



Margarida Penteado

Revista de  
Geomorfologia



## ANÁLISE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL NO BAIXO CURSO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SANTO ANTÔNIO, ILHA DO MARANHÃO

*ANALYSIS OF SURFACE FLOW IN THE LOWER COURSE OF THE SANTO  
ANTÔNIO RIVER BASIN, MARANHÃO ISLAND*

*ANÁLISIS DEL CAUDAL SUPERFICIAL EN EL CURSO INFERIOR DE LA CUENCA  
DEL RÍO SANTO ANTÔNIO, ISLA DE MARANHÃO*

**Weslem Jhony de Oliveira Rodrigues<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Mestrando em Geografia pela Universidade Estadual do Maranhão – PP GEO/UEMA

E-mail: [weslemrodrigues.uema@gmail.com](mailto:weslemrodrigues.uema@gmail.com)

 <https://orcid.org/0009-0006-6595-1220>

**Quésia Duarte da Silva<sup>2</sup>**

<sup>2</sup>Professora-Doutora do Departamento de Geografia da Universidade Estadual do Maranhão – DE GEO/UEMA

E-mail: [quesiasilva@professor.uema](mailto:quesiasilva@professor.uema)

 <https://orcid.org/0000-0003-4496-3426>

**Walefe Lopes da Cruz<sup>3</sup>**

<sup>3</sup>Mestre em Geografia (UEMA). Doutorando em Geografia pela Universidade Federal do Pará – PP GEO/UFPA

E-mail: [walefe.lopescruz@gmail.com](mailto:walefe.lopescruz@gmail.com)

 <https://orcid.org/0000-0003-3600-3177>

**Ricardo Gonçalves Santana<sup>4</sup>**

<sup>4</sup>Mestre em Geografia. Doutorando em Geografia pela Universidade Estadual do Maranhão – PP GEO/UEMA

E-mail: [ricardogsantana1919@gmail.com](mailto:ricardogsantana1919@gmail.com)

 <https://orcid.org/0000-0002-6611-0451>

### RESUMO

O objetivo deste trabalho foi analisar o escoamento superficial no baixo curso da bacia hidrográfica do rio Santo Antônio na Ilha do Maranhão, a partir de dados geoambientais da área, dados levantados a partir do uso da técnica CN (curva número) e dos dados dos testes de infiltração realizados. Para alcance do objetivo proposto foi realizado levantamento bibliográfico, elaboração de material cartográfico, trabalhos de campo para observação de condicionantes que intensificam o escoamento superficial e para a realização dos testes de infiltração, além de correlação das variáveis utilizadas por meio da Matriz de Correlação de Spearman (1961). O maior valor de escoamento superficial baseado na maior precipitação de 2021 (139,4mm/dia) foi em área urbana de grupo hidrológico D, onde o CN foi 92. Nessas condições, o escoamento foi de 112,96 mm/dia. Considerando os dados de escoamento superficial gerados a partir dos testes de infiltração realizados na área de estudo, afirma-se que os maiores valores de escoamento foram identificados em solo exposto do grupo hidrológico B. Neste caso, o teste realizado no ponto 08 apresentou valor de escoamento de 93,33mm/dia. A análise estatística obtida pela Matriz de Correlação de Spearman evidenciou que há uma correlação positiva moderada entre os dados de escoamento superficial gerados pela técnica e os dados gerados pelos testes de infiltração. Estudos que abordam o comportamento do escoamento superficial contribuem para a compreensão da dinâmica dos fenômenos hidrológicos, com possibilidade de fornecer subsídios aos planejamentos ambiental e territorial, seja em áreas urbanas e/ou rurais.

**Palavras-chave:** Curva número. Teste de infiltração. Bacia hidrográfica. Impermeabilização. Uso e cobertura da terra.



## ABSTRACT

The objective of this work was to analyze surface runoff in the lower reaches of the Santo Antônio river basin on the island of Maranhão, based on geoenvironmental data from the area, data collected using the CN technique (number curve) and data from the infiltration tests carried out. In order to achieve the proposed objective a bibliographic survey was carried out, cartographic material was prepared, field work was carried out to observe the factors that intensify surface runoff and to carry out infiltration tests, in addition to correlating the variables used using Spearman's Correlation Matrix (1961). The highest runoff value, based on the highest rainfall in 2021 (139.4mm/day), was in an urban area in hydrological group D, where the CN was 92. Under these conditions, runoff was 112.96 mm/day. Considering the runoff data generated from the infiltration tests carried out in the study area, it can be said that the highest runoff values were identified in exposed soil from hydrological group B. In this case, the test carried out at point 08 showed a runoff value of 93.33mm/day. The statistical analysis obtained by Spearman's Correlation Matrix showed that there is a moderate positive correlation between the runoff data generated by the technique and the data generated by the infiltration tests. Studies that address the behavior of surface runoff contribute to understanding the dynamics of hydrological phenomena, with the possibility of providing subsidies for environmental and territorial planning, whether in urban and/or rural areas.

**Keywords:** Curve number. Infiltration test. Watershed. Waterproofing. Land use and land cover.

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo es analizar la escorrentía superficial en el curso inferior de la cuenca del río Santo Antônio, en la isla de Maranhão, a partir de datos geoambientales de la zona, datos recogidos mediante la técnica de CN (curva numérica) y datos de los ensayos de infiltración realizados. Para alcanzar el objetivo propuesto, se realizó un relevamiento bibliográfico, se preparó material cartográfico, se realizó trabajo de campo para observar los factores que intensifican el escurrimiento superficial y para realizar ensayos de infiltración, además de correlacionar las variables utilizadas utilizando la Matriz de Correlación de Spearman (1961). El valor más alto de escorrentía, basado en la mayor precipitación de 2021 (139,4 mm/día), se dio en una zona urbana del grupo hidrológico D, donde el CN es 92. En estas condiciones, la escorrentía es de 112,96 mm/día. En estas condiciones, la escorrentía es de 112,96 mm/día. Considerando los datos de escorrentía generados a partir de los ensayos de infiltración realizados en la zona de estudio, se puede afirmar que los mayores valores de escorrentía se identificaron en suelos expuestos del grupo hidrológico B. En este caso, la prueba realizada en el punto 08 presentó un valor de escurrimiento de 93,33mm/día. El análisis estadístico obtenido por la Matriz de Correlación de Spearman mostró que existe una correlación positiva moderada entre los datos de escurrimiento generados por la técnica y los datos generados por los ensayos de infiltración. Los estudios que abordan el comportamiento de la escorrentía superficial contribuyen a la comprensión de la dinámica de los fenómenos hidrológicos, con la posibilidad de aportar subsidios a la planificación ambiental y territorial, ya sea en zonas urbanas y/o rurales.

**Palabras-clave:** Número de curva. Prueba de infiltración. Cuenca hidrográfica. Impermeabilización. Uso y ocupación del suelo.

## INTRODUÇÃO

A ocupação sem planejamento pode causar uma série de problemas socioambientais, como o aumento do escoamento superficial das águas pluviais, em virtude das modificações que ocorrem relacionadas à cobertura e ao uso da terra e que podem aumentar de forma significativa o deflúvio, uma vez que, grande parte da água em ambientes impermeabilizados, não efetua o processo de infiltração ao chegar à superfície do solo (CRUZ, 2021).

De acordo com Chen *et al.* (2009), as alterações no uso da terra afetam diretamente a concentração do escoamento superficial e interferem nos processos hidrológicos de interceptação, infiltração e evaporação, intensificando a frequência e a magnitude dos processos de ordem hidrometeorológica (enchentes, inundações, alagamentos e enxurradas).

As modificações das características da superfície pelos diferentes usos da terra alteram, conforme Suriya e Mugdal (2012), os processos hidrológicos e direcionam problemas para o ecossistema, meio ambiente e economia. Moon *et al.* (2024) afirmam que as alterações nos usos da terra propiciaram o advento das mudanças climáticas que resultaram em desafios para gerir o ambiente natural, reduzir os riscos de desastres e garantir a segurança pública, entretanto, essa afirmação não é consensual nos ambientes acadêmicos e mais pesquisas precisam ser realizadas para ratificar ou não tal afirmação.

Segundo Cruz (2021), o aumento do escoamento superficial pode ocasionar os fenômenos de alagamentos, inundações e enxurradas em áreas com alto grau de impermeabilização do solo, mesmo quando as precipitações não são elevadas, considerando as médias registradas. Para Tucci (2007), o escoamento superficial é a porção do ciclo hidrológico em que a água se desloca na superfície do solo.

O aumento do escoamento superficial ocorre predominantemente em grandes centros urbanos com altos índices de impermeabilização do solo. Nessas áreas têm-se grande parte da superfície coberta por algum tipo de construção, com zonas residenciais e industriais.

Segundo Choe *et al.* (2002), o escoamento superficial pode provocar o escoamento de materiais perigosos como componentes do petróleo, materiais pesados e flutuantes, que podem afetar diretamente os recursos hídricos.

A Ilha do Maranhão vem apresentando um aumento de áreas impermeáveis em função do aumento do número de habitantes e de estruturas urbanas. A ilha abrange 4 municípios (São Luís, Paço do Lumiar, São José de Ribamar e Raposa) que, conforme Burnett (2012), apresentam processos de desenvolvimento urbano distintos a partir da metropolização da capital do estado, São Luís.

Segundo dados da Defesa Civil Municipal e de pesquisas desenvolvidas por França (2019), a bacia hidrográfica do rio Santo Antônio na Ilha do Maranhão tem apresentado fenômenos hidrológicos severos como inundações e alagamentos em função da urbanização. Os fenômenos de alagamentos e enxurradas no médio curso dessa bacia hidrográfica foram abordados por pesquisas recentes, como as de Gomes (2021) e Rodrigues (2022).

Neste sentido, o objetivo desta pesquisa foi analisar o comportamento do escoamento superficial no baixo curso da bacia hidrográfica do rio Santo Antônio, Ilha do Maranhão. A bacia hidrográfica do rio Santo Antônio está localizada à nordeste da Ilha do Maranhão, tendo uma área de 92,44 km<sup>2</sup>. A área objeto de estudo compreende o baixo curso da bacia (Figura 1), com cerca de 43,60 km<sup>2</sup>.

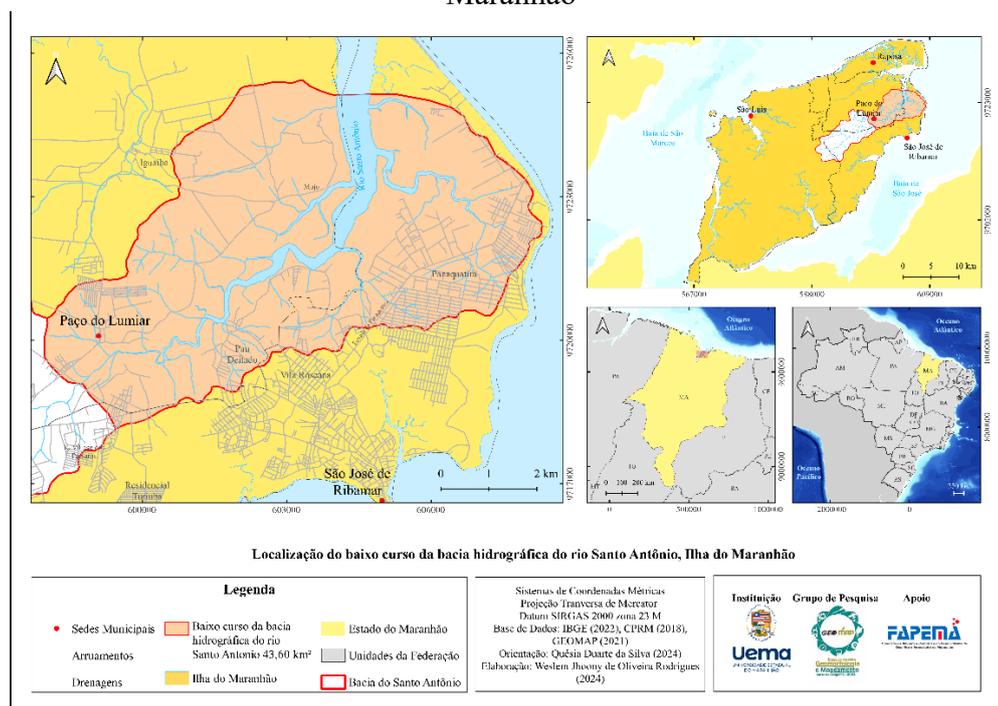
Em relação às obras consultadas que abordam sobre o escoamento superficial e a técnica do Curva-Número (CN), destacam-se as seguintes contribuições: Grove *et al.* 1998), Tucci (2001), Choe *et al.* (2002), Tucci (2007), Aguiar *et al.* (2007), Chen e Yin (2009), Suriya e Mudgal (2012), Li *et al.* (2015), Santos e Lollo (2016), Moon *et al.* (2024). Na Ilha do Maranhão foram consultadas as publicações de Cruz (2021; 2022) e Rodrigues (2022) nas bacias hidrográficas dos rios Anil e Santo Antônio.

Conforme Grove *et al.* (1998), a técnica do Curva-Número (CN) é uma das mais utilizadas para estimar o escoamento superficial. O modelo foi criado pelo Serviço de Conservação do Solo (SCS – USDA) e é baseado em um conjunto de dados inter-relacionados de precipitação, tipo hidrológico do solo, cobertura e uso da terra e escoamento.

De acordo com Santos e Lollo (2016), o escoamento pela superfície é condicionado pelas características climáticas do local, pela intensidade e duração da precipitação, tipo e porosidade do solo, declividade do terreno e ausência ou presença de cobertura vegetal. Áreas que são intensamente ocupadas por construções civis, em locais com considerável declividade e com solo impermeabilizado são as que apresentam maior capacidade de escoamento superficial.

Assim, a pesquisa em questão pode contribuir significativamente como uma ferramenta de auxílio e consulta no ambiente governamental, quando as questões de ordem hidrológica como as inundações em ambientes urbanos e rurais se tornarem um elemento importante de pesquisa em bacias hidrográficas.

**Figura 1** - Localização do baixo curso da bacia hidrográfica do rio Santo Antônio na Ilha do Maranhão



Fonte: CPRM, 2018; IBGE, 2022; GEOMAP, 2024.

## METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram realizados trabalhos de gabinete e de campo. Os trabalhos de gabinete envolveram a elaboração de mapas e gráficos, a realização de cálculos matemáticos e estatísticos por meio de softwares e a análise dos dados levantados nos trabalhos de campo. Os 4 (quatro) trabalhos de campo realizados objetivaram realizar registro fotográfico de imagens horizontais e verticais, realizar testes de infiltração em pontos previamente selecionados e analisar qualitativamente as áreas no entorno desses pontos.

Os mapas foram elaborados em Sistema de Informações Geográficas (SIG), por meio das ferramentas do programa de *software ArcGis for Desktop Advanced*, versão 10.2, de licença estudantil, pertencente ao Grupo de Pesquisa em Geomorfologia e Mapeamento da Universidade Estadual do Maranhão (GEOMAP/UEMA).

O mapeamento temático foi produzido na escala de 1:60.000. O mapa de cobertura e uso da terra foi elaborado com base na imagem de satélite Sentinel-2 (*European Space Agency-ESA*), com resolução de 10 metros, datada do dia 20 de agosto de 2021. Foram criadas quatro classes: área urbana, área com solo exposto, área vegetada e massas d'água. Para esta classificação dos usos adotou-se a proposta do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2013).

A espacialização do escoamento superficial na área da bacia foi realizada a partir da aplicação da técnica de Curva-Número (CN) do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos da América (SCS- EUA, 1972) e da realização de testes de infiltração utilizando o infiltrômetro de Hills (1960).

O mapa de CN foi produzido a partir da classificação do número de curva do SCS. Os valores foram gerados com base no tipo hidrológico do solo e no tipo de cobertura e uso da terra. O mapa de escoamento superficial por meio da técnica de Curva-Número (CN) fundamentou-se nos resultados do escoamento superficial gerados a partir da equação 2,

contendo dados da relação entre a precipitação efetiva, a capacidade de armazenamento do solo, o tipo de cobertura e uso da terra e o tipo hidrológico do solo.

O mapa de escoamento superficial, gerado a partir das informações levantadas com os testes de infiltração realizados, possibilitou estabelecer as inter-relações necessárias com os aspectos geoambientais da área, assim como a espacialização dos testes. Após estimar a capacidade de retenção hídrica do solo e identificar a precipitação total na área, foram gerados os valores de escoamento superficial (Equação 2) para cada um dos pontos pesquisados. Sendo assim, o escoamento superficial foi espacializado considerando a distribuição dos valores a partir dos testes de infiltração.

A técnica CN objetiva identificar a precipitação efetiva e pode ser implementada para bacias urbanas, suburbanas e rurais. A utilização da técnica se deve à sua eficácia em avaliar a precipitação efetiva com base nas condições de cobertura e uso da terra. Ela define valores de 0 a 100 para o nível de impermeabilidade de um local. Sendo assim, o CN considera o tipo hidrológico do solo e o tipo de cobertura e uso da terra para obtenção dos resultados.

Destaca-se que o escoamento superficial por meio da técnica CN, bem como outros modelos de estimativa do escoamento superficial já foram implementados em diferentes estudos de bacias hidrográficas, a exemplo de Zhan e Huang (2004), Menezes (2010), Arquino *et al.* (2008), Anjinho *et al.* (2018), Cheng *et al.* (2009).

Na obtenção dos resultados, seguindo as duas técnicas citadas, foi adotada a maior precipitação do ano de 2021, que ocorreu no dia 15 de março (139,4 mm em 24 horas). No escoamento superficial baseado na técnica CN, é necessário identificar o tipo hidrológico e o valor de CN para essa classificação de solo e assim identificar a capacidade de armazenamento do solo (Equação 1).

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (\text{Equação 1})$$

O resultado do cálculo de armazenamento foi alcançado a partir da equação de escoamento superficial (Equação 2), considerando a precipitação da área (P), a abstração inicial (Ia) e o potencial de armazenamento de água no solo (S), equacionando o escoamento superficial (Q) e obtendo o escoamento por meio do CN convencional.

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P - 0,8S)} \quad (\text{Equação 2})$$

Q = Escoamento Superficial direto (mm)

P = Precipitação total acumulada (mm)

S = capacidade máxima de retenção no solo (mm)

Ia = é a abstração inicial (mm), representado por 0,2S e 0,8S.

Para relacionar os dados obtidos por meio da técnica de curva-número com os testes de infiltração, foi elaborada a Matriz de Correlação de Spearman (1961). Desta forma obteve-se o valor de correlação das duas técnicas na análise do escoamento superficial da bacia hidrográfica.

De acordo com Cruz (2022), a utilização desta técnica possibilita avaliar a correlação entre as duas variáveis adotadas, podendo ter ou não uma distribuição formal. Segundo o autor, a correlação pode variar de -1 a 1.

Quanto mais próximo de -1, menor é a correlação das técnicas, ou seja, têm-se uma correlação negativa, e uma correlação negativa forte se chegar a -1. Neste caso, haverá uma correlação inversamente proporcional, tal que, se uma variável aumenta a outra diminui.

Margarida Penteadó - Revista de Geomorfologia. v.2 n.1, junho de 2025, p.1-19  
<https://doi.org/10.29327/ISSN2966-2958.v2n1.2024.025>

Por outro lado, quanto mais próximo de 1, maior será a correlação dos dados, isto é, ao chegar em 1 têm-se uma correlação positiva forte (Figura 2).

**Figura 2 - Valores de Correlação**



**Fonte:** Elaborado e adaptado de Cruz (2022).

A geração dos dados de correlação foi obtida conforme implementado por Cruz (2022). Nesse sentido, os valores foram gerados a partir do *Software Jamovi Projecti* versão 2.3 (2022), considerando a matriz de correlação de Spearman (1961). No processo de geração foram adotados pesos para os tipos de variáveis nominais qualitativas no tipo hidrológico do solo e tipo de cobertura e uso da terra (Tabela 1).

**Tabela 1 - Pesos atribuídos na Matriz de Correlação de Spearman**

Tipo de hidrológico do solo	Peso	Tipo de cobertura e uso da terra	Peso
A	1	Área vegetada	1.1
		Solo exposto	1.2
B	2	Solo Exposto	2.2
C	3	Solo exposto	3.1
D	4	Solo Exposto	4.2

**Fonte:** Elaborada com base em Cruz (2022).

Cruz (2022) esclarece que a atribuição dos pesos de acordo com o tipo hidrológico do solo se deve ao emprego de uma análise mais quantitativa, o que implica na construção de dados numéricos. Vale ressaltar que os pesos foram atribuídos à capacidade de retenção hídrica, uma vez que o SCS (Grove *et al.*, 1998) classificou os solos de acordo com esse parâmetro.

Desta forma a organização dos pesos baseou-se nos tipos de solos e tipos de cobertura e uso da terra. Nesse sentido, os tipos e cobertura e usos foram selecionados em área vegetada e solo exposto, pois foram apenas nesses tipos que foram realizados os testes de infiltração.

Os valores dos pesos, conforme as variáveis adotadas, foram plotados em tabela no *software Excel* (2016) e posteriormente ela foi exportada para o programa *Jamovi*. A partir daí, foi selecionada a opção *Analyses – Regression – Correletion Matrix* e por fim, *Spearman* para gerar a correlação dos dados.

Além dos trabalhos de gabinete detalhados anteriormente, foram realizados 4 trabalhos de campo, sendo um no segundo semestre de 2021 e três no primeiro semestre de 2022. Foram realizados registros fotográficos de imagens horizontais e verticais, para analisar qualitativamente as áreas no entorno desses pontos e para validar os dados obtidos em gabinete. As fotografias foram registradas através de máquina fotográfica convencional e Veículo Aéreo Não Tripulado, especificamente o Drone Mavic Air 2 Fly More Combo.

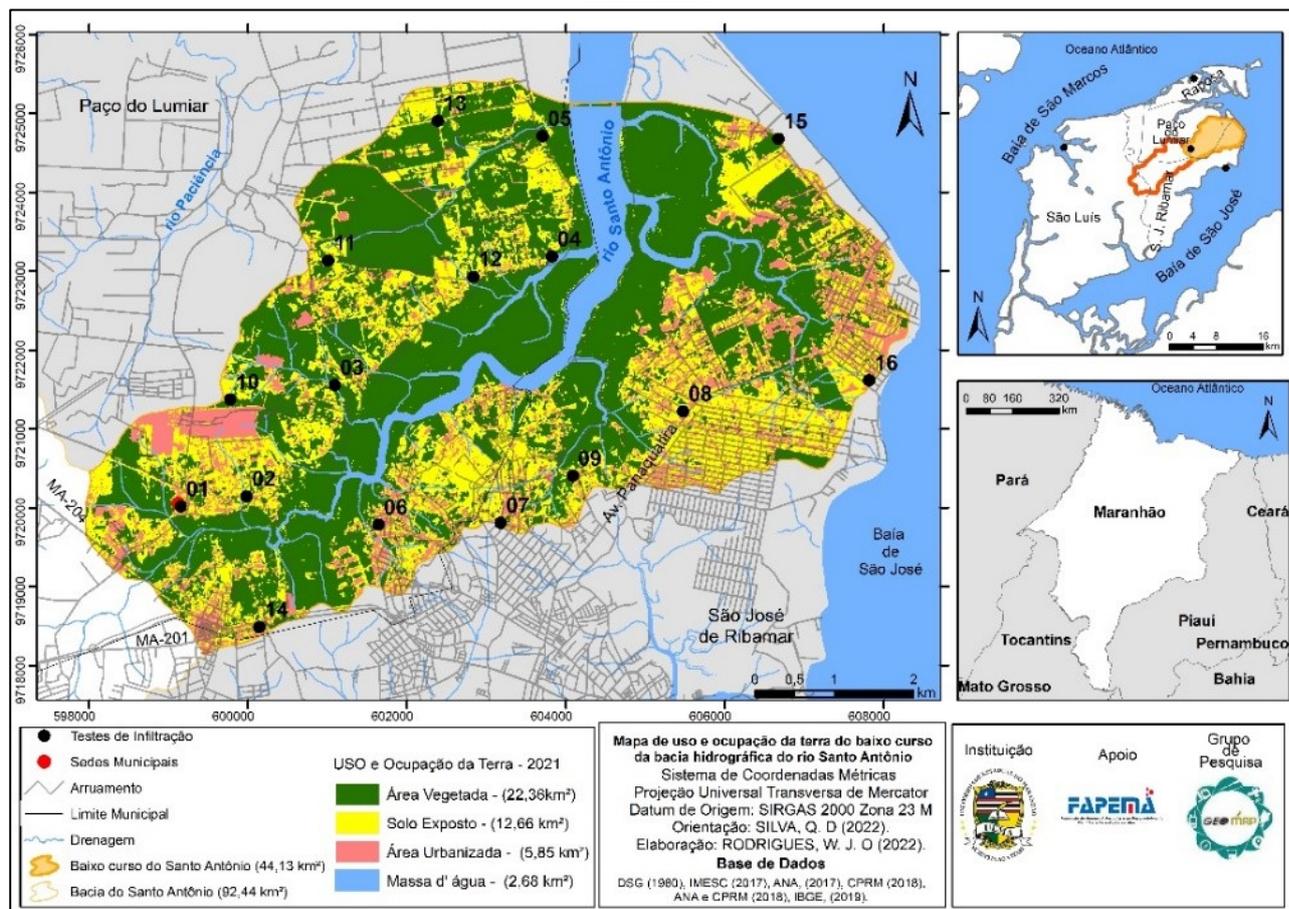
Foram observadas as características geoambientais da área, observando as alterações no relevo, nos canais fluviais, na cobertura superficial e nas condições de uso e cobertura da terra, registrando as informações em caderneta de campo.

Para a realização de testes de infiltração, pontos foram previamente selecionados a partir de imagens de satélite verticais e em campo, foram aplicados testes em 16 pontos distribuídos na área de estudo. Para a realização destes testes, foi utilizado o anel de Hills (1960), considerando a proposta de Guerra (2010). Os testes mostraram a capacidade de armazenamento de água no solo a partir das características da área e do tipo hidrológico do solo.

### ANÁLISE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL NO BAIXO CURSO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SANTO ANTÔNIO

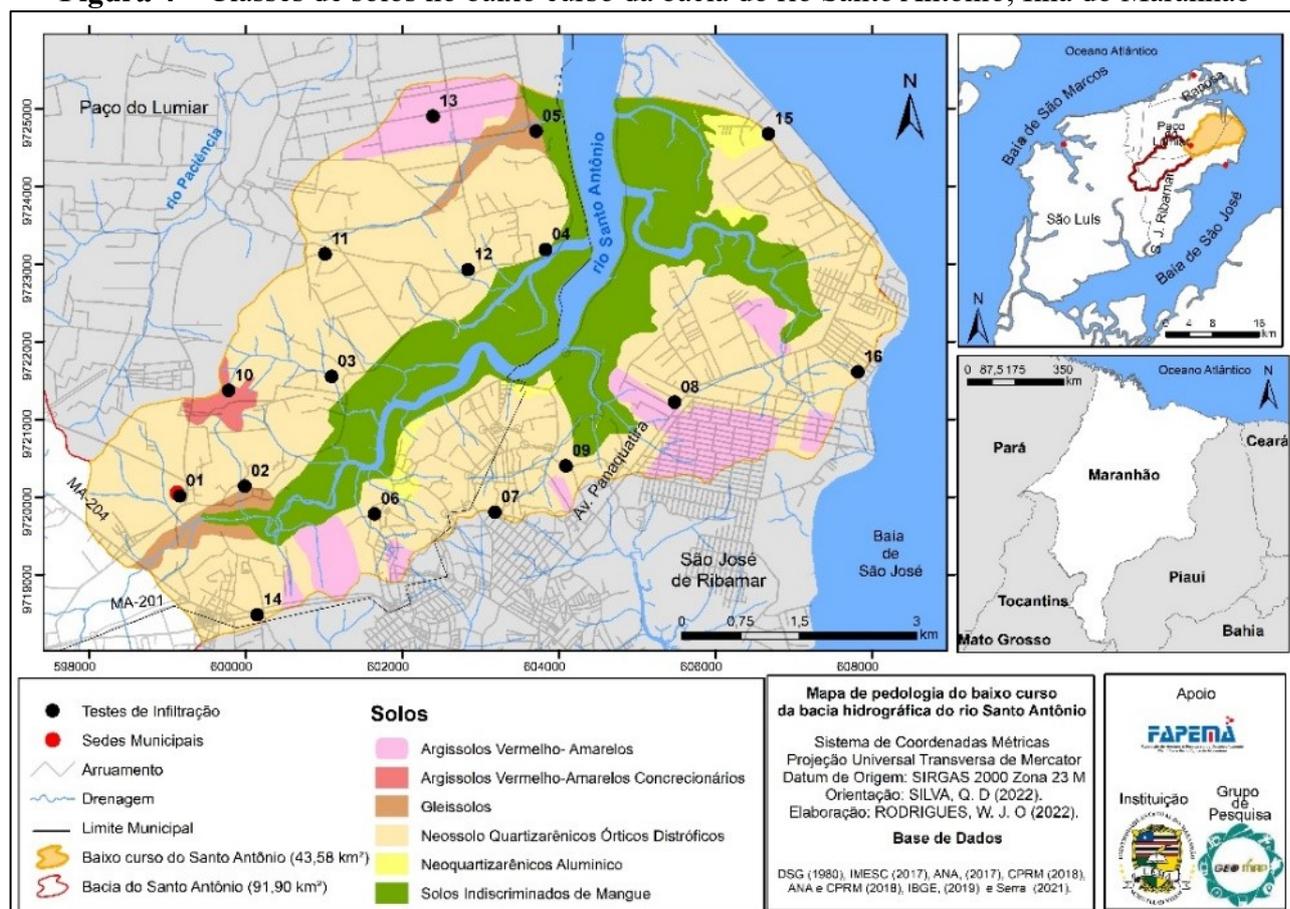
Conforme a metodologia utilizada e considerando a necessidade de levantamento de dados, foram elaborados mapas relacionados ao uso e cobertura e da terra e aos tipos de solos da área de estudo (Figuras 3 e 4). O mapa de uso e cobertura revela as áreas com maior tendência ao escoamento superficial, em virtude da impermeabilização ocorrente pelo processo de urbanização. Destaca-se que esses dois mapas contêm intencionalmente a localização dos pontos em que foram realizados os testes de infiltração, para análise das informações apresentadas.

**Figura 3 -** Uso e cobertura da terra no baixo curso da bacia do rio Santo Antônio, Ilha do Maranhão



Fonte: IMESC, 2017; ANA 2017; CPRM, 2018; IBGE, 2019; GEOMAP, 2021.

**Figura 4** – Classes de solos no baixo curso da bacia do rio Santo Antônio, Ilha do Maranhão



Fonte: IMESC, 2017; ANA 2017; CPRM, 2018; IBGE, 2019; GEOMAP, 2021.

Em conjunto com o mapa de solos, o uso e cobertura contribui para a análise do escoamento superficial de forma que, a depender das condições de uso da superfície, haverá ou não interferência na capacidade de armazenamento hídrico dos solos.

Os solos do baixo curso do rio Santo Antônio foram classificados em 6 tipos e em 4 grupos hidrológicos, sendo eles: Argissolos Vermelhos-Amarelos do tipo hidrológico B; Argissolos Vermelhos- Amarelos Concrecionários do tipo C; Neossolos Quartzarênicos Órticos Distróficos e Neoquartzarênicos Alumínicos do tipo A; e Solos Indiscriminados de Mangue e Gleissolos do tipo hidrológico D (Tabela 2).

**Tabela 2** – Tipos de solos do baixo curso do rio Santo Antônio

Solos	Valor absoluto em	Valor relativo
	Km <sup>2</sup>	em %
Argissolos Vermelhos - Amarelos	4,04	10,03
Argissolos Vermelhos - Amarelos Concrecionários	0,37	0,91
Gleissolos	1,07	2,65
Neossolos Quartzarênicos Órticos Distróficos	25,46	63,23
Neoquartzarênicos Alumínicos	0,71	1,76
Solos Indiscriminados de Mangue	8,61	21,38

Fonte: Elaborada pelos autores.

Com base nos dados dos tipos de solos e dos tipos de usos e cobertura da terra da área, foram definidos os valores de CN de acordo com o Quadro 1.

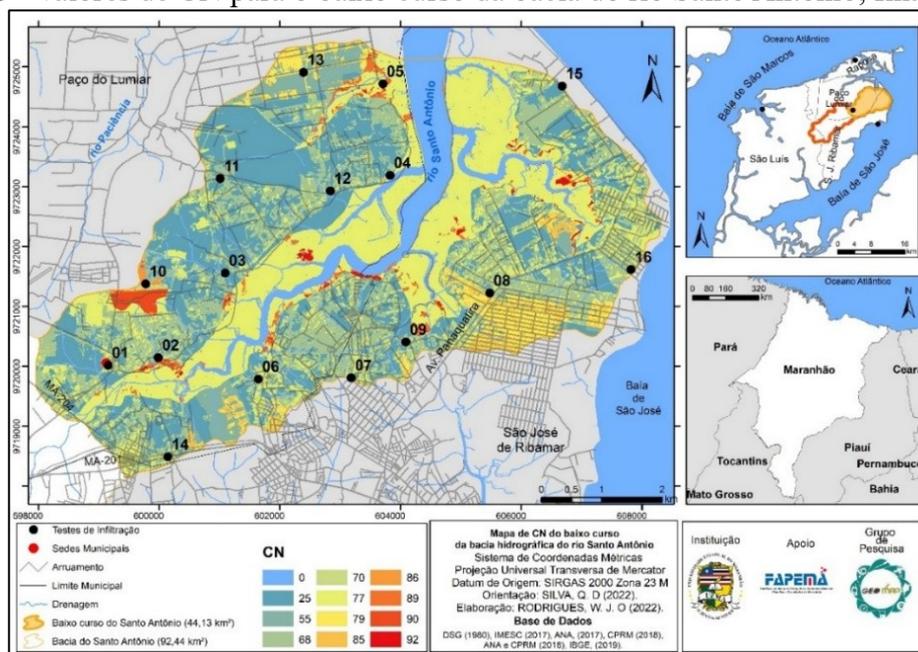
**Quadro 1** - Valores de CN para as classes de uso e cobertura

Solos	Tipo Hidrológico	Tipo de Uso e Cobertura	CN
Argissolos Vermelhos – Amarelos	C	Área urbana	90
		Vegetação	70
		Solo Exposto	86
Argissolos Vermelhos-Amarelos Concrecionários	B	Área urbana	85
		Vegetação	55
		Solo Exposto	79
Gleissolos	D	Área urbana	92
		Vegetação	77
		Solo Exposto	89
Neossolos Quartzarênicos Órticos Distróficos	A	Área urbana	77
		Vegetação	25
		Solo Exposto	68
Neoquartzarênicos Alumínicos	A	Área urbana	77
		Vegetação	25
		Solo Exposto	68
Solos Indiscriminados de Mangue	D	Área urbana	92
		Vegetação	77
		Solo Exposto	89

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os menores valores de CN ocorreram nas áreas com vegetação em solos Neoquartzarênicos Órticos Distróficos do tipo A com valor de curva número igual 25. Os maiores valores de CN ocorreram nas áreas urbanas com Gleissolos e Solos Indiscriminados de Mangue do tipo D e Argissolos Vermelhos-Amarelos do tipo C. Tais tipos hidrológicos possuem valores de CN de 92, 92 e 90, respectivamente (Figura 5).

**Figura 5** - Valores de CN para o baixo curso da bacia do rio Santo Antônio, Ilha do Maranhão



Fonte: IMESC, 2017; ANA 2017; CPRM, 2018; IBGE, 2019; GEOMAP, 2021.

Considerando os valores de CN para a área da bacia com base nos tipos hidrológicos dos solos, foram realizados os cálculos de capacidade armazenamento de água do solo, seguindo os parâmetros do cálculo de armazenamento (S) como observado na tabela 3.

**Tabela 3** - Potencial de retenção de água no solo no baixo curso da bacia do rio Santo Antônio, Ilha do Maranhão

Uso e Cobertura	Tipo Hidrológico	CN	Potencial de Retenção de Água no Solo (S) em mm/dia
Área urbana	A	77	75,87
Vegetação		25	762,00
Solo exposto		68	119,52
Área urbana	B	85	44,82
Vegetação		55	207,80
Solo exposto		79	67,51
Área urbana	C	90	28,22
Vegetação		70	108,85
Solo exposto		86	41,34
Área urbana	D	92	25,39
Vegetação		77	75,87
Solo exposto		89	31,39

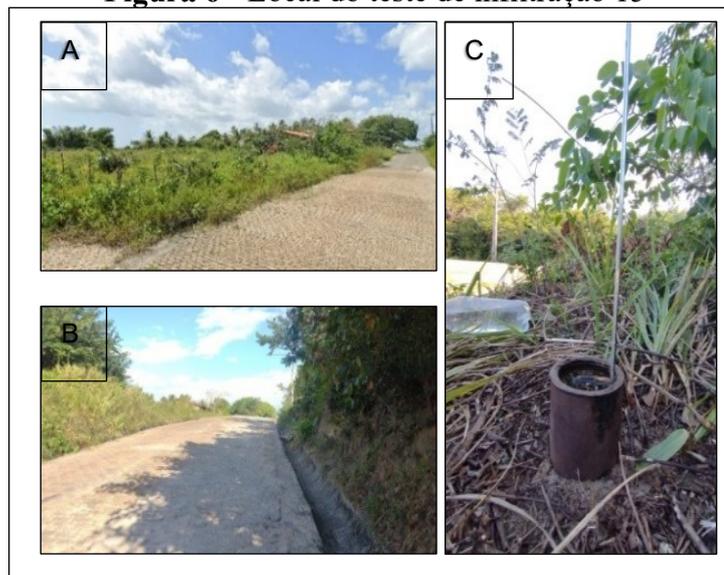
Fonte: Elaborados pelos autores.

De acordo com a tabela 3, afirma-se que os maiores níveis de escoamento superficial ocorrem nos solos hidrológicos dos tipos C e D em ambientes de área urbana e solo exposto. Os valores variaram entre 25,39 mm e 41,34 mm em potencial de retenção.

Os testes de infiltração realizados no baixo curso da bacia apresentaram comportamentos distintos conforme o uso e cobertura da terra e as condições do solo no momento do ensaio.

O teste de infiltração 15 foi realizado em um tabuleiro na porção norte da bacia. O teste demandou um total de 9 recargas e acumulou 470 mm de água no solo em 30 minutos de ensaio (Figura 6 e 7).

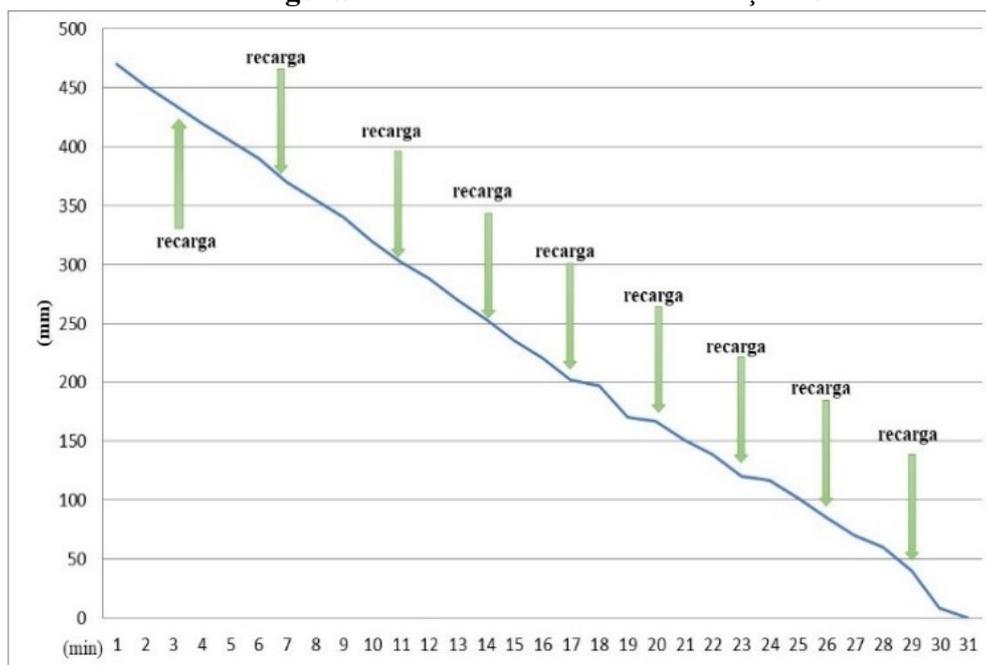
**Figura 6** - Local do teste de infiltração 15



**Legenda:** A – Superfície do tabuleiro; B – Topo de tabuleiro com superfície impermeável com plano de drenagem à direita e área parcialmente vegetada; C – Infiltrômetro posicionado para teste de infiltração em solo com húmus e vegetação arbustiva.

Fonte: Elaborado pelos autores.

**Figura 7 – Gráfico do teste de infiltração 15**



Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir do gráfico 15, pode-se observar a grande capacidade de armazenamento hídrico do solo, dado que a média do tempo para realização da recarga do infiltrômetro foi de 2 minutos, gerando a maior quantidade de recargas dentre todos os testes realizados.

Desta forma, a capacidade de armazenamento de água no solo foi propiciada pelas particularidades de retenção hídrica, uma vez que o solo apresenta classificação hidrológica do tipo A, ou seja, o solo tem maior potencial de acúmulo hídrico de acordo com a tabela 3.

Vale ressaltar que os solos Neoquartzarênicos Alumínicos e os Neossolos Quartzarênicos Órticos Distróficos apresentam boas condições de porosidade, já que em áreas com solo exposto e vegetação, o solo tem potencial de reter entre 119,52 mm e 762 mm (Tabela 3).

Em contrapartida, o teste 8, realizado na margem da estrada de Panaquatira, em área com Neossolo Quartzarênico, apresentou menor capacidade de infiltração dentre todos os outros. Acredita-se que isso ocorreu devido à compactação da superfície em função da construção de residências e estrada. Neste teste 8 não foi feita nenhuma recarga no infiltrômetro (Figura 8 e 9).

Para realizar o cálculo do escoamento superficial adotando a técnica do SCS e os dados levantados pelos testes de infiltração, foi utilizado o dado da maior precipitação ocorrida na área no ano de 2021, ocorrida no dia 15 de março. Neste dia foi registrado um acúmulo pluviométrico de 139,4 mm em 24 horas, segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Para a realização deste cálculo utilizando a técnica CN convencional, foram consideradas a precipitação (P), a abstração inicial (Ia) e a capacidade de armazenamento hídrico (S), seguindo cada tipo de uso e cobertura e cada tipo hidrológico do solo presente na área.

Com os resultados destes cálculos e a espacialização das informações (Figura 10), percebeu-se que os valores ultrapassaram os 100 mm de escoamento superficial, sendo 110,45 mm em Argissolo Concrecionário (Teste 10) e 112,96 mm em Gleissolo (Testes 2 e 5).

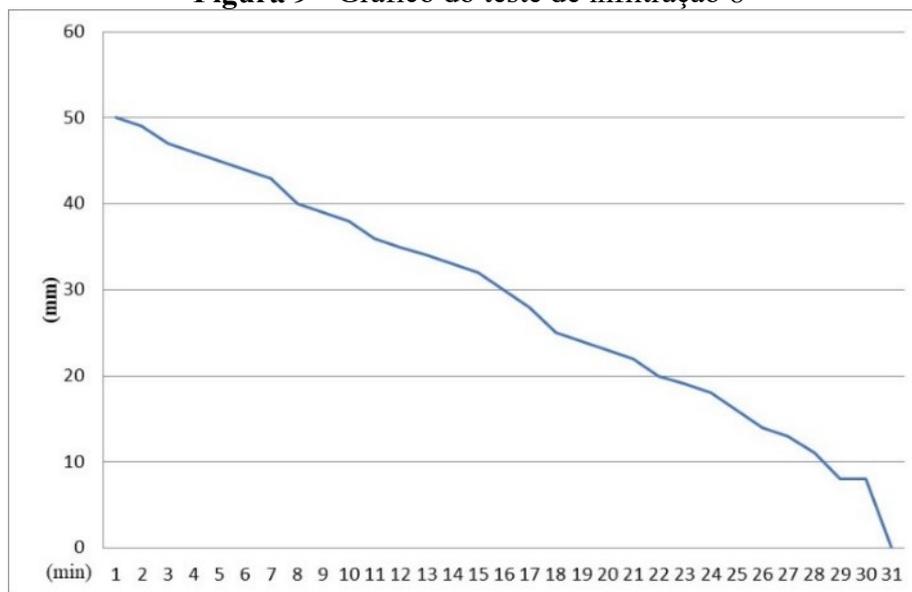
**Figura 8 - Local do teste 8**



**Legenda:** A – Vista parcial do local de realização do teste 8, às margens da rodovia chamada de Estrada de Panaquatira, em Paço do Lumiar; B –Área com vegetação herbácea e solo exposto; C – Infiltrômetro penetrado no solo exposto.

**Fonte:** Elaborado pelos autores.

**Figura 9 - Gráfico do teste de infiltração 8**

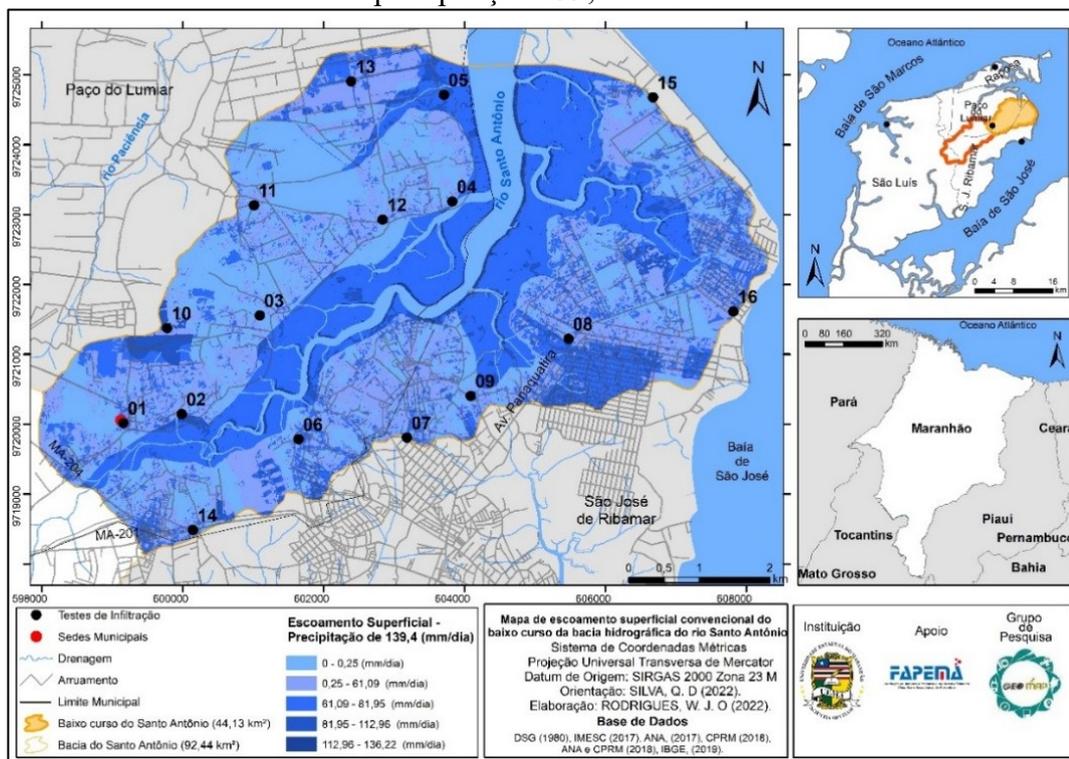


**Fonte:** Elaborado pelos autores.

Já na estimativa de escoamento superficial por meio da aplicação dos testes de infiltração, seguindo os estudos de Aguiar, Targa e Batista (2007) e Cruz (2022), os valores de potencial de retenção de água no solo (S) foram previamente obtidos por meio da infiltração acumulada (Iac) nos 30 minutos de ensaio. Sendo assim, o valor de Iac substituiu o valor de armazenamento dado pela técnica CN-SCS e foi adicionado diretamente no cálculo de escoamento superficial.

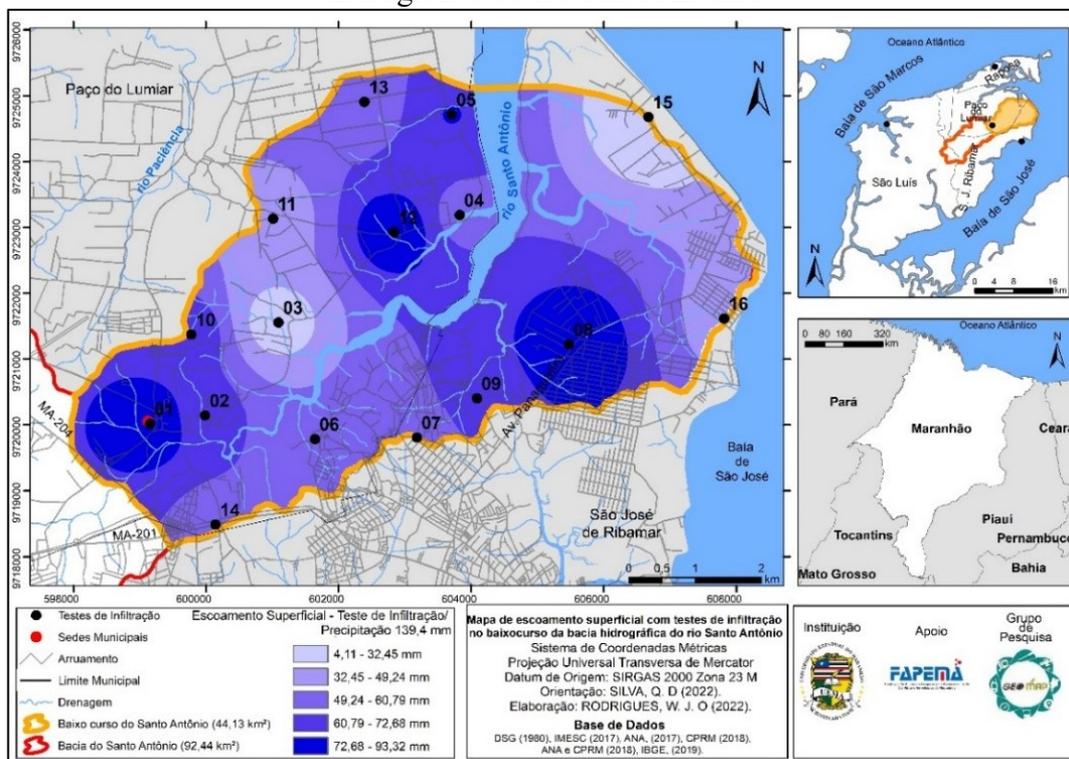
Dessa forma, os maiores valores foram encontrados nos testes 1, 5, 8, 10 e 12, todos ultrapassando 70 mm de escoamento, dada a precipitação de 139,4 mm/dia em 2021 (Figura 11). Dentre todos, o maior volume de escoamento foi percebido no teste 8 com 93,33 mm, uma vez que neste ensaio não foi realizada a recarga. Em suma, os testes apresentaram resultado de escoamento entre 72, 68 e 93,32 mm/dia.

**Figura 10** - escoamento superficial no baixo curso da bacia do rio Santo Antônio para precipitação 139,4 mm/dia



Fonte: IMESC, 2017; ANA 2017; CPRM, 2018; IBGE, 2019; GEOMAP, 2021.

**Figura 11** - escoamento superficial com os testes de infiltração no baixo curso da bacia hidrográfica do rio Santo Antônio



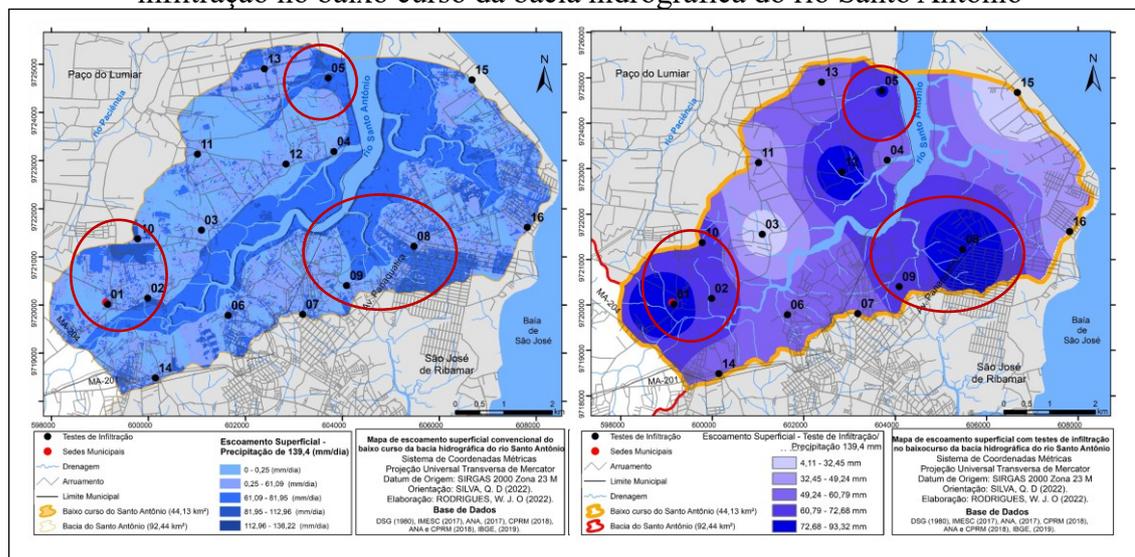
Fonte: IMESC, 2017; ANA 2017; CPRM, 2018; IBGE, 2019; GEOMAP, 2021.

Estes dados indicam que havia possibilidade de ocorrência de altas taxas de escoamento superficial nas áreas em questão, mas não garante que esses volumes ocorreram, em função de vários fatores que podem interferir no comportamento do escoamento, como a declividade, o uso e cobertura da terra, a saturação do solo no momento da precipitação, dentre outros.

Ao analisar os mapas 10 e 11, observa-se que os tipos hidrológicos A, B, e D, precisamente os Neossolos Quartzarênicos Órticos Distróficos, os Argissolos Vermelhos – Amarelos e os Gleissolos foram os que tiveram as maiores taxas de escoamento superficial. Os valores obtidos com a técnica de Curva- Número, considerando os maiores valores para os mesmos tipos hidrológicos tiveram comportamentos semelhantes.

Nessa conjuntura, ao analisar os mapas 10 e 11, é possível perceber uma correlação na espacialização das taxas de escoamento superficial com a aplicação das duas técnicas empregadas na pesquisa. As áreas próximas aos testes 1, 5, 8 e 10 apresentaram elevadas taxas de escoamento superficial, uma vez que as condições de uso e os tipos de solo foram relevantes para esse comportamento, nas porções norte, leste e sudoeste do baixo curso da bacia hidrográfica do rio Santo Antônio (Figura 12).

**Figura 12** - Comparação do escoamento superficial baseado com o CN e os testes de infiltração no baixo curso da bacia hidrográfica do rio Santo Antônio



Fonte: IMESC, 2017, ANA 2017, CPRM, 2018, IBGE, 2019, GEOMAP, 2021.

Para melhor compreensão dos resultados obtidos com a técnica de curva-número e com os 16 testes de infiltração, foi realizada a análise estatística a partir da Matriz de Correlação de Spearman (1961), para identificar a correlação entre os resultados de escoamento superficial.

A matriz estatística foi gerada pelo programa *Jamovi* (versão 2.3), considerando a Correlação de Spearman (1961), uma vez que os dados quantitativos não possuem distribuição normal, sendo assim considerados não paramétricos.

De acordo com Batista (2021), o coeficiente de correlação é compreendido como uma força de associação linear, que pode variar entre -1, correlação negativa perfeita, e +1, correlação positiva perfeita (Quadro 2).

**Quadro 2 – Interpretação do coeficiente de correlação**

Valor do coeficiente $\rho$	Interpretação
-1	Correlação negativamente perfeita
] -1 a -0.90	Correlação negativa muito forte
-0.89 a -0.70	Correlação negativa forte

-0.69 a -0.40	Correlação negativa moderada
-0.39 a -0.20	Correlação negativa fraca
-0.19 a 0.00[	Correlação negativa muito fraca
0.00	Correlação nula ou inexistente
]0.00 a 0.19	Correlação positiva muito fraca
0.20 a 0.39	Correlação positiva fraca
0.40 a 0.69	Correlação positiva moderada
0.70 a 0.89	Correlação positiva forte
0.90 a +1[	Correlação positiva muito forte
+1	Correlação positivamente perfeita

Fonte: Batista (2021).

O coeficiente de correlação foi gerado por meio dos dados quantitativos do grupo hidrológico, tipos de uso, escoamento superficial com a técnica de curva-número, escoamento superficial com testes de infiltração, infiltração acumulada, e o valor de CN para os 16 testes realizados na área de estudo.

As correlações significativas estão identificadas na figura 13 pelo caractere de “\*” (asterisco), tendo em vista a interpretação do coeficiente de correlação. Desta forma, esta figura representa as correlações dos dados obtidos no trabalho.

Figura 13 – Matriz de correlação

**Resultados**

**Matriz de Correlações**

Matriz de Correlações

	TESTES	CN	TIPO HIDROLÓGICO	TIPO DE USO	ESCOAMENTO SUPERFICIAL	VALOR COM A TÉCNICA	INFILTRAÇÃO ACUMULADA	POTENCIAL ARMAZENAMENTO CONVENCIONAL
TESTES	Rho de Spearman	—						
	p-value	—						
CN	Rho de Spearman	-0.393	—					
	p-value	0.147	—					
TIPO HIDROLÓGICO	Rho de Spearman	-0.209	0.820***	—				
	p-value	0.455	< .001	—				
TIPO DE USO	Rho de Spearman	-0.393	1.000***	0.820***	—			
	p-value	0.147	< .001	< .001	—			
ESCOAMENTO SUPERFICIAL	Rho de Spearman	-0.296	0.418	0.406	0.418	—		
	p-value	0.283	0.121	0.133	0.121	—		
VALOR COM A TÉCNICA	Rho de Spearman	-0.393	1.000***	0.820***	1.000***	0.418	—	
	p-value	0.147	< .001	< .001	< .001	0.121	—	
INFILTRAÇÃO ACUMULADA	Rho de Spearman	0.296	-0.418	-0.406	-0.418	-1.000***	-0.418	—
	p-value	0.283	0.121	0.133	0.121	< .001	0.121	—
POTENCIAL ARMAZENAMENTO CONVENCIONAL	Rho de Spearman	0.393	-1.000***	-0.820***	-1.000***	-0.418	-1.000***	0.418
	p-value	0.147	< .001	< .001	< .001	0.121	< .001	0.121

Nota. \* p < .05, \*\* p < .01, \*\*\* p < .001

Fonte: Jamovi projecti (2022).

A partir da análise dos dados presentes no quadro 2 e na figura 13, pode-se concluir que os dados das taxas de escoamento superficial da técnica CN são coerentes com os dados dos testes de infiltração de forma positiva moderada, resultando no coeficiente de correlação de 0.418, segundo a Matriz de Spearman-Rho.

Há três correlações significativas positivas perfeitas (+1) e quatro correlações negativas perfeitas: as relações entre o valor de CN com o tipo de uso solo, o valor de CN com o valor de escoamento dado pela técnica, o tipo de uso do solo com o valor de escoamento dado pela técnica, e as relações entre valor de CN, potencial de armazenamento, infiltração acumulada e o escoamento superficial com testes e com técnica curva número (Tabela 4).

**Tabela 4** – Matriz de correlação mais significativas

	Correlação	Spearman - Rho	Interpretação
CN	Tipo Hidrológico	0.820	Positiva forte
CN	Tipo de Uso	1	Positiva Perfeita
CN	Valor com a Técnica (Escoamento com a técnica)	1	Positiva Perfeita
Tipo Hidrológico	Tipo de Uso	0.820	Positiva forte
Tipo Hidrológico	Valor com a Técnica (Escoamento com a técnica)	0.820	Positiva forte
Tipo de Uso	Valor com a Técnica (Escoamento com a técnica)	1	Positiva Perfeita
Escoamento Superficial (Testes)	Valor com a Técnica (Escoamento com a técnica)	0.418	Positiva moderada
CN	Potencial de Armazenamento	-1	Negativa perfeita
Tipo Hidrológico	Potencial de Armazenamento	-0.820	Negativa forte
Tipo de Uso	Potencial de Armazenamento	-1	Negativa perfeita
Escoamento Superficial (Testes)	Infiltração Acumulada	-1	Negativa perfeita
Valor com a Técnica (Escoamento com a técnica)	Potencial de Armazenamento	-1	Negativa perfeita

**Fonte:** Elaborada pelos autores.

Com base na tabela acima, compreende-se primeiramente que os valores de CN têm total relação com os tipos de uso do solo. Assim, as áreas mais ocupadas são as tendem a apresentar maior valor de CN, enquanto as áreas menos ocupadas tendem a apresentar menor valor de CN.

A segunda correlação positivamente perfeita significa que, quanto maior for o valor de CN, maior será o escoamento superficial gerado de acordo com a técnica curva-número, mostrando uma relação totalmente proporcional. Já a terceira correlação positivamente perfeita é interpretada dependendo do tipo de uso do solo, ou seja, o escoamento superficial dado pela técnica CN será maior em função do tipo de solo.

As correlações negativamente perfeitas (-1) são as correlações inversamente proporcionais. A primeira pode ser observada na relação entre o valor de CN e o potencial de armazenamento convencional, isto é, quanto maior o valor de CN, menor a capacidade de armazenamento hídrico.

A segunda correlação negativamente perfeita está na relação entre o tipo de uso e o potencial de armazenamento convencional. Nesta situação, a menor capacidade de armazenamento do solo foi dada em função do tipo de uso. Isto é, os usos do solo com características impermeáveis inferem menor armazenamento hídrico e maior escoamento.

Já a terceira correlação negativamente perfeita é observada na relação entre o escoamento superficial com testes de infiltração e a infiltração acumulada dos testes de infiltração. Logo, quanto menor a infiltração acumulada, maior o escoamento superficial.

A quarta correlação negativamente perfeita está estritamente relacionada à correlação anterior, diferindo apenas na técnica utilizada. Considerando a técnica CN, quanto menor for o potencial de armazenamento convencional, maior será o valor de escoamento superficial, isto é, a menor capacidade de retenção hídrica do solo infere em maior grau de escoamento.

De todo modo, o grau de escoamento superficial, seja pela técnica CN ou pelos testes de infiltração, se dá a partir do nível de compactação do solo, uma vez que o potencial de armazenamento hídrico é mais reduzido.

Considerando a análise estatística realizada, é pertinente entender que na obtenção de dados mais exatos para estimativa do escoamento superficial numa bacia hidrográfica, é importante considerar a utilização de dados pluviométricos obtidos por meio de radares meteorológicos.

Li *et al.* (2015) afirma que a cobertura da rede de radares é limitada a algumas zonas do mundo, e que dados de imagens de satélite combinados com pluviômetros podem estimar precipitação de forma mais precisa em grande parte do globo. De acordo com os autores, modelos estatísticos foram desenvolvidos para fundir os dados de precipitação, como a fusão condicional, fusão bayesiana, assimilação de dados, estimativa ótima dupla/simples, análises estatísticas dentre outras.

## CONCLUSÃO

A área estudada apresenta formas de relevo com tabuleiros, colinas esparsas, apicum, planície fluvial e planície de maré; altitudes entre de 1 e 55 metros; declividade entre 0 e 30%; solos dos tipos Argissolos Vermelho-Amarelos, Argissolos Concrecionários, Neossolos Quartzarênicos Órtico Distrófico, Neoquartzarênico Alumínico, Gleissolos e Solos Indiscriminados de Mangue.

Essas características avaliadas em conjunto contribuem para compreender o comportamento do escoamento superficial, já que estas variáveis físicas da superfície, bem como suas condições de uso, apresentam particularidades que tornam o escoamento das águas mais ou menos intenso.

O escoamento superficial nos pontos analisados se difere pelo seu grau de intensidade, de acordo com uma série de condicionantes. Como exemplo, têm-se os equipamentos urbanos como as bocas de lobo e bueiros presentes na região sudoeste, leste e nordeste da área de estudo (Figura 3).

Os maiores valores de escoamento superficial foram identificados nas áreas urbanas com os tipos hidrológicos C e D, cujas condições de impermeabilidade são altas, possibilitando a ocorrência de fenômenos hidrológicos severos na região da sede de Paço do Lumiar – MA e na margem direita do rio Santo Antônio, nas localidades de Pau Deitado e Panaquatira.

Por outro lado, os menores valores de escoamento superficial foram identificados nas áreas vegetadas com solos do tipo hidrológico A, nos testes 3, na localidade de Iguaíba em Paço do Lumiar – MA, e 5, próximo às falésias de Panaquatira em São José de Ribamar – MA.

Nesse cenário, a análise estatística feita por meio da Matriz de Spearman (1961) constatou que a relação é positiva moderada entre o grau de escoamento superficial dado pela técnica de curva-número e pelos testes de infiltração. Desta forma, os dados de escoamento superficial identificados pelas duas técnicas apresentaram correlação positiva.

Além disso, concluiu-se que as áreas classificadas com maior valor de CN, tipo de uso do solo impermeável e tipo hidrológico mais próximo ao tipo D, tendem a ter maior taxa de

escoamento superficial. Isso pode ser percebido pela correlação positivamente perfeita e correlação positiva muito forte.

Diante disso, as duas técnicas validaram o escoamento superficial e podem contribuir para o planejamento urbano e rural do baixo curso bacia hidrográfica do rio Santo Antônio na Ilha do Maranhão, bem como servir de subsídio para a mesma finalidade em bacias de características semelhantes.

## REFERÊNCIAS

AGUIAR, L. S. G.; TARGA, M. S.; BATISTA, G. T. Escoamento superficial na bacia hidrográfica do Ribeirão Itaim. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 2, n. 1, p. 44-56, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/26469949> Escoamento superficial na bacia hidrográfica do Ribeirão Itaim. Acesso em 30 out. 2021.

BATISTA, I. **Testes de correlação**. Médiun, 2021. Disponível em: <https://ivanildobatista13.medium.com/testes-de-correla%C3%A7%C3%A3o-3cb0a37e0f2> Acesso em: 11 Set. 2023.

BURNETT, F. L. Metropolização e gestão urbana na Ilha do Maranhão: efeitos socioambientais da produção imobiliária de baixa renda. **Revista de Políticas Públicas** [en linea]. 2012, 353-361. Disponível em: <http://periodicoseletronicos.ufma.br/index.php/rppublica/article/view/1384>. Acesso em: 20 Nov. 2021.

CHEN, Y.; XU, Y.; YIN, Y. Impacts of land use change scenarios on storm-runoff generation in Xitiaoqi basin, China, **Quaternary International**, v. 208, Issues 1–2, 2009.

CHOE, J.; BANG, K.; LEE, J. Characterization of surface runoff in urban areas. **Water Science and Technology**, v. 45, n. 9, p. 249–254, 2002.

CRUZ, W. L. **Estudo do Grau de Impermeabilização Utilizando o Método Curve Number – Soil Conservation Service - CN-SCS: alto curso da bacia hidrográfica do rio Anil em São Luís – Maranhão. (Qualificação Mestrado em Geografia) Universidade Estadual do Maranhão (UEMA). São Luís, 2021. Disponível em: [https://sis.sig.uema.br/sigaa/public/programa/noticias\\_desc.jsf?lc=en\\_US&id=940&idcurso=122595&noticia=13136694](https://sis.sig.uema.br/sigaa/public/programa/noticias_desc.jsf?lc=en_US&id=940&idcurso=122595&noticia=13136694) Acesso em: 17 Set. 2022.**

CRUZ, W. L. **Análise do Escoamento Superficial no Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Anil em São Luís - Maranhão**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual do Maranhão. São Luís, 2022. Disponível em: [https://sis.sig.uema.br/sigaa/public/programa/noticias\\_desc.jsf?lc=pt\\_BR&id=940&noticia=14754647](https://sis.sig.uema.br/sigaa/public/programa/noticias_desc.jsf?lc=pt_BR&id=940&noticia=14754647) Acesso em 17 Set. 2022.

FRANÇA, D. V. B. **Vulnerabilidade Ambiental a Alagamentos no Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Santo Antônio, Ilha do Maranhão**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual do Maranhão. São Luís, 2019. Disponível em: <https://repositorio.uema.br/handle/123456789/1693> Acesso em 20 Out. 2022.

GOMES, E. C. **Situação Das Áreas Com Ocorrência de Alagamentos e Enxurradas no Médio Curso do Rio Santo Antônio, Ilha do Maranhão.** Relatório de Iniciação Científica. (Pesquisa em Geografia). São Luís, 2021.

GROVE, M.; HARBOR, J.; ENGEL, B. Composite vs. distributed curve numbers: effects on estimates of storm runoff depth. **Journal of the American Water Resources Association, Middleburg**, v. 34, n. 5, p. 1015-1023, 1998. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1752-1688.1998.tb04150.x>. Acesso em: 15 Out. 2021.

LI, H.; ZHANG, Y.; ZHOU, X. Predicting surface runoff from catchment to large region. **Advances in Meteorology**, v. 2015, p. 1-13, 2015.

MOON, H.; KIM, J.; CHEN, J.; YOON, S.; MOON, Y. Mitigating urban flood Hazards: Hybrid strategy of structural measures. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 108, 2024.

RODRIGUES, W. J. O. **Análise do comportamento do escoamento superficial no baixo curso da bacia hidrográfica do rio Santo Antônio, Ilha do Maranhão.** Relatório de Iniciação Científica. (Pesquisa em Geografia). São Luís, 2022.

SANTOS, F. M.; LOLLO, J. A. Cartografia digital para estimativa de escoamento superficial visando ao planejamento urbano. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 4, p. 663-675, 2016. Disponível em: <https://www.readcube.com/articles/10.1590%2Fs1413-41522016130053>. Acesso em: 15 Nov. 2021.

SURIYA, S.; MUDGAL, B. Impact of urbanization on flooding: the Thirusoolam sub watershed – a case study. **Journal of Hydrology**, v. 412–413, 2012, p. 210-219.

TUCCI, C. E. M. Escoamento Superficial. In: Tucci, C. E. M (Org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2º edição. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2001. Cap 11, p. 391-441.

TUCCI, C. E. M. Escoamento Superficial. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4a edição. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2007. p. 391-442.