



INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE GAZA  
FACULDADE DE AGRICULTURA  
CURSO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA AGRÍCOLA E ÁGUA RURAL

**Dedução da capacidade de armazenamento de água do solo e subsolo em pico de cheia e a funcionalidade das unidades geomorfológicas ao longo do rio Limpopo (Troço do Açude de Macarretane até Ponte de Guija)**

Monografia científica apresentada e defendido como requisito para obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Hidráulica Agrícola e Água Rural.

Autor: Hélder Feliciano Macive

Tutor: Eng<sup>o</sup> Luís Joaquim Maloa (MSc)

Lionde, Maio de 2022



## **INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE GAZA**

Monografia científica sobre a Dedução da capacidade de armazenamento de água do solo e subsolo em pico de cheia e a funcionalidade das unidades geomorfológicas ao longo do rio Limpopo (Troço do Açude de Macarretane até Ponte de Guija) apresentado ao Curso de Engenharia Hidráulica Agrícola e Água Rural na Faculdade de Agricultura do Instituto Superior Politécnico de Gaza, como requisito para obtenção do grau de licenciatura em Engenharia Hidráulica Agrícola e Água Rural.

Autor: Hélder Feliciano Macive

Tutor: Eng<sup>o</sup> Luís Joaquim Maloa (MSc)

Lionde, 2022



INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE GAZA

**Hélder Feliciano Macive**, “Dedução da capacidade de armazenamento de água no solo e subsolo em pico cheia e a funcionalidade das unidades germofológicas ao longo do rio Limpopo”, apresentada ao Curso de Engenharia Hidráulica Agrícola e Água Rural na Faculdade de Agricultura do Instituto Superior Politécnico de Gaza, como requisito para obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Hidráulica Agrícola e Água Rural.

Monografia defendida e aprovada em 12 Julho e 2022

Tutor: <sup>Júri</sup> Luis J. Maloa  
(Luis Joaquim Maloa, MSc)

Avaliadora 1: Paulo Sérgio Saveca  
(Eng<sup>a</sup>. Paulo Saveca, MSc)

Avaliador 2: Salimo Henrique  
(Eng<sup>o</sup>. Salimo Henriques, MSc)

## **INDICE**

INDICE DE FIGURAS .....	iii
INDICE DE TABELAS .....	iv
INDICE DE GRÁFICOS .....	vi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	vii
DECLARAÇÃO.....	viii
DIDICATÓRIA .....	ix
AGRADECIMENTOS .....	x
RESUMO .....	xi
ABSTRACT .....	xii
1.INTRODUÇÃO.....	1
1.1.Objectivos .....	2
1.1.1. Geral.....	2
1.1.2. Específicos .....	2
1.2.Problema de Estudo e Justificativa .....	2
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1.Ciclo hidrológico .....	4
2.1.1.Relação entre as águas superficiais e subterrâneas .....	4
2.2.Bacia hidrográfica.....	5
2.2.1.Hidrologia de uma bacia de drenagem.....	5
2.2.2.Modelagem hidrológica .....	6
2.3.Geomorfologia .....	6
2.4.Classificação do solo quanto a origem e formação.....	6
2.4.1.Solos sedimentares .....	7
2.4.2.Ensaio de caracterização dos solos .....	7
2.4.3.Limites de Consistência (Limites de Atterberg) .....	9

2.5. Infiltração de água no solo.....	12
2.5.1. Factores de interferência no processo de infiltração .....	12
2.5.2. Ensaio de infiltração com método de anéis de cilindros concêntricos.....	13
2.6. Métodos probabilísticos na previsão de cheias.....	14
2.6.1. Método de Gumbel.....	14
3. METODOLOGIA.....	15
3.1. Descrição da área de estudo.....	15
3.2. Identificação dos locais de obtenção das amostras de solo para medição da capacidade de infiltração de água no solo.....	16
3.2.1. Preparação de amostras para ensaios de caracterização.....	18
3.3. Ensaio de infiltração de água no solo .....	22
3.3.1. Procedimentos de execução do ensaio de infiltração de água no solo .....	22
3.3.2. Estimativa da infiltração da água no solo pelo Método de Kostiakov .....	22
3.4. Determinação do armazenamento de água no solo e subsolo.....	24
3.4.1. Determinação do volume de água armazenado no solo .....	25
3.4.2. Determinação do volume de água armazenado no subsolo.....	25
3.5. Simulação hidráulica para descrição dos planos de água ao longo do rio.....	27
3.6. Balanço hídrico .....	28
3.7. Elaboração dos mapas de parâmetros morfométricos (elementos do relevo) na área em estudo .....	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	30
4.1. Análise Granulométrica .....	30
4.1.1. Limites de consistência .....	33
4.1.2. Classificação SUCS .....	35
4.2. Infiltração de água no solo na área em estudo .....	36
4.2.1. Ensaio de infiltração do ponto n° 6.....	37
4.5. Armazenamento de água no solo e subsolo .....	40

4.4. Descrição dos planos de água ao longo do rio em estudo.....	42
4.4.1. Delimitação de manchas de inundação na área em estudo.....	43
4.3. Parâmetros morfométricos (elementos do relevo) na área em estudo .....	44
5.CONCLUSÃO.....	49
6.RECOMENDAÇÕES.....	50
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	i
8. ANEXOS .....	v

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

## **Página**

Figura 1:Representação esquemática dos subsistemas do ciclo hidrológico.....	4
Figura 2: Representação de diferentes curvas granulométricas.....	8
Figura 3:Limites de Atterberg .....	9
Figura 4:Gráfico de plasticidade .....	10
Figura 5: Mapa de localização da área de estudo. ....	15
Figura 6:Imagem satélite representativa da escolha dos locais de recolha de amostras.. .....	16
Figura 7: Imagem satélite representativa da localização dos locais de recolha das amostras.....	16
Figura 8:Imagem indetificativas e representativas dos locais onde foram retiradas as amostras de solo.. ....	17
Figura 9:Imagem ilustrativa das amostras depois da colecta e na secagem. ....	18
Figura 10: imagem representativa de homogenização e quartilha. ....	19
Figura 11:Peneiramento manual das amostras de solo.....	20
Figura 12:Ensaio de plasticidade de solo. ....	21
Figura 13:Ensaio de infiltração de água no solo.....	22
Figura 14:Delimitação da área para cálculo do volume de água no solo e subsolo. ....	25
Figura 15:Distribuição dos solos pelo método de SUCS no troço de estudo. ....	36
Figura 16: Gráfico de infiltração acumulado em função do tempo.Ensaio ponto nº 6..	38
Figura 17: Mancha de inundação para o ano 2000 na bacia hidrográfica do Limpopo (Troço Açude de Macarretane-Ponte de Guija). . ....	43

Figura 18: Mancha de inundação para tempo de retorno de 25 anos na Bacia hidrográfica do Limpopo (Troço Açude de Macarretane-Ponte de Guija). .....	44
Figura 19: Imagem satélite radar tipo Alos Palsar.. .....	45
Figura 20: Principais micro bacias da área de estudo.....	45
Figura 21: Curvas de nível da área de estudo. ....	46
Figura 22: Classes de altitude da área de estudo. ....	46
Figura 23: Relevo baseado nas classes de declividade.....	47
Figura 24: Classes de relevo baseadas na altitude da área de estudo.. .....	47

### **Lista de Figuras de anexos**

Figura 1: Gráfico de infiltração acumulado em função do tempo. Ensaio ponto n° 7 ..	xiv
Figura 2: Gráfico de infiltração acumulado em função do tempo, Ensaio ponto n° 8. ....	xvii
Figura 3: Mancha de inundação para o tempo de retorno de 50 anos na Bacia hidrográfica do Limpopo (Troço Açude de Macarretane-Ponte de Guija) .....	xix
Figura 4: Mapa de direcção do fluxo de água da área de estudo.....	xx
Figura 5: Imagem ilustrando algumas irregularidades num dos pontos ao longo do troço de estudo.....	xx

### **INDICE DE TABELAS**

Tabela 1: Escala granulométrica utilizada pela SUCS .....	8
Tabela 2: Classificação dos solos de acordo com índice de plasticidade.....	9
Tabela 3: Classificação de solos no SUCS .....	10
Tabela 4: Definição do tipo de solo em função da percentagem de ocorrência do grupo grosso de solo. ....	11
Tabela 5: Classificação da velocidade de infiltração.....	24
Tabela 6: Valores médios do coeficiente de Manning utilizados no trabalho.....	28
Tabela 7: Resultados da análise das dimensões de sedimentos. Processo dos Crivos. Ponto 4 (Amostra 4). ....	30
Tabela 8: Resultados da análise das dimensões de sedimentos. Processo dos Crivos Ponto 5 (Amostra 5). ....	31

Tabela 9:Dados e cálculos do ensaio do LP da amostra 04.....	33
Tabela 10:Coeficiente de consistência para cada amostra de solo e sua respectiva classificação .....	34
Tabela 11:Resultados da análise de variância referente ao IP (índice plástico) das amostras em estudo. ....	34
Tabela 12:Caracterização dos solos da área de estudo. ....	35
Tabela 13:Dados de ensaio de infiltração no campo: Ensaio ponto n° 6. ....	37
Tabela 14: Valores da regressão linear do método de Kostiakov. Ensaio ponto n° 6. ...	38
Tabela 15:Parâmetros da equação da velocidade de infiltração básica de cada ponto representativo. ....	39
Tabela 16:Classificação da velocidade de infiltração para cada ponto. ....	39
Tabela 17:Volume de água armazenado no subsolo e solo. ....	40
Tabela 18:Evapotranspiração média anual estimada a partir de dados de períodos críticos. ....	41
Tabela 19:Estimativa de vazões críticas para diferentes períodos de retorno na área de estudo. ....	42
Tabela 20:Condição de contorno para cada evento de inundação.....	43
Tabela 21:Profundidades inundadas (m). ....	44
Tabela 22:Distribuição das classes de relevo baseadas nas declividades e altitude da área de estudo.....	48

### **Lista de Tabelas de anexos**

Tabela A1: Massa medida para cada uma das amostras.....	v
Tabela A2:Resultados da análise das dimensões de sedimentos. Processo dos Crivos. Ponto 1 (Amostra 1).....	v
Tabela A3:Resultados da análise das dimensões de sedimentos. Processo dos Crivos. Ponto 2 (Amostra 2).....	vi
Tabela A4:Resultados da análise das dimensões de sedimentos. Processo dos Crivos. Ponto 3 (Amostra 3). ....	vii
TabelaA5:Resultados da análise das dimensões de sedimentos. Processo dos Crivos. Ponto 6 (Amostra 6). ....	viii



TabelaA6:Resultados da análise das dimensões de sedimentos. Processo dos Crivos. Ponto 7 (Amostra 7) .....	ix
TabelaA7: Resultados da análise das dimensões de sedimentos. Processo dos Crivos. Ponto 8 (Amostra 8) .....	x
Tabela A8:Dados de cálculos do ensaio do LP da amostra 01 .....	xi
Tabela A9:Dados e cálculos do ensaio do LP da amostra 03 .....	xii
Tabela A10:Dados e cálculos do ensaio do LP da amostra 07 .....	xii
Tabela A11:Dados e cálculos do ensaio do LP da amostra 08 .....	xiii
Tabela A12:Dados de ensaio de infiltração no campo: Ensaio no ponto n° 7 .....	xiii
Tabela A13:Valores da regressão linear do método de Kostiakov. Ensaio ponto n° 7..	xiv
Tabela A14:Parâmetro de infiltração do ensaio do ponto n ° 7.....	xv
Tabela A15:Dados de ensaio de infiltração no campo: Ensaio ponto n° 8 .....	xv
Tabela A16:Valores da regressão linear do método de Kostiakov. Ensaio ponto n° 8.	xvii
Tabela A17:Parâmetro de infiltração do ensaio do ponto n ° 8.....	xviii
Tabela A18:Classificação o do relevo baseada as classes de altitude .....	xviii
Tabela A19:Classificação do relevo baseada classes de declividade .....	xix
TabelaA20:Parâmetros da separação de escoamento de base pelo Filtro de Eckhardt(2005)	-xix

## INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico A 1- Curva granulométrica da Ponto 4 (Amostra) 4 .....	31
Gráfico A 2- Curva granulométrica da Ponto 5 (Amostra 5). .....	32

### Lista de gráficos de anexos

Gráfico A 3– Curva granulométrica do Ponto 1, amostra 1. ....	vi
Gráfico A 4– Curva granulométrica do Ponto 2, amostra 2 .....	vii
Gráfico A 5-Curva granulométrica do Ponto 3 (Amostra 3) .....	viii
Gráfico A 6– Curva granulométrica da Ponto 6, amostra 6 .....	ix
Gráfico A 7– Curva granulométrica da Ponto 7, amostra 7 .....	x
Gráfico A 8-Curva granulométrica da Ponto 8 (Amostra 8) .....	xi

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

ARCGIS- Geographic information system

ASTM - Série preconizada pelo American Society for Testing Material

DNIT-Departamento Nacional de Infra-Estruturas de Transportes

DNA- Direcção Nacional das Águas

EUA – Estados Unidos de América

GPS-Sistema de posicionamento global

HEC-RAS - Hydrologic Engineering Center's River Analysis System

INGC -Instituto Nacional de Gestão de Calamidades

MDE – Modelo digital de elevação

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

SRTM -Shuttle radar topography mission

SUCS - Sistema unificado de classificação de solos

QGIS- Quantum GIS, multiplataforma de sistema de informação geográfica (SIG)



## INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE GAZA

### Declaração

Declaro por minha honra que este Trabalho de Culminação do Curso é resultado da minha investigação pessoal e das orientações do meu tutor, o seu conteúdo é original e todas as fontes consultadas estão devidamente mencionadas no texto, nas notas e na bibliografia final. Declaro ainda que este trabalho não foi apresentado em nenhuma outra instituição para propósito semelhante ou obtenção de qualquer grau académico.

Lionde, 25 de Julho de 2022

Hélder Feliciano Macive

( Hélder Feliciano Macive )

## **DIDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais Feliciano Albino Macive e Eugénia Elisa Nhacoungue pela motivação, apoio e encorajamento que me transmitiram durante esta e outras fases da minha formação profissional. A Igreja Pentecostal Assembleia de Cristo de Chókwe pela força transmitida em um dos momentos difíceis da vida durante a formação.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeira quer agradecer a Deus pela vida e saúde, e por ter- me permitido realizar este trabalho.

Agradeço ao meu tutor Eng<sup>a</sup> Luís Joaquim Maloa, pela orientação durante a realização deste trabalho.

Aos meus pais Feliciano Albino Macive e Eugênia Elisa Nhacoungue, agradeço por terem contribuído directa e indirectamente durante a minha formação e na realização deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos e colegas, Luís Maninga, Obdinigo Mahoco, Ezequiel Mutié e outros aqui não mencionados, pelo apoio prestado durante esta jornada.

## **RESUMO**

Este trabalho teve como objectivo deduzir o armazenamento de água no solo e subsolo em pico de cheia e as funcionalidades das unidades geomorfológicas ao longo do Rio Limpopo no troço entre o Açude de Macarretane até ponte de Guija. O trabalho foi realizado em cinco fases respectivamente: obtenção e caracterização das amostras de solo pelo método de SUCS, ensaio de infiltração de água no solo pelo método de anéis concêntricos, extracção das informações morfométricas (altitude, curvas de nível, declividade e micro bacias de drenagem) gerada através do software Qgis na versão 2.18.21, estimativa da probabilidade de ocorrência de vazões críticas pelo método de Gumbel, e as suas respectivas manchas de inundação gerada através do software HEC-RAS na versão 6.1.0 e por último foram feitas, as estimativas de armazenamento de água no solo e subsolo pelo método de separação de escoamento de base pelo filtro de Eckhardt.

**Palavras-Chaves:** Armazenamento de água, pico de cheia, inundações, unidades geomorfológicas.

## **ABSTRACT**

This work aimed to deduce soil and subsoil water storage at flood peaks and the functionalities of geomorphological units along the Limpopo River in the Macarretane weir section to the Guija Bridge. The work was carried out in five phases respectively: obtaining and characterization of soil samples by the SUCS method, soil water infiltration test by the concentric ring method, extraction of morphometric information (altitude, level curves, slope and micro basins of drainage) generated by the Qgis software in version 2.18.21, estimation of the probability of occurrence of critical flows by the Gumbel method, and their respective flood spots generated by the HEC-RAS software in version 6.1.0 and lastly were made, the estimation of soil and subsoil water storage by the Eckhardt filter base flow separation method.

**Keywords:** Water storage flood peak, geomorphological units.

## 1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso renovável por virtude do ciclo hidrológico mas, trata-se também de um recurso limitado a necessitar de uma criteriosa gestão. Os grandes aproveitamentos hidráulicos tiram partido do ciclo hidrológico na medida em que, controlando o escoamento, possibilitam o uso da água para diversos fins: produção de energia, abastecimento de populações e indústrias, rega, controlo de cheias e inundações, etc. (Carlos *et al*, 2020).

Existem várias técnicas ou métodos para a determinação da capacidade de armazenamento de água no solo e subsolo as quais podem ser feitas directa ou indirectamente, utilizando-se diferentes instrumentos e normas pré-estabelecidas para o efeito.

A humidade do solo é geralmente estimada a partir dos componentes de entrada e saída de água no solo, os quais são conhecidos como Balanços Hídricos. Estes componentes possibilitam avaliar a contabilidade hídrica do solo, até a profundidade explorada pelas raízes ou os níveis de infiltração da água no solo (Unesco, s.d.)

Assim, considerando a importância da estimativa da capacidade de armazenamento de água no solo e subsolo em pico de cheia e das funcionalidades das suas unidades geomorfológicas ao longo do rio Limpopo, este trabalho tem como contributo a elaboração de um balanço hídrico ao longo deste rio, utilizando-se uma nova abordagem que irá incorporar características espaciais da distribuição das propriedades físicas dos solos e das camadas do subsolo bem como o estudo da geomorfologia da área de estudo.

Importa realçar que começam a estar disponíveis dados que permitem produzir sínteses das características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas relativas ao Rio Limpopo, o que permitirá uma aproximação fidedigna à caracterização dos regimes de retenção, escoamentos e processo de infiltração ao longo deste Rio.

Por sua vez, este estudo proporciona elementos de síntese geral sobre a dinâmica fluvial ao longo do Limpopo até porque com base nos trabalhos já desenvolvidos neste âmbito, é já volumosa a base de dados sobre os níveis de retenção dos principais cursos, como por exemplo a Barragem de Massingir, que também drena para o Rio Limpopo e os escoamentos a montante, vindos principalmente dos países vizinhos Zimbabue e África



do Sul, o que tornará possíveis apreciações fundamentadas sobre a evolução antiga e recente do Rio.

## **1.1.Objectivos**

### **1.1.1. Geral:**

- ✓ Deduzir a capacidade de armazenamento de água do solo e subsolo em pico de cheia e a funcionalidade das unidades geomorfológicas ao longo do rio Limpopo (Troço do Açude de Macarretane até Ponte de Guija).

### **1.1.2. Específicos:**

- ✓ Classificar os solos existentes e a sua distribuição granulométrica;
- ✓ Estimar a capacidade de infiltração de água no solo pelo método de cilindros concêntricos;
- ✓ Estimar a capacidade de armazenamento de água no solo e subsolo através de softwares computacionais como o QGIS e ArcGis;
- ✓ Descrever o alastramento de planos de água ao longo do Rio;
- ✓ Avaliar a influência do escoamento sobre a ocorrência de cheia.

## **1.2.Problema de Estudo e Justificativa**

Segundo Water net (2009), devido à sua localização, o Rio Limpopo recebe recorrentes inundações e cheias anuais resultantes dos ciclos marcantes de chuva e estiagem de sua área de drenagem. Tal movimento caracteriza sua fauna, flora e também o estilo de vida de seus habitantes. Em períodos críticos, o fluxo de água liberado emergencialmente pelo rio chega a ser três vezes maior que o normal para um ano de inundações ou cheias, causando verdadeira tragédia humana e ambiental a jusante, culminando na morte de diversas pessoas e animais este rio funciona como canal de escoamento e a sua alimentação processa-se através das águas superficiais e subterrâneas. A dinâmica do fluxo, os processos de infiltração, a capacidade de armazenamento, só agem quando estes possuem forças suficientes para ultrapassar qualquer resistência imposta ao longo deste processo (Water net, 2009).

De acordo com Guimarães (2000), o estudo do regime hidrológico de uma bacia ou canal fluvial é fundamental para que se conheça a disponibilidade real de água nos mananciais e no solo em geral, assim como o risco de enchentes.

Importa referenciar que durante o período chuvoso na área em estudo, se por um lado existem concentrações de grandes quantidades de água sob a forma de escoamento superficial, que por vezes tem provocado inundações ou cheias, que podem causar prejuízos consideráveis tais como: destruição de infraestruturas e campos cultivados, morte de pessoas e animais por outro lado, também estas águas superficiais não chegam onde deveriam, ao subsolo, levando a uma queda no abastecimento dos lençóis freáticos.

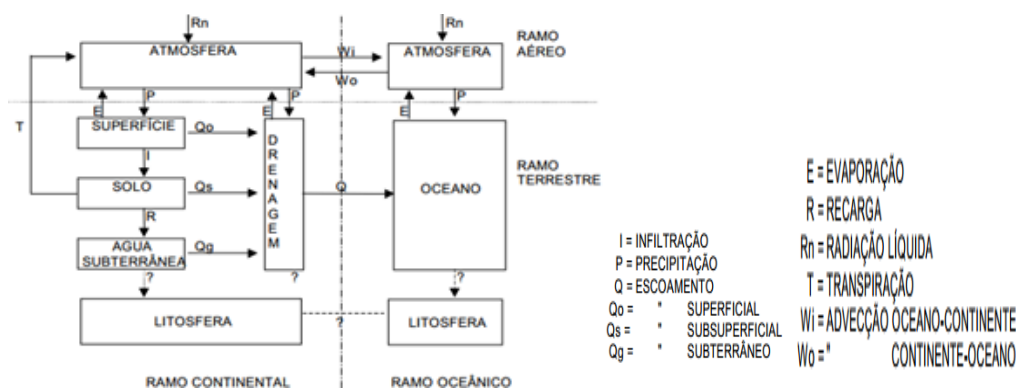
Assim, se pode presumir que neste local em períodos críticos existe o rebaixamento das águas subterrâneas, perda de solos, erosão e ainda o assoreamento dos cursos de água. Assim, o conhecimento do volume de armazenamento e a capacidade de infiltração de água nos solos torna-se importante fonte de informação para diversas finalidades.

Na perspectiva de contribuir com conhecimentos e informações que ajudem a solucionar e/ou minimizar o problema acima descrito, é relevante fazer um estudo sobre a capacidade de armazenamento de água no solo e subsolo e ainda estudar os recursos existentes na bacia do rio Limpopo para servir de base no correcto gerenciamento e monitoramento da bacia.

## 2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1.Ciclo hidrológico

De acordo com hidrológico Cedex (citado por Carlos *et al*,2020),o ciclo hidrológico pode ser definido como a parte do sistema climático relativa às propriedades hídricas dos diversos componentes: atmosfera, hidrosfera, criosfera, litosfera e biosfera, quando relacionados pelos processos de evaporação, condensação, precipitação, advecção e escoamento, o estudo das águas engloba a estimativa global do cálculo das suas reservas potenciais e a medida dos débitos dos principais cursos de água, em particular no momento das cheias.



**Figura 1:**Representação esquemática dos subsistemas do ciclo hidrológico. **Fonte:** (Cedex citado por Carlos *et al*, 2020).

Durante os processos hidrológicos, a água que se infiltra no solo é sujeita a evaporação directa para a atmosfera e é absorvida pela vegetação, e que através da transpiração, ela é devolvida à atmosfera. A evapotranspiração representa a evaporação e transpiração. A evaporação é o processo natural pelo qual há transformação em vapor da água da superfície do solo e dos cursos de água, lagos e mares. A transpiração é a perda de água para a atmosfera em forma de vapor, decorrente de acções físicas e fisiológicas dos vegetais Cedex (citado por Carlos *et al*, 2020).

#### 2.1.1.Relação entre as águas superficiais e subterrâneas

No ciclo hidrológico, águas subterrâneas e superficiais interagem continuamente. Os fluxos subterrâneos alimentam o escoamento básico dos rios durante o período de estiagem, transformam-se em água superficial através de descarga de base dos rios, escoamento em fontes e drenagem agrícola. Por outro lado, a água superficial pode se

transformar em água subterrânea através da infiltração da água de chuva, percolação proveniente de rios, canais e lagos bem como o excesso de água de irrigação. (Feitosa citado por Rebeca, 2009).

A forte conexão entre o regime de recarga e descarga da água subterrânea e os demais componentes do fluxo hidrológico influencia directamente na vazão dos cursos de água. Sendo assim, a análise das vazões de uma bacia, ao longo do tempo, permite a obtenção de dados importantes quanto as características dos aquíferos, o regime de fluxo e o armazenamento subterrâneo, através dos seus parâmetros hidrológicos. (Costa citado por Rebeca, 2009).

## **2.2.Bacia hidrográfica**

O conceito de bacia hidrográfica ou bacia de drenagem pode ser compreendido como uma área na superfície terrestre topograficamente definida por um divisor águas (ou interflúvio) que drena água, sedimentos e materiais dissolvidos para uma saída comum, cujas configurações espaciais reflectem a estrutura geológica e a composição morfogenética da área da bacia (Coelho, 2007& Cunha, 2001).

### **2.2.1.Hidrologia de uma bacia de drenagem**

Os rios funcionam como canais de escoamento e a sua alimentação processa-se através das águas superficiais e subterrâneas. Os fluxos canalizados e confinados, dependendo do suprimento de água podem ser (Coelho, 2007& Cunha, 2001).

- ✓ Efémeros, para os canais que ficam secos a maior parte do ano e comportam o fluxo de água apenas durante e imediatamente após a precipitação;
- ✓ Intermitentes, quando ficam secos em determinada parte do ano;
- ✓ E perenes, quando drenam água em todo o período do ano.

O fluxo da água de acordo com o número de froude ( $Fr$ ) pode ser:  $F > 1$  – fluxo turbulento baixa, tranquilo e  $F < 1$  – fluxo turbulento elevado (Herlânder, 2006). O fluxo turbulento elevado implica em uma maior capacidade de transporte de sedimentos, fluxo turbulento baixa a capacidade de transporte diminuirá, favorecendo a deposição dos sedimentos (Amílcar, 2014).

### **2.2.2. Modelagem hidrológica**

A modelagem hidrológica é uma ferramenta desenvolvida para simular o comportamento de um fenômeno físico dentro/ a partir de um sistema, como a precipitação, evaporação, infiltração e escoamento em rios. Um modelo hidrológico consistente deve considerar alguns componentes: a geometria do sistema, que envolve as características e processos hidrológicos da bacia hidrográfica; os dados de entrada; as condições iniciais e de contorno. (Tucci, 2005).

#### **➤ Modelo de simulação hidráulica de inundações HEC-RAS**

O modelo de simulação hidráulica HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) foi desenvolvido pelo Corpo de Engenharia do Exército dos EUA (US Army Corps of Engineers), e consiste em software *stand alone* que permite o cálculo hidráulico unidimensional do escoamento permanente e não-permanente em canais naturais e artificiais (Melo *et al*, 2013).

### **2.3. Geomorfologia**

A geomorfologia ocupa-se no conhecimento dos recursos existentes tais como: relevo, solos, rochas, recursos hídricos, entre outros (Hart citado por Marta *et al*, 2019). Compreendem os elementos do relevo as informações morfométricas como: hipsometria (altitude), declividade, curvas de nível e ordem dos cursos de água, extraídos a partir de imagens SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), nas palavras de Robaina *et al*, (2006).

### **2.4. Classificação do solo quanto a origem e formação**

Pelo ponto de vista da engenharia, o solo pode ser definido como um material que surge na natureza a partir do intemperismo, que se trata de um conjunto de processos físicos, químicos biológicos que ocasionam a desintegração e decomposição das rochas e dos minerais (Pinto, 2006). Na classificação genética, os solos são divididos em dois grandes grupos, sedimentares e residuais, a depender da existência ou não de um agente de transporte na sua formação, respectivamente. Os principais agentes de transporte actuando na formação dos solos sedimentares são a água, o vento e a gravidade (Sandro & Miriam, 2021).

### **2.4.1.Solos sedimentares**

Nos solos sedimentares, cada agente de transporte selecciona os grãos que transporta com maior ou menor facilidade, além disto, durante o transporte, as partículas de solo se desgastam e/ou quebram (Sandro & Miriam, 2018).

Pode-se listar alguns agentes de transporte, por ordem decrescente de selectividade, da seguinte forma (Sandro & Miriam, 2018):

#### **❖ Ventos (Solos Eólicos)**

A capacidade do vento de transportar e erodir é muito maior do que possa parecer à primeira vista. Solos com grandes quantidades de silte e areia fina podem ser altamente susceptíveis à erosão eólica e hídrica.

Solos siltosos são facilmente carregados por fluxos de água, num processo chamado “escoamento superficial”. Partículas de areia e silte se suspensas em água se depositam rapidamente (Apostila, 2021). Por conta destas características, os solos eólicos possuem grãos de aproximadamente mesmo diâmetro, apresentando uma curva granulométrica denominada de uniforme (Sandro & Miriam, 2018).

#### **❖ Água (Solos aluvionares)**

O transporte pela água é bastante semelhante ao transporte realizado pelo vento, porém algumas características importantes os distinguem:

- Eliminação da Coesão-o vento não pode transportar os solos argilosos devido a coesão entre os seus grãos. A presença de água em abundância diminui este efeito; com isso somam-se as argilas ao universo de partículas transportadas pela água (Sandro & Miriam, 2018).

### **2.4.2.Ensaio de caracterização dos solos**

Em um solo há partículas de tamanhos diversos, sendo sua textura definida pela proporção referente das classes de tamanho dessas partículas. São usados para definir a escala granulométrica no tamanho das partículas do solo as escalas granulométricas na página seguinte (DNIT, 2006):

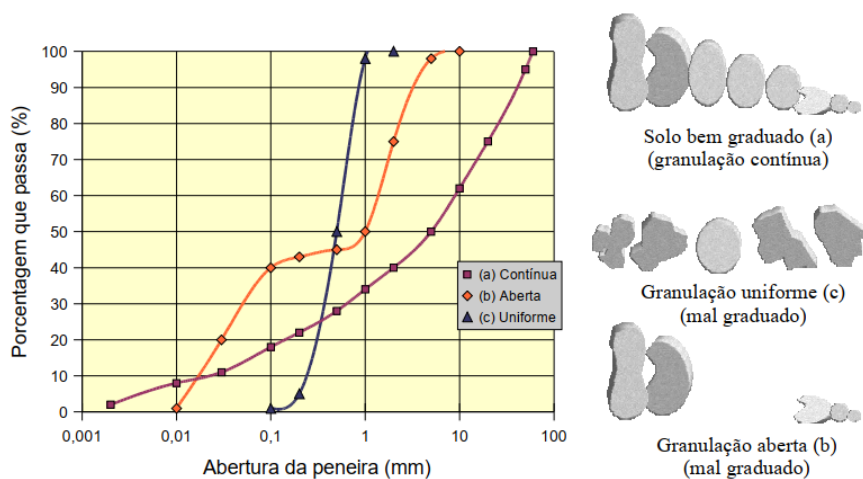
**Tabela 1:** Escala granulométrica utilizada pela SUCS

Fracção	Escala granulométrica da SUCS
Pedras	Acima de 3 polegadas (76mm)
Cascalho grosso	Entre 3” e a peneira ¾” (76 e 19mm)
Cascalho fino	Entre ¾ “ e a peneira n° (19 e 4,76mm)
Areia grossa	Entre as peneiras n° 4 e 10 (4,76 e 2mm)
Areia média	Entre as peneiras n° 10 e 40 (2 e 0,43mm)
Areia fina	Entre as peneiras n° 40 e 200 (0,42 e 0,075mm)
Finos (silte e argila)	Passando na peneira n° 200 (< 0,075mm)

Fonte: (DNIT, 2006).

#### 2.4.2.1. Representação gráfica do resultado de um ensaio de granulometria

A representação gráfica do resultado de um ensaio de granulometria é dada pela curva granulométrica do solo. A partir da curva granulométrica, podemos separar facilmente os solos grossos dos solos finos, apontando a percentagem equivalente de cada fracção granulométrica que constitui o solo (pedregulho, areia, silte e argila). Além disto, a curva granulométrica pode fornecer informações sobre a origem geológica do solo que está sendo investigado (Sandro & Miriam, 2018).



**Figura 2:** Representação de diferentes curvas granulométricas. Fonte: (Sandro & Miriam, 2018).

- ✓ O solo representado pela curva granulométrica “a” poderia ser um solo de origem glacial, um solo coluvionar (tálus) (ambos de baixa selectividade) ou mesmo um solo residual;

- ✓ A curva granulométrica “b”, Esta curva poderia ser gerada, por exemplo, por variações bruscas na capacidade de transporte de um rio em decorrência de chuvas;
- ✓ O solo descrito pela curva granulométrica “C” foi evidentemente depositado por um agente de transporte selectivo, tal como a água ou o vento (a curva c poderia representar um solo eólico, por exemplo), pois possui quase que todas as partículas do mesmo diâmetro (Sandro & Miriam, 2018).

### 2.4.3.Limites de Consistência (Limites de Atterberg)

O solo pode ter características bem diferentes que irão depender da sua composição mineralógica onde, esse solo pode ser moldado na presença de alguma humidade sem desagregar, assim só a distribuição granulométrica não o caracteriza bem. São conhecidos por limites de consistência ou de Atterberg: limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP). O limite de liquidez trata do teor de humidade no ponto e transição do estado plástico para o estado líquido. O ensaio é realizado pela NBR 6459 (1984). O limite plástico representa o ponto de transição do estado semi-sólido para o estado plástico (DAS, 2007).

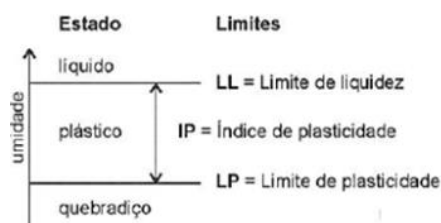


Figura 3: Limites de Atterberg. Fonte: (Pinto, 2006).

Tabela 2: Classificação dos solos de acordo com índice de plasticidade

Índice de plasticidade	Classificação
$1 < I_p < 7$	Solo fracamente plástico
$7 < I_p < 15$	Solo medianamente plástico
$I_p > 15$	Solo altamente plástico
$I_p = N_p$	Não plástico

Fonte: (Caputo, 2015).

#### 2.4.3.1. Sistema Unificado de Classificação dos Solos (S.U.C.S.)

Os solos neste sistema são classificados em solos grossos, solos finos e altamente orgânicos. Para a fracção grossa, foram mantidas as características granulométricas



como parâmetros mais representativos para a sua classificação, enquanto para fracção fina, casa-grande optou por usar os limites de consistência, por serem parâmetros mais importantes do que o tamanho das partículas (Pinto, 2006).

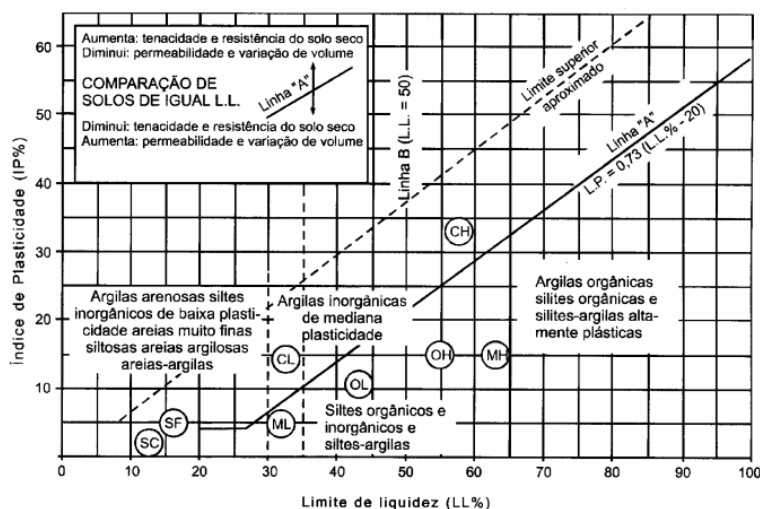
**Tabela 3:** Classificação de solos no SUCS

Solos Grossos Mais de 50% retido na peneira #200	Pedregulhos ou solos pedregulhos	GW, GP, GM, GC
	Areias ou solos arenosos	SW, SP, SM, SC
Solos Finos 50% ou mais do material passa na peneira #200	Siltes e Argilas de baixa Compressibilidade (LL < 50)	ML, CL, OL
	Siltes e Argilas de Alta Compressibilidade (LL > 50)	MH, CH, OH
Solos Orgânicos	Turfas, solos essencialmente orgânicos	Pt

Fonte: (Pinto, 2006).

#### 2.4.3.2.1. Gráfico de plasticidade

A classificação de um solo fino começa com a definição da classe indicada pela posição do ponto no gráfico de plasticidade. Os solos orgânicos, cujos pontos se situam sobre ou acima da linha A são classificados como argilas, enquanto, os que estão abaixo são classificados como siltes. O gráfico da plasticidade foi construído com os resultados dos ensaios de limites de consistência de solos de diferentes locais de origem e, tem como abcissa o limite de liquidez e como ordenado o índice de plasticidade (Manual de caracterização de solos, 2021).



**Figura 4:** Gráfico de plasticidade. Fonte: (Manual de caracterização de solos, 2021)

Para a definição do tipo de solo é preciso considerar a percentagem de ocorrência do grupo grosso no solo; para isso foram definidos três níveis de valores para a percentagem que passa na peneira 200: menor que 15, entre 15 e 29 e, maior ou igual a 30. Para o último nível é preciso definir qual grupo grosso tem a maior percentagem de ocorrência e, se a percentagem do grupo minoritário é menor ou maior que 15 (Manual de caracterização de solos, 2021).

**Tabela 4:** Definição do tipo de solo em função da percentagem de ocorrência do grupo grosso de solo.

<b>Tipos de solos</b>					
<b>Solos finos inorgânicos</b>			<b>Solos finos orgânicos</b>		
<b>Pr (#200)</b>	<b>Símbolo</b>	<b>P (S)&gt; P (G)</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Linha A</b>	<b>P (S)&gt; P (G)</b>
<15	CL	Argila pouco plástica	OL	Sobre ou acima	Argila Orgânica
	ML	Silte		Abaixo	Silte Orgânico
	CL-ML	Argila siltosa			
	CH	Argila plástica			
	MH	Silte elástico			
15 a 29	CL	Argila pouco plástica com areia	OL	Sobre ou acima	Argila orgânica com areia
	ML	Silte com areia		Abaixo	Silte orgânico com areia
	CL-ML	Argila siltosa com areia	OH	Sobre ou acima	Argila orgânica com areia
	CH	Argila plástica com areia		Abaixo	Silte orgânico com areia
	MH	Silte elástico com areia			
	P (G) <15				
	CL	Argila pouco plástica arenosa	OL	Sobre ou acima	Argila orgânica arenosa

≥ 30	ML	Silte arenoso		Abaixo	Silte orgânico arenoso
	ML	Argila silte-arenosa	OH	Sobre ou acima	Argila orgânica arenosa
	CL-ML	Argila plástica arenosa		Abaixo	Silte orgânico arenoso
	CH	Argila plástica arenosa			
	MH	Silte elástico arenoso			
P (S) > 15					
≥ 30	CL	Argila pouco plástica pedregulhenta com areia	OL	Sobre ou acima	Argila orgânica pedregulhenta com areia
	ML	Silte pedregulhento com areia		Abaixo	Silte orgânico pedregulhento com areia
	CL-ML	Argila siltosa pedregulhenta com areia	OH	Sobre ou acima	Argila orgânica pedregulhenta com areia
	CH	Argila plástica pedregulhenta com areia		Abaixo	Silte orgânico pedregulhento com areia
	MH	Silte elástico pedregulhento com areia			

Fonte: (Manual de caracterização de solos, 2021).

## 2.5. Infiltração de água no solo

A infiltração apresenta grande relevância dentro do ciclo hidrológico. Segundo Teixeira *et al* citado por Masato *et al* (2011), é processo mais importante de recarga da água armazenada no subsolo. Infiltração é o nome dado ao processo de passagem da água que chega à superfície do solo via precipitação, degelo ou irrigação, para seu interior, através dos poros. (Masato *et al*, 2011).

### 2.5.1. Factores de interferência no processo de infiltração

Há alguns factores de intervenção no processo de infiltração, conforme Martins citado por, Arthur (2017), como por exemplo na página seguinte:

- a) Tipo de Solo: características como porosidade e tamanho dos grãos do solo, principalmente, as características presentes nas camadas superficiais da ordem de 1cm, afectam directamente a capacidade de infiltração no terreno;
- b) Grau de Humidade do Solo: solos que contenham certa humidade têm sua capacidade de infiltração reduzida;
- c) Precipitação Sobre o Terreno: o choque das águas pluviais com o terreno causa uma compactação do solo, que por sua vez, perde parte de sua capacidade de infiltração;
- d) Compactação Devida ao Homem e aos Animais: áreas onde há constante trânsito de pedestres e veículos, ou áreas de pastagens onde a superfície é constantemente pisoteada, têm sua capacidade de infiltração diminuída devido à compactação causada;
- e) Cobertura Vegetal: a presença de vegetação atenua o impacto da água contra o solo e dificulta seu escoamento superficial, estabelecendo uma camada de matéria orgânica atractiva para insectos e animais que façam escavações nesse local, aumentando as vias de entrada para percolação das águas pluviais;
- f) Presença de Ar: o ar presente entre as partículas de solo sofre compressão da água que se infiltra, ficando retido temporariamente e atrasando o processo de infiltração.
- g) Temperatura: épocas de clima frio tendem a alterar a viscosidade da água, dificultando sua infiltração em relação aos meses mais quentes.

### **2.5.2. Ensaio de infiltração com método de anéis de cilindros concêntricos**

Este método é destinado a medir a capacidade de infiltração vertical, consiste em observar a taxa de infiltração de uma pequena lâmina de água represada dentro de dois cilindros metálicos cravados no solo (Masato *et al*, 2011). A duração do teste é de uma a duas horas em solos arenosos e de 3 a 4 horas em solos argilosos, recomenda-se que durante os primeiros 5 a 10 minutos, as leituras sejam feitas a intervalos curtos (30s a 1min em solos arenosos, dois a cinco minutos nos argilosos). O intervalo de tempo entre leituras deve ser definido de forma que a variação da lâmina d'água entre duas leituras consecutivas não ultrapasse 3,0cm (Masato *et al*, 2011).

## **2.6. Métodos probabilísticos na previsão de cheias**

São métodos de previsões de cheias futuras (associadas a um período de recorrência) baseados nos registros de cheias passadas (série histórica) conforme, Luciana (2010).

### **2.6.1. Método de Gumbel**

Baseado na teoria dos extremos de amostras ocasionais, Gumbel demonstrou que, se o número de vazões máximas anuais tende para infinito, a probabilidade “P” de uma dada descarga ser superada por um certo valor da variável aleatória é dada pela equação seguinte, para um número infinito de elementos (DNIT,2005):

$$P = e^{-e^{-y}} \quad (Eq.1)$$

Onde = probabilidade de não ocorrerem descargas maiores (%); e = base dos logaritmos neperianos (unidimensional); y = variável reduzida (unidimensional).

### 3.METODOLOGIA

#### 3.1.Descrição da área de estudo

A bacia hidrográfica do Rio Limpopo situa-se aproximadamente entre os paralelos, 22° e 26° Sul e os meridianos, 26° e 35° Este, em Moçambique a bacia tem como limites a bacia do rio Save a Norte, a Sul com a do rio Incomáti. A bacia do Limpopo é partilhada por quatro países nomeadamente a África do Sul, Moçambique, Botswana e o Zimbabwe. Estende-se por uma área de cerca de 412.000km<sup>2</sup>. (DNA citado por Water net, 2009).

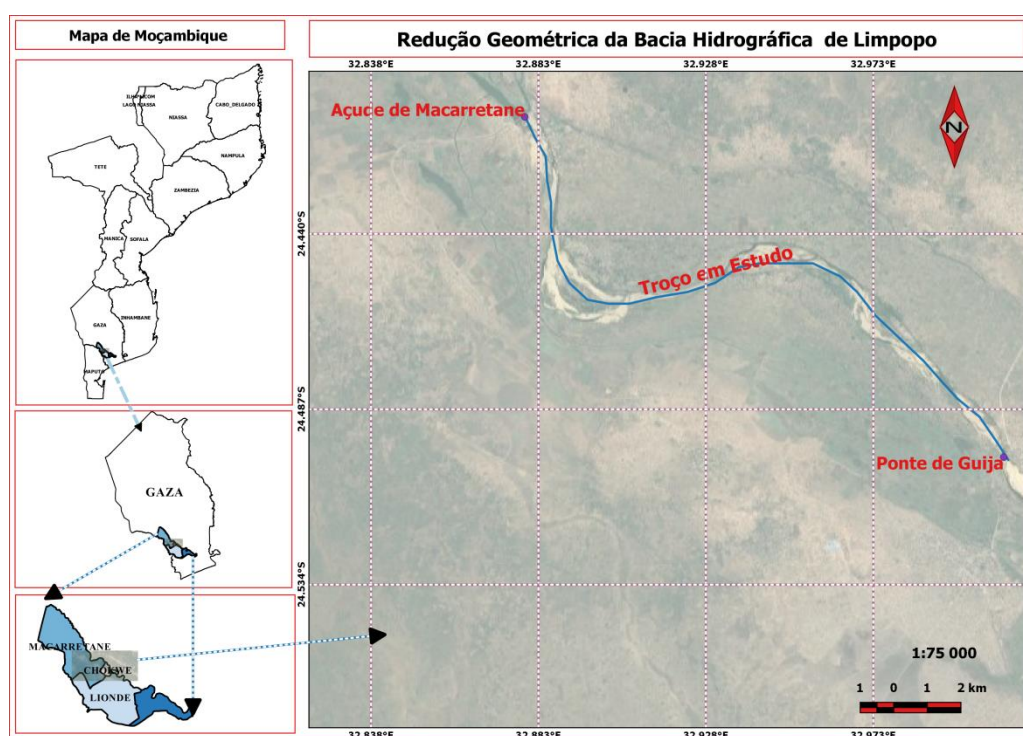


Figura 5: Mapa de localização da área de estudo. Fonte: (Autor, 2022).

O Rio Limpopo actualmente é considerado um rio perene fraco, cujos fluxos podem deixar de existir com alguma frequência. Durante os períodos de seca não apresenta água de superfície ao longo de grandes extensões, na sua secção intermédia e baixa.

Todo o vale do Limpopo está sujeito, ciclicamente, a cheias e a secas, particularmente nas zonas do Baixo Limpopo, através da planície de inundação costeira em Moçambique. Esta região de baixo-relevo é particularmente susceptível já que durante períodos de alto caudal recebe uma larga porção das águas da parte superior da bacia (INGC, *et al.*, 2003).



### 3.2. Identificação dos locais de obtenção das amostras de solo para medição da capacidade de infiltração de água no solo

A identificação dos locais para colecta de amostras de solo, com a finalidade de medir a capacidade de infiltração de água no solo na área de estudo, procedeu-se inicialmente por análise distanciada em imagens de satélite e de seguida delimitou-se os locais adequados para colecta de amostras representativas para o estudo em caso.



**Figura 6:** Imagem satélite representativa da escolha dos locais de recolha de amostras. **Fonte:** (Autor, 2022).

De acordo com Ferreira (2000), a cada local amostrado se deve tirar ou anotar as características numa caderneta de campo. Quando chegou se ao campo registou-se as coordenadas geográficas obtidas por meio de GPS, e de seguida procedeu-se com a recolha das amostras segundo o procedimento descrito na página seguinte.



**Figura 7:** Imagem satélite representativa da localização dos locais de recolha das amostras. **Fonte:** (Autor, 2022).

Os locais amostrados caracterizam-se pela presença de aglomeradas populações residentes em casas de construções melhoradas, convencionais, fábrica de 10 a 20m em relação ao curso de água, e algumas casas a 1 m em relação a drenagem urbana, bares e lojas a menos de 1m em relação ao leito do curso de água, presença de vegetação e zona arbustivas, presença de campos agrícolas próximos ao rio e alguns agricultores praticam agricultura dentro do leito do curso de água e áreas de pastagem.

As amostras foram colhidas ao longo do rio Limpopo no trecho do Açude de Macarretane até Ponte de Guija de 10m a 20m em relação ao leito do curso de água do rio, conforme a metodologia descrita por Caio (2015).



**Figura 8:** Imagem indetificativas e representativas dos locais onde foram retiradas as amostras de solo. a) 5 Pontos de subamostragem correspondendo uma amostra. b) Medição da distância entre os pontos de subamostragem. c) Registo das coordenadas geográficas. d) Retiradas das subamostras. e) Sedimentos descartados de 0-40cm. **Fonte:** (Autor, 2022).

As amostras de solo da área de estudo foram colectadas a uma camada de 0-60cm de profundidade com o uso de trado manual. Segundo Luciano & Marlon (2015), no caso de uso do trado, em cada um dos locais de amostragem definidos deve-se colectar 5 subamostras de solo: 1 no centro, e quatro delas, em cruz, distantes a 3 metros do ponto central, a junção dessas subamostras correspondem uma amostra por cada local. Isso porque, como o trado é pequeno, temos uma grande variabilidade. Assim, aumentamos os pontos colectados, tentando tornar nossa amostragem mais representativa.



A quantidade de material colhido deveria ser tal que permitisse obter pelo menos 500 gramas de material fino por cada amostra no laboratório segundo as recomendações de, (Luciano & Marlon, 2015).

Foram tomadas medidas para evitar qualquer tipo de contaminação das amostras. Por este motivo as amostras já colectadas, foram colocadas em sacos plásticos previamente preparados e identificados segundo as recomendações da, (EMBRAPA Meio Ambiente, 2006).

### 3.2.1.Preparação de amostras para ensaios de caracterização

Após a colecta, as amostras foram conduzidas até ao laboratório a fim de caracterizá-las. O tratamento das amostras de solo foi feito segundo a NBR 6457/1986 (Amostras de solo para ensaio de compactação e caracterização). Com as amostras foram realizados os seguintes ensaios para a caracterização do solo: análise granulométrica e determinação dos limites de atterberg (limite plástico e limite líquido).

#### 3.2.1.1.Secagem

O objectivo da secagem é facilitar o manuseamento do solo e permitir que as operações posteriores (a homogeneização e cominuição de amostras) não sofram perda de material.



a)Chegadas das amostras ao laboratório      b)Secagem das amostras ao ar livre

**Figura 9:**Imagem ilustrativa das amostras depois da colecta e na secagem.**Fonte:**(Autor, 2022)

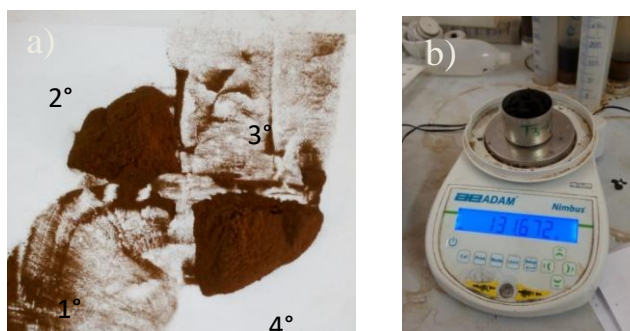
A totalidade da amostra deve ser submetida a secagem, que pode ser realizada em duas condições: Ar livre e Estufa ventilada. No caso da estufa ventilada a temperatura deve rondar os 35-40°C, (Ana *et al*, 2004).

As amostras do presente trabalho foram secadas ao ar livre.

A amostra deve ser secada em estufa , se houver conhecimento de que a temperatura não mudará as características do material, como pode ocorrer em solos com matéria orgânica (Suporte, 2018).

### 3.2.1.2.Homogeneização e quartilha

O processo de quartilha das amostras foi feito manualmente usando almofariz e mão de grão para desmanchar os torrões sem forçar exageradamente de forma a evitar a quebra dos grãos. O objectivo desse processo era de permitir que toda amostra passe 100% no peneiro de abertura de malha de 2mm compreendido o peneiramento fino. Homogeneizou-se a amostra para obter uma amostra, de menores dimensões (menor quantidade), mas que seja representativa da amostra total original e suficiente para o ensaio de análise granulométrica. O processo foi continuado com as restantes amostras, isto é, repetindo-se o ciclo novamente até se obter uma amostra com cerca de 100 á 120g.



a) 2° e 4° amostra usada como testemunho      b)Peso da cápsula +amostra

**Figura 10:** imagem representativa de homogeneização e quartilha. **Fonte:** (Autor, 2022).

### 3.2.1.3.Análise granulométrica de solos

A análise granulométrica foi feita por peneiramento, utilizando os crivos de série ASTM (série preconizada pelo American Society for Testing Material).Estes crivos foram encaixados uns nos outros de modo a formarem uma coluna de crivos.

Na parte superior e base desta coluna foi colocada uma bandeja por cada uma das partes. Uma para evitar perdas de material durante a peneiração e outra bandeja destinado a receber as partículas menores que atravessaram todas as colunas sem serem retidas em nenhum dos crivos respectivamente.

A coluna de crivos foi agitada manualmente, o tempo de peneiração foi de 10 minutos para cada amostra. O ensaio quando terminado ,pesaram se as quantidades retidas em cada peneira e de seguida calculou -se as percentagem que passam em cada peneira , conforme a metodologia de Alveirinho Dias (2004).



**Figura 11:**Peneiramento manual das amostras de solo. **Fonte:** (Autor,2022).

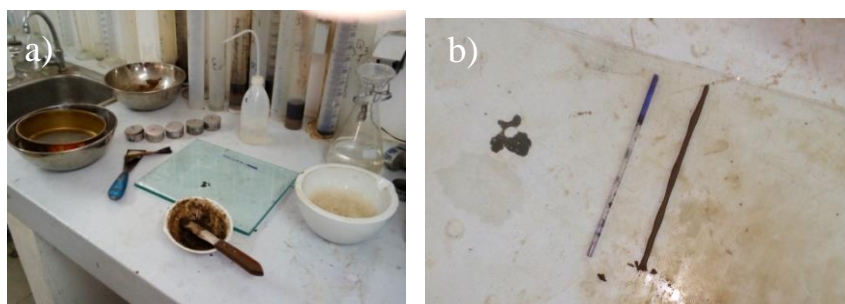
#### **3.2.1.4.Ensaio plástico e líquido**

O ensaio de plasticidade foi feito segundo a NBR7180/1984. Primeiro preparou se amostra de solo de acordo com a NBR6457,de seguida pesou se uma amostra representativa de 50 gramas que passou pela peneira de 0,42 mm de abertura de malha (peneira n° 40), a qual foi usada para o ensaio.

A amostra foi colocada em uma cápsula e homogeneizada com adição de uma pequena quantidade de água destilada, o tempo de homogeneização foi de 15 minutos, de seguida tomou-se 10g da amostra assim preparada formando uma pequena bola a qual foi rolada sobre a placa de vidro com pressão suficiente da palma da mão para lhe dar forma de cilindro.

Ao se fragmentar o cilindro, com o diâmetro de 3mm e comprimento da ordem de 100mm (o que se verificou com o tubo de caneta), transferiu se imediatamente as parte do mesmo para uma cápsula porcelana e pesou, de seguida levou se a estufa de 105° C - 110° C para determinar a humidade.

Repetiu se o procedimento acima referido até obter 3 valores que não deferissem da respectiva média mais de 5%.



a) Quite para ensaio de plasticidade. b) Amostra em estado plástico.

**Figura 12:**Ensaio de plasticidade de solo. **Fonte:** (Autor,2022).

O limite de liquidez foi calculado relacionando a fórmula do índice de plasticidade (NBR7180/1984) e equação do índice de plasticidade utilizada pela SUCS ( Sistema Unificado de Classificação de Solos) , usada para caracterizar solos a escala granulométrica no tamanho das partículas do solo, que ocorrem peneiras com diâmetro de abertura de malha de seguintes especificações :

Areia média	Entre as peneiras n ° 10 e 40 (2 e 0,43mm)
Areia fina(limo ou mó )	Entre as peneiras n ° 40 e 200(0,42 e 0,075mm)
Finos(silte e argila )	Passando no peneira n ° 200(< 0,075mm)

**Fonte:** Manual de Pavimentação (2006).

$$IP = (LL - LP) \quad (a) \quad (Eq.2)$$

$$IP = 0,73 (LL - 20) \quad (b) \quad (Eq.3)$$

$$(LL - LP) \% = (0,73LL - 14,6) \% \quad (c) \quad (Eq.4)$$

Onde:

a) NBR7810                      b) SUCS                      c) Modificado autor  
 IP- Índice plasticidade;      LL-limite de liquidez                      LP-limite plástico.

A análise estatística descritiva foi aplicada para avaliar o nível de variação do IP (índice plástico) a partir do coeficiente de variação (CV) das amostras de solo em estudo. Foi utilizado para o cálculo coeficiente de variação o programa computacional Excel. Os resultados são classificados de acordo com Gomes citado por Douglas *et al* (2019), CV baixo quando se apresentaram inferiores a 10%; CV médio entre 10 e 20%; CV alto quando entre 20 e 30%; CV muito alto quando acima de 30%. Esta classificação serve como base para ser utilizada na classificação de inúmeras variáveis indiscriminadamente dentro da experimentação em geral (Douglas *et al*, 2019).

### 3.3. Ensaio de infiltração de água no solo

Para estimar a infiltração de água no solo foi usado o método de cilindros concêntricos. Foram realizados 3 ensaios de infiltração sendo 1 ensaio para cada ponto. O cilindro interno apresenta 30 cm de diâmetro e o cilindro externo apresenta 50cm de diâmetro, ambos cilindros têm 25 cm de altura.



**Figura 13:**Ensaio de infiltração de água no solo. **Fonte:** (Autor, 2022).

#### 3.3.1. Procedimentos de execução do ensaio de infiltração de água no solo

- ✓ Cravou -se ambos os cilindros com o auxílio de um martelo a uma profundidade 10 cm, nivelados com auxílio da régua de nível de modo que fiquem concêntricos deixando uma altura livre de 15 cm para a lâmina de água. O anel externo teve finalidade de reduzir o efeito da dispersão lateral da água infiltrada do anel interno;
- ✓ Fixou-se uma régua graduada no anel interno para a leitura da altura de lâmina de água.
- ✓ Com baldes, encheu-se em simultâneo os dois anéis de água;
- ✓ Cronometrou-se o tempo e, fez se leitura das lâminas de água no anel interno em intervalos de tempo definidos para cada ponto conforme as recomendações de Masato *et al* (2011) e os procedimentos descritos por Artur (2017).

#### 3.3.2. Estimativa da infiltração da água no solo pelo Método de Kostiakov

Para estimar a infiltração de água no solo, foi utilizada o método de Kostiakov. Esse modelo é bastante empregado visto ser simples e preciso para elaborar os dados que irão

determinar o ponto onde será alcançado o equilíbrio do solo em relação ao seu grau de saturação (Carvalho & Silva, 2006).

#### a) A equação potencial de kostiakov

A equação para o cálculo da infiltração acumulada resultou da equação potencial (Equação 5).

$$I = K * T^a \quad (Eq.5)$$

Onde: I=Infiltração acumulada (cm); K = Constante dependente do solo (a dimensional); T= Tempo de infiltração (min) e, a = Constante dependente do solo (a dimensional), varia de [0-1].

#### b) Velocidade de infiltração instantânea

A equação para o cálculo da velocidade de infiltração instantânea resultou da equação potencial:

$$VI = k * a * T^{a-1} \quad (Eq.6)$$

#### c) Velocidade de infiltração média

A equação para o cálculo da velocidade de infiltração média resultou da equação potencial:

$$VIm = k * T^{a-1} \quad (Eq.7)$$

#### d) Velocidade de infiltração básica (VIB).

A velocidade de infiltração básica é a velocidade de infiltração em um solo no momento que a variação da mesma em relação ao tempo é muito pequena (a velocidade de infiltração permanece quase constante), (Guilherme, 2009), A equação para o cálculo da infiltração acumulada resultou da equação potencial (Equação 8).

$$VIB = 60 * K * a * \left( \frac{-0,01}{60 * K * a * (a-1)} \right)^{\left( \frac{a-1}{a-2} \right)} \quad (Eq.8)$$

**Onde:** K = Constante dependente do solo; a = Constante dependente do solo (a dimensional, varia de 0-1).



### e) Coeficientes das equações de infiltração

Os coeficientes das equações 6,7 e 8 foram obtidos usando-se as equações de regressão linear:  $\log I = \log K + m * \log T$  (Eq.9),  $Y = A + B * X$  (Eq.10),  $Y = \log I$  (Eq.11),  $A = \log K$  (Eq.12),  $B = m$  (Eq.11) e  $X = \log T$  (Eq.13)

$$A = \frac{\sum X * \sum XY - \sum X^2 * \sum Y}{(\sum X)^2 - N * \sum X^2} \text{ (Eq.14)}, A = \frac{\sum X * \sum Y - N * \sum XY}{(\sum X)^2 - N * \sum X^2} \text{ (Eq.15)}$$

$$K = 10^A \text{ (Eq.16)} \quad a = B \text{ (Eq.17)}$$

Segundo Reichardt (citado por Muriel, 2005) a velocidade de infiltração básica é classificada como sendo:

**Tabela 5:** Classificação da velocidade de infiltração.

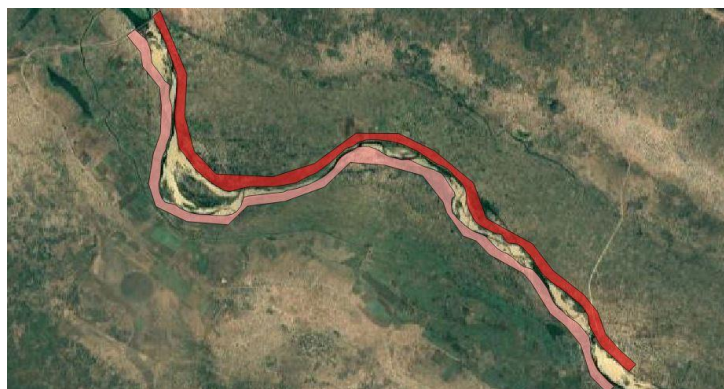
Solo	VIB (mm/h)
Solo de VIB muito alta	>30
Solo de VIB alta	15 -30
Solo de VIB média	5-15
Solo de VIB baixa	<5

**Fonte:** (Reichardt citado por Muriel, 2005).

### 3.4. Determinação do armazenamento de água no solo e subsolo

Para estimativa do armazenamento de água primeiro, foram organizados dados históricos de vazão e de precipitação média da área ocupada pela bacia de estudo. Os volumes de armazenamento são determinados respectivamente: um para um período crítico, e um em período não crítico.

Para delimitar a área de cálculo dos volumes de armazenamento de água foi utilizado a ferramenta computacional Qgis na versão 2.18.21 com o uso de uma imagem satélite foi criado um shapifile com 2 polígonos com uma área total de 14,737,326.290 m<sup>2</sup>. Cada polígono para uma margem do rio com uma largura de 300m e com 20482m de comprimento. Presumia que a quantidade de água que escoo no solo e subsolo no canal do rio é mesma quantidade de água que escoo a 300m em relação ao canal do rio conforme, a metodologia descrita por Biekart, (2018).



**Figura 14:** Delimitação da área para cálculo do volume de água no solo e subsolo. **Fonte:** (Autor, 2022).

### 3.4.1. Determinação do volume de água armazenado no solo

O volume foi estimado em função dos níveis hidrométricos máximos observados para cada período em estudo, conforme Takeshita citado por Masato *et al* (2011), o volume de água armazenado no solo em função da altura hidrométrica na área de uma bacia hidrográfica pode ser obtido em função da seguinte equação:

$$H = \frac{V}{A} \quad (\text{Eq.18})$$

Onde: H= altura hidrométrica (m); V= volume de água no solo ( $m^3$ ); A=área da bacia ( $m^2$ ).

### 3.4.2. Determinação do volume de água armazenado no subsolo

Para efectuar o cálculo de volume de água no subsolo usou-se primeiramente a separação de escoamento de base pelo filtro de Eckhardt. O filtro de Eckhardt é um algoritmo utilizado para calcular o fluxo de base em cursos de água que faz a separação da vazão do rio em duas componentes: escoamento superficial (directo) e escoamento de base (indirecto), conforme a equação (Eckhardt, 2005).

$$b_i = \frac{(1-BFI_{max}) * a * b_{i-1} + (1-a) * BFI_{max} * y_i}{1-a * BFI_{max}} \quad \text{Eq. (19)}$$

Os parâmetros de entrada usados na equação podem ser obtidos como sendo:

$$BFI_{max} = 0.8344 \frac{Q_{90}}{Q_{50}} + 0.2146 \quad (\text{Eq.20})$$

$$k = \frac{-\Delta t}{\ln\left(\frac{Q_{(t+\Delta t)}}{Q_{(t)}}\right)} \quad (\text{Eq.21})$$



$$a = e^{\frac{-\Delta t}{k}} \quad (\text{Eq.22})$$

Onde:  $b_i$  = escoamento de base ( $m^3/s$ );  $BFI_{max}$  (Índice máximo de escoamento de base). Sujeito a  $BFI_{max} < 1$ ;  $y_i$  = representa a vazão no tempo indicado ( $m^3/s$ );  $b_{i-1}$  é a vazão de base no passo de tempo anterior ( $m^3/s$ ). Além disso, a condição  $b_i \leq y_i$  deve ser atendida para todos os passos de tempo, uma vez que a vazão de base não pode ser maior que a vazão do rio observada;  $k$  é a constante do período característico de recessão (dias) e “ $a$ ” é a constante de recessão (a dimensional).

$BFI_{max}$  = este parâmetro está relacionado com as características do fluxo e o tipo de aquífero do rio;

$Q_{90}$  = este parâmetro representa as vazões mínimas diárias registadas no rio, pode ser obtido a partir do somatório de 10% das vazões diárias registadas no rio ( $m^3/s$ );

$Q_{50}$  = este parâmetro representa as vazões médias diárias registadas no rio, pode ser obtido a partir do somatório de 50% das vazões diárias registadas no rio ( $m^3/s$ );

O escoamento de base (base flow) é constituído basicamente do escoamento subterrâneo, é o responsável pela alimentação do curso de água (Costa, 2005).

A constante do período característico define o intervalo de tempo que ocorre uma recessão (Eckhardt, 2005).

#### 3.4.2.1. Taxa de recarga no subsolo

Com o uso da equações 29 e 30 de Eckhardt, 2005 á baixo calculou se taxa de recarga aquífera (mm/ano) e volume armazenado no subsolo respectivamente:

$$TR = \frac{\bar{b}}{A} * 1000 * 3162240 \quad (\text{Eq.23})$$

$$V = TR * A \quad (\text{Eq.24})$$

Onde:  $TR$ =taxa de recarga aquífera (mm/ano);  $\bar{b}$  = média dos valores de vazão de base ( $\frac{m^3}{s}$ );  $A$ = área da bacia ( $m^2$ ); 1000= Factor de conversão de m para mm, 3162240= Factor de conversão de segundos para ano e  $V$ = volume de água no subsolo( $m^3$ ).

### 3.5. Simulação hidráulica para descrição dos planos de água ao longo do rio.

Com a finalidade de descrever o escoamento do rio fez se, a delimitação das manchas de inundação a partir de dados de vazões referentes a períodos críticos inicialmente organizados. Agrupados os dados possibilitaram o cálculo da vazão de recorrência para diferentes anos de retorno conforme, o método de Gumbel com o uso das seguintes equações a baixo:

$$\bar{Q} = \frac{\sum Q}{m} \quad (Eq.25) \quad CV = \frac{\sigma}{\bar{Q}} \quad (Eq.26)$$

$$TR = \frac{1}{p} \quad (Eq.27)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(Q-\bar{Q})^2}{m-1}} \quad (Eq.28)$$

$$Y = -\ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{Tr} \right) \right] \quad (Eq.29)$$

$$Qp = \bar{Q}(1+CV(0.78*Y - 0.45)) \quad (Eq.30)$$

Onde:  $\sigma$ -Desvio padrão;

$\bar{Q}$  = Descarga média obtida da série disponível ( $m^3/s$ );  $\sum Q$ =somatório das descargas da série de máximas anuais ( $m^3/s$ ); TR= tempo de retorno (anos);

m- número de anos de observação; Y = variável reduzida;

ln- base dos logaritmos neperianos; m = número de vazões observadas.

- **Aplicação da ferramenta computacional Qgis na versão 2.18.21 na aquisição de dados topográficos para simulação dos planos de água ao longo do trecho do rio em estudo.**

Com o uso do MDE (Modelo Digital de Elevação) no ambiente Qgis fez se a extracção das curvas de níveis com equidistância de 1m, os quais permitiram a extracção de atributos topográficos (cota maior, cota menor e o comprimento) do trecho em estudo esses valores foram usados para cálculo da declividade do trecho. À ferramenta Qgis foi usada também a posterior na classificação dos arquivos digitais (*shapefile*) com manchas de inundação gerados na ferramenta computacional HEC-RAS.

➤ **Aplicação da ferramenta computacional HEC-RAS na versão 6.1.0 para simulação dos planos de água ao longo do trecho do rio em estudo.**

Nesta etapa primeiro foi usada a janela *Ras Mapper* da aplicação HEC-RAS onde sobre o MDE (Modelo digital de elevação) e uma imagem satélite foram delimitados os seguintes atributos do curso de água: o canal principal, as margens do rio, direcção do fluxo de água e as secções transversais. A segunda etapa foi o uso da janela *Geometric Data* onde foram atribuídos os coeficientes de maninng e a posterior foi usada a janela *steady flow Data* para adição dos dados de entrada gerados inicialmente. Conforme, o manual de instrução (HAC-RAS versão 6.0, Dezembro de 2020).

**Tabela 6:** Valores médios do coeficiente de Manning utilizados no trabalho

<b>Tipo</b>	<b>Características</b>	<b>Rugosidade média (n)</b>
Canais de pequeno porte em planície (B <30m)	Limpos	0,033
	Trechos lentos	0,070
Canais de grande porte (B> 30m)	Secções regular	0,042
Planície de inundação	Área urbana / solo exposto	0,030
	Pastagens	0,030
	Vegetação média (capoeira)	0,050
	Vegetação densa	0,070

**Fonte:** (Adaptado de Baptista & Lara,2003).

### 3.6. Balanço hídrico

O balanço hídrico foi feito para uma área total de 14,737,326.290 m<sup>2</sup>. Com a finalidade de quantificar a água perdida na zona onde ocorre o armazenamento superficial e subterrâneo, ou seja área ocupada pela extensão de 300m nas duas margens em relação ao canal do curso do rio.

Segundo Doarlei (2021), o balanço hídrico para o cálculo da intensidade da evapotranspiração em uma bacia hidrográfica, num intervalo de tempo  $\Delta t$ , é dada com a seguinte equação:

$$i * A - Q - ET * A = \frac{\Delta Vol}{\Delta t} \quad (Eq.31)$$

Sendo  $i$  a intensidade média da precipitação no intervalo,  $Q$  -vazão média na seção exutório da bacia para este intervalo,  $A$ - área de drenagem da bacia e  $\Delta Vol$ - diferença entre os armazenamentos totais de humidade na bacia no final e início do intervalo de tempo, isto é,  $\Delta Vol = Vol. Final - Vol. Inicial$ .

Para o presente trabalho adoptou -se o cálculo da intensidade da evapotranspiração, no intervalo de tempo  $\Delta t=1$ ano. Neste caso, é razoável admitir-se  $\Delta Vol \cong 0$  passando a equação do balanço hídrico a ser descrita como sendo (Doarlei, 2021):

$$ET \cong i - \frac{Q}{A} \quad (Eq.32)$$

Sendo  $ET$ -Estimativa da evapotranspiração média da bacia (mm/ano).

### **3.7.Elaboração dos mapas de parâmetros morfométricos (elementos do relevo) na área em estudo**

Para a confecção dos mapas utilizou-se como material básico MDE (Modelo digital de elevação -ALOS PALSAR) com resolução de 12,5m incorporando no ambiente SIG.A área de estudo foi delimitada através da ferramenta de polígonos temáticos, disponível como ferramenta no aplicativo QGIS da versão 2.18.21.Para extracção das micro bacias de drenagem primeiro gerou se o mapa de altimetria com uso da imagem ALOS PALSAR e, a próxima etapa foi a digitalização, hierarquização e classificação das micro bacias de drenagem, conforme a proposta de Strahler (1952).

A classificação do relevo segue uma proposta de mapeamento morfométrica automatizado e a sua classificação foi feita segundo EMBRAPA citado por Simone, (2012). Foram empregados dois atributos topográficos para classificação do relevo: altimetria e declividade. Para interpolação dessas informações morfométricas usou-se modelo digital sombreado. Às informações referentes, a curvas de nível foram extraídas do MDE (Modelo digital de elevação) com equidistância de 15 metros somadas aos pontos cotados presentes na área. Para realização dessas actividades utilizou -se como aplicativo QGIS versão 2.18.21.

## 4.RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Análise Granulométrica

Com a finalidade de caracterizar o solo inicialmente, fez se análise granulométrica da amostra de solo colectada a cada ponto de amostragem. Análise granulométrica dos solos compreendeu a determinação do tamanho de partículas e frequência com que estes ocorrem a cada ponto de estudo, os resultados, de um modo geral apresentaram-se diferentes de ponto a cada ponto. Por este motivo, serão aqui apresentadas as curvas granulométricas obtidas para as amostras 4 e 5 respectivamente e as restantes curvas granulométricas poderão ser observados nos anexos deste trabalho dado a limitação do número de páginas dentro do corpo do trabalho já estabelecidos na estrutura das monografias em uso no ISPG. Importa referir que foram analisadas 8 amostras que corresponderam a 8 curvas granulométricas e as respectivas tabelas de distribuição.

**Tabela 7:** Resultados da análise das dimensões de sedimentos. Processo dos Crivos. Ponto4 (Amostra 4).

Peneira (mm)	Massa Retida na Peneira (g)	% Retida na Peneira	% Retida Acumulada	% Passante
2	0	0	0	100
0,425	7,495	6,426856457	6,426856457	93,57314354
0,355	6,384	5,474189676	11,90104613	88,09895387
0,3	0,285	0,244383468	12,1454296	87,8545704
0,212	9,068	7,775681701	19,9211113	80,0788887
0,18	2,462	2,111130166	22,03224147	77,96775853
0,15	12,579	10,78631453	32,81855599	67,18144401
0,09	43,361	37,18144401	70	30
0,075	26,074	22,35808609	92,35808609	7,641913908
0,063	7,378	6,326530612	98,6846167	1,315383296
0,045	1,011	0,866918196	99,5515349	0,4484651
<0,045	0,523	0,4484651	100	0
Total	116,62	100		

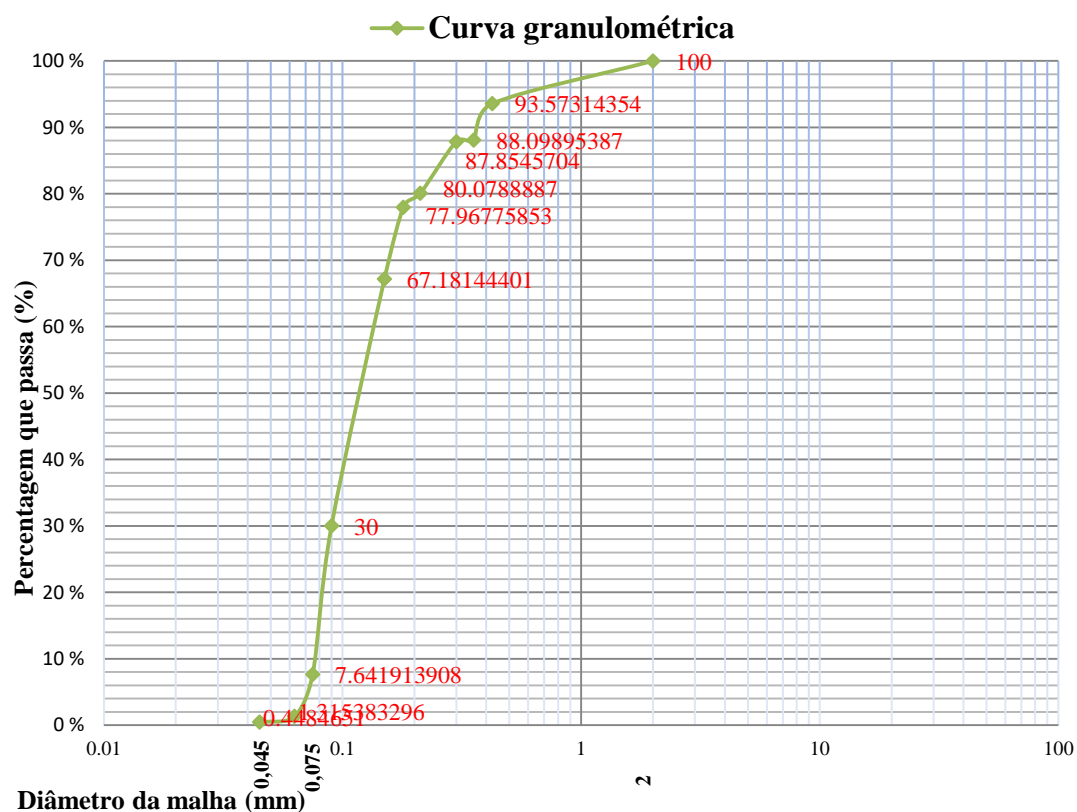


Gráfico A 1- Curva granulométrica da Ponto 4 (Amostra) 4. (Autor, 2022).

Tabela 8: Resultados da análise das dimensões de sedimentos. Processo dos Crivos Ponto 5 (Amostra 5).

Peneira (mm)	Massa Retida na Peneira (g)	% Retida na Peneira	% Retida Acumulada	% Passante
2	0	0	0	100
0,425	4,872	4,128743581	4,128743581	95,87125642
0,355	3,274	2,774529245	6,903272826	93,09672717
0,3	0,145	0,122879273	7,026152099	92,9738479
0,212	4,98	4,220267453	11,24641955	88,75358045
0,18	0,947	0,802528771	12,04894832	87,95105168
0,15	8,527	7,226148709	19,27509703	80,72490297
0,09	48,315	40,94422128	60,21931832	39,78068168
0,075	31,401	26,61056592	86,82988424	13,17011576
0,063	11,861	10,05152455	96,88140879	3,11859121
0,045	2,973	2,519448823	99,40085761	0,599142387

<0,045	0,707	0,599142387	100	0
Total	118,002	100		

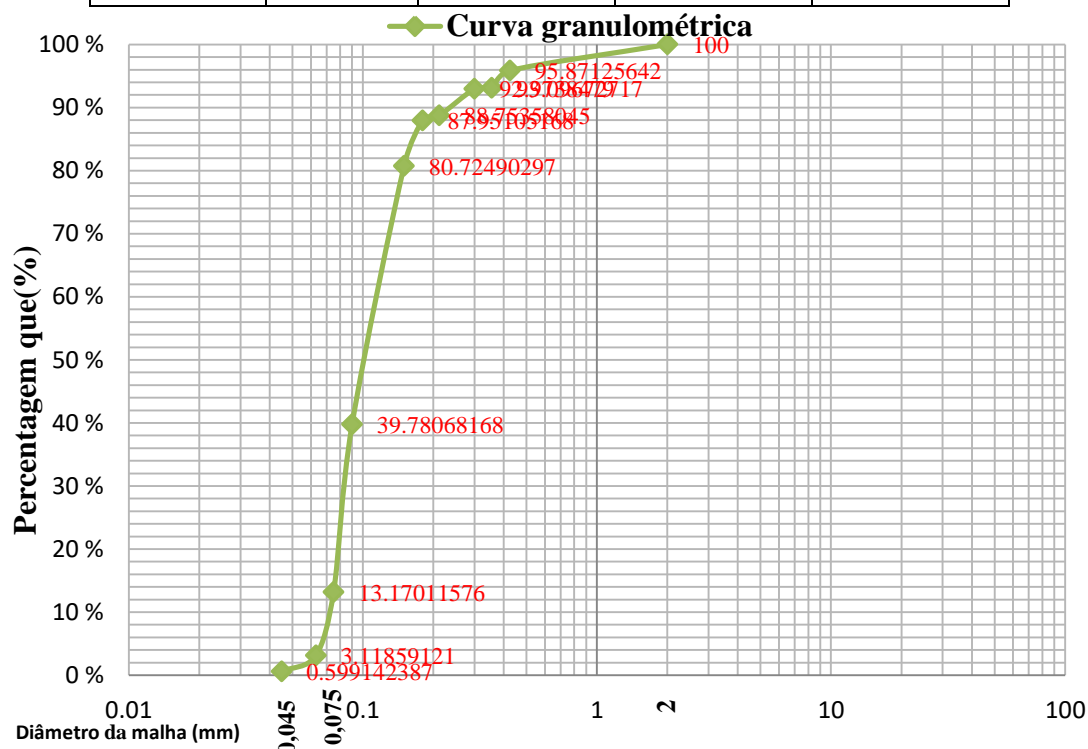


Gráfico A 2- Curva granulométrica da Ponto 5 (Amostra 5).(Autor, 2022).

No geral, usando a escala granulométrica da SUCS as amostras de solo na área em estudo são classificadas no sentido granulométrico como uma areia fina com silte e argila. Às curvas granulométricas são denominadas uniformes, aproximando-se a uma recta indicando:

- Menor variação do tipo de partículas constituintes do solo;
- Solos transportados pelo escoamento hídrico e a dinâmica do vento envolvente a longa distancias;
- Solos que possuem grãos de aproximadamente mesmo diâmetro;
- Partículas depositadas devido a subsidência dos taludes ao longo do percurso do rio.

Conforme Pinto (1998), é importante frisar também que solos de granulometrias semelhantes podem apresentar comportamentos distintos, tendo outras propriedades que influenciam directamente no seu comportamento.

#### 4.1.1. Limites de consistência

Os ensaios dos Limites de consistência foram feitos para determinação do limite plástico e líquido. O limite plástico de cada amostra foi feito segundo a NBR 7810/1984. Durante o ensaio de plasticidade foram feitas 3 determinações por cada amostra de solo e a posterior determinada em média o coeficiente de plasticidade do solo conforme a NBR7810/1984 recomenda. Os cálculos de outras amostras serão apresentados em anexo deste trabalho.

**Tabela 9:**Dados e cálculos do ensaio do LP da amostra 04.

Determinação n°		1	2	3	LP=24%
Cápsula n°		A	B	C	
1	Massa da cápsula (g)	15,892	16,062	37,59	
2	Cápsula +amostra humidade (g)	17,946	18,455	39,476	
3	Cápsula +amostra seca (g)	17,558	17,979	39,12	
4	Massa de Água = (2) - (3)	0,388	0,476	0,356	
5	Massa de solo =(3) - (1)	1,666	1,917	1,53	
6	Humidade (%)=(4/5)*100%	23,2893	24,8305	23,268	

Fonte: (Autor, 2022).

O limite líquido foi determinado usando a equação do gráfico de plasticidade para solos finos e a equação de cálculo do índice plástico da NBR 7810/1984 uma vez que as amostras de solo são compostas somente por partículas finas.

**Tabela:** Equações modificadas para cálculo do limite líquido da amostra 04.

$$IP = 0,73 (LL-20) \text{ Equação para solos finos (SUCS)}$$

$$IP = LL - LP \text{ Índice de plástico(NBR 7810/1984)}$$

$$IP = LL - LP$$

$$LL - LP = 0,73 (LL - 20)$$

$$0,27LL = LP - 14,6 \quad (Eq.32)$$

Fonte: (Modificado Autor, 2022).



Os coeficientes de consistência e a sua classificação para cada amostra foram obtidos como sendo:

**Tabela 10:** Coeficiente de consistência para cada amostra de solo e sua respectiva classificação

<b>Amostras n°</b>	<b>LL (%)</b>	<b>LP (%)</b>	<b>IP (%)</b>	<b>Classificação do solo</b>
1	46	27	19	Altamente plástico
2	46	27	19	Altamente plástico
3	42	26	16	Altamente plástico
4	35	24	11	Medianamente plástico
5	-	-	0	Não plástico
6	-	-	0	Não plástico
7	39	25	14	Medianamente plástico
8	61	31	30	Altamente plástico
<b>Médias</b>	41	26	14	Medianamente plástico

**Fonte:** (Autor, 2022).

**Tabela 11:** Resultados da análise de variância referente ao IP (índice plástico) das amostras em estudo.

Média ( $\bar{X}$ )	14
Desvio padrão ( $\sigma$ )	9.42
Coeficiente de variação (CV)	69%

**Fonte:** (Autor, 2022).

A consistência do solo é afectada por factores como a granulometria e teor de matéria orgânica (Lorenzo, 2010). Solos que apresentam alta percentagem de finos são muito influenciados pela humidade, causando grandes variações nas suas propriedades plásticas (Souza et al., 2000). Conforme Silva e Miranda (2016), a matéria orgânica do solo (MO) influencia nos limites de liquidez e plasticidade dos solos, podendo aumentar seu índice de plasticidade.

As amostras 1,2,3 e 8 são solos com presença de matéria orgânica apresentando deste modo, valores altos de IP (índice plástico), as amostras 5 e 6 foram classificadas como

solos não plásticos e, as amostras 4 e 7 foram classificadas como medianamente plásticas.

De modo geral, os solos da área em estudos são constituídos por partículas finas. O coeficiente de variação (Cv) do IP (índice plástico) das amostras foi igual a 69% sendo este coeficiente classificado como muito alto assim, indicando uma grande variação do IP (índice plástico) das amostras do estudo em caso. O valor de IP (índice plástico) em média para a área estudada foi de 14 %, indicando solos com plasticidade média.

#### 4.1.2. Classificação SUCS

A classificação do solo foi feita, com base no sistema unificado de classificação de solo (SUCS) usando o gráfico da plasticidade e os valores da composição granulométrica, ou seja, a percentagem do solo que passa na peneira n° 200 identifica as características do solo. Todas amostras analisadas foram classificadas como solos finos por apresentar maior percentagem de ocorrência que passa na peneira n° 200. O solo é caracterizado para cada amostra:

**Tabela 12:**Caracterização dos solos da área de estudo.

Amostras n°	Classificação (SUCS)	
	Nomenclatura	Símbolo
1	Silte orgânico	OL
2	Silte orgânico	OL
3	Argila orgânica com areia	OL
4	Silte com areia	ML
5	Areia siltosa	SM
6	Areia mal graduada com silte	SP-SM
7	Silte com areia	ML
8	Argila orgânica	OH

Fonte: (Autor, 2022).

As amostras 1,2 e 3 apresentam mesmo tipo de simbologia “OL “mas, têm um nome diferente devido a percentagem retida na peneira número 200.



**Figura 15:** Distribuição dos solos pelo método de SUCS no troço de estudo. **Fonte:** (Autor, 2022).

Na área em estudo verificou-se maior ocorrência de solos coesivos (argilas e siltes) com mistura de areia e menor ocorrência de solos coesivos sem mistura de areia.

Segundo Alberto *et al*, (2021), é importante referenciar que os espaços vazios dos solos coesivos são muito pequenos e predominantemente isolados uns dos outros. Devido a sua estrutura esses solos mostram pouca tendência a permitir a passagem de água, absorvem água muito lentamente e também voltam a expulsá-la com lentidão.

#### **4.2. Infiltração de água no solo na área em estudo**

Estão aqui apresentados os resultados de ensaio da taxa de infiltração no campo, os procedimentos de cálculo dos coeficientes da equação de infiltração de Kostiakov no ponto n° 6. Dado a limitação do número de páginas dentro do corpo do trabalho já estabelecidos na estrutura das monografias em uso no ISPG, os resultados de ensaio da taxa de infiltração no campo, os procedimentos de cálculo dos coeficientes da equação de infiltração de Kostiakov para outros pontos serão obtidos nos anexos deste trabalho. Importa referir que foram feitos 3 ensaios de infiltração sendo 1 ensaio para cada ponto.

#### 4.2.1. Ensaio de infiltração do ponto n° 6.

O ensaio de campo consistiu na determinação da relação entre o tempo (min) e a leitura (cm) da água infiltrada. Os dados colectados em campo são dispostos a seguir:

**Tabela 13:** Dados de ensaio de infiltração no campo: Ensaio ponto n° 6.

Tempo de leitura (min)		Infiltração (cm)		
Tempo	Tempo Acumulado	Leitura na régua	Reposição (cm)	Lâmina Infiltrada (cm)
0	0	14		0
1	1	13,1		0,9
2	3	12,1		1
2	5	11,1		1
5	10	9,1	14	2
5	15	12,5		1,5
5	20	11,7		0,8
10	30	11,1	14	0,6
10	40	10,9		3,1
10	50	8,2	14	2,7
25	75	11		3
25	100	9,5		1,5
28	128	7,9		1,6
28	156	6,3		1,6
28	184	4,7		1,6

Fonte: (Autor,2022)

A taxa de infiltração obtida no campo é representada graficamente em função do tempo.

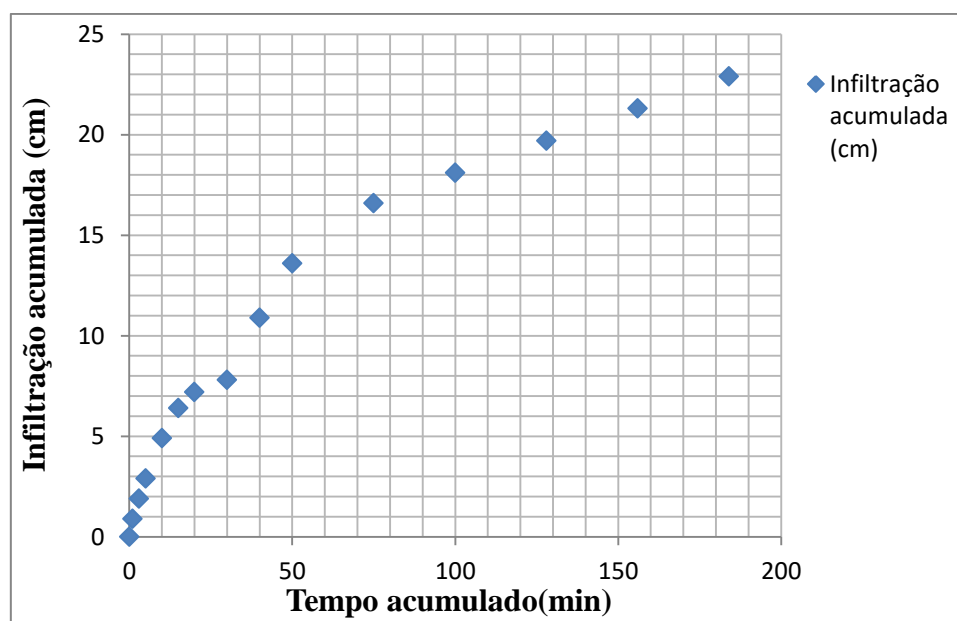


Figura 16: Gráfico de infiltração acumulada em função do tempo. Ensaio ponto n° 6. Fonte: (Autor, 2022).

#### 4.2.1.1. Coeficientes da equação de infiltração de Kostiakov: Ensaio ponto n° 6.

O somatório referente aos coeficientes de regressão linear do método de Kostiakov é disposto:

Tabela 14: Valores da regressão linear do método de Kostiakov. Ensaio ponto n° 6.

Tac	Iac	Y=log Iac	X= Log T ac	X.Y	X <sup>2</sup>
0	0	-	-	-	-
1	0,9	0,045757491	0	0	0
3	1,9	0,278753601	0,477121255	0,132999	0,227645
5	2,9	0,462397998	0,698970004	0,323202	0,488559
10	4,9	0,69019608	1	0,690196	1
15	6,4	0,806179974	1,176091259	0,948141	1,383191
20	7,2	0,857332496	1,301029996	1,115415	1,692679
30	7,8	0,892094603	1,477121255	1,317732	2,181887
40	10,9	1,037426498	1,602059991	1,662019	2,566596
50	13,6	1,133538908	1,698970004	1,925849	2,886499
75	16,6	1,220108088	1,875061263	2,287777	3,515855
100	18,1	1,257678575	2	2,515357	4
128	19,7	1,294466226	2,10720997	2,727712	4,440334
156	21,3	1,328379603	2,193124598	2,913302	4,809796
184	22,9	1,359835482	2,264817823	3,07978	5,1294
	Σ	<b>12,57263064</b>	<b>19,87157742</b>	<b>21,63948</b>	<b>34,32244</b>

Fonte: (Autor, 2022).

A partir das equações de regressão foi possível encontrar os valores de “A” e “B” e por consequência os parâmetros “k” e “a”:

**Tabela 15:**Parâmetros da equação da velocidade de infiltração básica de cada ponto representativo.

Ensaio n °	Parâmetro da equação para cálculo da velocidade de infiltração básica			
	A	B	K	a
7	0,9149	0,0930	8,2218	0,0930
6	0,0177	0,6203	1,0415	0,0177
8	-0,5056	0,7906	0,3122	0,7906

Fonte: (Autor, 2022).

Quando aplicados os parâmetros no ensaio ponto n ° 6 resultaram:

- Equação potencial de Kostiakov:**  $I = 1.0415 * T^{0.018}$
- Velocidade de infiltração instantânea:**  $VI = 0.018 * T^{-0.982}$
- Velocidade de infiltração média:**  $VI_m = 1.0415 * T^{-0.982}$

Quando aplicados os valores resultam na velocidade de infiltração básica (VIB) para cada ponto representativo.

**Tabela 16:**Classificação da velocidade de infiltração para cada ponto.

Amostra n °	Velocidade de infiltração básica (VIB) mm/h	Classificação
6	1,08	Baixa
7	8,72	Média
8	54,86	Muito Alta
Média	21.55	Alta

Fonte: (Autor, 2022).

Excluindo outros factores que podem influenciar no comportamento da infiltração de água no solo, e considerando como premissa de que cada ponto com mesma classificação de solo apresenta mesmo comportamento na infiltração pode se dizer o seguinte:

- Os pontos 1,2,3 e 8 são influenciados pela matéria orgânica apresentando valores altos de IP (índice plástico). A velocidade de infiltração básica é alta

nesse ponto o que leva a assumir a vegetação presente nesse ponto como influencia no retardamento da infiltração de água no solo;

- Nos pontos 4 e 7 os valores de IP (índice plástico) foram classificados como medianamente plásticos indicando uma consistência média do solo para se transformar em líquido, o que verificou-se também com a velocidade de infiltração básica de água no campo classificada como média;
- Os pontos 5 e 6 apresentam menor limite plástico desta forma atingido facilmente o estado líquido devido ao tipo de poros e sua má distribuição na estrutura desse solo que retém água e permite uma menor taxa de infiltração. A velocidade de infiltração básica de água no campo é classificada como baixa.

De modo geral, a infiltração na área em estudo foi classificada como sendo alta. É importante referenciar que, a vegetação exerce marcante influência na formação do solo pelo fornecimento de matéria orgânica, na protecção contra a erosão pela acção das raízes fixadas no solo, assim como as folhas evitam o impacto directo da chuva (Valmiqui *et al*, 2007).

Os poros entre as partículas no material siltosos são bem menores (e muito mais numerosos) do que os poros presentes entre as partículas de areia, deste modo, o silte retém água e permite uma menor taxa de infiltração (Apostila, 2021).

#### 4.5. Armazenamento de água no solo e subsolo

Serão aqui apresentados os resultados referentes aos volumes de armazenamento de água no solo e subsolo respectivamente para 2 períodos na área de estudo.

**Tabela 17:** Volume de água armazenado no subsolo e solo.

<b>ANO</b> <b>Período</b>	<b>(2020)</b> <b>Não crítico</b>	<b>(2000)</b> <b>Critico</b>
Caudal médio (m <sup>3</sup> /s)	7.99	362.99
Caudal base (m <sup>3</sup> /s)	6.53	351.7
Taxa de recarga aquífera (mm/ano)	14,011.65	754,655.075
Volume armazenado no aquífero (m <sup>3</sup> /ano)	206,494,272,000	11,121,598,080.000

Volume armazenado no solo (m <sup>3</sup> /ano)	4,746,008,558.432	19,536,536,596.339
Volume total (m <sup>3</sup> /ano)	4,952,502,830.432	30,658,134,676.339

Fonte: (Autor, 2022).

**Tabela 18:** Evapotranspiração média anual estimada a partir de dados de períodos críticos.

ANO	1966	1967	1972	1975	1977	1981	2000	Média
<b>i(mm/ano)</b>	685.6	927.2	752.6	675.3	525.9	986.5	986.5	752.60
<b>Q(mm/ano)</b>	120.20	310.06	302.59	367.05	266.70	306.31	770.69	306.31
<b>Evapotranspiração real anual em média</b>								
Altura (mm/ano)	446.29			Volume ( m <sup>3</sup> )		6,577,098.57		

Fonte: (Autor, 2022).

O volume armazenado no solo e subsolo varia em função do período em análise. Para o ano crítico (ano 2000), o volume armazenado no solo e subsolo é estimado em percentagem como 63.72% e 36.28%. O período não crítico (Ano 2020), o volume armazenado no solo e subsolo é estimado em percentagem como 95.83% e 4.17% respectivamente.

Contudo comparando os volumes de armazenamento subterrâneo, percebe-se que em períodos críticos há maiores volumes de água concentrados no troço, influenciados pela estrutura dos solos que mostram pouca tendência a permitir a passagem de água, absorvem água muito lentamente e também quando saturados voltam a expulsá-la com lentidão, levando a maior recarga do aquífero subterrâneo.

Em períodos não críticos a menor volume de água concentrado no troço, ocasionando menor infiltração porque, os solos não chegam a saturar e por sua vez a maior quantidade de água é escoada superficialmente assim, sendo há menor recarga subterrânea.



#### 4.4. Descrição dos planos de água ao longo do rio em estudo.

Primeiro são aqui apresentados os resultados referentes aos dados de vazões aplicados na geração de manchas de inundação na área em estudo.

**Tabela 19:** Estimativa de vazões críticas para diferentes períodos de retorno na área de estudo.

<b>Método de Gumbel</b>						
<b>Ordem m</b>	<b>Ano de ocorrência Ano</b>	<b>Vazões históricas Q</b>	<b>Probabilidade de ocorrência Pr</b>	<b>Tempo de retorno Tr</b>	<b>Y</b>	<b>Vazão de recorrência Qp</b>
		<i>m<sup>3</sup>/s</i>	(%)	(anos)		<i>m<sup>3</sup>/s</i>
1	1955	5065	0.01	10000	9.21	39246.17
2	1958	4870	0.1	1000	6.91	30128.01
3	1966	3890	0.5	200.0	5.30	23747.99
4	1967	4190	1	100.0	4.60	20993.73
5	1972	5210	2	50.0	3.90	18229.38
6	1975	5190	3	33.3	3.49	16603.85
7	1977	5810	4	25.000	3.20	15444.46
8	1981	4490	10	10.0	2.25	11690.49
9	2000	19967	20	5.0	1.50	8719.40
<b><math>\bar{Q}</math></b>		5065	25	4.0	1.25	7713.61
<b><math>\sigma</math></b>		5075.89	50	2.0	0.37	4231.95
<b>CV</b>		1.00	70	1.4	-0.19	2045.92
			80	1.3	-0.48	896.73

Fonte: (Autor, 2022).

#### 4.4.1. Delimitação de manchas de inundação na área em estudo

A tabela á baixo ilustra as condições de contorno para as manchas de inundação referentes aos anos 2000, período de retorno (Tr) de 25 e 50 anos respectivamente.

Tabela 20: Condição de contorno para cada evento de inundação.

	Evento(1975)	Evento(2000)	TR 25	TR50
<b>Q Total (m<sup>3</sup>/s)</b>	5910	19967	15444.46	18229.38
<b>Área inudada(m<sup>2</sup>)</b>	416554.4	899646.8	773143.7	853216.9
<b>Número de froude</b>	0.23	0.27	0.26	0.27
<b>Classificação do fluxo</b>	Fluxo turbulento elevado			

Fonte: (Autor, 2022).

Com as manchas de inundação verifica-se um grande risco que a população está sujeita associado a altos caudais, que escoam ao longo do troço de estudo em fluxo turbulento ocasionando a subida do nível máximo de água e a erosão dos taludes do rio. Os altos caudais vão alastrando-se até as residências habitacionais, campos agrícolas, lojas e bares em profundidades mínimas igual a 54 cm, e profundidades máximas até 8.1m.

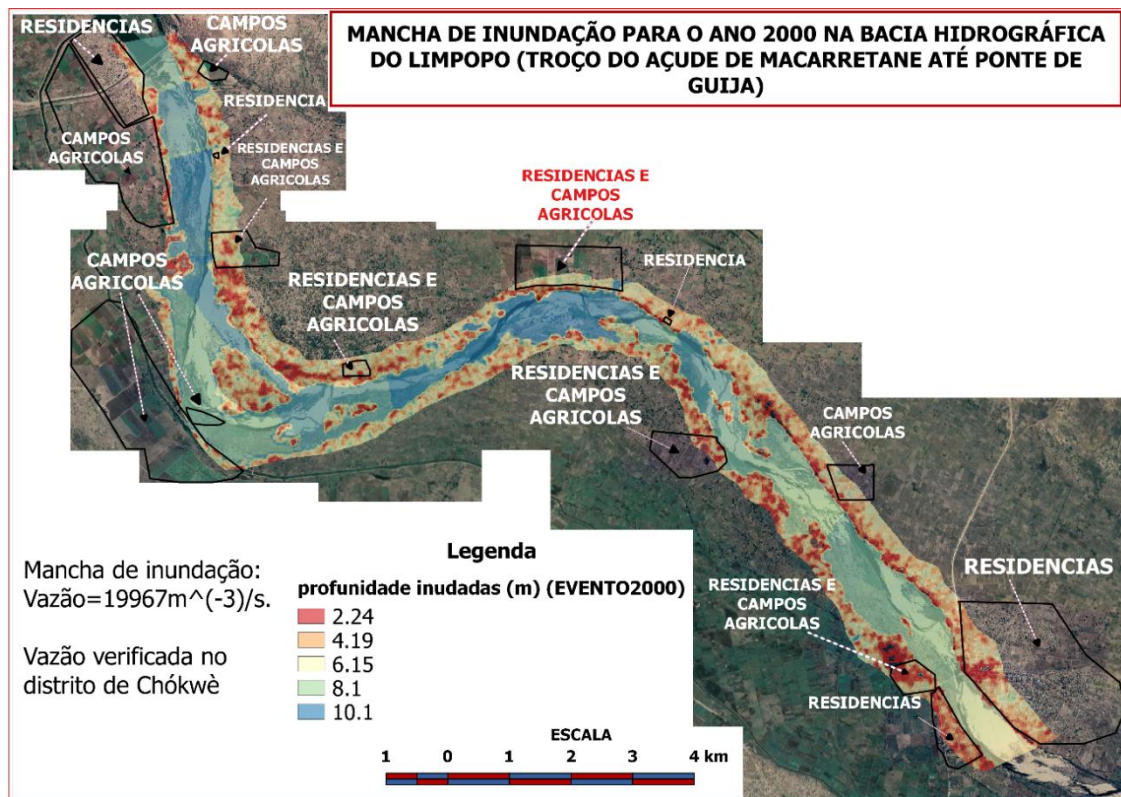
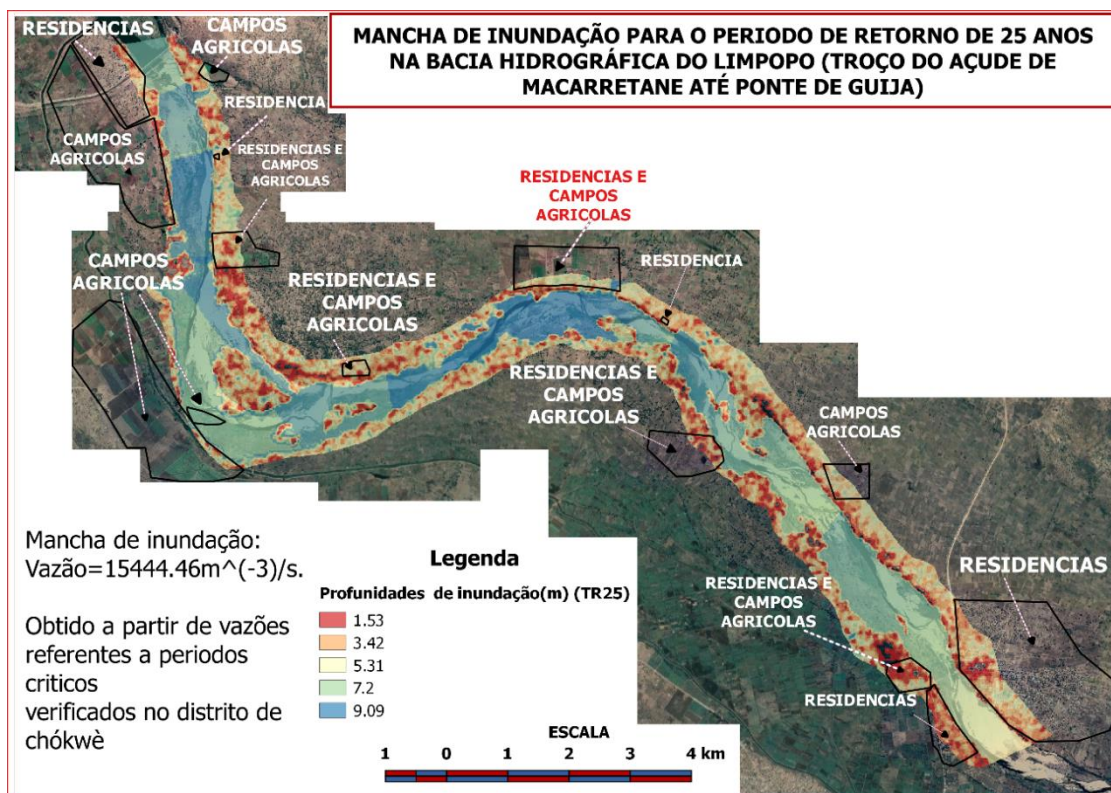


Figura 17: Mancha de inundação para o ano 2000 na bacia hidrográfica do Limpopo (Troço Açude de Macarretane-Ponte de Guija). Fonte: (Autor, 2022).



**Figura 18:** Mancha de inundação para tempo de retorno de 25 anos na Bacia hidrográfica do Limpopo (Troço Açude de Macarretane-Ponte de Guija). **Fonte:** (Autor,2022)

**Tabela 21:**Profundidades inundadas (m).

Evento(1975)	Evento(2000)	TR 25	TR50
0.544	2.24	1.53	1.97
2	4.19	3.42	3.91
3.45	6.15	5.31	5.84
4.9	8.1	7.2	7.78

**Fonte:** (Autor, 2022).

### 4.3. Parâmetros morfométricos (elementos do relevo) na área em estudo

Os parâmetros morfométricos da área de estudo compreenderam a extracção dos seguintes elementos: altitude, curvas de nível, declividade e micro bacias de drenagem) utilizando se imagens satélite radar (ALOS PALSAR) com resolução de 12.5 m. Com a imagem na área em estudo verificou-se como altitudes mínimas 6.374 m e máximas 95.235m.

A bacia hidrográfica da área em estudo é da 5ª ordem. O troço em estudo tem 20482m de extensão, o sentido de escoamento da água é de oeste para leste, formando um

padrão de drenagem dendrítica. As classes de altitudes na área de estudo variam de 39.1-50.5 m em maior percentagem.

De modo geral o relevo baseado nas classes de declividade foi classificado como suave á ondulado indicando maior ocorrência de declividades entre 3-8%. Quanto as classes de altitude o relevo foi classificado como colinas indicando maior predominância de altitudes <50 m.

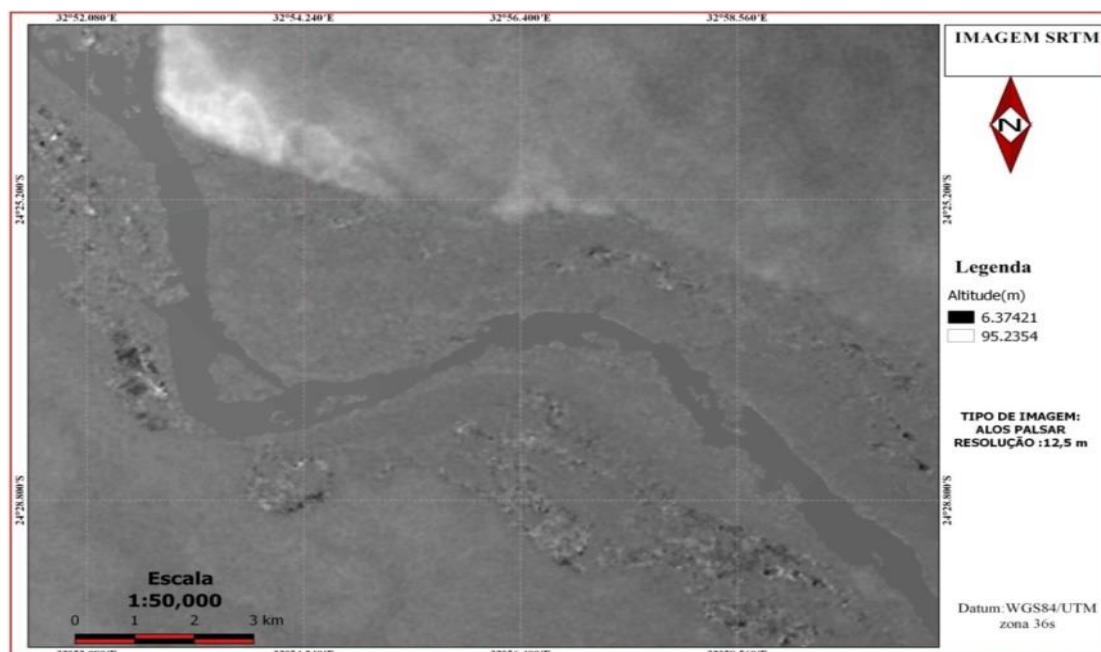


Figura 19:Imagem satélite radar tipo Alos Palsar. Fonte: (Autor, 2022).

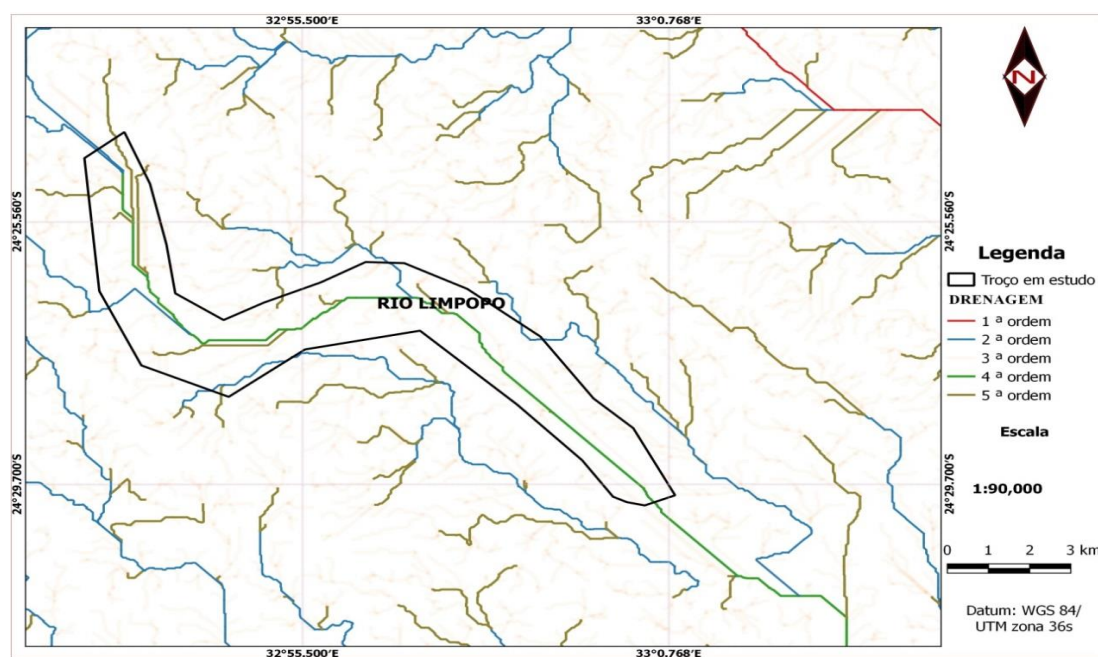


Figura 20:Principais micro bacias da área de estudo. Fonte: (Autor, 2022).



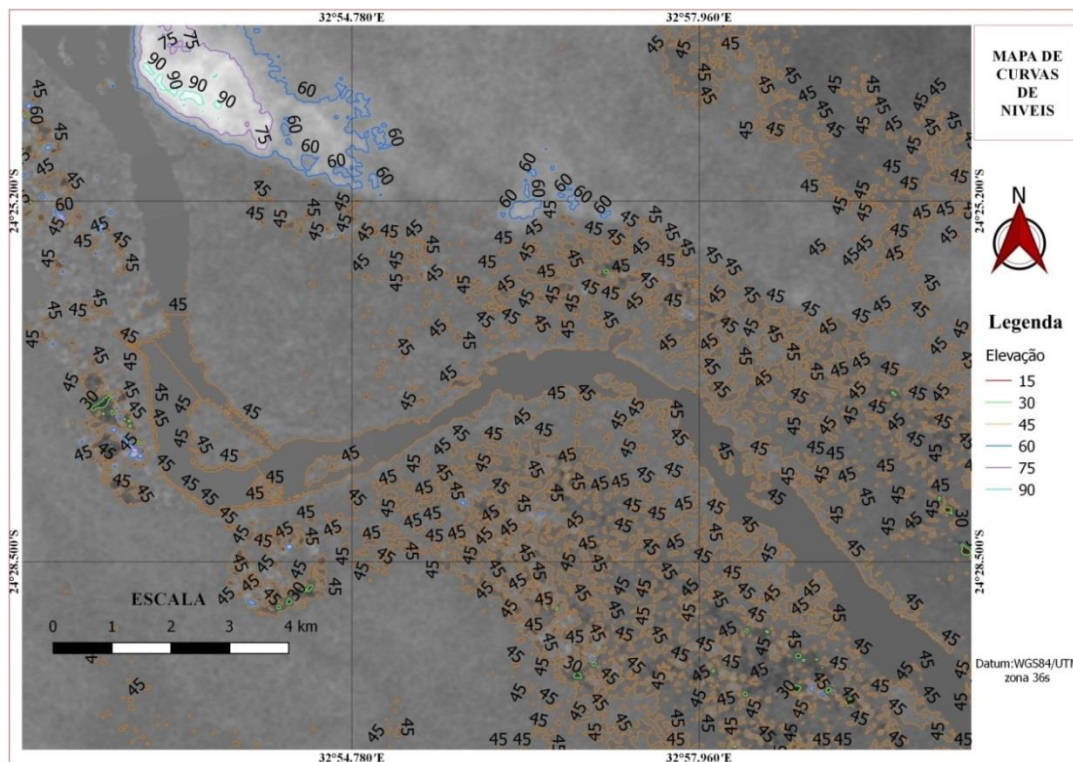


Figura 21: Curvas de nível da área de estudo. Fonte: (Autor, 2022).

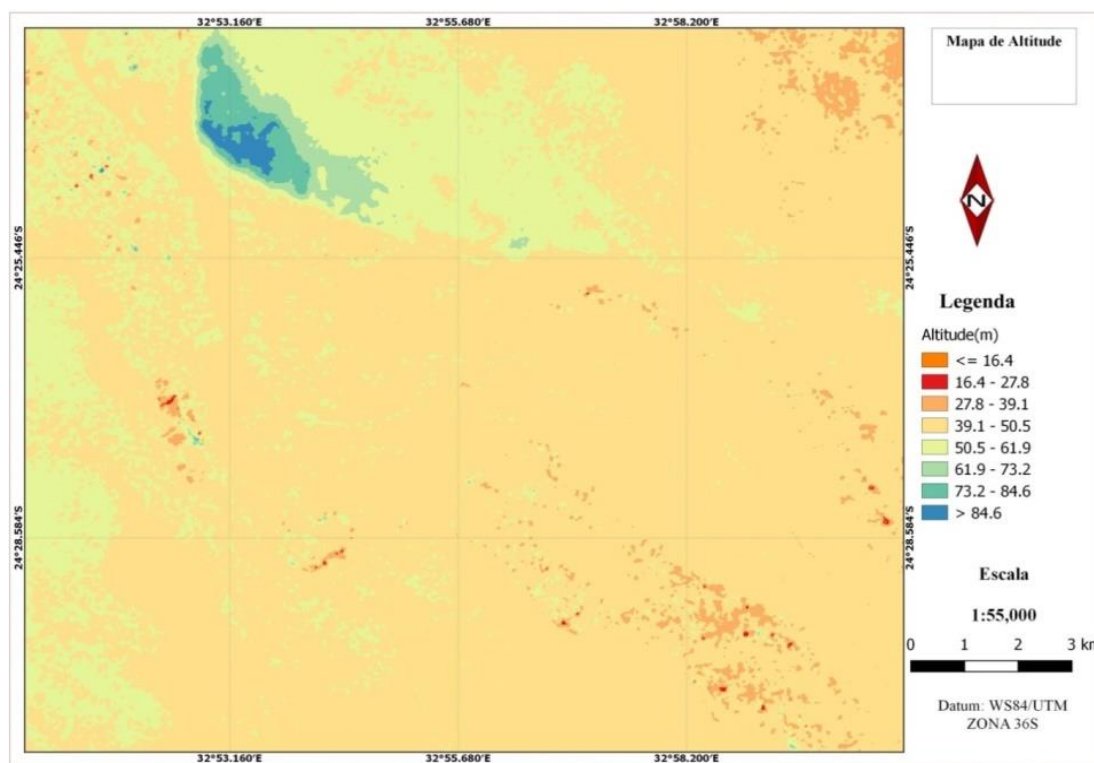


Figura 22: Classes de altitude da área de estudo. Fonte: (Autor, 2022).

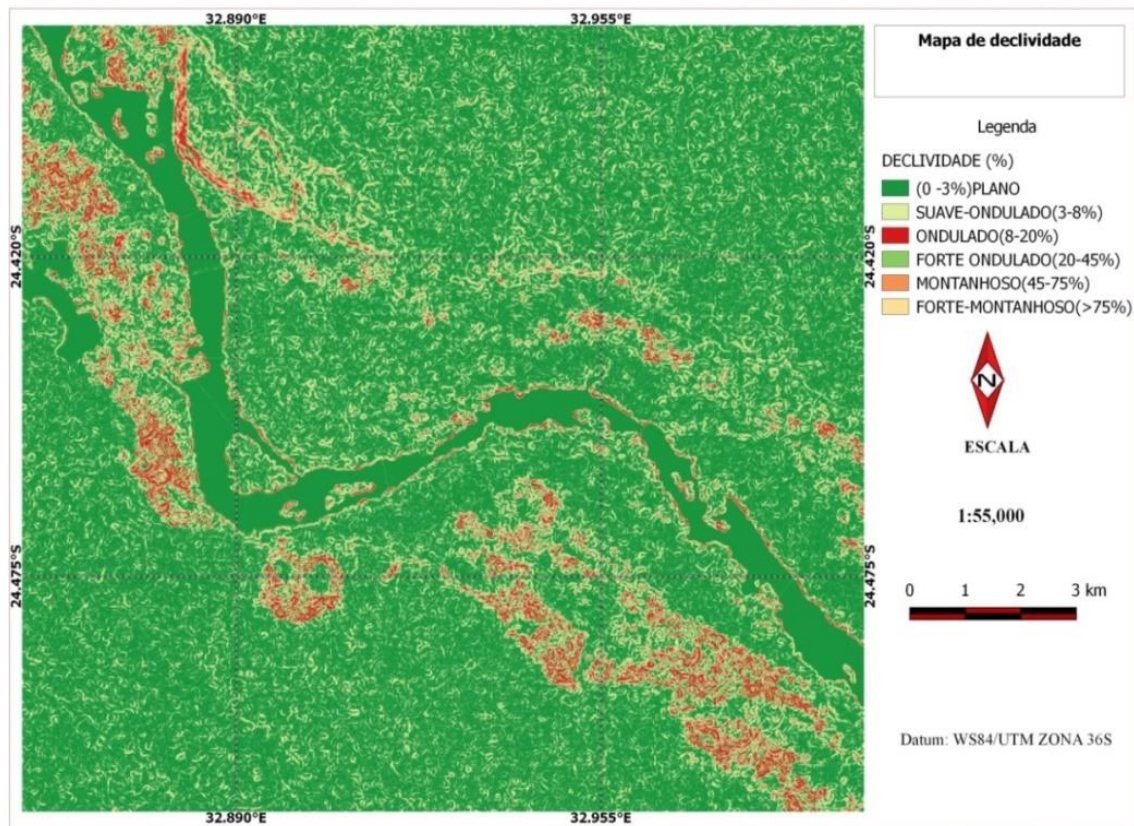


Figura 23: Relevo baseado nas classes de declividade. Fonte: (Autor, 2022).

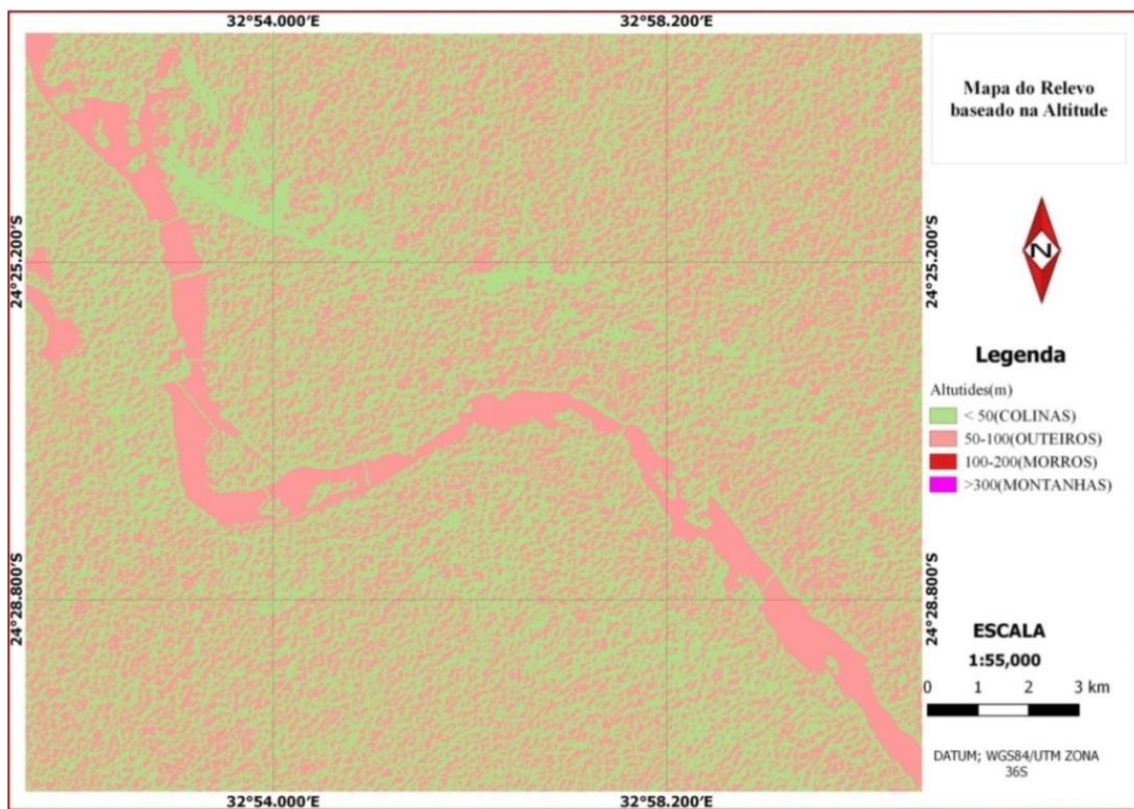


Figura 24: Classes de relevo baseadas na altitude da área de estudo. Fonte: (Autor, 2022).

**Tabela 22:** Distribuição das classes de relevo baseadas nas declividades e altitude da área de estudo.

Declividade (%)				Altitude (m)	
Classe	Plano	Suave -ondulado	Ondulado	Colinas	Outeiros
		0-3%	3-8%	8-20%	<50
<b>Percentagem (%)</b>	41,77	47,94	10,29	53,17	46,83

**Fonte:** (Autor, 2022)



## 5.CONCLUSÃO

Na área de estudo no geral verificou-se maior ocorrência de areias finas com mistura de silte, e a capacidade de infiltração de água no solo foi classificada como sendo alta. A infiltração de água foi influenciada por três factores que são a consistência do solo, vegetação e a porosidade do solo.

O troço de estudo indica maior predominância de declividades entre 3-8% indicado um relevo suave á ondulado e altitudes <50 m, indicado um relevo do tipo colinas.

As informações obtidas a partir da modelagem hidrológica de vazões críticas verificadas na área de estudo permitiram simular acontecimentos passados e futuros referentes a caudais que verificam se ao longo do rio. Estas informações obtidas revelam a vulnerabilidade à ocorrência de inundações em grandes profundidades que variam de 54cm á 8.1m deixando em risco a segurança da população e das construções em áreas próximas do troço de estudo. Uma das causas que influencia também na ocorrência de inundação presume-se que seja o tipo de solos presente nas proximidades troço de estudo, os solos coesivos (argilas e siltes) em outras palavras solos de granulometria fina apresentam pouca tendência a permitir a passagem de água, absorve água muito lentamente e também voltam a expulsá-la com lentidão.

O armazenamento de água mostra uma grande variância percentual para diferentes períodos no troço de estudo. Em um armazenamento não crítico o volume chega a ser um total de  $4,952,502,830.432m^3$ /ano, que representa cerca de 95.83% no solo e 4.17% no subsolo. Para um período de armazenamento crítico chega a ser um total de  $30,658,134,676.339m^3$ /ano, que representa cerca de 63.72% no solo e 36.28% no subsolo.



## **6.RECOMENDAÇÕES**

Após todos capítulos listados nesse trabalho, sugere-se que futuramente sejam seguidas as seguintes recomendações:

- ✓ A realização de um estudo mais aprofundando no trecho em estudo;
- ✓ A realização de um estudo similar em outros trechos do rio Limpopo;
- ✓ Um estudo sobre evolução do uso e cobertura de terra ao longo do rio;
- ✓ Avaliar a erosão hídrica ocasionada pelo fluxo verificado no rio principalmente, em períodos críticos .

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Arthur. F.V. C (2017), Estudo de Caso Sobre o Dimensionamento de Poços de Recarga Como Alternativa de Controlo de Inundações na Fonte Curso de Engenharia Civil, Universidade evangélica;
2. Administração Regional de Águas do Sul (2021), DGBL (Divisão de gestão da Bacia do Limpopo);
3. Alberto et al (2021), Reforço de Solos, Manual Técnico, MACCAFERRI, América Latina;
4. Amílcar (2014), Dinâmica fluvial do Rio Madeira, Brasil;
5. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (1986).NBR 6457, Amostras de solo-preparação para ensaios de compactação e ensaio de caracterização, Rio de Janeiro;
6. Alveirinho Dias (2004), Análise Sedimentar e Granulométrica e os conhecimentos marinhos;
7. Teresa.V (2004), Caracterização de um solo mineiro (área degradada), Pedologia e Conservação de Solos, Universidade do Minho;
8. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (1984). NBR7180,solo-determinação do limite de plasticidade, método de ensaio, Rio de Janeiro;
9. Apostila (2021), Arquitectura e Propriedades Faíscas do Solo;
10. Baptista & Lara (2003), Fundamentos de Engenharia Hidráulica, 2ª edição. Biekart (2018), Research on groundwater abstraction from the Limpopo sand bed, Gaza province-Mozambique, Final version;
11. Caio (2015), Amostragem do solo, Aula 10, Brasil;
12. Carlos. M. R (2020), Apontamentos para as Aulas de Hidrologia, Departamento de Engenharia Rural, Universidade de Évora;
13. Coelho (2007), Alterações hidro geomorfológicas no médio-baixo Rio Doce, Universidade Federal Fluminense, Niterói;
14. Caputo.H.P (2015), Mecânica dos Solos e suas Aplicações.V1/7ª Edição, Rio de Janeiro;
15. Costa (2005), Analise por métodos hidrológicos e hidroquímicos de factores condicionantes do potencial hídrico de bacias hidrográficas. Ouro Preto;

16. Douglas (2019), Classificação dos coeficientes de variação para as propriedades de painéis de madeira aglomerada. Goiânia;
17. DAS, M. Fundamentos de Engenharia Geotécnica. São Paulo: Thomson, 2007.
18. DNIT (2005), Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem, Instituto de Pesquisas Rodoviárias;
19. DNIT (2006), Manual de Pavimentação, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 3ª Edição, Rio de Janeiro;
20. EMBRAPA Meio Ambiente (2006), Solo, Água e Sedimentos, Jaguariúna, São Paulo;
21. Eckhardt. K. (2005), How to construct recursive digital filters for base flow separation;
22. Ferreira (2000), Dados de base de Sedimentos Fluviais de Campo, AMPJ;
23. Guilherme. A (2009), Sistemas de Irrigação por Aspersão, Dourados, Universidade Federal da Grande Dourados;
24. Guimarães. J (2000), Relação entre a Ocupação do Solo e o Comportamento Hidrológico da Bacia Hidrográfica do Rio Pequeno, São José dos Pinhais;
25. HAC-RAS versão 6.0 (2020), River analysis system, Applications guides;
26. Herlânder (2006), Impacto de Projectos da Engenharia Civil na Hidrologia de Bacias de Drenagem como o Excesso de Escoamento, UM, Mata-Lima;
27. INGC; UEM & FEWS NET (2003), Atlas for Disaster Preparedness and Response in the Limpopo Basin. Mozambique – Maputo;
28. Joyce. P, 2010, Avaliação dos Métodos de Campo para a Determinação de Condutividade Hidráulica em Meio Saturado e não Saturados, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília;
29. Luciana.C (2010), Estimativa de Vazões Máximas de Projecto por Métodos Determinísticos e probabilísticos, Universidade Federal do Espírito Santo;
30. Luciano (2015), Solos, Colégio Politécnico UFSM, Santa Maria-RS;
31. Melo, L. P. R. et al (2013), Análise comparativa de metodologias de propagação de ondas para previsão dos impactos de inundação provenientes da ruptura hipotética da barragem ticoico, XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos;
32. Manual de caracterização de solos (2021);
33. Doarlei (2021), Manual de Hidrologia Aplicada Evapotranspiração, CIV226;

34. Manual Técnico de Geomorfologia (2009), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística- IBGE 2<sup>a</sup> edição, Rio de Janeiro;
35. Muriel. B (2005), Análise do Desempenho de Equações de Infiltração, São, Rio de Janeiro, Brasil;
36. Marta et al (2019), Geomorfologia da Área de Protecção Ambiental do Rio Machado, Sul de Minas Gerais, Caderno de Geografia, v.29;
37. Masato. K (2011), Curso de Capacitação em Hidrologia e Hidrometria para Conservação de Mananciais.3<sup>a</sup> edição Brasil; Paulo, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, São Paulo;
38. Pinto (1988), Mecânica dos Solos e Suas Aplicações, Fundamentos, vol. 1/ 6<sup>o</sup> Edição. Rio de Janeiro;
39. Pinto.C.S (2006), Curso Básico de Mecânica de Solos.3<sup>a</sup> Edição, São Paulo;
40. Rebeca (2009), Estimativa de Parâmetros Hidrodinâmicos de Aquíferos em Áreas de Embasamento Através de Métodos Indirectos,
41. Robaina. L. E. S (2006), Mapeamento Geomorfológico da Bacia Hidrográfica Miracatu, IV Simpósio Universal de Geomorfologia;
42. Sandro & Miriam (2021), Mecânica dos Solos I: Conceitos introdutórios, Universidade Federal da Bahia;
43. Silva e Miranda (2016), Matéria Orgânica e sua Influência nas Fracções Granulométricas do Solo e nos limites de Atterberg, Brasil;
44. Simone. C (2012), Proposta Metodológica para Classificação das paisagens da Sub-bacia do Rio Salgado/CE; Rio de Janeiro;
45. Suporte. (2018), consultado no dia 03 de Maio 2022, disponível em [:https://www.suportesolos.com.br/blog/preparacao-de-amostras-de-solo-para-ensaios-de-caracterizacao-ensaios-geotecnicos/64/;](https://www.suportesolos.com.br/blog/preparacao-de-amostras-de-solo-para-ensaios-de-caracterizacao-ensaios-geotecnicos/64/)
46. Strahler, A.N (1952), Hypsometric (área-altitude), analysis and erosional topography. Geological Society of America Bulletin, v. 63;
47. Tucci, C.E.M (2005), Programa de Drenagem Sustentável: apoio ao desenvolvimento do manejo das águas pluviais urbanas, Versão 2.0., Brasília;
48. UNESCO (s.d.), Dicionário de Hidrologia, consultado no dia 30 de Setembro, 2020, disponível em :

<http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/PT/GF0469PT.HTM>;

49. Valmiqui et al. (2007), O Solo no Meio Ambiente, Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR;
50. Water net (2009), Profile of the Limpopo Basin in Mozambique, Secção de Uso de Terra e Água, Universidade Eduardo Mondlane, Maputo;

## 8. ANEXOS.

### MASSA MEDIDA PARA CADA AMOSTRA DURANTE A ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

**Tabela A1:** Massa medida para cada uma das amostras

Amostra	Massa da amostra (g)
1	107,812 ± 0,1
2	118,428 ± 0,1
3	107,364 ± 0,1
4	109,515 ± 0,1
5	112,969 ± 0,1
6	115,460 ± 0,1
7	116,620 ± 0,1
8	118,002 ± 0,1

Fonte: Autor (2022).

### RESULTADOS DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (ANÁLISE DAS DIMENSÕES DE SEDIMENTOS).

**Tabela A2:** Resultados da análise das dimensões de sedimentos. Processo dos Crivos. Ponto 1 (Amostra 1)

Peneira (mm)	Massa Retida na Peneira (g)	% Retida na Peneira	% Retida Acumulada	% Passante
2	0	0	0	100
0.425	7.29	6.761456913	6.761456913	93.23854309
0.355	4.459	4.135711437	10.89716835	89.10283165
0.3	0.172	0.159529573	11.05669792	88.94330208
0.212	7.923	7.348562843	18.40526077	81.59473923
0.18	3.666	3.400205904	21.80546667	78.19453333
0.15	21.933	20.34280308	42.14826975	57.85173025
0.09	43.957	40.77000844	82.91827819	17.08172181
0.075	16.034	14.87149522	97.78977341	2.210226588
0.063	2.057	1.907862396	99.69763581	0.302364191
0.045	0.006	0.005564985	99.70320079	0.296799206
<0,045	0.32	0.296799206	100	0
Total	107.817	100		

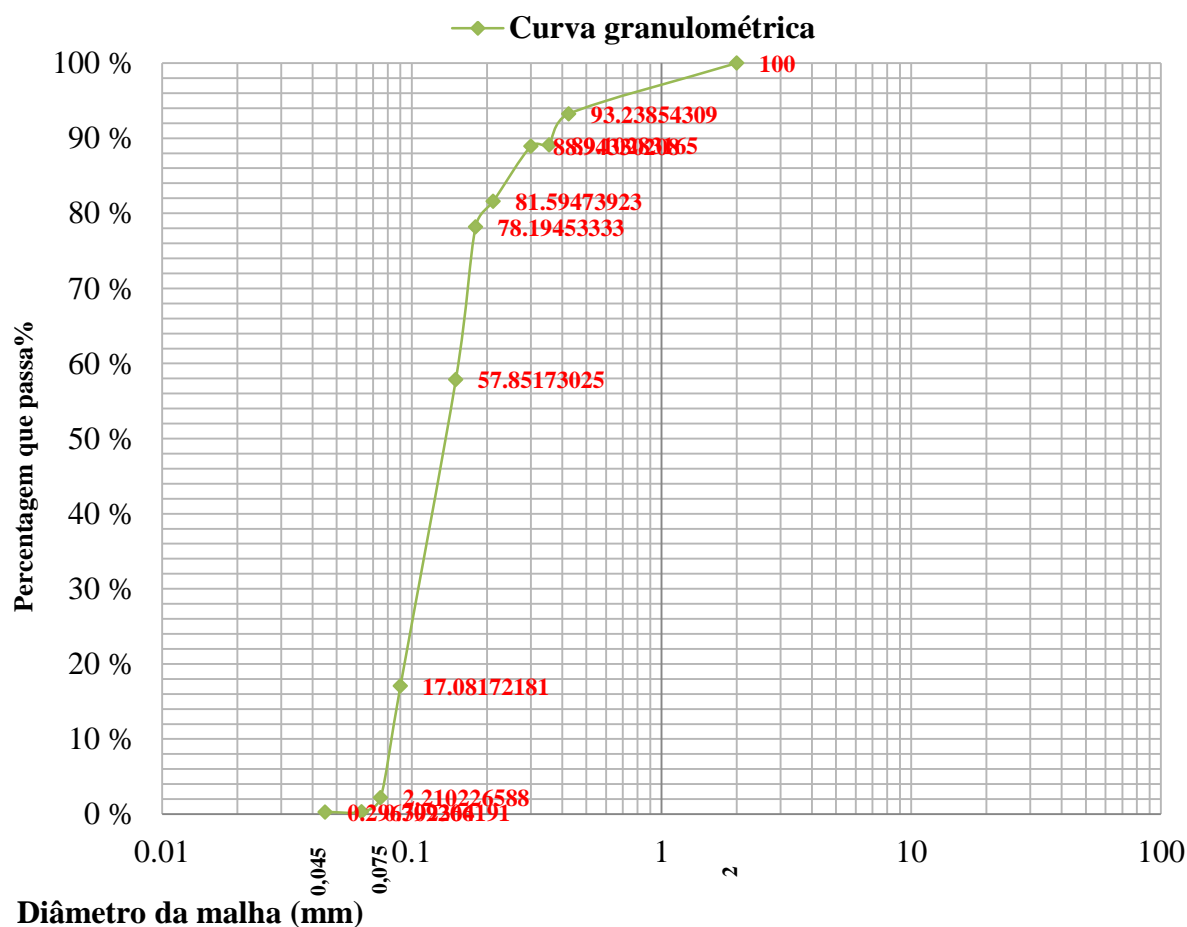


Gráfico A 3– Curva granulométrica do Ponto 1, amostra 1 (Autor, 2022).

### RESULTADOS DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (ANÁLISE DAS DIMENSÕES DE SEDIMENTOS).

Tabela A3: Resultados da análise das dimensões de sedimentos. Processo dos Crivos. Ponto 2 (Amostra 2)

Peneira (mm)	Massa Retida na Peneira (g)	% Retida na Peneira	% Retida Acumulada	% Passante
2	0	0	0	100
0.425	10.311	8.709203325	8.709203325	91.29079668
0.355	19.407	16.39215488	25.1013582	74.8986418
0.3	0.768	0.648692479	25.75005068	74.24994932
0.212	11.647	9.83765795	35.58770863	64.41229137
0.18	2.924	2.46976147	38.0574701	61.9425299
0.15	25.562	21.59098588	59.64845598	40.35154402

0.09	36.574	30.89229002	90.540746	9.459254004
0.075	5.427	4.583924589	95.12467059	4.875329414
0.063	3.106	2.623488074	97.74815866	2.251841341
0.045	1.822	1.538955335	99.28711399	0.712886006
<0,045	0.844	0.712886006	100	0
Total	118.392	100		

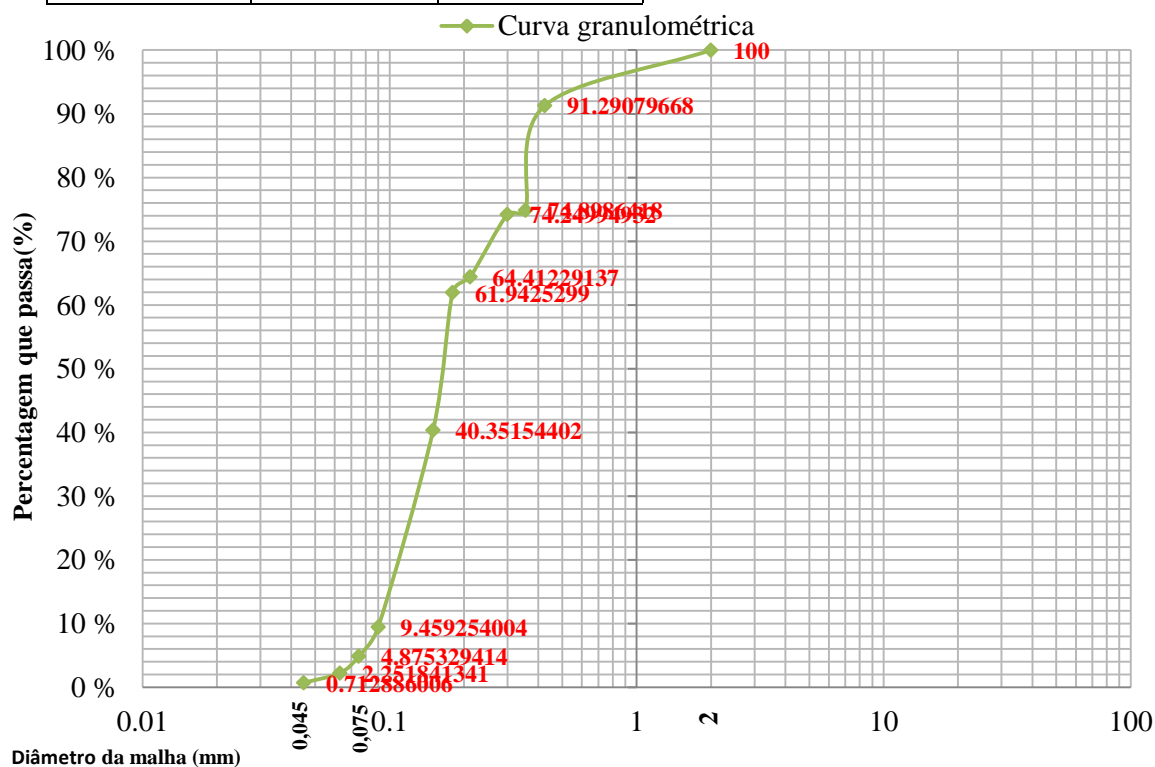


Gráfico A4– Curva granulométrica do Ponto 2, amostra 2. (Autor, 2022).

## RESULTADOS DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (ANÁLISE DAS DIMENSÕES DE SEDIMENTOS).

Tabela A4: Resultados da análise das dimensões de sedimentos. Processo dos Crivos. Ponto 3 (Amostra 3).

Peneira (mm)	Massa Retida na Peneira (g)	% Retida na Peneira	% Retida Acumulada	% Passante
2	0	0	0	100
0.425	9.087	8.46373086	8.46373086	91.53626914
0.355	5.514	5.135799709	13.59953057	86.40046943
0.3	0.405	0.377221415	13.97675198	86.02324802



0.212	9.069	8.446965463	22.42371745	77.57628255
0.18	2.65	2.468238888	24.89195634	75.10804366
0.15	12.849	11.96769867	36.85965501	63.14034499
0.09	40.6	37.81528259	74.6749376	25.3250624
0.075	21.802	20.30662047	94.98155806	5.018441936
0.063	3.598	3.351216423	98.33277449	1.667225513
0.045	1.215	1.131664245	99.46443873	0.535561268
<0,045	0.575	0.535561268	100	0
Total	107.364	100		

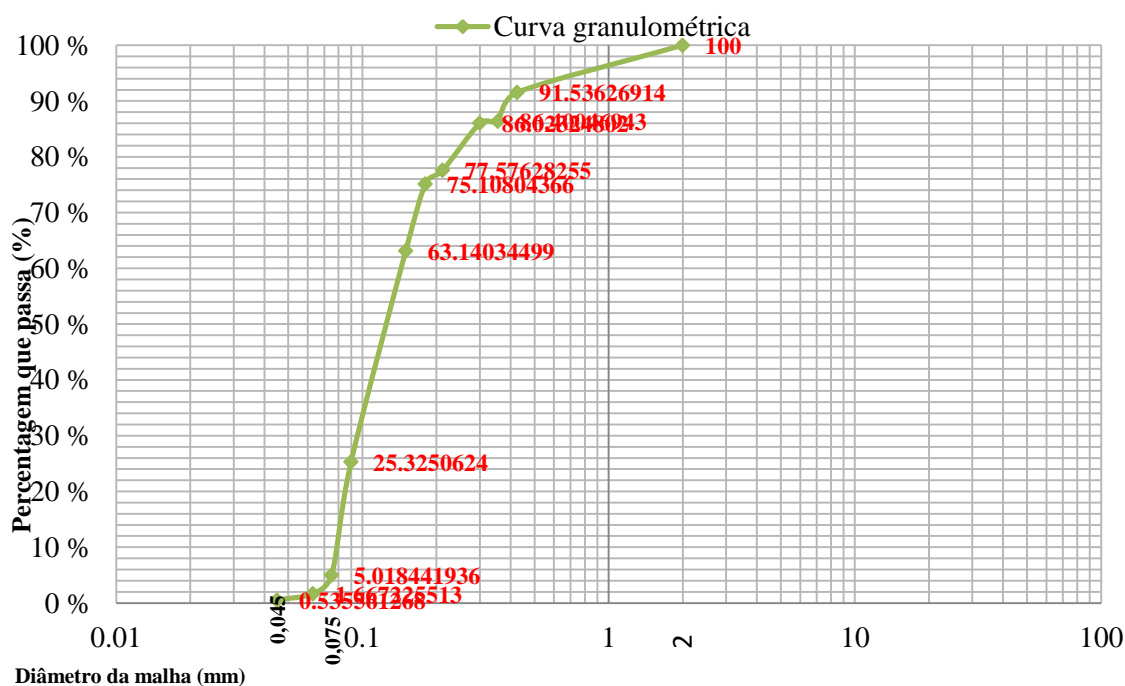


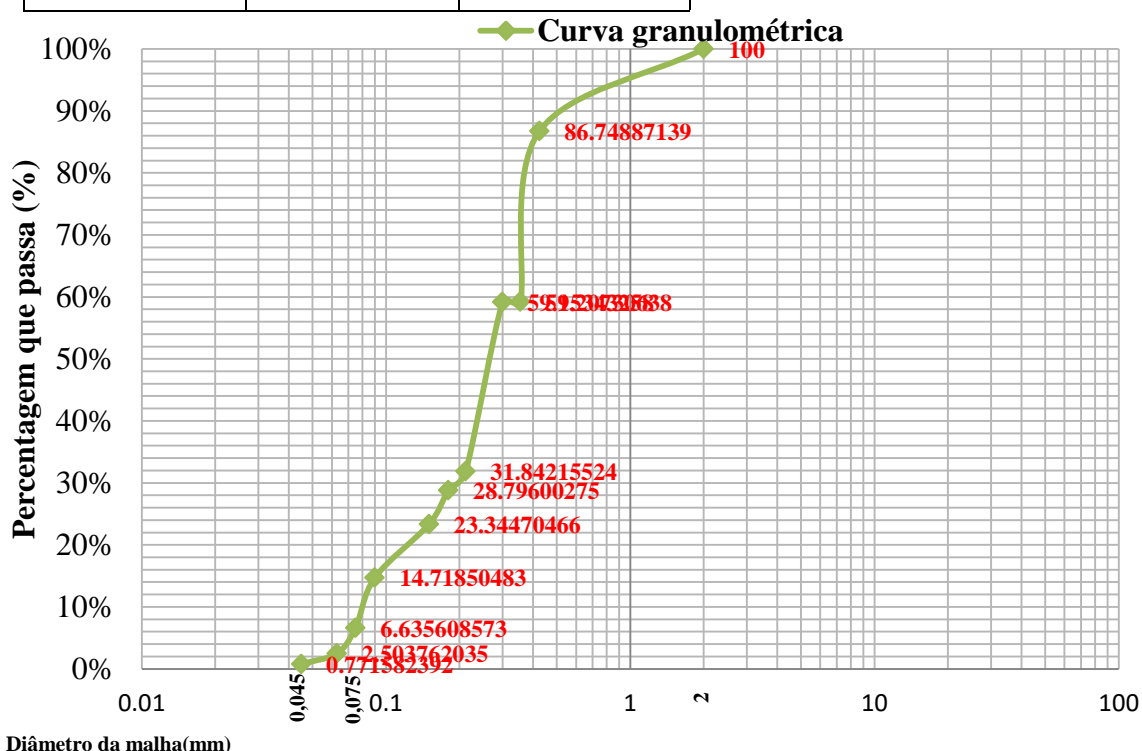
Gráfico A5-Curva granulométrica do Ponto 3 (Amostra 3) (Autor, 2022).

## RESULTADOS DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (ANÁLISE DAS DIMENSÕES DE SEDIMENTOS).

Tabela A5: Resultados da análise das dimensões de sedimentos. Processo dos Crivos. Ponto 6 (Amostra 6).

Peneira (mm)	Massa Retida na Peneira (g)	% Retida na Peneira	% Retida Acumulada	% Passante
2	0	0	0	100
0.425	14.512	13.25112861	13.2511286	86.7488714
0.355	30.1622	27.54156501	40.7926936	59.2073064

0.3	0.059	0.0538738	40.8465674	59.1534326
0.212	29.91	27.31127734	68.1578448	31.8421552
0.18	3.336	3.046152498	71.2039973	28.7960027
0.15	5.97	5.451298085	76.6552953	23.3447047
0.09	9.447	8.626199833	85.2814952	14.7185048
0.075	8.852	8.082896255	93.3643914	6.63560857
0.063	4.525	4.131846538	97.496238	2.50376203
0.045	1.897	1.732179643	99.2284176	0.77158239
<0,045	0.845	0.771582392	100	0
Total	109.5152	100		



**Gráfico A6**– Curva granulométrica da Ponto 6, amostra 6(Autor, 2022).

## RESULTADOS DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA(ANÁLISE DAS DIMENSÕES DE SEDIMENTOS).

**Tabela A6:**Resultados da análise das dimensões de sedimentos. Processo dos Crivos. Ponto 7 (Amostra 7)

Peneira (mm)	Massa Retida na Peneira (g)	% Retida na Peneira	% Retida Acumulada	% Passante
2	0	0	0	100

0.425	12.119	10.73627513	10.73627513	89.26372
0.355	6.659	5.899237236	16.63551236	83.36449
0.3	0.157	0.139086987	16.77459935	83.2254
0.212	7.688	6.810832839	23.58543219	76.41457
0.18	1.403	1.242923839	24.82835603	75.17164
0.15	6.78	6.006431666	30.83478769	69.16521
0.09	23.585	20.8940547	51.72884239	48.27116
0.075	24.098	21.34852364	73.07736603	26.92263
0.063	23.142	20.50159906	93.57896509	6.421035
0.045	6.198	5.490835319	99.06980041	0.9302
<0,045	1.05	0.930199594	100	0
Total	112.879	100		

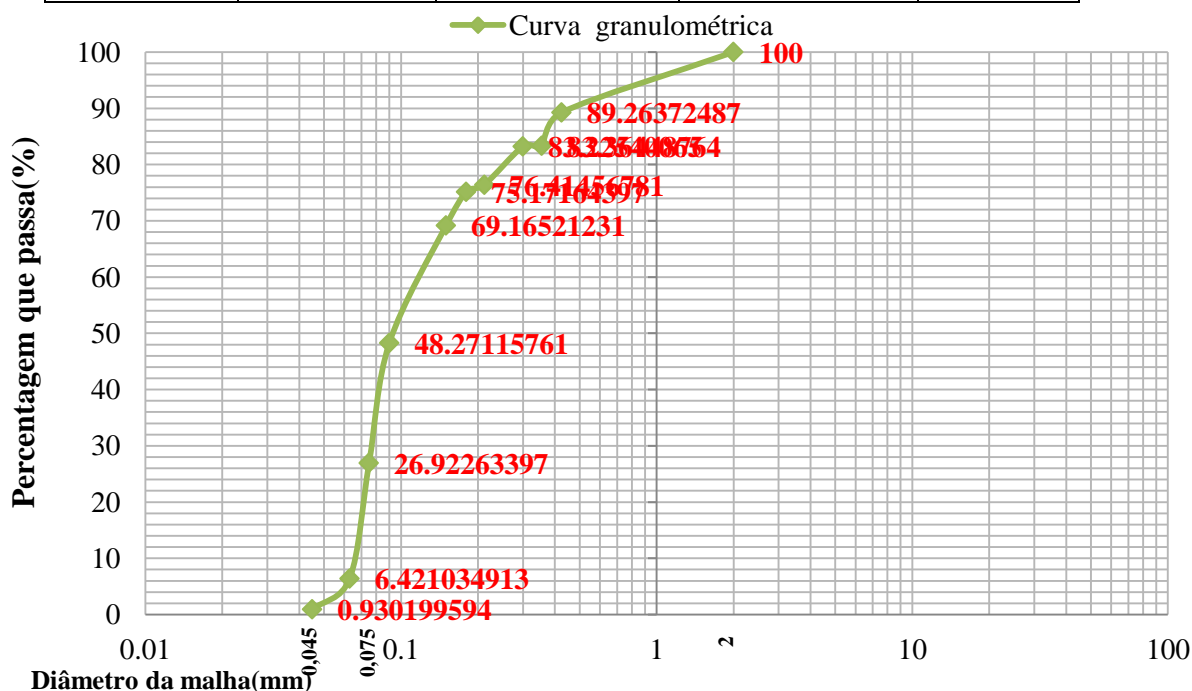


Gráfico A7– Curva granulométrica da Ponto 7, amostra 7(Autor, 2022).

### RESULTADOS DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (ANÁLISE DAS DIMENSÕES DE SEDIMENTOS).

Tabela A7: Resultados da análise das dimensões de sedimentos. Processo dos Crivos. Ponto 8 (Amostra 8)

Peneira (mm)	Massa Retida na Peneira (g)	% Retida na Peneira	% Retida Acumulada	% Passante
2	0	0	0	100

0.425	51.4685	44.57710279	44.57710279	55.42289721
0.355	19.227	16.65259247	61.22969526	38.77030474
0.3	5.047	4.371229739	65.600925	34.399075
0.212	13.984	12.11160623	77.71253123	22.28746877
0.18	6.031	5.22347663	82.93600786	17.06399214
0.15	8.918	7.723920509	90.65992837	9.340071627
0.09	6.519	5.646135658	96.30606403	3.693935969
0.075	0.985	0.853112996	97.15917703	2.840822973
0.063	1.471	1.274039815	98.43321684	1.566783158
0.045	1.182	1.023735596	99.45695244	0.543047562
<0,045	0.627	0.543047562	100	0
Total	115.4595	100		

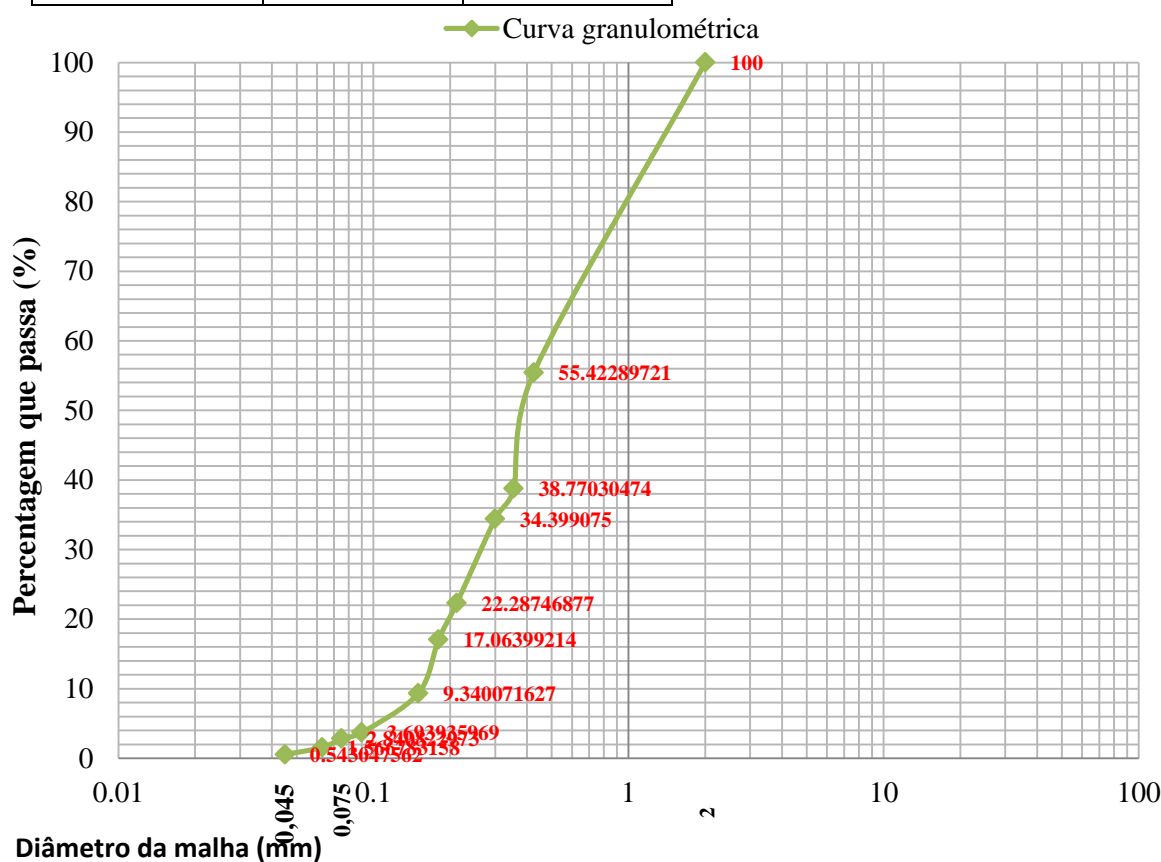


Gráfico A8-Curva granulométrica da Ponto 8 (Amostra 8) (Autor, 2022).

## RESULTADOS DE ENSAIO DO LIMITE PLÁSTICO (LP) .

Tabela A8:Dados de cálculos do ensaio do LP da amostra 01

Determinação n°		1	2	3	LP=27%
Cápsula n°		A	B	C	
1	Massa da cápsula (g)	16.573	16.788	15.174	
2	Cápsula +amostra humidade (g)	19.274	19.053	18.136	

3	Cápsula +amostra seca (g)	18.689	18.576	17.534
4	Massa de água= (2) -(3)	0.585	0.477	0.602
5	Massa de solo =(3) - (1)	2.116	1.788	2.36
6	Humidade (%)=4/5)*100%	27.6465	26.6779	25.5085

Fonte: (Autor, 2022).

## RESULTADOS DE ENSAIO DO LIMITE PLÁSTICO (LP) .

Tabela A1:Dados de cálculos do ensaio do LP da amostra 02

Determinação n°		1	2	3	LP=27%
Cápsula n°		A	B	C	
1	Massa da cápsula (g)	37.538	37.605	37.558	
2	Cápsula +amostra humidade (g)	39.147	40.439	39.306	
3	Cápsula +amostra seca (g)	38.806	39.82	38.945	
4	Massa de água= (2) - (3)	0.341	0.619	0.361	
5	Massa de solo =(3) -(1)	1.268	2.215	1.387	
6	Humidade (%)=4/5)*100%	26.8927	27.9458	26.0274	

Fonte: Autor (2022).

Tabela A9:Dados e cálculos do ensaio do LP da amostra 03

Determinação n°		1	2	3	LP=26%
Cápsula n°		A	B	C	
1	Massa da cápsula (g)	31.912	32.085	37.468	
2	Cápsula +amostra humidade (g)	34.522	33.905	40.095	
3	Cápsula +amostra seca (g)	34.002	33.533	39.554	
4	Massa de água= (2) -(3)	0.52	0.372	0.541	
5	Massa de solo =(3) -(1)	2.09	1.448	2.086	
6	Humidade (%)=4/5)*100%	24.8804	25.6906	25.9348	

Fonte: Autor (2022)..

Tabela A10:Dados e cálculos do ensaio do LP da amostra 07

Determinação n°		1	2	3	LP=25%
Cápsula n°		A	B	C	
1	Massa da cápsula (g)	32.108	32.108	31.772	
2	Cápsula +amostra humidade (g)	33.445	34.172	34.682	
3	Cápsula +amostra seca (g)	33.162	33.757	34.116	
4	Massa de água= (2) -(3)	0.283	0.415	0.566	
5	Massa de solo =(3) - (1)	1.054	1.649	2.344	

<b>6</b>	<b>Humidade (%)=4/5)*100%</b>	26.8501	25.1668	24.1468
----------	-------------------------------	---------	---------	---------

Fonte: Autor (2022).

## RESULTADOS DE ENSAIO DO LIMITE PLÁSTICO (LP) .

Tabela A11:Dados e cálculos do ensaio do LP da amostra 08

Determinação n°		1	2	3	LP=31%
Cápsula n°		A	B	C	
1	Massa da cápsula (g)	15.122	16.867	16.73	
2	Cápsula +amostra humidade (g)	17.238	19.240	19	
3	Cápsula +amostra seca (g)	16.734	18.678	18.459	
4	Massa de água= (2) -(3)	0.504	0.562	0.541	
5	Massa de solo =(3) -(1)	1.612	1.811	1.729	
6	Humidade (%)=4/5)*100%	31.2655	31.0326	31.2898	

Fonte: Autor (2022).

## RESULTADOS DE ENSAIO DE INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

### 1. Dados de ensaio de infiltração do ponto n°7

Tabela A12:Dados de ensaio de infiltração no campo: Ensaio no ponto n°7

Tempo de leitura (min)		Infiltração (cm)		
Tempo	Tempo acumulado	Leitura	Reposição	Água Infiltrada
0	0	14		0
1	1	13		1
1	2	11		2
2	4	8,5	14	2,5
3	7	11		3
3	10	7,5	14	3,5
10	20	13,7		0,3
10	30	13		0,7
10	40	12,7		0,3
15	55	11,8		0,9
15	70	11,5		0,3

15	85	11		0,5
20	105	10,5		0,5
20	125	10		0,5
20	145	9,5		0,5

Fonte: (Autor,2022).

A taxa de infiltração obtida no campo é representada graficamente em função do tempo:

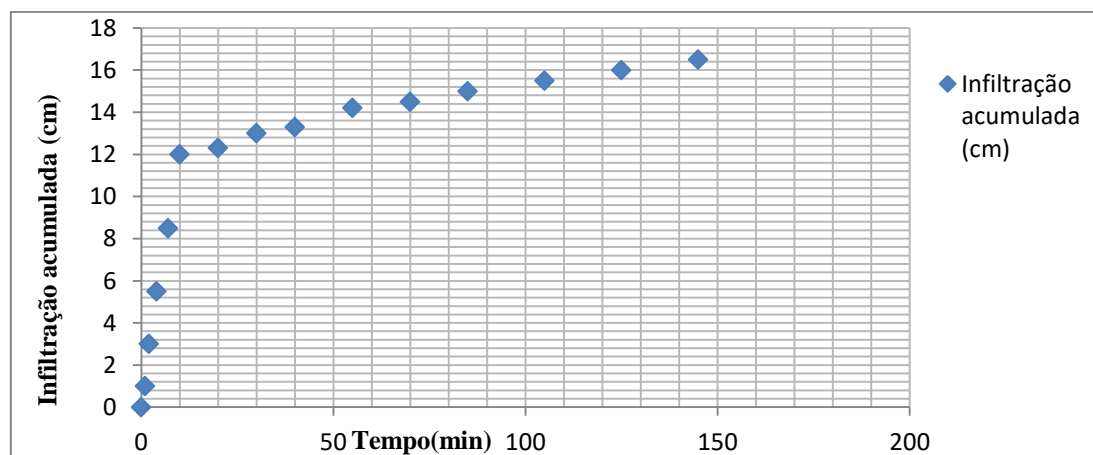


Figura 1: Gráfico de infiltração acumulada em função do tempo. Ensaio ponto n° 7. Fonte: (Autor,2022).

### 1.1. Coeficientes da equação de infiltração de Kostiakov: Ensaio ponto n° 7.

O somatório referente aos coeficientes de regressão linear do método de Kostiakov é disposto:

Tabela A13: Valores da regressão linear do método de Kostiakov. Ensaio ponto n° 7

Tac	Iac	Y=log Iac	X= Log T ac	X.Y	X <sup>2</sup>
0	0	-	-	-	-
1	1	0	0	0	0
2	3	0,477121255	0,301029996	0,143627809	0,020628948
4	5,5	0,740362689	0,602059991	0,445742754	0,198686603
7	8,5	0,929418926	0,84509804	0,785450112	0,616931879
10	12	1,079181246	1	1,079181246	1,164632162
20	12,3	1,089905111	1,301029996	1,417999242	2,010721851
30	13	1,113943352	1,477121255	1,645429402	2,707437918
40	13,3	1,123851641	1,602059991	1,80047775	3,241720129

55	14,2	1,152288344	1,740362689	2,005399642	4,021627725
70	14,5	1,161368002	1,84509804	2,142837825	4,591753943
85	15	1,176091259	1,929418926	2,269172734	5,149144895
105	15,5	1,190331698	2,021189299	2,405885691	5,788285957
125	16	1,204119983	2,096910013	2,524931248	6,37527781
145	16,5	1,217483944	2,161368002	2,63143084	6,924428267
$\Sigma$		<b>13,65546745</b>	<b>18,92274624</b>	<b>21,2975663</b>	<b>42,81127809</b>

Fonte: (Autor, 2022).

A partir das equações de regressão foi possível encontrar os valores de “A” e “B” e por consequência os parâmetros “k” e “a”

**Tabela A14:**Parâmetro de infiltração do ensaio do ponto n ° 7

A	B	K	a
0.915	0.093	8.222	0.093

Fonte: (Autor, 2022).

Quando aplicados os parâmetros resultaram:

- Equação potencial de Kostiakov:**  $I = 8.222 * T^{0.093}$
- Velocidade de infiltração instantânea:**  $VI = 0.765 * T^{-0.907}$
- Velocidade de infiltração média:**  $VI_m = 8.222 * T^{-0.907}$
- Velocidade de infiltração básica (VIB):** 8.719 mm/h.

A velocidade de infiltração básica (VIB) no ensaio ponto n ° 7 é classificada como: média.

## RESULTADOS DE ENSAIO DE INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

### Dados de ensaio de infiltração do ponto n ° 8.

**Tabela A15:**Dados de ensaio de infiltração no campo: Ensaio ponto n ° 8

Tempo de leitura (min)		Infiltração (cm)		
Tempo	Tempo Acumulado	Leitura na régua	Reposição	Água Infiltrada
0	0	14		0

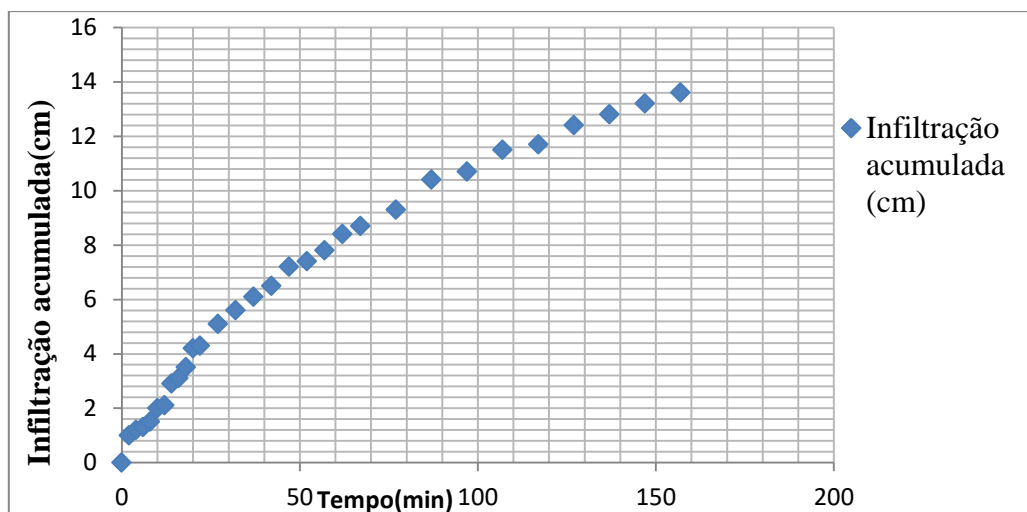


Dedução da capacidade de Armazenamento de Água do Solo e Subsolo em Pico de Cheia e a Funcionalidade das Unidades Geomorfológicas ao longo do Rio Limpopo

2	2	13		1
2	4	12,8		0,2
2	6	12,7		0,1
2	8	12,5		0,2
2	10	12		0,5
2	12	11,9		0,1
2	14	11,1		0,8
2	16	10,9		0,2
2	18	10,5		0,4
2	20	9,8		0,7
2	22	9,7	14	0,1
5	27	13,2		0,8
5	32	12,7		0,5
5	37	12,2		0,5
5	42	11,8		0,4
5	47	11,1		0,7
5	52	10,9		0,2
5	57	10,5		0,4
5	62	9,9		0,6
5	67	9,6	14	0,3
10	77	13,4		0,6
10	87	12,3		1,1
10	97	12		0,3
10	107	11,2		0,8
10	117	11		0,2
10	127	10,3		0,7
10	137	9,9		0,4
10	147	9,5		0,4
10	157	9,1		0,4

Fonte: (Autor,2022).

A taxa de infiltração obtida no campo é representada graficamente em função do tempo na página seguinte:



**Figura 2:** Gráfico de infiltração acumulada em função do tempo, Ensaio ponto n° 8. Fonte: (Autor, 2022)

### 2.1. Coeficientes da equação de infiltração de Kostiakov: Ensaio ponto n° 8.

O somatório referente aos coeficientes de regressão linear do método de Kostiakov é disposto:

**Tabela A 16:** Valores da regressão linear do método de Kostiakov. Ensaio ponto n° 8

Tac	Iac	Y=log Iac	X= Log Tac	X.Y	X <sup>2</sup>
0	0	-	-	-	-
2	1	0	0,30103	0	0,090619
4	1,2	0,079181	0,60206	0,047672	0,362476
6	1,3	0,113943	0,778151	0,088665	0,605519
8	1,5	0,176091	0,90309	0,159026	0,815572
10	2	0,30103	1	0,30103	1
12	2,1	0,322219	1,079181	0,347733	1,164632
14	2,9	0,462398	1,146128	0,529967	1,313609
16	3,1	0,491362	1,20412	0,591658	1,449905
18	3,5	0,544068	1,255273	0,682954	1,575709
20	4,2	0,623249	1,30103	0,810866	1,692679
22	4,3	0,633468	1,342423	0,850382	1,802099
27	5,1	0,70757	1,431364	1,01279	2,048802
32	5,6	0,748188	1,50515	1,126135	2,265476
37	6,1	0,78533	1,568202	1,231556	2,459257
42	6,5	0,812913	1,623249	1,319561	2,634938

47	7,2	0,857332	1,672098	1,433544	2,795911
52	7,4	0,869232	1,716003	1,491605	2,944667
57	7,8	0,892095	1,755875	1,566406	3,083097
62	8,4	0,924279	1,792392	1,656671	3,212668
67	8,7	0,939519	1,826075	1,715632	3,334549
77	9,3	0,968483	1,886491	1,827034	3,558847
87	10,4	1,017033	1,939519	1,972556	3,761735
97	10,7	1,029384	1,986772	2,045151	3,947262
107	11,5	1,060698	2,029384	2,152563	4,118399
117	11,7	1,068186	2,068186	2,209207	4,277393
127	12,4	1,093422	2,103804	2,300345	4,42599
137	12,8	1,10721	2,136721	2,365798	4,565575
147	13,2	1,120574	2,167317	2,428639	4,697264
157	13,6	1,133539	2,1959	2,489138	4,821975
	$\Sigma$	<b>20,882</b>	<b>44,31699</b>	<b>36,75428</b>	<b>74,82663</b>

Fonte: (Autor, 2022).

A partir das equações de regressão foi possível encontrar os valores de “A” e “B” e por consequência os parâmetros “k” e “a”:

**Tabela A17:** Parâmetro de infiltração do ensaio do ponto n ° 8

<b>A</b>	<b>B</b>	<b>K</b>	<b>a</b>
-0.506	0.791	0.312	0.791

Fonte: (Autor, 2022).

Quando aplicados os parâmetros resultaram:

- Equação potencial de Kostiakov:**  $I = 0.312 * T^{0.791}$
- Velocidade de infiltração instantânea:**  $VI = 0.247 * T^{-0.209}$
- Velocidade de infiltração média:**  $VI_m = 0.312 * T^{-0.209}$
- Velocidade de infiltração básica (VIB):** 54.856mm/h

A velocidade de infiltração básica (VIB) no ensaio ponto n ° 8 é classificada como: muito alta.

### **CLASSIFICAÇÃO DO RELEVO BASEADA AS CLASSES DE ALTITUDE.**

**Tabela A 18:** Classificação o do relevo baseada as classes de altitude

<b>Altitude (m)</b>	>300	100-200	50-100	<50
<b>Descrição</b>	Montanhas	Morros	Outeiros	Colinas

Fonte: (Guerra citado por Paulo, 2003).

## CLASSIFICAÇÃO DO RELEVO BASEADA CLASSES DE DECLIVIDADE.

Tabela A19: Classificação do relevo baseada classes de declividade

Declividade (%)	0-3	3-8	8-20	20-45	45-75	>75
Descrição	Plano	Suave-ondulado	Ondulado	Forte-ondulado	Montanhoso	Forte montanhoso

Fonte: (Manual Técnico de Geomorfologia, 2009).

## RESULTADOS DA SEPARAÇÃO DO ESCOAMENTO BASE PELO FILTRO DE ECKHARDT.

Tabela A20: Parâmetros da separação de escoamento de base pelo Filtro de Eckhardt(2005)

PERÍODO/ANO	Parâmetros				
	Q90	Q50	Bfmax	k(dias)	a
Período crítico (2000)	118.23	362.99	0.49	69	0.99
Período não crítico (2020)	0.43	7.99	0.26	4	0.8

Fonte: (Autor, 2022).

## MAPA DE MANCHA DE INUNDAÇÃO



Figura 3: Mancha de inundação para tempo de retorno de 50 anos na Bacia hidrográfica do Limpopo (Troço Açude de Macarretane-Ponte de Guija). Fonte: (Autor, 2022)



## MAPA DE DIRECÇÃO DO FLUXO DE ÁGUA DA ÁREA DE ESTUDO

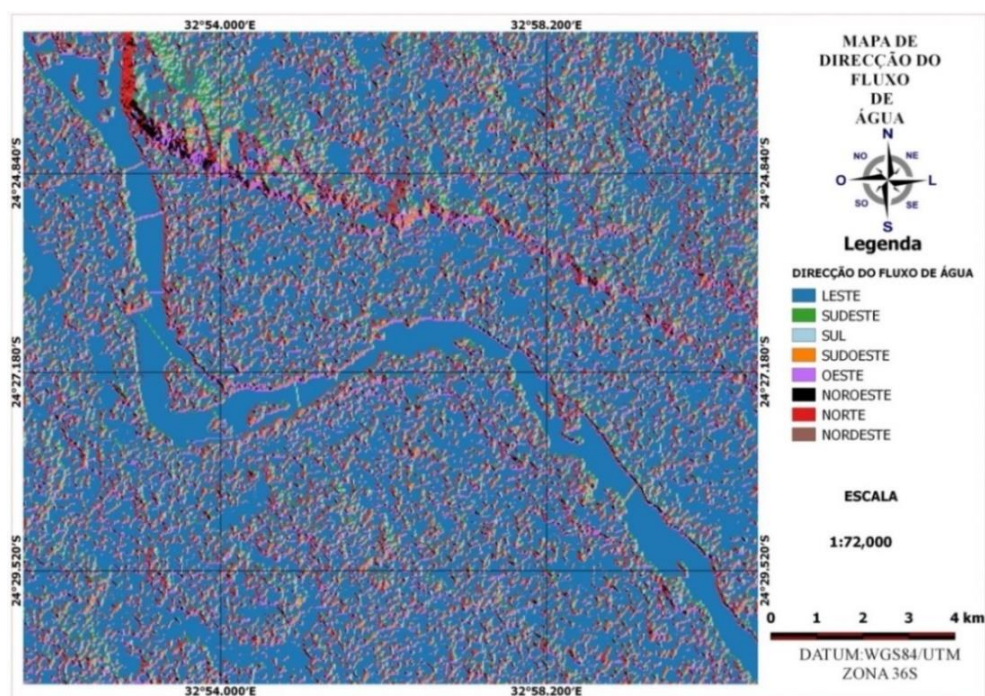


Figura 4: Mapa de direcção do fluxo de água da área de estudo. Fonte: (Autor, 2022).

## IMAGEM ILUSTRANDO ALGUMAS IRREGULARIDADES AO LONGO DO TROÇO



Figura 5: Imagem ilustrando algumas irregularidades num dos pontos ao longo do troço de estudo. Fonte: (Autor, 2022).