência de um evento com uma determinada intensidade durante um período de exposição.

Por outro lado, a sensibilidade do sistema analisado é outro parâmetro chave na vulnerabilidade (ADGER 2006; LUERS 2005; TURNER ET AL. 2003). Adger (2006) refere-se à sensibilidade como o grau ao qual um sistema pode ser modificado ou afetado por perturbações em quanto que Luers (2005) a define como o grau em que um sistema responderá a uma força perturbadora externa. No entanto, outras expressões como suscetibilidade ou fragilidade são usadas para se referir a este componente. Finalmente Gaviño (1999) afirma que os modelos de fragilidade são baseados na análise do ambiente e a seleção de variáveis - chave da área, local ou região, relacionadas à suscetibilidade do meio ambiente e possíveis mudanças significativas em sua estrutura e função. Estudos anteriores mostram que essas dimensões geralmente incluem variáveis do ecossistema como solo, declive, condições do ar ou recursos hídricos (GAVIÑO, 1999).

O desenvolvimento de indicadores de vulnerabilidade é um elemento central para a tomada de decisões (AROCA JIMENEZ ET AL, 2018; TURNER, 2003) e no GeoPUC, Rio de Janeiro, v. 13, n. 26, p. 166-187, jul-dez. 2020

desenvolvimento de políticas para áreas e grupos vulneráveis (EAKIN E LUERS, 2006; BIRKMANN et al, 2013). Modelos de vulnerabilidade construídos a partir da integração de índices tem dominado as estratégias de quantificação (DÍAZ et al, 2017). Eles são usados porque permitem que diferentes dimensões da vulnerabilidade sejam incorporadas (BIRKMANN, 2006). No entanto, eles apresentam uma série de limitações metodológicas relacionadas a subjetividades e a ponderação das variáveis que as compõem (LUERS ET AL. 2003; FÜSSEL 2010).

Galacho (1998) acrescenta que uma das ferramentas para a construção desses modelos consiste em preparar mapas temáticos dos diferentes componentes, combinando-os posteriormente usando técnicas de sistema de informações geográficas (SIG). Nesse sentido, existem vários antecedentes que vinculam o uso do SIG como ferramenta para modelar a vulnerabilidade no território, como o trabalho realizado por BARTESAGHI (2011), GASPARI, 2011, LIAO (2013), DIAZ (2013) ou FREITAS et al. (2019).

O presente trabalho constitui uma das primeiras aproximações no Uruguai a integrar os elementos conceituais e técnicos antes mencionados em uma proposta metodológica orientada para a gestão integrada do território. Especificamente, o objetivo assumido foi o desenho e aplicação de uma proposta metodológica que permitisse uma definição espacialmente explícita de vulnerabilidade do território nas bacias hidrográficas, através do uso de um SIG. Espera-se que esse tipo de modelos e abordagens, ainda que em etapa inicial e em processo de desenvolvimento, permitam uma melhor leitura dos componentes do ambiente, de suas ameaças e das inter-relações entre eles, fortalecendo as capacidades de planificação e gerenciamento do território.

Metodologia

Para realizar este trabalho foi escolhida a bacia do Arroio Lunarejo, localizada no nordeste do Uruguai, na região leste do departamento de Rivera, perto da fronteira com a República Federativa do Brasil (Figuras 1). A escolha foi baseada na sua heterogeneidade em termos de unidades ambientais e a presença conhecida de GeoPUC, Rio de Janeiro, v. 13, n. 26, p. 166-187, jul-dez. 2020

diferentes atividades produtivas. Também é importante destacar que na bacia encontra-se a área protegida "Vale do Lunarejo", integrada com a categoria de "Paisagem Protegida"¹ no Sistema Nacional de Áreas Protegidas do Uruguai por decreto presidencial de 2009, constituindo este também um elemento de interesse para a eleição da área de trabalho.

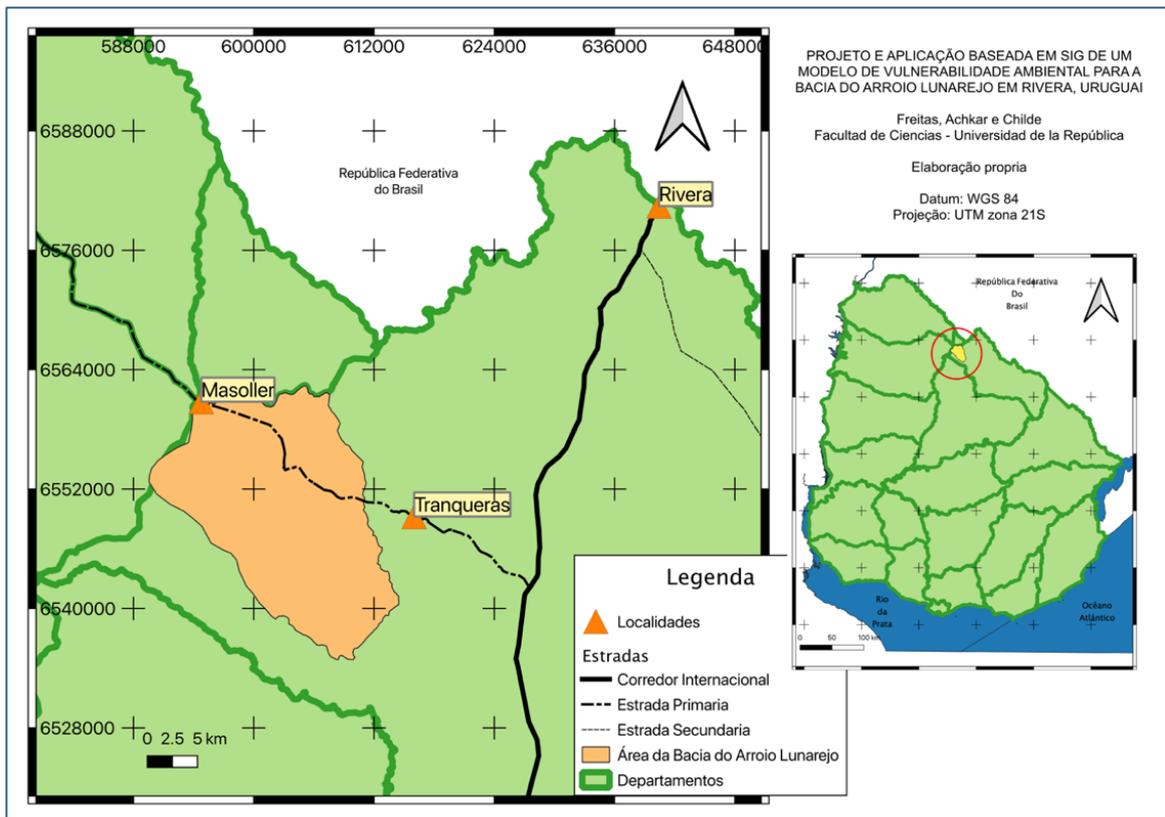


Figura 1. Localização da Bacia do Arroio Lunarejo

O Arroio Lunarejo é um afluente do Rio Tacuarembó e sua bacia é delimitada ao oeste e norte pela *Cuchilla de Haedo* e ao sul pela *Cuchilla de la Venta*. A bacia delimitada tem uma área próxima a 40.000ha (Figura 2), com alturas acima de 350m sobre o nível do mar e declives acentuados correspondentes a serras e escarpas (zonas de borda erosiva ou *front* erosivo do planalto basáltico). Para a delimitação da bacia,

¹ Equivalente a categoria V da classificação UICN: Paisagem terrestre ou marinha protegida: Objetivo: Proteger e manter importantes paisagens / paisagens marítimas e conservação da natureza associada, bem como outros valores criados por interações com seres humanos por meio de práticas tradicionais de manejo (UICN, 2020).

foram utilizadas cartas 1:50.000 do Serviço Geográfico Militar do Uruguai, além de informações topográficas geradas a partir de um Modelo Digital de Terreno disponível no site da NASA.

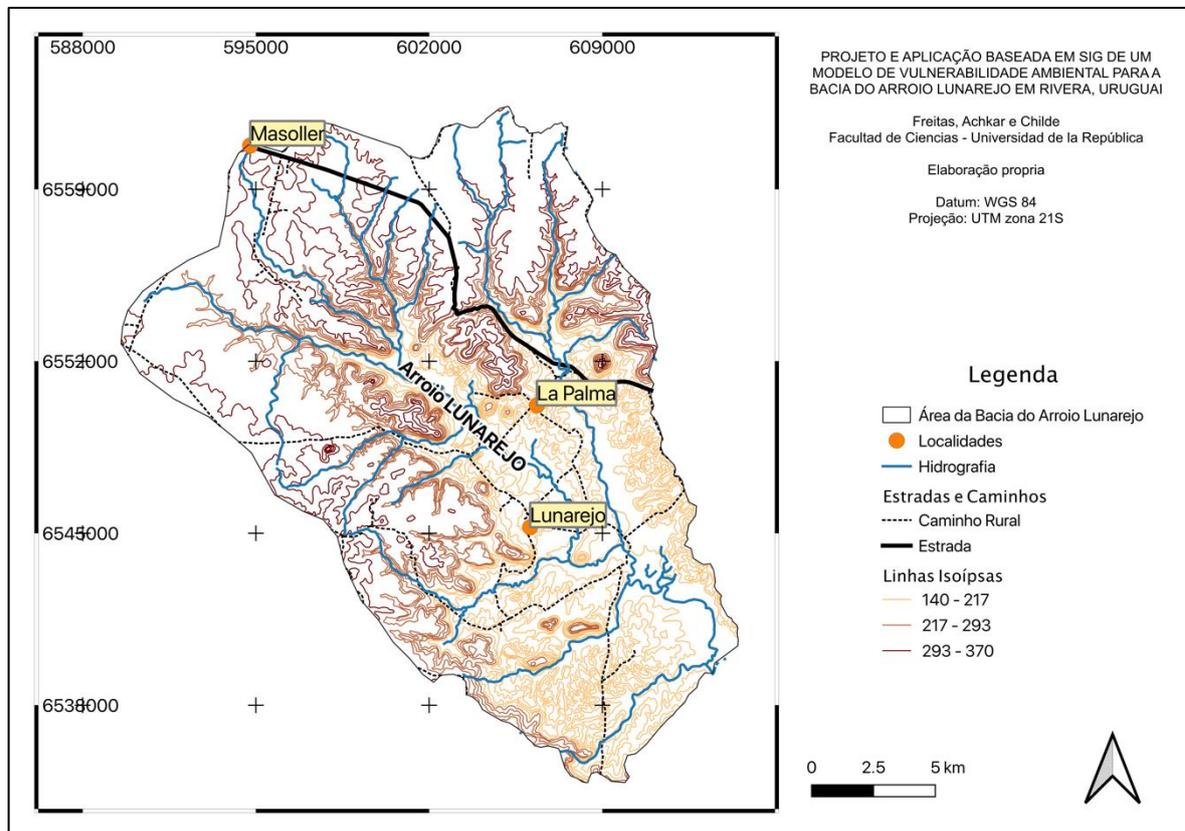


Figura 2: Mapa da Bacia do Arroio Lunarejo

A construção do modelo de vulnerabilidade apresenta como principais antecedentes os trabalhos de Freitas, 2019; Ippolito et al, 2010; Muller, 2005; Turner et al, 2003 e Muller et al 2000, onde se integram um grande número de fatores na análise da vulnerabilidade de sistemas biológicos, sociais ou produtivos. Para a construção do modelo, as informações foram organizadas em dois submodelos: um modelo de fragilidade do ambiente (MF) e um modelo de ameaças sobre o ambiente (MA) levando em consideração as propostas de Gómez (2007). A definição das variáveis para a construção de cada um dos modelos foi feita a partir de consultas bibliográficas e trabalhos de campo na área.

As unidades de análise foram quadrados de 1 ha de superfície, que formaram um *grid* com um total de 39.190 unidades. As informações utilizadas para o trabalho foram obtidas de fontes indiretas e foram processadas usando software para SIG, usando como referencial geográfico o sistema UTM, WGS84, zona 21S.

Em relação à operação entre variáveis, Villa (2002) destaca a importância de elaborar modelos simples para reduzir o número de níveis de agregação, embora recomende o uso de pelo menos dois níveis. Por outro lado, o mesmo autor diferencia mecanismos de agregação linear (por exemplo, soma) de mecanismos não lineal (por exemplo, multiplicação), indicando que estes refletem melhor os níveis de interação entre as variáveis. Para este trabalho em particular dois níveis de agregação da informação foram utilizados. No primeiro nível as variáveis que definiram os submodelos "Fragilidade" (MF) e "Ameaças" (MA) foram multiplicadas para gerar ambos mapas. No segundo nível, os valores de cada submodelo, uma vez normalizados, foram adicionados para obter o valor final da vulnerabilidade para cada unidade. As variáveis não foram previamente ponderadas, mas o peso específico delas na variabilidade do modelo foi explicado através da Análise de Componentes Principais.

O MF foi baseado na análise do ambiente e na seleção de variáveis relacionadas à sua suscetibilidade. Nessa perspectiva, claramente dependente do contexto em que cada modelo é construído, o modelo proposto integrou 6 atributos que descrevem a variação na fragilidade do componente ambiental na área de estudo. Cada um desses atributos foi classificado em três classes com diferentes valores de fragilidade (1 menor fragilidade e 3 maior fragilidade) (Tabela 1).

Tabela 1: Variáveis do Modelo de Fragilidade, segundo definição, detalhe e valor de fragilidade.

Variável	Definição	Detalhe	Valor de Fragilidade		
			1	2	3
Declive	Declive no terreno	Determina maior ou menor concentração ou dispersão de energia para a mobilização de sedimentos.	Suave (0 a 2%)	Media (3 a 8%)	Forte (8%<)
Altura	Metros sobre o nível do mar	Quanto menor a altura, maior a energia da água durante a drenagem, resultando em uma área com maior suscetibilidade a alterações.	>100m	Entre 94 y 100m	<93m
Geoforma	Forma do relevo e da paisagem	Determina a concentração ou dispersão de energia, tornando-as mais ou menos suscetíveis a alterações devido à ação do escoamento superficial.	Plano	Côncavo	Convexo
Vegetação	Vegetação dominante	Formações vegetais existentes na área, seguindo a classificação de fragilidade de Lepsch (1991).	Lenhosa	Herbácea	Substituída
Tipos de solo	Tipos de solos na bacia	Os solos de maior profundidade, melhor, avaliam suas características que os tornam menos suscetíveis à degradação e erosão.	Solos profundos, textura argilosa, e com alto teor de matéria orgânica	Solos profundos, textura arenosa argilosa, drenagem imperfeita e fertilidade muito baixa	Solos superficiais com alta rochiosidade
Fauna	Riqueza de espécies	Os locais com os maiores valores de riqueza de espécies contêm um número maior de espécies ameaçadas.	Riqueza média	Riqueza média	Riqueza alta

Uma vez obtidos os valores para cada atributo em cada unidade, para cada uma das 5 variáveis, esses valores foram integrados para obter um gradiente de fragilidade de acordo com a seguinte equação: {Fragilidade = FrS x FrD x FrG x FrV x FrF}, sendo *FrS* o valor de fragilidade do solo, *FrP* o valor de fragilidade do declive, *FrG* o valor de fragilidade da geoforma (convexidade), *FrV* o valor da fragilidade da vegetação e *FrF* o valor da fragilidade da fauna.

Para a construção do MA foram consideradas as atividades antrópicas (mais precisamente, atividades produtivas) como principais agentes que alteram os ciclos ambientais na bacia observada. Para isso, os usos do solo e seu potencial impacto no meio ambiente foram identificados e classificados com base no trabalho realizado por Prados (2002), mais precisamente em sua proposta de índice de intensificação agrária, gerando valores que variaram entre 1 (menor ameaça) e 4 (maior ameaça), a partir dos usos do solo relevados na bacia (ver tabela 2).

Tabela 2: Classes de uso de Solo e valor de Ameaça

Uso do solo	Detalhe	Valor de ameaça
Floresta nativa e Pantanais	Solos cobertos com floresta nativa ou áreas parcialmente alagadas com vegetação de pantanal	1
Pastaçais	Pasturas naturais	2
Plantações Florestais	Plantações de Eucaliptus com fins comerciais	3
Agricultura	Áreas com algum tipo de cultivo	4

Estes valores foram aplicados para cada unidade para os anos de 1995, 2005 e 2015. O período observado procurou incluir o tempo anterior à atividade florestal e o estabelecimento da área protegida na área. Além disso, foi obtido um valor de ameaça para cada unidade para os processos ocorridos entre 1995 e 2005, 2005 e 2015 e para o total dos 20 anos, buscando valores parciais do processo e de todo o período. Um valor especial de ameaça foi adicionado a essas informações para áreas urbanas (valor de ameaça 4) e para estradas e caminhos rurais (valor final de ameaça da unidade multiplicado por 2).

Para a definição de usos do solo, foi usada uma imagem Landsat do 8 de fevereiro de 2015 (LANDSAT_SCENE_ID = "LC82240822015045LGN00") obtida no site do United States Geological Survey, também utilizada para calcular o índice de intensificação agrícola daquele ano. Para o cálculo do mesmo índice nos anos de 1995 e 2005, foram utilizadas imagens Lansat 5 (LANDSAT_SCENE_ID =

"L5TM19951021224082" e LANDSAT_SCENE_ID = "LT52240822005065CUB00") para os anos de 1995 e 2005, respetivamente), também disponíveis no site do United States Geological Survey.

Os valores obtidos foram integrados para cada unidade da grade para obter um gradiente de ameaça único, de acordo com a seguinte fórmula: {Ameaça = $(a_{95} \times a_{05} \times a_{15}) \times a_{95_05} \times a_{05_15} \times a_{95_15}$ }, sendo a_{95} o valor da ameaça para o ano 1995, a_{05} o valor de ameaça para o ano 2005, a_{15} o valor da ameaças para 2015, a_{95_05} o valor de ameaça para o período entre os anos de 1995 e 2005, a_{05_15} o valor de ameaça para o período entre os anos de 2005 e 2015 e finalmente a_{95_15} o valor de ameaça para o período entre os anos de 1995 e 2015.

Finalmente, para obter o modelo de vulnerabilidade (MV) os valores obtidos para os mapas de fragilidade e ameaça foram normalizados em intervalos de 0 a 100. Para obter o valor final da vulnerabilidade em cada unidade, os valores de fragilidade e ameaça foram adicionados como indicado na equação: {Vulnerabilidade = $Fr + Am$ }, sendo Fr o valor final de Fragilidade para cada unidade e Am o valor final de Ameaça para cada unidade.

Para avaliar a autocorrelação espacial das informações geradas, foi utilizada uma ferramenta estatística denominado Índice Moran. O Índice de Moran (MORAN, 1948) é uma medida de autocorrelação espacial que essencialmente é o coeficiente de correlação de Pearson com uma matriz de ponderação de localização espacial que mantém o intervalo entre -1 e 1. A hipótese nula responde à afirmação em que a configuração espacial é aleatória e, na alternativa (H_1), a configuração espacial não é aleatória. O nível de significância indica que a probabilidade de rejeitar a hipótese nula é verdadeira. O software estadístico calcula o valor do Índice Moran e um escore z e um valor P para avaliar a significância desse índice. Os valores de P são aproximações numéricas da área sob a curva de uma distribuição conhecida, limitada pela estatística do teste.

Antes de analisar a matriz resultante com os dados de vulnerabilidade e suas variáveis para cada Unidade para o análise de componentes principais (ACP), foram realizadas outras análises para determinar a viabilidade de submeter os dados ao ACP. Estas foram a medida de adequação da amostra de Kaiser - Meyer - Olkin (KMO) e o GeoPUC, Rio de Janeiro, v. 13, n. 26, p. 166-187, jul-dez. 2020

teste de esfericidade de Bartlett. Os valores dos testes de esfericidade KMO e Bartlett são medidas de adequação da amostra. Um valor KMO abaixo de 0,5 indicaria que ele não deve ser usado na análise fatorial com os dados da amostra sendo analisados. Por outro lado, o teste de esfericidade de Bartlett testa a hipótese nula de que a matriz de correlação observada é realmente uma matriz de identidade. Se o nível crítico (Sig.) fosse maior que 0,05, não seria possível garantir que o modelo fatorial fosse adequado para explicar os dados. Uma vez sistematizada a informação, foi realizada a ACP com o objetivo de conhecer o comportamento multivariado do sistema e o possível agrupamento das variáveis.

Para a elaboração dos mapas, os valores de Fragilidade e Ameaças foram classificados em três categorias, tendo como critério o método de rupturas naturais ou Jenks. O mesmo mecanismo foi usado para o mapa final de vulnerabilidades, mas desta vez com cinco categorias para uma análise mais detalhada do comportamento da vulnerabilidade na bacia.

Resultados

A partir das variáveis escolhidas para descrever a fragilidade do ambiente na bacia, foi obtida a distribuição espacial da fragilidade para a área (Figura 3). O mapa de fragilidade mostra que as áreas com os maiores valores estão associadas às áreas de escarpas, enquanto os menores valores são encontradas nas áreas de planalto e no centro do vale.

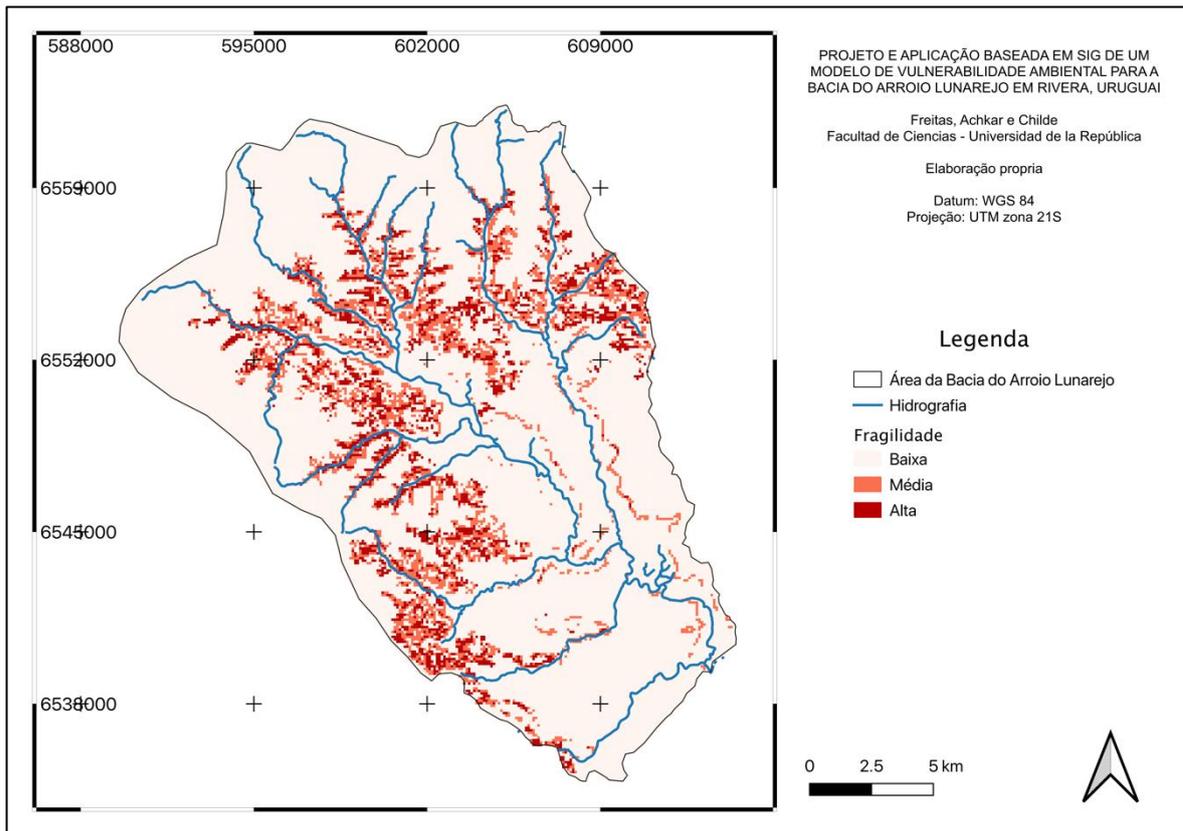


Figura 3: Modelo de Fragilidade do Ambiente

Mais precisamente, o MF resultante indica que o 70% (27427ha) do total de área da bacia encontra se em situação de Baixa Fragilidade, em quanto que um 23% (8876ha) encontra se em situação de Fragilidade Média e, finalmente, o 7% (2787ha) da área de bacia está num cenário de Fragilidade Alta.

A expressão gráfica do submodelo de ameaça é apresentada na figura 4. Em uma matriz geral de baixa ameaça, podem perceber se zonas de valores médios de ameaça ligadas à estradas e cultivos florestais. Por outro lado, as áreas com valores máximos de ameaças constituem alguns parches dispersos.

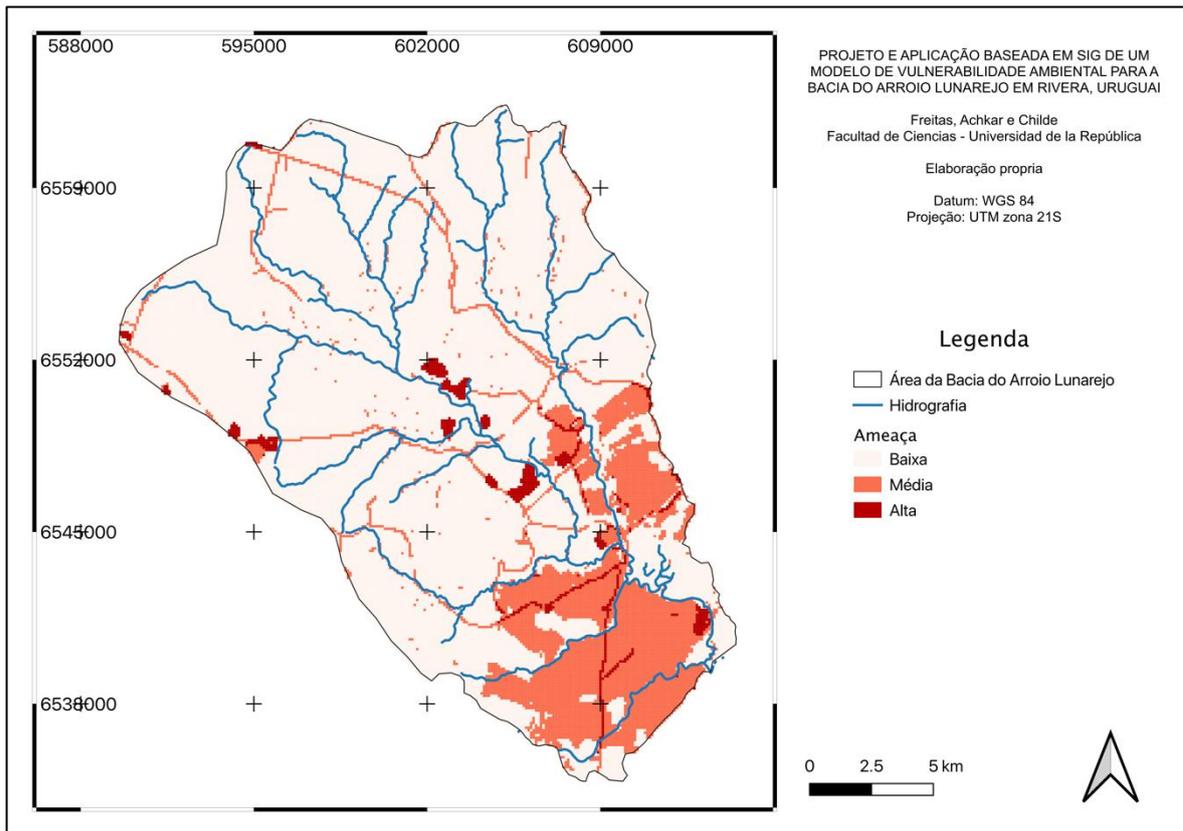


Figura 4: Modelo de Ameaças ao Ambiente

Segundo o MA resultante, temos que um 79% de área encontrasse em situação de ameaça baixa (30984ha), em quanto que o 10% (7332ha) encontra se em ameaça média e somente o 2% (874ha) se encontra em ameaça alta.

Finalmente, a partir dos submodelos anteriores foi construído o modelo de distribuição espacial da vulnerabilidade ambiental para a bacia do Arroio Lunarejo, apresentado na Figura 5, onde os valores são agrupados em 5 categorias. O modelo mostra que ás áreas com maiores valores de vulnerabilidade (Vulnerabilidade Alta: 8% da superfície da bacia) se encontram associadas as escarpas, em quanto que os menores valores de vulnerabilidade (Vulnerabilidade Baixa: 26% da superfície da bacia) encontram-se em zonas de planície tanto no centro do vale, ao redor do Arroio Lunarejo, como no planalto, nas zonas de nascentes. Finalmente, as zonas com valores intermédios (Vulnerabilidade Média - Baixa, Media e Média - Alta: 67% da superfície da bacia) resultaram ocupar a maior parte do território (resultando esperável) e se projetaram sobre áreas com plantações,

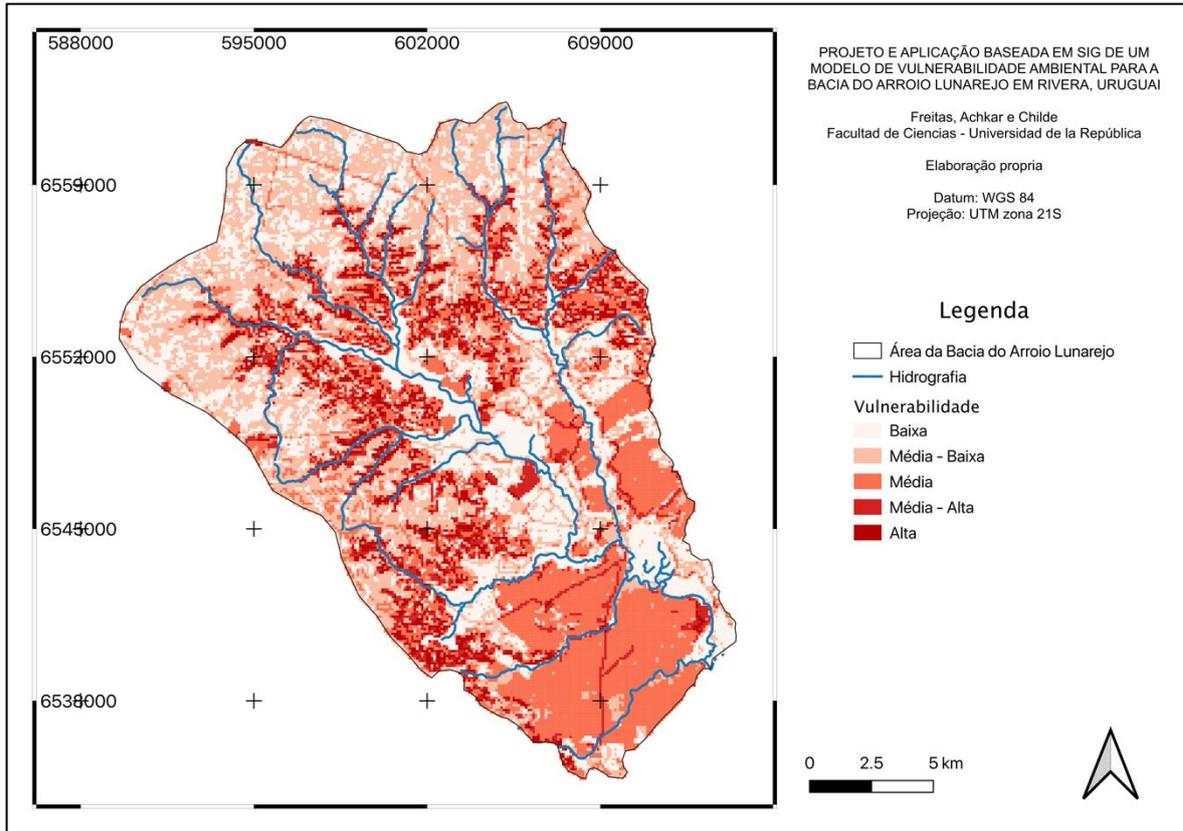


Figura 5: Modelo de Vulnerabilidade Ambiental

A tabela 3, a continuação, apresenta a relação de superfícies em função da categoria de vulnerabilidade para o modelo resultante.

Tabela 3. Classes de vulnerabilidade segundo superfície e percentagem

Vulnerabilidade	Superfície (Ha)	%
Baixa	10397	26
Média - Baixa	12141	31
Média	8622	22
Media - Alta	4982	13
Alta	3048	8
Total	39190	100

A análise de autocorrelação espacial indica a partir do valor do índice de Moran (0,591353) que as informações são espacialmente agrupadas em clusters, em vez de serem randômicas ou dispersas. O valor Z obtido para o modelo foi de 164,9 o qual indica uma possibilidade menor a 1% de que o padrão agrupado seja resultado de uma GeoPUC, Rio de Janeiro, v. 13, n. 26, p. 166-187, jul-dez. 2020

probabilidade aleatória. Este é um importante indicador de que as variáveis integradas ao modelo se relacionam de forma coerente, e que por tanto o resultado é acertado.

Por outra parte, tanto o teste KMO quanto o teste de Bartlett indicaram a adequação da matriz para a análise por meio do ACP (tabela 4), que foi finalmente realizado com 14 variáveis, pois foram excluídas 3 variáveis² de pouca relevância na explicação do modelo após uma análise inicial.

Tabela 4: Teste de KMO y Bartlett

Teste	Valor
Medida Kaiser-Meyer-Olkin	,675
Teste de Esfericidade de Bartlett	660597,580
	Sig. ,000

Finalmente, a ACP indicou que o primeiro componente explica 31,5% da variabilidade e o segundo 30,5%; portanto, quando somados, explicam 62,06% da variabilidade do sistema. Tanto a matriz de componentes (figura 6) como o gráfico de componentes no espaço rotado (figura 6) permitem visualizar que as variáveis relacionadas ao MF tenderam a agrupar se em torno ao componente 1, em quanto que as variáveis relacionadas ao MA tenderam a agrupar se em torno ao componente 2.

²Geoforma, Altura e Tipo de Solo
GeoPUC, Rio de Janeiro, v. 13, n. 26, p. 166-187, jul-dez. 2020

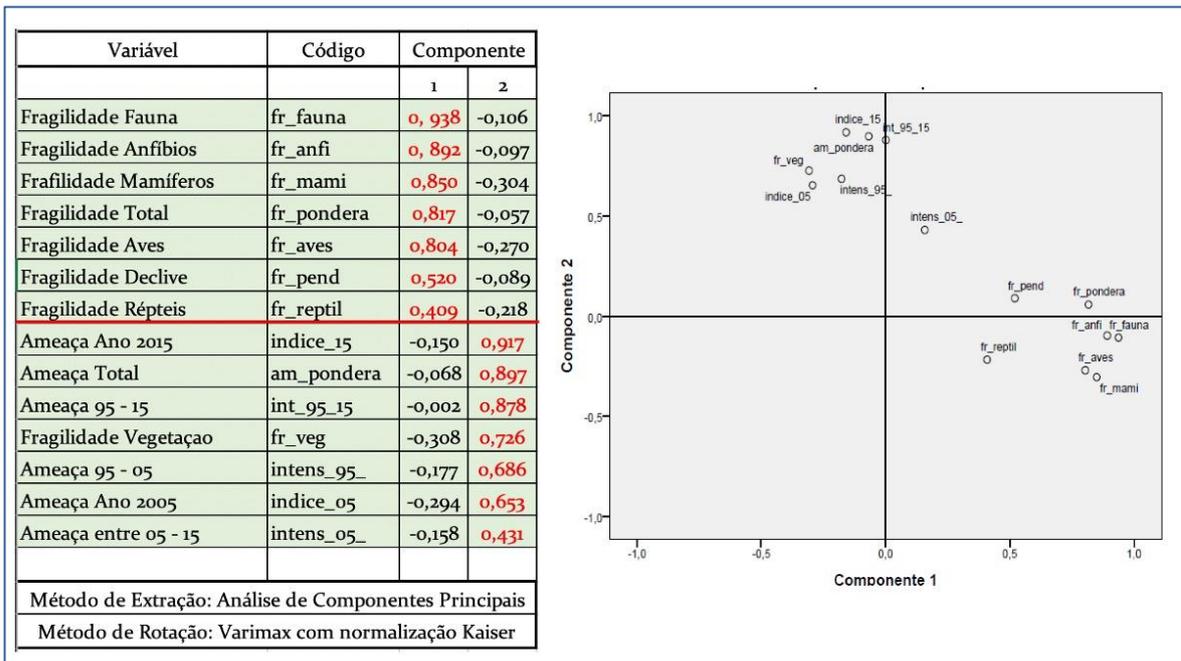


Figura 6: Matriz de Componentes e Gráfico de Componentes em Espaço Rotado

Alem disso, a matriz de componentes (figura 6) mostra a relevância da variável “Fragilidade de Fauna” já que teve maior peso em relação ao componente 1, em quanto que a variável “Ameaça 2015” teve maior peso em relação ao componente 2.

Conclusões e Discussão

Com a metodologia utilizada, foi possível identificar, quantificar e apresentar graficamente a variabilidade espacial da vulnerabilidade do ambiente para a bacia do Arroio Lunarejo. Nesse sentido, o presente trabalho contribui, de acordo com Birkman (2006, p5), para “traduzir o conceito abstrato de vulnerabilidade em ferramentas práticas a serem utilizadas em campo”, dados os desafios que a aplicação do conceito tem do ponto de vista da sua definição teórica e resolução matemática. Alem disso, esta constitui uma das poucas abordagens do assunto no Uruguai, ao menos do ponto de vista ambiental.

Um dos elementos de interesse e ao mesmo tempo um elemento positivo em relação ao esquema conceitual proposto é que ele permite a análise separada dos dois submodelos integrantes do modelo de vulnerabilidade: a fragilidade do ambiente

(Modelo de Fragilidade Ambiental) por um lado e as ameaças (Modelo de Ameaças) por outro. Isso também permitiu analisar em cada caso com especial atenção o comportamento espacial das variáveis que os compõem.

Os submodelos resultantes permitiriam concluir que, neste caso, tanto a fragilidade do ambiente quanto as ameaças apresentam padrões heterogêneos de distribuição espacial na bacia, podendo destacar áreas e locais específicos de alto valor ambiental e também locais com níveis significativos de ameaças.

Em relação à distribuição de ameaças, o valor de ameaça obtido para 2015 teve maior peso na explicação do submodelo, resultado esperado, uma vez que o ele reflete com mais intensidade a situação atual, além do processo ocorrido nos 20 anos observados. As áreas com os maiores valores de ameaça estão associadas às culturas forrageiras e às áreas urbanas, enquanto o setor florestal se encontra em uma situação intermediária de ameaça, juntamente com as estradas.

O modelo de fragilidade mostra que, numa matriz geral de baixa fragilidade do ambiente, as áreas com os maiores valores estão associadas às áreas de escarpas. Embora isso possa indicar sua ligação com a variável "Declive", na realidade reflete o peso da distribuição da "Fauna", conforme expresso no resultado do ACP. Por outro lado, zonas de fragilidade média estão associadas a áreas cultivadas com florestação e parte das áreas de planalto, nas cabeceiras dos cursos de água. O outro elemento interessante que emerge da análise mencionada acima, é a relevância do atributo "Fauna" dentro do mapa de fragilidade. Esse resultado foi bastante surpreendente, pois era esperado que essa variável estivesse mais intimamente ligada a levantamentos como declives, tipos de solo ou geofomas. De qualquer forma, essas variáveis não são independentes, tal como mostra o resultado da análise KMO. Por outro lado, dentro de "Fauna", as informações sobre "Anfíbios" demonstraram maior peso do que em outros grupos funcionais.

A integração dos modelos de fragilidade e ameaças permitiu identificar e quantificar a variação na vulnerabilidade da bacia. O modelo proposto foi validado estatisticamente, tanto em termos da escolha das variáveis quanto dos processos matemáticos de sua integração, começando por um lado com o resultado da análise de autocorrelação espacial que verificou um agrupamento das informações em GeoPUC, Rio de Janeiro, v. 13, n. 26, p. 166-187, jul-dez. 2020

clusters e pela análise de componentes principais realizada, que mostra um agrupamento razoável das variáveis utilizadas. A análise estatística do modelo obtido mostra como dados de interesse que o modelo é explicado principalmente (mesmo que com pouca diferença) pelo componente vinculado à fragilidade (31,5%) e não pelas ameaças (30,5%).

Quando se trata de operacionalizar os conceitos que compõem o modelo de vulnerabilidade, talvez o de “fragilidade” tenha sido o que ofereceu os maiores desafios. Ser capaz de resolver a fragilidade de cada elemento no território, principalmente sob a perspectiva da “fragilidade intrínseca” de cada um, requer maior desenvolvimento. Isso foi resolvido caso a caso para cada uma das 5 variáveis escolhidas, com base principalmente na literatura disponível.

A delimitação das zonas de acordo com os graus de vulnerabilidade pode apoiar a tomada de decisões em relação à planificação territorial geral na bacia e a identificação dos impactos das diversas ações específicas realizadas é relevante no desenvolvimento do plano de manejo da área. Também contribui para a definição de estratégias de gerenciamento de bacias hidrográficas. Nesse sentido, é importante que a diversidade de situações seja distribuída de forma heterogênea dentro da bacia, gerando possibilidades importantes para o desenvolvimento de um plano de manejo que tende a ordenar o conjunto de diversas atividades que são realizadas na bacia.

Como passos a futuro, seria interessante integrar o componente de resiliência dos sistemas ambientais ao modelo de vulnerabilidade gerado. Nesse sentido, Gómez (2001), citando Clark et. al. (2000) define resiliência como a capacidade de resistir ou recuperar-se dos danos associados à convergência de múltiplas pressões. Parte da bibliografia de referência sobre vulnerabilidade menciona este como um terceiro elemento de importância ao considerar a vulnerabilidade no ambiente, uma vez que os ecossistemas com menor capacidade de recuperar-se de um distúrbio também estariam em uma situação de maior vulnerabilidade do que outros.

Também seria interessante explorar a possibilidade de integrar a dimensão temporal ao modelo, uma vez que a vulnerabilidade, além de ser uma propriedade do sistema, varia com o tempo e a correlação entre as variáveis também pode mudar. Isso permitirá, entre outras coisas, modelar a variação da vulnerabilidade na bacia para o GeoPUC, Rio de Janeiro, v. 13, n. 26, p. 166-187, jul-dez. 2020

futuro, de acordo com a estimativa do comportamento das variáveis que compõem o modelo. Por outro lado, esse mesmo componente temporal desse atributo do sistema (vulnerabilidade) limita a validade do modelo proposto, de forma que atualizações sistemáticas, pelo menos de algumas de suas variáveis (relacionadas à fauna e à intensificação agrária, entre outros), seria essencial para mantê-lo atualizado.

Referências

ACHKAR, M; CAYSSIALS, R; DOMÍNGUEZ, A; PESCE, F. **Hacia un Uruguay Sustentable, Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas**; Redes Amigos de la Tierra. 2004.

ADGER, N. **Vulnerability**. *Global Environmental Change*, 16(3), 268–281. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>. 2006.

AROCA-JIMÉNEZ, E., BODOQUE, J. M., GARCÍA, J. A., & DIEZ-HERRERO, A. **A quantitative methodology for the assessment of the regional economic vulnerability to flash floods**. *Journal of Hydrology*, 565, 386–399. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.029>. 2018.

BARTESAGHI, L. **Modelización de la vulnerabilidad del territorio a la erosión frente a distintos escenarios de uso del suelo**. *Aportes para la Planificación del Territorio*. Maldonado, Uruguay. *Tesis Licenciatura en Geografía*. Facultad de Ciencias. Montevideo Uruguay. 72pp. 2011.

BIRKMAN, J. **Measuring the Un Measurable, The Challenge of Vulnerability**. Studies of the University: Research, Consel, Education; Publication Series of UNU-FHS/N°5. 2006.

BURROUGH, A. **Principles of Geographic Information Systems for Land Resource Assessment**. Monographs on Soil and Resources Survey, No. 12, Oxford Science Publications, New York. 1986.

CARDONA, O. **La Necesidad de Repensar de Manera Holística los Conceptos de Vulnerabilidad y Riesgo**. Work Conference on Vulnerability in Disaster Theory and Practice; Holanda. 2001.

CUTTER, L. **Vulnerability to environmental hazards**. *Progress in Human Geography*, 20(4), 529–539. <https://doi.org/10.1177/030913259602000407>. 1996.

DÍAZ, I. **Modelación de los aportes de nitrógeno y fósforo en cuencas hidrográficas del departamento de Canelones (Uruguay)**. Tesis de Maestría en GeoPUC, Rio de Janeiro, v. 13, n. 26, p. 166-187, jul-dez. 2020

Ciencias Ambientales. Facultad de Ciencias. Universidad de la República. Uruguay. 88pp. 2013.

FREITAS, G. DÍAZ, I. BESSONART, M. DA COSTA, E. ACHKAR, M. **An ecosystem-based composite spatial model for floodplain vulnerability assessment: a case study of Artigas, Uruguay.** *GeoJournal*. 78 (4). 2019,

FURLAN, A., BONOTTO, D. M., & GUMIERE, S. J. **Development of environmental and natural vulnerability maps for Brazilian coastal at São Sebastião in São Paulo State.** *Environmental Earth Sciences*, 64(3), 659-669. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0886-7>. 2011.

FÜSSEL, M. **Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research.** *Global Environmental Change*, 17(2), 155-167. <https://doi.org/10.2007>.

GAVIÑO, M. SARANDÓN, R. **El uso de indicadores ambientales y de intervención en la gestión ambiental.** Actas del V Seminario Internacional Ingeniería y Ambiente. La Plata 7 y 8 de Noviembre de 2000. *Serie Gestión Ambiental* Nº 3. La Plata, Depto. de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería. 2000.

GASPARI, F. *et al.* **Vulnerabilidad Ambiental en Cuencas Hidrográficas Serranas Mediante SIG.** *Revista Multequina* Nº 20, pp 3 - 13. 2011.

JAMSHED, A. RANA, A. BIRKMANN, J. NADEEM, O. **Changes in vulnerability and response capacities of rural communities after extreme events: Case of major floods of 2010 and 2014 in Pakistan.** *Journal of Extreme Events*, 4(03). <https://doi.org/10.1142/s2345737617500130>. 2018.

LIAO, X. LI, W. HOU, J. **Application of GIS based ecological vulnerability evaluation in environmental impact assessment of master plan of coal mining areas.** *Procedia Environmental Sciences*. 18, 271 - 276; Elsevier. 2013.

LUERS, L. **The surface of vulnerability: An analytical framework for examining environmental change.** *Global Environmental Change*, 15(3), 214-223. 2005.

MORAN, P. **The interpretation of satstistical maps.** *Journal of the Royal Statistical Society B*, v.10, 243-251 p. 1948.

Naciones Unidas; Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo. **La Gestión del Riesgo de Desastres Hoy; Glosario de Términos.** Disponible en: <http://www.eird.org/gestion-del-riesgo/>. 2008.

PRADOS, M. **Metodología para la identificación y el análisis de procesos de intensificación agrícola mediante la utilización de Sistemas de Información Geográfica e imágenes de satélite. Caso práctico en la cuenca del Guadiamar (proyecto SITCOVER).** X Congreso del Grupo de Métodos Cuantitativos, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección (10º. 2002). 2002.

GeoPUC, Rio de Janeiro, v. 13, n. 26, p. 166-187, jul-dez. 2020

SMITH, L. **A tutorial on Principal Components Analysis**, Universidad de Otago; Nueva Zelanda. 2002.

TORO, J., DUARTE, O., REQUENA, I., & ZAMORANO, M. **Determining vulnerability importance in environmental impact assessment. The case of Colombia**. *Environmental Impact Assessment Review*, 32(1), 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2011.06.005>. 2012.

TRAN, L. T., O'NEILL, R. V., & SMITH, E. R. **Spatial pattern of environmental vulnerability in the Mid-Atlantic region, USA**. *Applied Geography*, 30(2), 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2011.06.005>. 2010.

TURNER, B. L., KASPERSON, R. E., MATSON, P. A., MCCARTHY, J. J., CORELL, R. W., CHRISTENSEN, L., ET AL. **A framework for vulnerability analysis in sustainability science**. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(14), 8074–8079. <https://doi.org/10.1073/pnas.1231335100>. 2003.

VILLA, F. **Environmental Vulnerability Indicators for Environmental Planning and Decision-Making: Guidelines and Applications**. *Environmental Management*, Vol. 29, No. 3, pp. 335–348. 2002.

Recebido em 23 jul. 2020;
aceito em 19 dez. 2020.