

Título: Mapeamento de Suscetibilidade a Inundações Utilizando o Google Earth Engine

Resumo

Este trabalho apresenta uma metodologia para o mapeamento da suscetibilidade a inundações utilizando o Google Earth Engine (GEE). A análise se baseia em diversos fatores de suscetibilidade, como o Índice Topográfico de Umidade (TWI), elevação, uso e cobertura da terra (LULC), declividade, precipitação, densidade de drenagem, Índice de Vegetação (NDVI), e distância de rios e estradas, além do tipo de solo. A ponderação da importância de cada fator foi realizada através do método do Processo Analítico Hierárquico (AHP). O objetivo principal é identificar e classificar áreas de acordo com o seu grau de risco de inundação, fornecendo informações cruciais para o planejamento e a gestão territorial. A implementação no GEE permitiu a análise eficiente de grandes volumes de dados geoespaciais, resultando na geração de um mapa de suscetibilidade com diferentes níveis de risco.

Palavras-chave: Suscetibilidade a Inundações, Google Earth Engine, Sensoriamento Remoto, Processo Analítico Hierárquico, AHP.

1. Introdução

As inundações representam um dos desastres naturais mais frequentes e impactantes em todo o mundo, causando significativos danos socioeconômicos e ambientais. O mapeamento da suscetibilidade a inundações é uma etapa fundamental para a identificação de áreas vulneráveis e para o desenvolvimento de estratégias de prevenção e mitigação. Nesse contexto, o uso de ferramentas de sensoriamento remoto e Sistemas de Informação Geográfica (SIG), como o Google Earth Engine (GEE), tem se mostrado altamente eficaz devido à sua capacidade de processar e analisar grandes volumes de dados geoespaciais de forma eficiente.

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia para o mapeamento da suscetibilidade a inundações utilizando o GEE, combinando diversos fatores ambientais relevantes e o método do Processo Analítico Hierárquico (AHP) para a ponderação da importância de cada fator. A análise resultante permite a identificação e classificação de áreas com diferentes níveis de risco de inundação, fornecendo subsídios importantes para o planejamento e a gestão territorial.

2. Materiais e Métodos

A metodologia desenvolvida para o mapeamento da suscetibilidade a inundações envolveu a seleção e análise de diversos fatores ambientais, a aplicação do método AHP para a determinação dos pesos de cada fator, e a implementação da análise no ambiente do Google Earth Engine.

2.1. Fatores de Suscetibilidade a Inundações

Foram considerados os seguintes fatores de suscetibilidade a inundações, cada um representando uma característica específica do ambiente que contribui para a probabilidade de ocorrência de inundações:

- **Índice Topográfico de Umidade (TWI):** Mede o potencial de acúmulo de água no terreno, calculado pela fórmula $TWI = \ln(A/\tan(\beta))$, onde A é a área de contribuição (acúmulo de água na encosta) e β é o declive em radianos. Valores altos indicam maior risco de inundação devido ao maior acúmulo de água.

- **Elevação:** Áreas de menor altitude tendem a acumular mais água, sendo mais propensas a inundações. Os dados de elevação foram obtidos através de modelos como o SRTM (Shuttle Radar Topography Mission).
- **Uso e Cobertura da Terra (LULC):** Classifica a superfície terrestre em diferentes categorias de ocupação. Áreas urbanas e com solo exposto geralmente apresentam maior escoamento superficial, aumentando o risco de inundações.
- **Declive (Slope):** Representa a inclinação do terreno. Declives muito suaves podem favorecer o acúmulo de água, enquanto declives acentuados tendem a promover o escoamento.
- **Precipitação:** O volume de chuva em um determinado período influencia diretamente o risco de inundações, especialmente em eventos de precipitação intensa.
- **Densidade de Drenagem:** Mede a extensão dos cursos d'água por unidade de área. Uma alta densidade de drenagem pode indicar maior risco em alguns contextos devido ao aumento das vias de escoamento.
- **Índice de Vegetação (NDVI):** Indica a quantidade de vegetação saudável. Áreas com vegetação densa tendem a ter maior infiltração de água, reduzindo o risco de inundações.
- **Distância dos Rios:** A proximidade a corpos d'água aumenta significativamente o risco de inundações, principalmente em eventos de cheia.
- **Distância das Estradas:** Estradas podem interferir na drenagem natural, atuando como barreiras ou canais de escoamento, o que pode levar ao acúmulo de água em áreas próximas.
- **Tipo de Solo:** A capacidade de infiltração do solo é um fator crucial. Solos arenosos permitem maior infiltração, enquanto solos argilosos possuem menor capacidade de infiltração, aumentando o risco de escoamento superficial.

2.2. Processo Analítico Hierárquico (AHP)

O método do Processo Analítico Hierárquico (AHP) foi utilizado para determinar os pesos de importância de cada fator de suscetibilidade. Este método envolve a comparação pareada dos fatores utilizando uma escala de importância (Escala de

Saaty), que varia de 1 (mesma importância) a 9 (extremamente mais importante). Uma matriz de comparação é construída com base nas avaliações dos especialistas ou no julgamento técnico do pesquisador. Os pesos finais de cada fator são então calculados a partir desta matriz.

ANEXO 1 – Matriz AHP

Após a construção da matriz de comparação, foram realizados os cálculos para obter os pesos normalizados de cada critério, seguindo os passos de soma das colunas, normalização da matriz e cálculo da média das linhas.

ANEXO 2 – Matriz Normalizada

É importante ressaltar que a consistência das comparações realizadas no AHP deve ser verificada através do cálculo do Índice de Consistência (IC) e da Razão de Consistência (RC).

Verificação da Consistência da Matriz AHP

Após a construção da matriz de comparação pareada (Anexo 1), foi realizada a verificação de consistência, uma etapa essencial para garantir a coerência dos julgamentos utilizados no método AHP.

A verificação se baseia no cálculo do **Índice de Consistência (IC)** e da **Razão de Consistência (RC)**, conforme proposto por Saaty (1980). Primeiramente, foi calculado o **autovalor máximo** ($\lambda_{\text{máx}}$) a partir da multiplicação da matriz original pelo vetor de pesos obtido (médias das linhas da matriz normalizada). Para este estudo, obteve-se:

- $\lambda_{\text{máx}} \approx 9,26$
- $n = 9$ (número de critérios)
- $RI = 1,45$ (Índice Aleatório de Saaty para $n = 9$)

Aplicando as fórmulas:

$$IC = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n(n-1)} = \frac{9,26 - 9}{9(9-1)} = 0,0325$$

$$RC = \frac{IC}{RI} = \frac{0,0325}{1,45} \approx 0,022$$

A **Razão de Consistência (RC)** foi inferior a 0,1, indicando que os julgamentos realizados na matriz de comparação são **consistentes**. Dessa forma, os pesos atribuídos aos fatores são confiáveis e podem ser utilizados na composição do mapa de suscetibilidade.

2.3. Implementação no Google Earth Engine e Cálculo do TWI

A metodologia foi implementada no Google Earth Engine (GEE), uma plataforma baseada em nuvem para análise de dados geoespaciais. As etapas de implementação incluíram:

- **Importação da área de estudo:** Delimitação da área de análise através da importação de um shapefile ou definição de um polígono.
- **Importação dos conjuntos de dados:** Carregamento dos dados de elevação (SRTM), água superficial (JRC Global Surface Water), Landsat para NDVI e cobertura da terra, dados de precipitação e outros relevantes.
- **Geração de mapas de corpos d'água:** Detecção de áreas com presença frequente de água para o cálculo da distância dos rios.
- **Cálculo da distância da água:** Geração de um mapa com a distância euclidiana de cada pixel ao corpo d'água mais próximo.
- **Geração de mapa de elevação e declive:** Utilização dos dados de elevação para gerar o mapa de elevação e o mapa de declive através da função `ee.Terrain.slope()`.

Um dos desafios encontrados durante a implementação no GEE foi a ausência de uma função nativa para o cálculo do Índice Topográfico de Umidade (TWI) na API JavaScript. A fórmula do TWI requer a área de contribuição do fluxo (flowAccumulation), uma funcionalidade não diretamente disponível nessa interface do GEE. Para superar esta limitação, adotou-se uma abordagem alternativa para estimar a acumulação de fluxo, conforme detalhado a seguir:

1. **Preenchimento de depressões:** Utilizou-se a função `ee.Terrain.fillMinima()` para preencher pequenas depressões no modelo de elevação (SRTM), minimizando artefatos que poderiam influenciar o fluxo da água.
2. **Cálculo do declive:** O declive em radianos foi calculado a partir da elevação utilizando as funções `ee.Terrain.slope()` e conversão para radianos (`.multiply(Math.PI).divide(180)`). A tangente do declive (`.tan()`) foi então obtida.

3. **Correção de valores baixos de declive:** Para evitar divisões por zero ou valores próximos de zero, que poderiam gerar instabilidade no cálculo do TWI, valores de tangente de declive menores ou iguais a zero foram substituídos por um valor mínimo de 0.001.
 4. **Aproximação da acumulação de fluxo:** Dada a indisponibilidade de uma função direta para acumulação de fluxo em JavaScript no GEE, utilizou-se uma aproximação baseada em convolução. Um kernel circular com um raio de 300 metros foi aplicado à imagem de elevação preenchida (`filled.convolve(kernel)`). Esta operação de convolução soma os valores de elevação dentro da janela circular, fornecendo uma estimativa da área de contribuição para cada pixel.
 5. **Cálculo do TWI:** O TWI foi então calculado dividindo a imagem aproximada da acumulação de fluxo (`accProxy`) pela tangente corrigida do declive (`tanSlopeFixed`) e aplicando o logaritmo natural (`.log()`).
 6. **Normalização do TWI:** Finalmente, os valores do TWI foram normalizados para uma escala de 0 a 1 utilizando a função `unitScale(5, 15)` e limitados a este intervalo com `clamp(0, 1)`.
- **Combinação dos fatores:** Normalização dos valores de cada fator para uma escala comum (geralmente de 0 a 1) e aplicação dos pesos obtidos no AHP através da multiplicação de cada camada pelo seu respectivo peso. A soma ponderada dos fatores resultou no mapa de suscetibilidade final.

3. Resultados e Discussão

O mapa de suscetibilidade a inundações gerado no GEE classificou a área de estudo em diferentes níveis de risco, que podem ser categorizados em: muito alto risco, alto risco, médio risco, baixo risco e muito baixo risco. Esta classificação é resultado da combinação ponderada dos fatores de suscetibilidade, onde áreas com maior probabilidade de inundação apresentam os níveis mais altos de risco.

```
var mapaSuscetibilidade = decliveNorm.multiply(0.10)

.add(distRiosNorm.multiply(0.16))

.add(NDVINorm.multiply(0.07))
```

```
.add(chuvaAcumuladaNorm.multiply(0.09))  
.add(twiManualNorm.multiply(0.15))  
.add(densidadeDrenagemNorm.multiply(0.09))  
.add(lulcNorm.multiply(0.22))  
.add(elevacaoNorm.multiply(0.03))  
.add(distNorm.multiply(0.09))  
.rename('suscetibilidade');
```

Mapa de Risco=(Fator1 ×Peso1)+(Fator2 ×Peso2)+...

A análise dos pesos obtidos no AHP permitiu identificar a importância relativa de cada fator na determinação da suscetibilidade a inundações na área de estudo. Fatores como a distância dos rios e o TWI, por exemplo, podem ter apresentado pesos maiores, indicando sua maior influência no risco de inundação.

A visualização do mapa de suscetibilidade permite identificar espacialmente as áreas mais vulneráveis, auxiliando no planejamento de ações preventivas e na tomada de decisões para a gestão do uso do solo. Áreas classificadas com alto e muito alto risco podem demandar medidas específicas, como restrições de ocupação, implementação de sistemas de drenagem eficientes ou realocação de infraestruturas críticas.

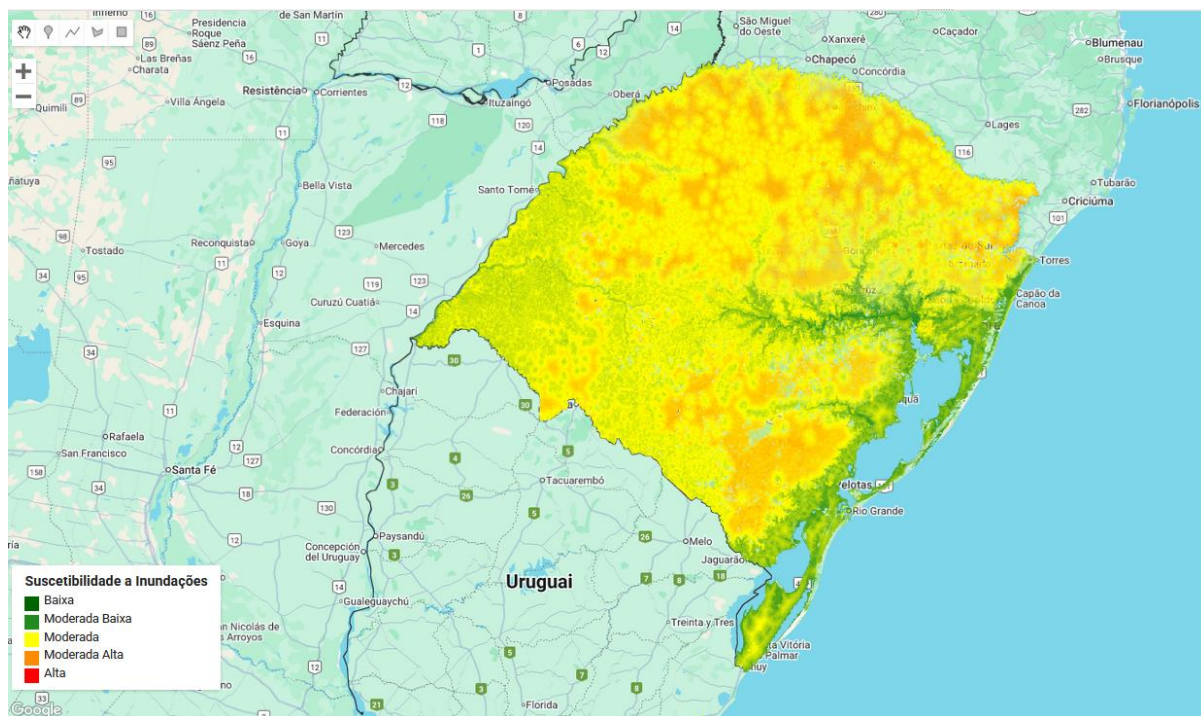


IMAGEM 1: Mapa final de suscetibilidade

4. Conclusão

A metodologia apresentada demonstrou a eficácia da integração entre o Google Earth Engine e o método do Processo Analítico Hierárquico para o mapeamento da suscetibilidade a inundações. A capacidade do GEE de processar grandes volumes de dados de sensoriamento remoto e a flexibilidade do AHP na incorporação de múltiplos critérios e na definição de seus pesos de importância, tornam esta abordagem uma ferramenta poderosa para a análise de riscos ambientais.

A aplicação desta metodologia pode ser adaptada a diferentes áreas geográficas, bastando ajustar a área de estudo, os conjuntos de dados utilizados e a matriz de comparação AHP de acordo com as características específicas de cada região. Os resultados obtidos fornecem informações valiosas para o planejamento territorial, a gestão de recursos hídricos e a implementação de medidas para a redução dos impactos causados por inundações.

ANEXO 1

Matriz AHP

	TWI — Índice Topográfico de Umidade	Elevação	LULC — Uso e Cobertura da Terra	Declive (Slope)	Precipitação	Densidade de Drenagem	NDVI — Índice de Vegetação	Distância dos Rios	Distância das Estradas
TWI — Índice Topográfico de Umidade	1	5	1/2	3	2	3	2	1/2	1
Elevação	1/5	1	1/5	1/3	1/3	1/2	1/2	1/5	1/3
LULC — Uso e Cobertura da Terra	2	5	1	3	3	<u>2</u>	2	2	2
Declive (Slope)	1/3	3	1/3	1	2	2	2	1/2	1
Precipitação	1/2	3	1/3	1/2	1	2	2	1/2	1
Densidade de Drenagem	1/3	2	1/2	1/2	1/2	1	2	1	1
NDVI — Índice de Vegetação	1/2	2	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1/2	1
Distância dos Rios	2	5	1/2	2	2	1	2	1	2
Distância das Estradas	1	3	1/2	1	1	<u>1</u>	1	1/2	<u>1</u>
peso coluna	7,87	29,00	4,37	11,83	12,33	13,00	14,50	6,70	10,33

ANEXO 2

Matriz com valores normalizado e média

[illegible]