



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Análise da vulnerabilidade à inundação na Bacia Hidrográfica do rio Sirinhaém, utilizando o Método de Análise Hierárquica

Bárbara de Melo Portela¹, Giovana Bueno Alves², Simone Rosa da Silva³, Kalinny Patrícia Vaz Lafayette⁴

¹ Engenharia Civil. Mestranda do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PEC). TPF Engenharia. Rua Irene Ramos Gomes de Mattos, nº 176, Pina, Recife, Pernambuco, Brasil, 41011-530. bmp2@poli.br. ² Engenharia Civil. Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). TPF Engenharia. Rua Irene Ramos Gomes de Mattos, nº 176, Pina, Recife, Pernambuco, Brasil, 41011-530. giovana.alves@tpfe.com.br. ³ Engenharia Civil. Professora Dr^a em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Universidade de Pernambuco (UPE). Rua Benfica, nº 455, Madalena, Recife, Pernambuco, Brasil, 50720-001. simonerosa@poli.br. ⁴ Engenharia Civil. Professora Dr^a em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Universidade de Pernambuco (UPE). Rua Benfica, nº 455, Madalena, Recife, Pernambuco, Brasil, 50720-001. klafayette@poli.br.

Artigo recebido em 17/03/2023 e aceito em 17/04/2023

RESUMO

As fortes chuvas geram enchentes e inundações, comprometendo a qualidade de vida da população local e causando danos significativos à economia. A bacia do rio Sirinhaém é constituída por rios perenes e promove vazões regularizadas significativas. As fortes chuvas que ocorreram em julho de 2010 causaram, por exemplo, grandes consequências às unidades de saúde básica, unidades de ensino e habitações nos municípios de Barra de Guabiraba, Palmeirinha, Cortês e Gameleira. Dessa forma, o estudo tem como objetivo o mapeamento e a identificação de áreas vulneráveis à inundação utilizando a metodologia AHP, desenvolvida por Saaty em 1970, na bacia do rio Sirinhaém. A metodologia inicialmente atribui grau de importância para as variáveis estudadas, sendo elas: altitude, declividade, tipo de solo, uso e ocupação do solo, e em seguida aplica a álgebra de mapas utilizando o software QGIS. O mapeamento resultante mostra uma região majoritariamente com baixa a moderada vulnerabilidade, apresentando alta vulnerabilidade apenas em áreas de baixas altitudes e declividades, como no exutório da bacia e zonas próximas aos rios.

Palavras-chave: vulnerabilidade; inundação; Processo Hierárquico Analítico (AHP).

Flood vulnerability analysis in the Sirinhaém river basin using the Analytic Hierarchy Process method

ABSTRACT

Heavy rains generate river floods and flash floods, compromising the quality of life of the local population and causing significant damage to the economy. The Sirinhaém river is constituted by perennial rivers and provides a significant capacity of regularized flows. The heavy rains that occurred in July 2010 had, for example, great consequences for basic health units, teaching units and homes at Barra de Guabiraba, Palmeirinha, Cortês and Gameleira. Thus, the study aims to map and the identify areas vulnerable to flooding using the AHP methodology, developed by Saaty in 1970. This methodology initially assigns a degree of importance to the variables studied, namely: altitude, slope, soil type, land use and occupation, and then applies map algebra using the QGIS software. The mapping results revel a region mostly with low to moderate vulnerability, with hight vulnerability seen only in areas of lower altitude and slopes as seen in the basin exutory and river zones.

Keywords: vulnerability. flooding. Analytic Hierarchy Process (AHP).

Introdução

O processo de urbanização, principalmente em áreas ribeirinhas, ocasiona a diminuição de áreas permeáveis, gerando uma redução na taxa de infiltração e consequente aumento do escoamento das águas pluviais, intensificando a frequência e a magnitude dos alagamentos. A urbanização acelerada pode ter efeitos negativos sobre a vida das pessoas e da infraestrutura urbana,

especialmente quando não são implementadas medidas adequadas de gestão das águas pluviais (Garcia e Júnior, 2022).

Em concordância com Brito et al. (2020), a urbanização favorece interferências no regime das águas pluviais, em razão da redução das áreas verdes e permeáveis. Assim, a paisagem é alterada

e a degradação ambiental é uma consequência resultante, conforme apontado por Silva (2020).

De acordo com Cred (2023) os eventos hidrológicos, tendem a ser uma das ameaças mais recorrentes no país e Mantis e Vaz (2019) complementa que esse fenômeno ocorre principalmente em épocas de chuvas intensas.

Frietzen & Binda (2011) afirma que as cidades são formas extremamente agressivas de alteração do ambiente natural e, por consequência, tornam-se palco de diversos impactos ambientais, que resultam em desastres naturais com consequências para a população local.

Os termos “risco”, “perigo”, “susceptibilidade” e “vulnerabilidade” possuem significados diferentes a depender do autor ou contexto, e são muitas vezes utilizados como sinônimos (Silveira, 2018). Nesse caso, o termo vulnerabilidade é aplicado de acordo com a terminologia “vulnerabilidade física” proposta por Cutter (1996), se referindo aos impactos que um sistema pode sofrer devido às suas condições ambientais intrínsecas.

A partir do mapa de vulnerabilidade podem ser eleitas as áreas prioritárias para investimentos, ações e programas do governo, assim como a implementação de políticas públicas para mitigação da vulnerabilidade a inundações da região (Leal, 2020).

Segundo Goerl (2012), o mapeamento de áreas de risco é de fácil implementação e é uma metodologia de baixo custo. De acordo com Sami G. et. al. (2020) o conhecimento prévio das características físicas da região estudada é um passo essencial no estudo da vulnerabilidade. Conforme Pessoa Neto et. al. (2021), a elaboração de mapeamentos deve subsidiar um planejamento urbano adequado, buscando o uso da área de forma que possam ser reduzidos os impactos de grandes eventos hidrológicos.

A análise multicritério permite que seja realizada uma investigação combinada das variáveis, e associada à álgebra de mapas permite a caracterização, agrupamento e classificação de regiões semelhantes. A utilização de recursos do SIG permite a sobreposição e manipulação das variáveis, além de permitir uma análise e apresentação ampla (Leal, 2020).

Partindo da importância dos estudos sobre tal temática, este trabalho tem por objetivo o mapeamento de áreas vulneráveis à inundações na

bacia hidrográfica do Rio Sirinhaém, por meio de aplicação da técnica de processo analítico hierárquico (AHP) com o auxílio de um Sistema de Informação Geográfica (SIG).

Este sistema associado com outras técnicas de geoprocessamento, são fundamentais para o mapeamento e identificação das áreas com risco de acidentes hidrológicos (Pessoa Neto et. al., 2021), sendo uma importante ferramenta para prevenção e mitigação de desastres naturais (Santos, L. S., 2022).

Vale salientar que, a escolha da bacia hidrográfica do rio Sirinhaém, deu-se em função principalmente por ter ocorrido eventos nas últimas décadas que provocaram incidência de inundações. Recentemente, em maio de 2022, o fenômeno denominado Distúrbio Ondulatório de Leste (DOLs) causou fortes chuvas no litoral Pernambucano, sendo decretado estado de emergência em diversos municípios, como por exemplo, Sirinhaém, Primavera e Água Preta. O principal rio da bacia, o rio Sirinhaém, e seu afluente, o rio Amaraji, atingiram suas cotas de inundações.

Assim, o mapeamento e a identificação das áreas de riscos à inundações, serve para compor recomendações de decisão significativa entre os gestores, como a priorização dos riscos, alocação de recursos financeiros, plano de emergência, de forma a mitigar ou reduzir a vulnerabilidade da ocorrência de acidentes hidrológicos.

Material e métodos

Caracterização da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Sirinhaém está localizada no estado de Pernambuco, possui 19 municípios, com área total de 2090,64 km², sendo limitada ao leste pelo oceano Atlântico e os grupos de bacias GL3 e GL4, a oeste pela bacia do Rio Una, ao norte com a bacia do rio Ipojuca e o grupo de bacias GL3, ao sul com a bacia do rio Una e o grupo de bacias GL4. A bacia está situada entre as coordenadas 08°16'05'' e 08°44'50'' de latitude sul e 35°01'00'' e 35°47'58'' de longitude Oeste (Agência Pernambucana de Águas e Climas [APAC], 2022), conforme Figura 1.

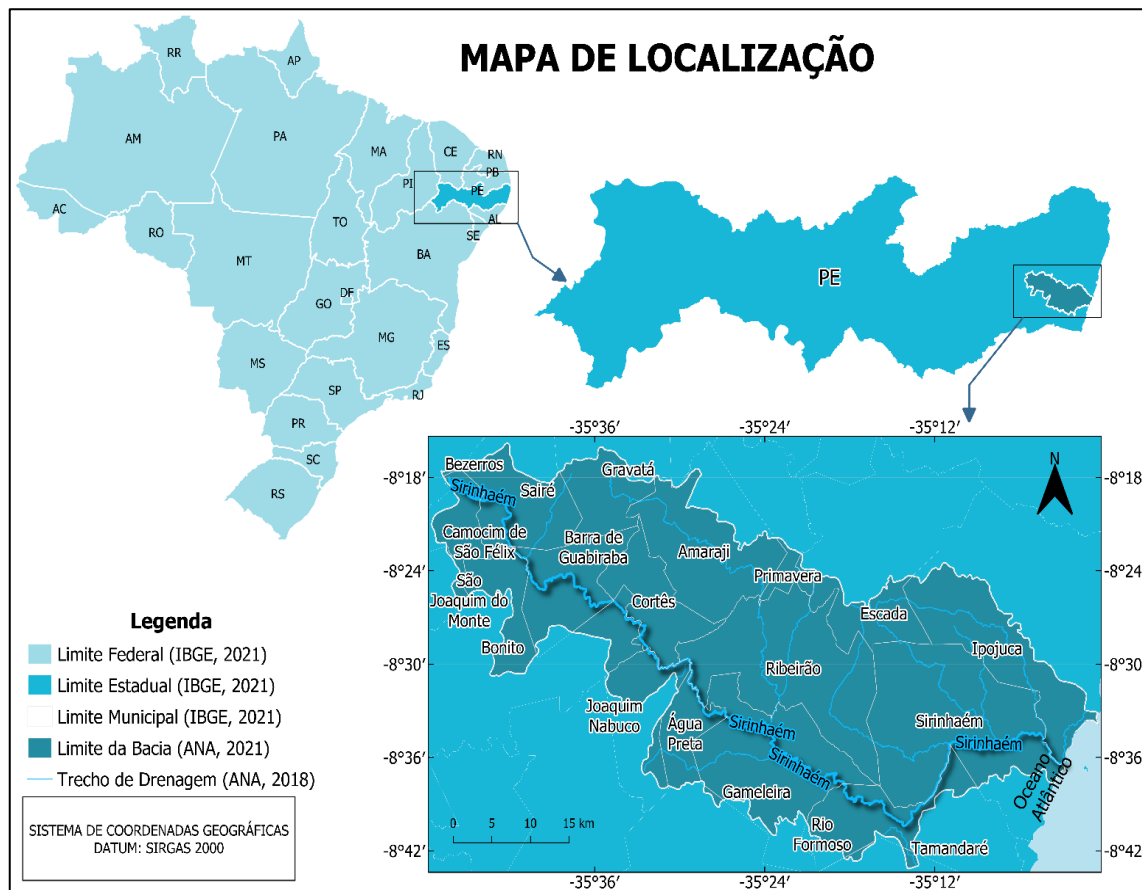


Figura 1. Mapa da bacia hidrográfica do rio Sirinhaém - Pernambuco.

A Atualização do Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco (PERH/PE) coloca a Bacia do Sirinhaém como Unidade de Planejamento 6 (UP06) e, devido a pequena área da bacia hidrográfica GL4 e a sua proximidade com a Bacia do Rio Sirinhaém, está também considerada na UP06, totalizando 2.369,28 km². Uma seção da Bacia do Sirinhaém (aproximadamente 8%) está contida, também, na Unidade Especial de Planejamento (UEP) que engloba a região metropolitana de Recife (Pernambuco, 2020a).

Em sua maior parte, a Bacia do Sirinhaém é formada por rochas cristalinas, apresentando rochas sedimentares apenas no litoral. A região da UP06 consiste, majoritariamente, em solo do tipo Latossolo Amarelo, mas também com porções significativas de Argissolos amarelo e vermelho-amarelo e Gleissolo háplico (Pernambuco, 2020a).

A bacia possui como principal curso d'água o rio Sirinhaém, com aproximadamente 158 km de extensão, tem sua nascente no município de Camocim de São Félix e seu exutório no oceano Atlântico. Os principais afluentes do rio Sirinhaém é o rio Amaraji, com nascente no município de Gravata, além deste, outros afluentes são

importantes, como: os riachos Sangue, os riachos Seco, Camaragibe, Tapirucu, Sibiró, Tanque de Piabas, Várzea Alegre, Córrego Sabiá e Rio Cuiambuca (APAC, 2022).

A bacia do Rio Sirinhaém é dividida em duas classificações climáticas de acordo com a classificação climática de Köppen (1936). O litoral apresenta clima do tipo Am, ou clima de monção, já o interior da bacia apresenta clima do tipo as (Ferraz, 2019). Ambos são caracterizados como climas de regiões tropicais, tendo o clima Am um regime de pluviosidade e alternância entre períodos secos e chuvosos, já o clima as tem como característica uma estação seca, com temperaturas médias mensais superiores a 18° C, com um dos meses do ano com precipitação inferior a 60 mm (Sá Júnior, 2009).

A precipitação anual na bacia varia entre 1100,01 e 1200mm no setor oeste até uma variação entre 1800,1 e 1900 mm no litoral, já a temperatura média anual varia de 20,5° a 21°C, na porção da bacia localizada no interior do estado, até 22,1° a 22,5°C na porção leste (Pernambuco, 2020a). Na parte alta (região agreste), a bacia apresenta uma segurança hídrica mínima. Assim, é notável a transição desta para a categoria de alta segurança

hídrica à medida em que se desloca para a baixa bacia, na Zona da Mata (Pernambuco, 2020b).

Em relação a uso e ocupação de solo, a Atualização do PERH/PE (Pernambuco, 2020a) distribuiu 96% da área da UP06 em três maiores classes, sendo elas: pastagem, mosaico de agricultura e pastagem e formação florestal, sendo 17% da área da unidade de planejamento protegida por Unidades de Conservação. Sua vegetação é composta em sua maior parte por cana-de-açúcar (70% da área), seguindo por mata atlântica (10,75%) e solo exposto (5,98%) (Pernambuco, 1998).

Assim, a escolha da bacia hidrográfica do rio Sirinhaém se deu em função de suas

Quadro 1. Revisão da literatura com as principais variáveis utilizando o método AHP para inundação.

Variáveis	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	Total
Altitude	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	10
Declividade	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	11
Tipo de Solo		x	x	x		x		x		x	x	7
Uso e ocupação do solo	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	11
Proximidade superfícies líquidas					x							1
Geologia				x				x				2
Densidade de drenagem		x							x			2
Distribuição de precipitação		x							x			2
Cobertura e Vegetação									x			1

NOTA: (I) Magalhães et al. (2011), (II) Ouma e Tateishi (2014), (III) Borges et al. (2015), (IV) Miranda (2016), (V) Santos e Ventorini (2017), (VI) Rezende et al. (2017), (VII) Coelho (2017), (VIII) Campioli e Vieira (2019), (IX) Sami G. et al. (2020), (X) Pessoa Neto et al. (2021), (XI) Costa e Portela (2021).

De acordo com Magalhães et al. (2011), a altitude é uma variável que pode contribuir para o risco de inundação, em razão da ação da gravidade, em que regiões mais baixas possuem um maior risco. O autor também considera a declividade como uma variável importante, pois regiões mais planas, possuem um maior risco de inundação.

O tipo de solo também influencia na vulnerabilidade, pois possuem diferentes capacidades de infiltração e escoamento superficial da água. A bacia do rio Sirinhaém é constituída por

características físico naturais e por ser uma área que apresenta histórico de regiões suscetíveis ao risco de inundação.

Seleção das variáveis

Em estudos relacionados a áreas de risco, suscetibilidade ou vulnerabilidade à inundação, a literatura menciona com frequência algumas variáveis em destaque, conforme apresentadas no Quadro 1. Em concordância com esta análise, foram selecionadas para essa pesquisa, as variáveis de altitude, declividade, tipo de solo e uso e ocupação do solo.

mais de um tipo de solo (Pernambuco, 2020a), que diverge da situação do município Guaçu, conforme analisado por Magalhães et al. (2011).

Segundo Campioli & Vieira (2019), o uso e ocupação do solo é um importante indicador, pois demonstra as condições de cobertura, e consequentemente, impermeabilização do solo. Ainda, Coelho (2017) e Sami G. et al. (2020) utilizam as variáveis taxa de impermeabilização/permeabilidade, com este mesmo intuito de apresentar a consequência da

ocupação do homem no processo de infiltração e escoamento superficial da água do terreno (Magalhães et al., 2011).

Para elaboração deste estudo, os dados foram obtidos por meio de plataformas virtuais de órgãos oficiais, no formato raster e vetor, conforme indicado no Quadro 2.

Todos os dados utilizados foram tratados no QGIS, software livre e gratuito do Sistema de Informações Geográficas (SIG). Inicialmente para

tratamento dos dados, foi inserido em todos os arquivos o mesmo Sistema de Referência Geocêntrico (SIRGAS).

Em seguida realizado o processo de reamostragem para 30 pixel, com intuito que todos os arquivos estivessem com a mesma resolução. As camadas que estavam em formato vetor foram convertidas para raster.

Quadro 2 - Fonte dos dados utilizados. Fonte: Autores.

Dado	Tipo	Origem	Ano
Federação	Vetor	IBGE	2021
Municípios	Vetor	IBGE	2021
Bacia Hidrográfica	Vetor	ANA	2021
Altitude	Raster	EMBRAPA	2005
Declividade	Raster	EMBRAPA	2005
Tipo de solo	Vetor	EMBRAPA	2020
Uso e ocupação do solo	Raster	MAPBIOMAS	2020

Reclassificação das variáveis

Nesta etapa, foi realizada a reclassificação das variáveis em função do seu grau, na opção de reclassificar por tabela da caixa de ferramenta no QGIS, de forma que quanto maior o grau, maior a vulnerabilidade à inundação. Dessa forma, o grau 1 representa as classes que apresentam

vulnerabilidade muito baixa e o grau 5 aquelas de vulnerabilidade muito alta.

A Tabela 1 mostra as faixas para diferentes classes de vulnerabilidade para cada uma das variáveis, que foram escolhidas com base nos 11 artigos apresentados no Quadro 1.

Tabela 1 - Reclassificação das classes das variáveis, conforme a classe de vulnerabilidade à inundação.

Classe de vulnerabilidade	Grau	Variáveis			
		Altitude (m)	Declividade	Tipo de solo	Uso e ocupação do solo
Muito baixa	1	Acima de 800	Escarpado (>75%)	Latossolo	Floresta
baixa	2	500 a 800	Montanhoso (45% a 75%)	Neossolo	Formação Natural não florestal
Moderada	3	400a 500	Fortemente ondulado (20% a 45%)	-	Agropecuário
Alta	4	200 a 400	Ondulado (8% a 20%)	Argissolos,	Infraestrutura urbana
Muito Alta	5	100 a 200	Suavemente ondulado (3% a 8%)	Gleissolos	
		0 a 100	Plano (0% a 3%)	Rios, Solos de mangue	Curso d'água

Aplicação do método AHP

O Analytic Hierarchy Process (AHP) é um método que auxilia na tomada de decisão, desenvolvido na década de 1970, pelo professor Thomas Saaty. De acordo com Martins e Coelho (2012) este método contribui para eleger uma prioridade na tomada de decisão, sendo possível uma decisão racional e não intuitiva ou subjetiva.

O método hierarquiza as variáveis selecionadas e quantifica de modo a auxiliar na tomada de decisão e soluções ao problema em estudo dentre todos os parâmetros selecionados.

Os parâmetros foram julgados comparativamente para determinar a importância mútua de cada um deles e construir a matriz de comparação pareada.

Desta forma, o Quadro 3 apresenta a construção de uma matriz de decisão pareada, em que foi realizado através de um processo de julgamento comparativo entre os parâmetros para determinar a importância mútua de cada um deles.

Quadro 3. Matriz de decisão pareada. Fonte: Adaptado Pessoa Neto et al. (2021)

Parâmetro	Parâmetro 1		Parâmetro p		Parâmetro n
Parâmetro 1	1		a_{1p}		a_{1n}
...	...				
Parâmetro 2	a_{p1}		1		a_{pn}
...					
Parâmetro n	a_{n1}		a_{np}		1

Para construção da matriz de decisão pareada, foi utilizada a intensidade de importância

definida por Saaty (1980), apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Escala do método AHP. Fonte: Adaptado de Saaty (1987).

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Importância igual	Os dois fatores contribuem igualmente para o objeto
3	Importância moderada	Um fator é ligeiramente mais importante que o outro
5	Importância essencial	Um fator é claramente mais importante que o outro
7	Importância demonstrada	Um fator é fortemente favorecido sua maior relevância foi demonstrada na prática
9	Importância extrema	A evidência que diferencia os fatores é da maior ordem possível
2-4-6-8	Valores intermediários entre julgamentos	Indecisão entre os fatores

O processo de comparação dos parâmetros resulta na **Tabela 3**, onde cada elemento da matriz indica quanto à variável da coluna da esquerda é mais importante em relação a cada fator

correspondente à linha superior. Desse modo, quando uma variável se relaciona com ela mesma, o único resultado possível é de “importância igual”, ou seja, a diagonal principal é igual a 1.

Tabela 3. Matriz de decisão para elaboração dos pesos variáveis.

Variáveis	A1	A2	A3	A4
A1	1	1/a	1/b	1/c
A2	a	1	1/d	1/e
A3	b	d	1	1/f
A4	c	e	f	1

Para calcular o índice de consistência (IC), é dada a seguinte Equação I.

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (I)$$

Onde:

IC – índice de consistência

$\lambda_{\max}$ - Maior valor do autovetor da matriz;

n - Número de ordem da matriz.

A

Tabela 4 apresenta o índice randômico (IR) obtido para uma matriz de ordem n.

Tabela 4. Índice de consistência randômico (IR).

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
IR	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Por fim, a Equação II se propõe a calcular a razão de consistência (RC), obtida pela razão entre IC e IR correspondente:

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (II)$$

Segundo Saaty (1987), os julgamentos obtidos são consistentes caso a RC seja menor ou igual a 10%.

Álgebra de mapas

Nesta etapa, foi realizada a álgebra dos mapas, através da calculadora raster no QGIS, em que consiste no processo matemático de média ponderada (Equação III), realizada a partir dos pesos atribuídos após a reclassificação.

$$M = Pa * A + Pd * D + Ps * S + Pu * U \quad (III)$$

Onde:

M - Mapa final;

Px -Peso da respectiva variável;

A – Altitude;

D – Declividade;

S - Tipo de solo;

U - Uso e ocupação.

Validação do método AHP

Para validação dos resultados pelo método AHP, serão utilizados os dados existentes na ANA (2014), visto que, essas informações são de fonte

oficial do governo, que identificam trechos vulneráveis dos rios. O processo de execução do Atlas utilizou duas variáveis para analisar as inundações: impacto e frequência, e em seguida foi realizada a construção da matriz vulnerabilidade.

A recorrência a inundações, foi classificado segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento ([ANA], 2014) em alta, média e baixa frequência, da seguinte forma:

- Alta: eventos de inundações graduais observados em um período inferior a cinco anos;
- Média: eventos de inundações graduais observados no intervalo de cinco a dez anos e
- Baixa: há mais de dez anos não são observados eventos de inundações.

Conforme a ANA (2014), a classificação dos impactos, foi dividida em alto, médio e baixo impacto, sendo considerados deste modo:

- Alto: risco de dano à vida humana e danos significativos a serviços essenciais, instalações e obras de infraestrutura pública e residências;
- Médio: danos razoáveis a serviços essenciais, instalações e obra de infraestrutura públicas e residenciais e
- Baixo: danos localizados.

Em seguida, a ANA (2014), elaborou uma matriz a partir do cruzamento das informações de impacto e frequência, conforme Quadro 4.

Dessa forma, para validação, será possível consolidar em um único mapa, as informações do presente estudo, utilizando a metodologia de análise de multicritério e a metodologia utilizada pela ANA (2014).

Quadro 4. Matriz vulnerabilidade às inundações. Fonte: Adaptado ANA (2014).

Vulnerabilidade	Impacto	Frequência
Baixa	Baixo	Média
		Baixa
Média	Médio	Média
	Baixo	Baixa
Alta	Alto	Alta
		Média
	Baixo	Baixa
	Médio	Alta

Resultados e discussão

A Figura 2 apresenta 4 mapas de comportamento das variáveis de vulnerabilidade à

inundação da bacia do rio Sirinhaém, sendo eles (I) Altitude, (II) Declividade, (III) Tipo de solo e (IV) Uso do solo.

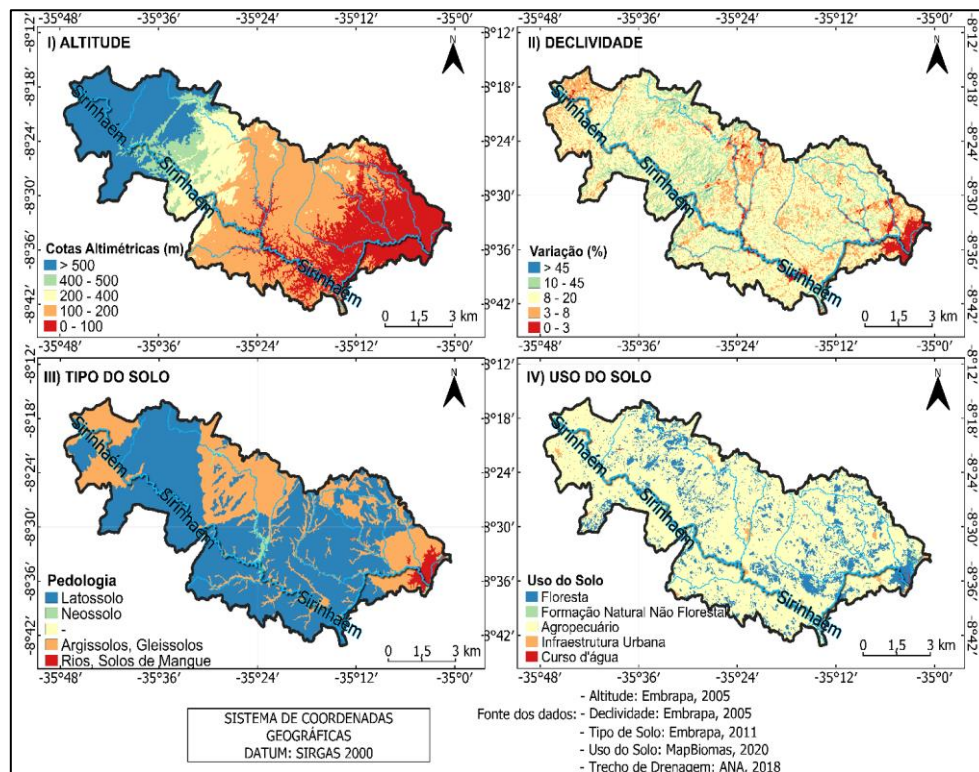


Figura 2. Variáveis de vulnerabilidade à inundação na bacia hidrográfica do rio Sirinhaém - Pernambuco.

Os mapas foram obtidos a partir do tratamento dos dados coletados no software QGIS, classificando os parâmetros de acordo com a Tabela 2.

Dessa forma, pode-se observar que o interior da bacia do Sirinhaém tem altitude acima de 500 metros, sendo reduzida à medida que se aproxima do seu exutório. A região apresenta declividades variadas, sendo no seu litoral as regiões mais planas, variando de 0% a 3%.

Ainda, os latossolos representam a maior porção da área estudada, seguido por argissolos e gleissolos, sendo estes, representados em uma única classe. Por fim, para o uso do solo é predominante a agropecuária, seguido por uma pequena amostra de área florestal.

Para obtenção dos resultados, utilizando a metodologia AHP, foi gerada a matriz de decisão pareada, apresentada na Tabela 5.

Tabela 5. Matriz de decisão pareada.

Variáveis	Tipo de solo	Uso do solo	Altitude	Declividade	Peso
Tipo de solo	1	1/3	1/5	1/7	0,053
Uso do solo	3	1	1/3	1/5	0,144
Altitude	5	3	1	1/3	0,296
Declividade	7	5	3	1	0,507

A matriz foi preenchida utilizando os valores similares aos encontrados na maioria nos 11 estudos citados no Quadro 2.1.

Conforme apresentado na Tabela 3.1, a variável que apresenta maior importância é a declividade, seguida da altitude, uso do solo e por último tipo do solo. Esses valores são aceitáveis de acordo com Saaty (1987), pois sua razão de consistência é de aproximadamente 6,5%, ou seja, inferior aos 10% requeridos pelo autor. Este valor é calculado a partir da Equação II, onde o índice de consistência (IC) foi aproximadamente 0,059 e o índice randômico (IR) igual a 0,9.

Por fim, foi realizada a álgebra de mapas, a partir da calculadora raster no Software QGIS, utilizando como base a Equação III e os pesos obtidos na Tabela 5, conforme apresentado na Equação IV.

$$M=0,296*A+0,507*D+0,053*S+0,144*U \quad (IV)$$

Desta forma, obteve-se como resultado o mapeamento da vulnerabilidade à inundação da bacia, apresentados na Figura 3.

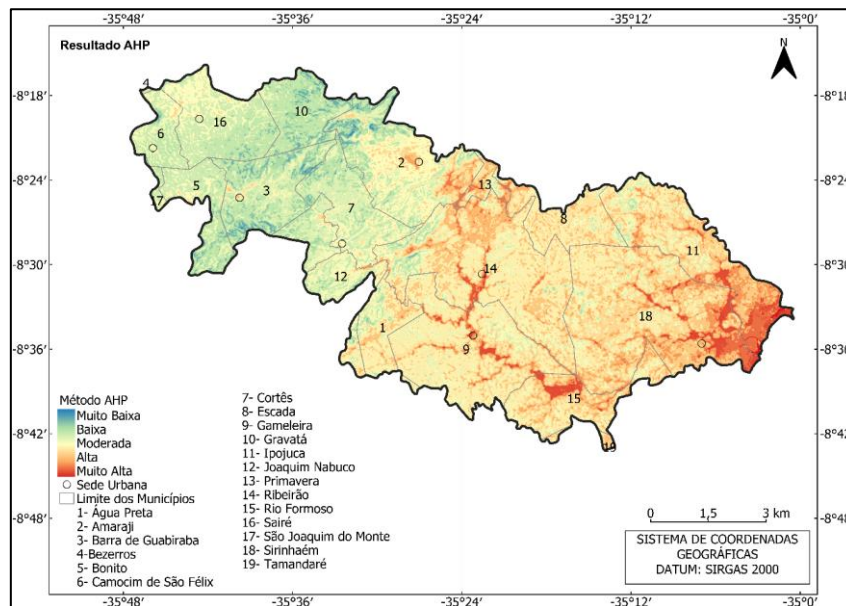


Figura 3. Mapa de vulnerabilidade à inundação da bacia hidrográfica do rio Sirinhaém - Pernambuco.

A região leste da bacia se encontra mais vulnerável do que a oeste, isso se deve as características físico-naturais da região. Assim, é possível observar que, a vulnerabilidade a inundação é maior no exutório da bacia, nos municípios de Ipojuca e Sirinhaém, por ser uma região mais plana, com menores cotas e solos de mangue. A oeste da bacia é possível analisar que a vulnerabilidade varia de muito baixa a moderada,

por ser uma região mais elevada, com declividades mais íngremes.

Desta forma, analisando os resultados, temos que a maior parte da área da bacia (50,80%) possui média vulnerabilidade, enquanto 7,76% possuem vulnerabilidade alta a muito alta e o restante possui muito baixa a baixa vulnerabilidade, conforme Figura 4.

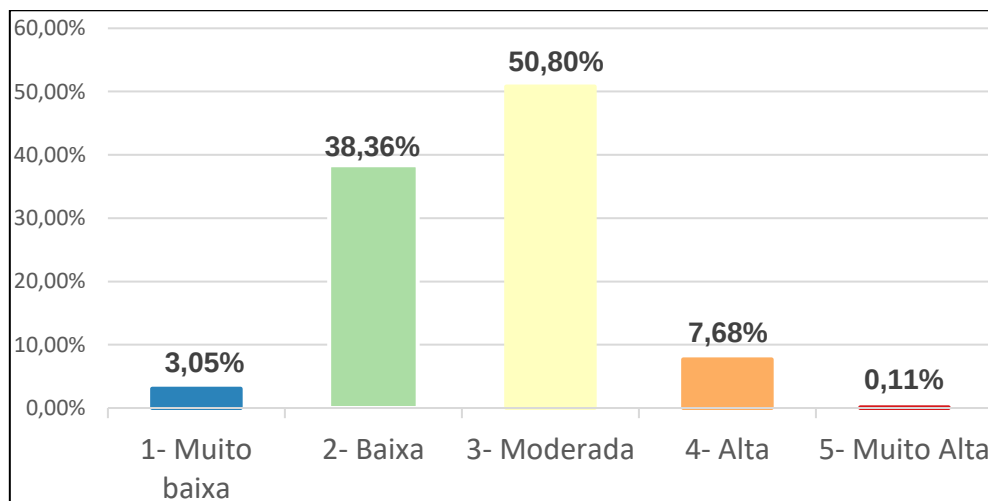


Figura 4. Percentuais das áreas de vulnerabilidade à inundação da bacia hidrográfica do rio Sirinhaém - Pernambuco.

A bacia do Sirinhaém abrange dezenove municípios, dos quais as sedes de oito estão inseridas na região, conforme a Figura 3.2. Dessa forma, é possível analisar que todas as sedes possuem vulnerabilidade de moderada a alta, sendo

estes pontos o de maior densidade demográfica dentro de seus respectivos limites municipais.

Para validação dos resultados, foi utilizado os dados do Atlas Vulnerabilidade a Inundações (ANA, 2014), representado na Figura 5.

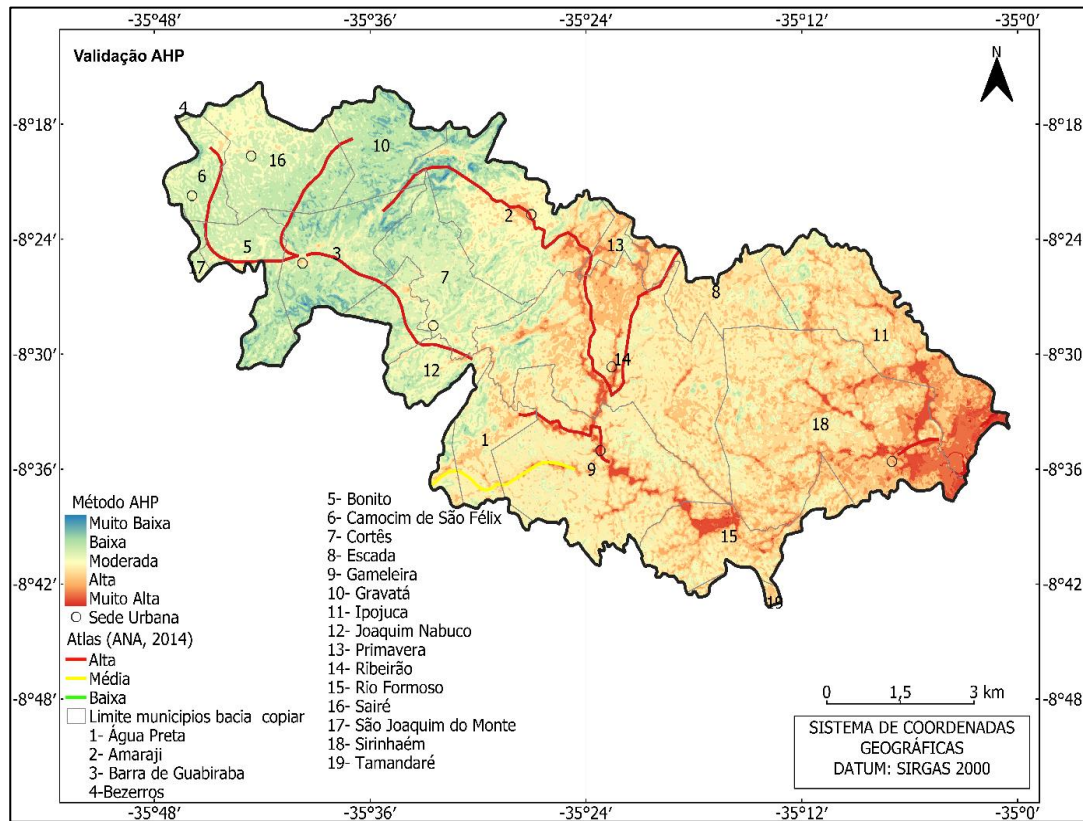


Figura 5. Validação do método Método de Análise Hierárquica (AHP) da bacia hidrográfica do rio Sirinhaém - Pernambuco.

Podemos verificar que a leste da bacia as informações são consideradas validas devido às vulnerabilidades moderadas a altas resultantes do método AHP na região poderem ser relacionadas com os trechos de rio com vulnerabilidade média e alta segundo a ANA (2014).

A oeste da bacia, podemos analisar que a ANA (2014) classifica o trecho do rio com alta vulnerabilidade e o método AHP considera apenas as regiões mais próximas destes rios com moderada a alta vulnerabilidade, à medida que, os arredores da região possuem um menor grau de vulnerabilidade.

Assim, é necessário salientar que a análise da ANA (2014) considera aspectos socioeconômicos e a frequência de inundação, o que difere das características físicas consideradas no presente estudo.

Por fim, considera-se satisfatória a aplicação do Método de Análise Hierárquica (AHP), visto que, as variáveis escolhidas, de maneira geral, foram consistentes para classificar a vulnerabilidade à inundação na bacia hidrográfica da Bacia do rio Sirinhaém.

Conclusões

O mapeamento da vulnerabilidade à inundação resultante do método AHP apresenta, de maneira geral, um grau de vulnerabilidade baixo a moderado na bacia do Sirinhaém. As regiões de maior vulnerabilidade ocorrem especialmente em áreas de altitude e declividade baixas, como o exultório da bacia e áreas próximas aos rios.

Com o referido mapeamento, órgãos gestores e profissionais da área podem buscar melhores soluções para mitigar os efeitos das inundações e até evitar a ocorrência destas, através, por exemplo, do planejamento urbano.

É importante salientar que os resultados analisados apresentam apenas a vulnerabilidade a inundações a partir de características físicas da região, não adentrando ao âmbito de impactos causados por esta. A validação utilizando dados da ANA (2014), justifica futuros estudos que devem conter também variáveis socioeconômicas, permitindo a priorização das regiões que precisam de medidas mitigadoras devido aos maiores impactos causados à população.

Por fim, ressalta-se a importância desta pesquisa a fim de subsidiar um adequado planejamento urbano, objetivando o uso ordenado do solo de forma a mitigar ou reduzir a vulnerabilidade da ocorrência de acidentes hidrológicos.

Agradecimentos

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PEC) da Universidade de Pernambuco, as professoras Dr^a Simone Rosa da Silva e Kalinny Patrícia Vaz Lafayette, pelas orientações durante a disciplina de Sustentabilidade Aplicada em Áreas Urbanas.

A primeira autora agradece também a Margarida Regueira da Costa pela sua orientação em sua pesquisa de TCC, dedicado também ao tema discutido neste texto.

Por fim, a primeira autora agradece o Governo do Estado de Pernambuco, por disponibilizar uma verba do stricto sensu para a Escola Politécnica de Pernambuco. Essa verba serve para ajuda de custos na pesquisa da aluna.

Referências

- ANA. Agência Nacional de Águas, 2014. Atlas de Vulnerabilidade a Inundações, Brasília.
- APAC. Agência Pernambucana de Águas e Clima, 2022. Bacia do rio Sirinhaém, Pernambuco.
- Borges, M. P; Cruvinel, A. S; Flores, W. M. F; Barbosa, G. R., 2015. Utilização de técnicas de

geoprocessamento para a elaboração de cotas de inundações: estudo de caso do parque ecológico do rio Paranaíba. In: XXVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 5897-5903. João Pessoa, Paraíba.

- Brito, A. J.; Conserva, C. S.; Araújo, C. B.; Lavinas, E. C.; Andrade, L. M. S., 2020. Expansão urbana e drenagem: Análise das soluções propostas para manejo de águas pluviais em região produtora de água na bacia do Paranoá, DF. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental [online] 9. Disponível: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v9e02020588-605>. Acesso: 04 mai. 2022.

- Campioli, P. F.; Vieira, C. V., 2019. Avaliação do Risco a Inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte, Joinville/SC. Revista Brasileira de Geografia Física 12, 124-138.

- Coelho, A. L. N., 2017. Método de análise hierárquica (AHP) aplicado a inundação urbana após evento de chuva concentrado. Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica [online] 20. Disponível: <https://doi.org/10.21138/GF.565>. Acesso: 18 maio. 2022.

- Cutter, S., 1996. Vulnerability to environmental hazards. Progress in Human Geography [online] 20. Disponível: <https://doi.org/10.1177/030913259602000407>. Acesso: 09 abr. 2022.

- Costa, M. R., Portela, B. M., 2021. Análise da vulnerabilidade a inundações na bacia hidrográfica do rio Capibaribe – PE: Validação das metodologias de análise hierárquica e do atlas de vulnerabilidade a inundações. In: XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, Minas Gerais.

- CRED, 2023. Emergency Events Database (EM-DAT). Disponível: <https://public.emdat.be/>. Acesso em: 29 mar. 2023.

- Ferraz, F. G., 2019. Simulação hidrológica e hidrodinâmica do impacto de enchentes na bacia do rio Sirinhaém e avaliação de sistema de controle proposto. Dissertação (Mestrado). Recife, Universidade Federal de Pernambuco.

- Fritzen, M.; Binda, A. L., 2011. Alterações no ciclo hidrológico em áreas urbanas: Cidade, hidrologia e impactos no ambiente. Ateliê Geográfico [online] 5. Disponível: <https://doi.org/10.5216/ag.v5i3.16703>. Acesso: 22 abr. 2022.

- Garcia, F. R., Júnior, M. J. A., 2022. Comparação de MDTs a partir do acoplamento de modelo hidrológico e hidrodinâmico aplicado à

- identificação de áreas de inundações urbanas~. Revista Brasileira de Geografia Física [online] 15. Disponível: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.2.p783-803>. Acesso: 29 mar. 2023
- Goerl, R.F., Kobiyama, M., Pellerin, J. R. G. M., 2012. Proposta Metodológica para Mapeamento de Áreas de Risco a Inundação: Estudo de Caso do Município de Rio Negrinho – SC. Boletim de Geografia 30, 81-100.
- Leal, F.C.B.S.; Barbosa, I. M. B. R.; Aquino, J. T., 2020. Vulnerabilidade à inundação na bacia hidrográfica do Rio Una – PE utilizando análise hierárquica de processo. In: VIII Encontro de Sustentabilidade em Projeto, 149-160. Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.
- Magalhães, I. A. L; Thiago, C. R. L; Agrizzi, D. V; Santos, A. R., 2011. Uso de geotecnologias para mapeamento de áreas de risco de inundação em Guaçuí, ES: Uma análise comparativa entre dois métodos. Cadernos de Geociência 8, 63-70.
- MANTIS, A. B.; VAZ, J. A., 2019. Mapeamento de áreas de risco de alagamento do município de Guarujá – SP utilizando Método de Análise Hierárquica. Leopoldianum 45, 69-85.
- Martins, F. G.; Coelho, L. S., 2012. Aplicação do método de análise hierárquica do processo para o planejamento de ordens de manutenção em dutovias. Gestão da Produção, Operações e Sistemas 7, 65-80.
- Miranda, N. M. G., 2016. Análise espacial da suscetibilidade à inundação da bacia hidrográfica do ribeirão do Ipa-Cuiabá-MT. Trabalho de conclusão de curso (Graduação). Santa Catarina, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Ouma, Y., Tateishi, R., 2014. Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: methodological overview and case study assessment. Water [online] 6. Disponível: <https://doi.org/10.3390/w6061515>. Acesso: 04 abr. 2022.
- Pernambuco, 1998. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente. Plano Estadual de Recursos Hídricos – Volume I. Recife, Pernambuco.
- Pernambuco. Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos, 2020a. Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco – Produto 3 – Relatório Técnico Parcial 1 – Tomo I. Recife, Pernambuco.
- Pernambuco. Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos, 2020b. Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco – Produto 4 – Diagnóstico Integrado. Recife, Pernambuco.
- Pessoa Neto, A. G., Barbosa, I. M. B. R., Silva, S. R., 2021. Mapeamento das áreas de risco de inundação da bacia hidrográfica do rio Jaboatão, em Pernambuco, utilizando o método AHP (Analytic Hierarchy Process). In: IX Encontro de Sustentabilidade em Projeto, 83-94, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.
- Rezende, P. S.; Marques, D. V.; Oliveira, L. A., 2017. Construção de modelo no Qgis e utilização do método de processo analítico hierárquico–AHP para mapeamento de riscos à inundação na área urbana de Paracatu–MG. Caminhos de Geografia [online] 18. Disponível: <https://doi.org/10.14393/RCG186101>. Acesso: 09 abril. 2022.
- Sá Junior, A., 2009. Aplicação da classificação de Koppen para o zoneamento climático do Estado de Minas Gerais. Dissertação (Mestrado). Lavras, Universidade Federal de Lavras.
- Saaty, R. W. A., 1977. Scaling method form priorities in hierarquical structures. Journal of Mathematical Psychology [online] 15. Disponível: [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5). Acesso: 11 mai. 2022.
- Saaty, R. W., 1987. The Analytic Hierarchy Process - What it is and how it is used. Mathematical Modelling [online] 9. Disponível: [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8). Acesso: 05 março. 2022.
- Sami, G., Hadda, D., Mahdi, K., Abdelwahhab, F. A., 2020. Multi - Criteria Analytical Hierarchy Process (AHP) to Flood Vulnerability Assessment in Batna Watershed (Algeria). Analele Universității din Oradea, Seria Geografie [online] 30. Disponível: <https://doi.org/10.30892/auog.301105-810>. Acesso: 21 mar. 2022.
- Santos, L. S., 2022. Mapeamento da Suscetibilidade A Inundações No Município de Jaboatão dos Guararapes (PE) a Partir do Modelo Hand e MDT de Alta Resolução Espacial. Trabalho de conclusão de curso (Graduação). Recife, Universidade Federal de Pernambuco.
- Santos, T. G.; Ventorini, S. E., 2017. Mapeamento digital das áreas propícias às enchentes e inundações na bacia do Córrego do Lenheiro em São João del-Rei–MG. Revista PerCursos, Florianópolis [online] 18. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5965/1984724618362017095>. Acesso: 15 abr. 2022.

Silva, R. R., 2020. Avaliação de Índices Físicos na Bacia Hidrográfica do Rio Ipanema-PE. Dissertação (Mestrado). Recife, Universidade Federal de Pernambuco.

Silveira, Y.G., 2018. Avaliação da vulnerabilidade física à erosão e inundação de setores costeiros abrigados. Estudo de caso: baía de Florianópolis – SC. Dissertação (Mestrado). Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemática, Universidade Federal de Santa Catarina.