UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS AMBIENTAIS

GEISE MACEDO DOS SANTOS

ANÁLISE DAS CONDICIONANTES AMBIENTAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DE SAN IDELFONSO – PROVÍNCIA DE TRUJILLO, PERU

CAXIAS DO SUL
2021

GEISE MACEDO DOS SANTOS

ANÁLISE DAS CONDICIONANTES AMBIENTAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DE SAN IDELFONSO – PROVÍNCIA DE TRUJILLO, PERU

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências Ambientais do Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências Ambientais, da Universidade de Caxias do Sul-RS.

Orientação: Prof.ª Dr.ª Vania Elisabete Schneider
Coorientação: Prof. Dr. Taison Anderson Bortolin

CAXIAS DO SUL
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

S237a Santos, Geise Macedo dos
Análise das condicionantes ambientais da bacia hidrográfica de San Idelfonso - província de Trujillo, Peru [recurso eletrônico] / Geise Macedo dos Santos. – 2021.
Dados eletrônicos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais, 2021.
Orientação: Vania Elisabete Schneider.
Coorientação: Taison Anderson Bortolin.
Modo de acesso: World Wide Web
Disponível em: https://repositorio.ucs.br

1. Impactos ambientais. 2. Zoneamento ambiental. 3. Bacias hidrográficas. I. Schneider, Vania Elisabete, orient. II. Bortolin, Taison Anderson, coorient. III. Título.

CDU 2. ed.: 504.4

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)
Carolina Machado Quadros - CRB 10/2236

GEISE MACEDO DOS SANTOS

ANÁLISE DAS CONDICIONANTES AMBIENTAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DE SAN IDELFONSO – PROVÍNCIA DE TRUJILLO, PERU

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências Ambientais do Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências Ambientais, da Universidade de Caxias do Sul-RS.

Orientação: Prof.ª Dr.ª Vania Elisabete Schneider
Coorientação: Prof. Dr. Taison Anderson Bortolin

Aprovada em 09/12/2021

Banca Examinadora

_____
Prof.ª Dr.ª Vania Elisabete Schneider
Universidade de Caxias do Sul

_____
Prof. Dr. Taison Anderson Bortolin
Universidade de Caxias do Sul

_____
Prof.ª Dr.ª Gisele Cemin
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Juliano Rodrigues Gimenez
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Ludmilson Abritta Mendes
Universidade Federal de Sergipe

Prof.ª Msc. Janet Edith Gonzáles Valdivia
Universidad Católica de Trujillo

Dedico este trabalho aos meus pais Ailto e Nalva, que me incentivaram ao longo de toda minha vida a alcançar bons resultados, à minha irmã Camila, como forma de incentivo e meu companheiro Lucas, por estar ao meu lado durante este processo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores Drª. Vania Elisabete Schneider e Dr. Taison Anderson Bortolin pelo auxílio na elaboração deste trabalho. Agradeço também o auxílio recebido da *Universidad Católica de Trujillo*, em especial a Msc. Janet Edith Gonzáles Valdivia e a irmã Adelia Dannus. Agradeço ainda ao PPGECAM e a Universidade de Caxias do Sul. Por fim, agradeço todos que contribuíram de forma direta e indireta para esse trabalho.

RESUMO

As motivações para o estabelecimento de uma comunidade em determinada região podem ser diversas. Na América do Sul, especialmente no Peru, pelo desconhecimento do histórico das áreas, nem sempre o posicionamento das localidades se mostrou o mais adequado. A omissão da variável ambiental apresenta efeitos negativos até os dias atuais. É o caso da província de Trujillo no Peru, onde o desenvolvimento urbano se deu sobre o leito de um rio intermitente, o qual quando ativado em eventos de precipitação elevada causa além de corrida de detritos, a inundação da área urbana. As consequências alcançam não apenas o nível ambiental, mas econômico e social, desde que além dos detritos provenientes da área montanhosa da bacia, são arrastados também resíduos sólidos dispostos irregularmente ao longo do leito, juntos, os sedimentos, os resíduos e a água, alcançam a área urbana de Trujillo. Atualmente é possível pensar em mitigação ou eliminação das consequências desses eventos e ao menos a compreensão dos eventos. Com o apoio das geotecnologias e modelagens pode-se compreender a dinâmica global dessas situações e modelar as respostas com o intuito solucionar ou ao menos minimizar a problemática. Neste trabalho foram utilizados dados históricos de precipitação, composição da área, evolução do uso e cobertura do solo e relevo, que são dados diretamente relacionados a condição ambiental da bacia e serviram de entrada para as modelagens de precipitação-vazão, estabilidade de encostas e mancha de inundação. A posterior união de todos os dados de caracterização, incluindo materiais bibliográficos, deram origem a uma proposta de zoneamento ambiental para a bacia. A caracterização da bacia indica variação acentuada altitude na zona montanhosa, com declividades igualmente acentuadas. A parte montanhosa da bacia, onde nascem os rios intermitentes é composta majoritariamente por granodiorita, um material altamente fragmentável. E o nível freático, mesmo na montanha, possui grande variação e rápida saturação. O uso do solo ao longo do tempo variou na zona de planície, sendo convertido desordenadamente em área urbana. Com relação a estabilidade de encostas, 3% da área da bacia (0,33 km²) são classificados como incondicionalmente instável, não-saturado, nas áreas onde há o acúmulo dos sedimentos. Considerando os dados de precipitação (1963-2019), observou-se o incremento de precipitação ao longo do tempo. Os resultados do HEC-RAS se apresentaram inconclusivos, pela ausência de dados de vazão para a bacia e comportamento intermitente do fluxo. A requalificação do zoneamento da bacia possui ações de baixa a alta complexidade, que em conjunto têm potencial para minimizar os impactos das inundações. Conclui-se que a condição ambiental da bacia frente aos eventos de *El Niño* é crítica, pois os fatores que compõem antropicamente e naturalmente a bacia, já isoladamente contribuem para as inundações. E compreende-se a necessidade de ações que minimizem esses impactos, sugeridas através do zoneamento ambiental. Sugere-se ainda a elaboração do diagnóstico das demais quebradas que alcançam os distritos da província de Trujillo.

Palavras-chave: Avaliação de impactos ambientais. HEC-RAS. *Huaicos*. Uso e ocupação do solo. Zoneamento Ambiental.

ABSTRACT

The motivations for establishing a community in a particular region can be diverse. In South America, especially in Peru, due to the lack of knowledge of the history of the areas, the positioning of the settlements was not always the most adequate. The omission of the environmental variable has negative effects up to the present day. This is the case in the province of Trujillo in Peru, where urban development has taken place on the riverbed of an intermittent river, which, when activated in events of high rainfall, causes, in addition to debris flow, the flooding of the urban area. The consequences reach not only the environmental level, but also the economic and social one, since in addition to the debris coming from the mountainous area of the basin, solid residues are also dragged along the riverbed, together with sediments, residues, and water to the urban area of Trujillo. It is currently possible to think about mitigating or eliminating the consequences of these events and at least understanding the events. With the support of geotechnologies and modeling, it is possible to understand the dynamics of these situations and model the responses to solve or at least minimize the problem. In this work, historical data on precipitation, area composition, evolution of land use and land cover and relief were used, which are directly related to the environmental condition of the basin and served as input for the precipitation-flow, slope stability and flood modeling. The subsequent union of all characterization data, including bibliographic materials, gave rise to a proposal for environmental zoning for the basin. The characterization of the basin indicates a marked variation in altitude in the mountainous area, with equally accentuated slopes. The mountainous part of the basin, where intermittent water resources originate, is mostly composed of grandiorite, a highly fragmentable material. And the groundwater, even in the mountains, has great variation and rapid saturation. The land use over time varied in the plain area, being disorderly converted into an urban area. Regarding slope stability, 3% of the basin area (0.33 km^2) is classified as unconditionally unstable, unsaturated, in areas where there is accumulation of sediment. Considering the precipitation data (1963-2019), there was an increase in precipitation over time. The results of the HEC-RAS were inconclusive, due to the lack of flow data for the basin and intermittent flow behavior. The requalification of the zoning of the basin has actions of low to high complexity, which together have the potential to minimize the impacts of flooding. It is concluded that the environmental condition of the basin in face of El Niño events is critical, as the factors that anthropically and naturally make up the basin, already contribute to flooding separately. And it is understood the need for actions that minimize these impacts, suggested through environmental zoning. It is also suggested to prepare a diagnosis of the other quebradas that reach the districts of the province of Trujillo.

Keywords: Environmental impact assessment. HEC-RAS. *Huaicos*. Land use and land cover. Environmental zoning.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Área Inundada em Trujillo no ano de 2017 23
Figura 2. Correntes Marítimas na América do Sul 24
Figura 3. Exemplo do aquecimento das águas do Pacífico em decorrência do Fenômeno El Niño 25
Figura 4. Exemplo de huaico 27
Figura 5. Precipitação nos Fenômenos de El Niño em 1998 e 2017 28
Figura 6. Tipos de movimentos de massa 30
Figura 7. Huaico atingindo o centro urbano de Trujillo em 2017 31
Figura 8. Huaico alcançando o mar em Trujillo em 2017 32
Figura 9. Erosão costeira causada pelo mar 33
Figura 10. Muro de rochas para impedir o avanço da erosão costeira 33
Figura 11. Usos recorrentes do geoprocessamento 38
Figura 12. Fluxograma do geoprocessamento 38
Figura 13. Exemplo de utilização de sensoriamento remoto em inundações 41
Figura 14. O modelo em um estudo 43
Figura 15. Aproximação do modelo de estabilidade de encostas 44
Figura 16. Fluxograma metodológico 48
Figura 17. Estações do SENAMHI 50
Figura 18. Geocatmin, base de dados do INGEMMET 51
Figura 19. Aquisição de dados SRTM 52
Figura 20. Fluxograma de elaboração da hipsometria e declividade 52
Figura 21. Ecossistemas nacionais 54
Figura 22. Fluxograma de utilização do HEC-RAS 58
Figura 23. Mancha de inundação registrada em 2017 59
Figura 24. Fluxograma para a elaboração do zoneamento ambiental para a bacia de San Idelfonso 60
Figura 25. Localização da província de Trujillo 62
Figura 26. Localização da bacia de San Idelfonso 63
Figura 27. Resíduos sólidos ao longo do leito intermitente 65
Figura 28. Hipsometria da bacia de San Idelfonso 67
Figura 29. Declividade da bacia de San Idelfonso 68
Figura 30. Mapa Geomorfológico da bacia de San Idelfonso 69
Figura 31. Classificação geológica da bacia de San Idelfonso 71
Figura 32. Mapa Hidrogeológico da bacia de San Idelfonso 74
Figura 33. Precipitação Total Anual – Sinsicap 76
Figura 34. Precipitação Média Mensal Anual - Sinsicap 76
Figura 35. Precipitação Média Mensal - Sinsicap 77
Figura 36. Precipitação Máxima Mensal - Sinsicap 78
Figura 37. Histograma total anual - Sinsicap 78
Figura 38. Histograma mensal - Sinsicap 79
Figura 39. Tendenciosidade - Sinsicap 79

Figura 40. Precipitação total anual - Laredo 81
Figura 41. Precipitação média mensal anual - Laredo 81
Figura 42. Precipitação máxima mensal - Laredo 82
Figura 43. Precipitação média mensal - Laredo 82
Figura 44. Exemplificação da vegetação nativa peruana 84
Figura 45. Uso e cobertura do solo dos anos de 1975, 1985 e 1998 86
Figura 46 Uso e cobertura do solo dos anos de 1998, 2006 e 2016 87
Figura 47. Uso e cobertura do solo dos anos de 2017 e 2020 88
Figura 48. Estabilidade de encostas por Shalstab 92
Figura 49. Localização da estação de Laredo 94
Figura 50. Hidrograma para a bacia de San Idelfonso para o evento de março de 2017 95
Figura 51. Mancha de inundação de 2017 97
Figura 52. Fluxograma de testes do modelo 98
Figura 53. Edificação atingida 98
Figura 54. Mancha de inundação para a simulação 1D 99
Figura 55. Dique de contenção da *quebrada* de San Idelfonso ao longo do tempo 99
Figura 56. Zoneamento ambiental da bacia de San Idelfonso 103

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Propostas de mitigação dos impactos da precipitação decorrentes das quebrada de San Idelfonso 64
Quadro 2. Descrição e quantificação da classificação geológica da bacia de San Idelfonso ... 72
Quadro 3. Descrição da fitogeografia 83
Quadro 4. Quadro resumo 109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Condições de estabilidade do SHALSTAB 45
Tabela 2. Classificação do mapa pela metodologia SHALSTAB..... 55
Tabela 3. Hipsometria da bacia de San Idelfonso..... 66
Tabela 4. Declividade da bacia de San Idelfonso 68
Tabela 5. Geologia da bacia de San Idelfonso..... 71
Tabela 6. Estação de Sinsicap..... 75
Tabela 7. Estação de Laredo 80
Tabela 7. Quantificação do uso e cobertura do solo na província de Trujillo 89
Tabela 8. Uso e cobertura do solo na bacia de San Idelfonso 90
Tabela 9. Resultados numéricos da metodologia Shalstab 92
Tabela 10. Dados de precipitação da estação de Laredo entre 13/03/2017 e 22/03/2017 93
Tabela 11. Zoneamento Ambiental 104

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
1.1 OBJETIVO PRINCIPAL 16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 16

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17
2.1 GESTÃO AMBIENTAL E ORDENAMENTO TERRITORIAL 17
2.2 DESASTRES NATURAIS 22
2.2.1 Movimentos de massa e inundações 28
2.3 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL PERUANA 33
2.4 GEOTECNOLOGIAS 37
2.4.1 Geoprocessamento 37
2.5 MODELAGEM 41
2.5.1 Estabilidade de encostas 43
2.5.1.1 SHALSTAB 43
2.5.2 Modelos precipitação – vazão 46
2.5.2.1 HEC-HMS 46
2.5.3 Mancha de inundação 46
2.5.3.1 HEC-RAS 47

3 MATERIAIS E MÉTODOS 48
3.1 DADOS CLIMÁTICOS 48
3.2 GEOMORFOLOGIA, GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA 50
3.3 RELEVO 51
3.4 USO E COBERTURA DO SOLO 52
3.5 MODELAGENS 54
3.5.1 SHALSTAB 54
3.5.2 HEC-HMS 56
3.5.3 HEC-RAS 57
3.6 ZONEAMENTO AMBIENTAL 59

4 RESULTADOS 61
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA PROVÍNCIA DE TRUJILLO E DA BACIA DE SAN IDELFONSO 61
4.2 RELEVO DA BACIA DE SAN IDELFONSO 65
4.3 GEOMORFOLOGIA 69
4.4 GEOLOGIA DA BACIA DE SAN IDELFONSO 70
4.5 HIDROGEOLOGIA 73
4.6 PRECIPITAÇÃO 75
4.7 EVOLUÇÃO DO USO E COBERTURA DO SOLO 83
4.8 MODELAGENS NA BACIA HIDROGRÁFICA DE SAN IDELFONSO 90
4.8.1 SHALSTAB 90
4.8.2 HEC-HMS 93
4.8.3 HEC-HAS 95
4.9 PROPOSTA DE APROFUNDAMENTO DO ZONEAMENTO AMBIENTAL PARA A BACIA DE SAN IDELFONSO 100

CONSIDERAÇÕES FINAIS..... 108

REFERÊNCIAS 110

1 INTRODUÇÃO

As motivações para o estabelecimento de uma comunidade em determinada região podem ser diversas. Pensando na América, na época da colonização, os colonizadores buscavam a manutenção do território e posicionamento estratégico para sua defesa e movimentação de cargas por via marítima. Principalmente pelo desconhecimento do histórico das áreas, nem sempre essas escolhas se mostraram as mais adequadas. E a omissão da variável ambiental apresenta efeitos negativos até os dias atuais.

Este é o caso da província de Trujillo no Peru, onde o desenvolvimento urbano se deu sobre o leito de um rio intermitente, o qual quando ativado em eventos de precipitação elevada causa além de corrida de detritos, a inundação da área urbana. As consequências alcançam não apenas o nível ambiental, mas econômico e social. Desde que junto aos detritos são arrastados resíduos sólidos dispostos irregularmente ao longo do leito do rio, além das evidentes perdas econômicas, o aumento dos vetores de proliferação de doenças nestas situações é potencializado.

A província de Trujillo está localizada no caminho de três *quebradas*: Leon Dormido, San Carlos e San Idelfonso. Esta última ativada no último evento extremo que afetou a região em 2017. Apesar do registro ao longo do tempo de vários eventos de ativação das *quebradas*, associados ao fenômeno *El Niño*, o impacto devido à expansão urbana desordenada que se aproxima da montanha e disposição inadequada de resíduos, foi o maior registrado até então.

Além dos efeitos adversos das chuvas no interior do continente, as mudanças climáticas causaram uma variação no nível do mar que avança sobre a costa, o que requer proteções para evitar a perda de área. Os esforços locais para criar soluções para evitar novos desastres resultaram em planos inviáveis que consistem em soluções pontuais que não consideram todo o ecossistema. Dessa forma, o problema passaria apenas de uma área para outra, resultando em novos desastres de magnitude desconhecida. Portanto, a proposta de avaliação do cenário ambiental da área coberta pela bacia de San Idelfonso e proposição de soluções busca subsidiar a tomada de decisões sobre gestão e planejamento territorial na região.

Neste contexto destaca-se o zoneamento ambiental como ferramenta para ordenar a área de interesse com vistas a identificar as potencialidades e especialmente as fragilidades da área, para assim indicar ações que minimizem os impactos adversos da precipitação, no caso de Trujillo e da bacia hidrográfica de San Idelfonso.

As geotecnologias são ferramentas que podem auxiliar a tomada de decisões no sentido de mitigar as consequências desses eventos. As geotecnologias associadas a modelagem permitem compreender a dinâmica global dessas situações e modelar as respostas de intervenções realizadas com o intuito solucionar ou ao menos minimizar os problemas decorrentes do uso e ocupação do solo em áreas susceptíveis a eventos extremos como é o caso de Trujillo.

1.1 OBJETIVO PRINCIPAL

Analisar as condições ambientais da bacia hidrográfica de San Idelfonso com vistas ao ordenamento territorial da província de Trujillo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos estão identificados a seguir:

a) Caracterizar as principais variáveis ambientais relacionadas à problemática das inundações em Trujillo, Peru;
b) Analisar diferentes cenários de escoamento superficial na bacia para eventos hidrológicos distintos utilizando modelos hidrológicos e hidráulicos;
c) Elaborar uma proposta de zoneamento ambiental para a bacia de San Idelfonso com vistas a mitigação das inundações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A compressão da dinâmica envolvendo as inundações de centros urbanos passa pela abordagem dos temas de gestão ambiental e ordenamento territorial que permitem avaliar o uso do solo e suas ferramentas que auxiliam na organização do território, seguindo assim para a legislação pertinente ao tema. A discussão inclui também os desastres naturais, como conceitos, forças motrizes e histórico. Na sequência é importante conhecer ainda as ferramentas que podem ser utilizadas nessas situações, como ferramentas computacionais para a elaboração de cenários e regramentos para uso do solo, a exemplo do geoprocessamento e modelagem hidrológica.

2.1 GESTÃO AMBIENTAL E ORDENAMENTO TERRITORIAL

Problemas de saneamento e ocupação de áreas ambientalmente inadequadas são situações comuns nas cidades em que a ocupação do espaço se deu de forma desordenada. As alterações ocasionadas pela urbanização sobre o meio ambiente são realizadas de forma intensa e rápida, as quais normalmente não possibilitam a recuperação do ambiente. Essas alterações podem ser climáticas, como aumento de temperatura e precipitação, mas afetam principalmente as condições hidrológicas, através da impermeabilização do solo com consequente aumento do escoamento superficial e possibilidade de enchentes (SOUZA; OTTONI, 2003). O planejamento neste contexto pode contribuir para a remediação dos impactos ocasionados pelo uso e ocupação do solo.

A ação humana sobre o meio ambiente produz impactos, sejam eles positivos ou negativos, porém, para a manutenção de um ambiente equilibrado, as ações sobre o meio ambiente devem ser planejadas. A gestão ambiental é descrita como um braço da administração que busca reduzir os impactos das atividades econômicas sobre a natureza (ACADEMIA PEARSON, 2010).

Conforme Kilvington e Saunders (2019), normalmente, o planejamento atua para remediar os impactos causados pela urbanização inadequada, embora existam práticas de planejamento em áreas que considerem as condições ambientais, principalmente áreas de recorrentes desastres naturais.

Barsano e Barbosa (2014) definem a gestão ambiental como “a ciência que estuda e administra o exercício de atividades econômicas e sociais de forma a utilizar de maneira

racional os recursos naturais, renováveis ou não, visando preservar um meio ambiente saudável a todas as gerações". Para os autores, a gestão ambiental envolve a utilização de práticas com vistas a conservação e preservação da biodiversidade e a redução do impacto das atividades humanas sobre os recursos naturais.

Para El-Hinnawi e Hashmi (1987) dentro do *United Nations Environment Programme* (UNEP), o objetivo da gestão ambiental é melhorar a qualidade de vida, envolvendo o uso dos recursos naturais e econômicos por meio da administração governamental. A identificação e resolução de conflitos é descrita como uma das tarefas mais importantes na gestão ambiental.

Dentro da gestão ambiental, destaca-se o ordenamento territorial, que expressa as condições econômicas, sociais, culturais e ambientais de uma unidade territorial. É uma temática interdisciplinar, que compreende o campo científico, administrativo e político, buscando o desenvolvimento equilibrado da unidade territorial (CONSEJO DE EUROPA, 1983; GTZ; CONAM, 2006).

Moraes (2005) e Boueri e Costa (2013) caracterizam o ordenamento territorial como um instrumento transetorial e interinstitucional de planejamento integrado do espaço realizado pelo poder público. Envolve uma macro visão do espaço, englobando grandes unidades territoriais, sejam elas biomas, municípios, regiões metropolitanas, conjuntos de municípios ou unidades de interesse estratégico ou especiais, como zonas de fronteiras, unidades de conservação e reservas indígenas, entre outras (GUDIÑO; REYES PAECKE, 2005; MORAES, 2005; BOUERI; COSTA, 2013). Segundo os autores, o ordenamento territorial busca evidenciar as tendências através das demandas, potencialidades e fragilidades da unidade territorial de modo a alcançar os objetivos estabelecidos, sempre buscando a resolução de conflitos de uso.

O Conselho Nacional de Meio Ambiente peruano (CONAM, 2006), ressalta o caráter preventivo do ordenamento territorial, especialmente apontando as restrições naturais do ambiente sujeitas aos processos de desenvolvimento econômico e as suas potencialidades buscando alcançar de forma eficiente e sustentável os objetivos de desenvolvimento.

Apesar de o governo organizar o ordenamento territorial, esse é um processo coletivo, que deve envolver a opinião da população, por intermédio das diferentes organizações representativas da sociedade. A participação da população faz parte do processo do ordenamento territorial, juntamente com o diagnóstico técnico da unidade, passando pelo conhecimento especializado do território (GTZ; CONAM, 2006).

No Peru, o modelo de desenvolvimento seguido ao longo dos anos resultou em grandes concentrações de população, e alta concentração de poder, tanto político quanto econômico, causando assim grandes áreas de elevada pobreza nos territórios e diferenciação proeminente entre o que é urbano e o que é rural (GTZ; CONAM, 2006). Parte dos problemas de ordenamento territorial e impactos da interação da sociedade com o meio ambiente são ocasionados por esse modelo de desenvolvimento.

Segundo Quinhoes e Yakabi (2016), isso resulta da falta de planejamento. Até o ano de 1992 havia o Instituto de Nacional de Planejamento, cujo papel era elaborar planos de desenvolvimento para o país e conduzir o planejamento de forma geral. No entanto, o Instituto foi extinto nesse ano e teve suas atividades dispersas no Ministério de Economia e Finanças e no Ministério de Moradia e Construção. Essa mudança ocasionou a falta de regramento específico para a temática de planejamento e ordenamento territorial.

Somente em 2016 foi elaborado o Plano Estratégico de Desenvolvimento Nacional. Quinhoes e Yakabi (2016), no entanto, defendem que a criação desse plano apresenta vários erros tanto de conceito quanto de enfoque, além de indicadores e metas mal concebidos e com ausência do caráter territorial. Ainda assim, as Bases Conceituais e Metodológicas para a Elaboração do Guia Nacional de Ordenamento Territorial (GTZ; CONAM, 2006) apresentam como finalidade do ordenamento territorial a redução dos desequilíbrios demográficos entre as áreas povoadas e reduzir o desequilíbrio espacial ocasionado pelo desenvolvimento econômico.

Quinhoes e Yakabi (2016) apontam que, apesar do esforço em criar o guia para ordenamento territorial, esse se configurou um esforço unilateral do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAM), atualmente Ministério do Meio Ambiente, pois o fluxo de elaboração não ocorreu da maneira mais adequada, já que não havia uma lei para validar o guia. Apesar da elaboração do Guia datar de 2006, somente em 2018 houve o recebimento de um projeto de lei nacional no Congresso peruano (*Proyecto de Ley n° 2758/2017*), especialmente para apresentar a função dos gestores de mais alta instância com relação ao ordenamento territorial, além de instituir a Comissão Nacional de Ordenamento Territorial e o Sistema Nacional de Ordenamento Territorial, o projeto, porém, ainda não foi aprovado (SÁNCHEZ, 2018).

Vergara (1999) por sua vez, identifica critérios chave para o ordenamento territorial ambiental, especialmente para a América Latina. O primeiro, o compromisso, ou seja, a participação e aceitação dos atores envolvidos deve ocorrer, especialmente com relação ao Estado. A gestão do território nasce como necessidade social, mas envolve ativamente o agente

com maior poder de decisão, o Estado. Por isso o comprometimento com as necessidades e resoluções ocasionadas pelo planejamento territorial torna-se relevante, para que os objetivos da população sejam alcançados de forma justa e equilibrada através da governança. O segundo critério chave é o envolvimento dos diferentes níveis e setores da sociedade, que abrangem as esferas sociais, econômicas e ambientais. Essa participação tem como objetivos ou resultados informar, difundir e promover o processo, incentivar o desenvolvimento de organizações sociais, identificar problemas, necessidades e aspirações da comunidade, gerar propostas para a resolução dos problemas da comunidade e potencializar os recursos dessa, avaliar programas e ações selecionadas para alcançar os objetivos da comunidade, resolver conflitos socio-territoriais e ambientais através da busca de consenso e realização de processo contínuo para essas discussões (VERGARA, 1999; FERRÃO, 2012).

Por parte do Estado, no entanto, os autores ressaltam pontos que devem ser compreendidos durante o processo de gestão. Devem-se conhecer as políticas e instrumentos que podem influenciar no processo do ordenamento territorial e a disponibilidade de recursos humanos e financeiros para a implementação do plano de ordenamento. Deve-se considerar ainda, para a elaboração do processo de ordenamento territorial, que os objetivos do plano devem ser além de claros e coerentes, executáveis e alcançáveis, sejam eles socialmente alcançáveis e executáveis, tanto quanto economicamente e ambientalmente executáveis e alcançáveis (VERGARA, 1999; FERRÃO, 2012).

No Peru, destacam-se alguns esforços relacionados a gestão ambiental e ordenamento territorial. No caso específico dos bosques peruanos, Dunin-Borkowski (2014) relata ações em busca de um desenvolvimento sustentável, considerando a interrelação e complexidade do sistema, não ignorando os usos do ecossistema, mas priorizando o uso racionalizado dos recursos naturais, como madeira, turismo e agricultura (sistemas agrossilvipastoris) conciliado ao ambiente dos bosques, adotando assim os serviços ecossistêmicos.

Outra finalidade de suma importância é a prevenção de riscos de desastres ocasionados pelas vulnerabilidades naturais, agravados pelas atividades humanas. Essa é a situação da província de Trujillo, a qual sofre com as inundações na área urbana, ocasionadas pela ativação dos rios intermitentes, especialmente o da *quebrada* da bacia hidrográfica San Idelfonso, em decorrência do fenômeno *El Niño.* Pontua-se que, segundo a Real Academia Española (2020), *quebrada* na língua espanhola caracteriza as fendas na montanha, os talvegues, ou seja, a área de formação dos cursos hídricos na montanha.

Os Lineamentos da Política para o Ordenamento Territorial do Peru (MINAM, 2010) apresentam como ferramentas do ordenamento territorial o Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE), os Estudos Especializados e o Plano de Ordenamento Territorial.

O Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) é uma ferramenta para a organização do território, na qual constam medidas e padrões de proteção ambiental com vistas a garantir a qualidade ambiental (recursos hídricos, solo e biodiversidade), proporcionando um desenvolvimento sustentável (BRASIL, 2002). No ZEE o objetivo é organizar de forma cooperativa as ações dos meios públicos e privados que utilizem recursos naturais.

As Bases Conceituais e Metodológicas para a Elaboração do Guia Nacional de Ordenamento Territorial (GTZ; CONAM, 2006) descrevem que, em nível provincial, é de responsabilidade do governo regional além de planejar, regrar a utilização da província, tanto com relação ao zoneamento, quanto ao urbanismo, condicionamento territorial e assentamentos humanos.

Essas ações passam pela aprovação do Plano de Condicionamento Territorial, que aponta as áreas urbanas e de expansão, áreas de riscos naturais, áreas agrícolas e áreas de conservação ambiental, tanto em ambientes rurais quanto urbanos. Esses ainda podem conter ações focadas na conservação da diversidade biológica e recreação, por exemplo (GTZ; CONAM, 2006).

Apesar dos problemas relacionados ao planejamento territorial peruano, destaca-se a proposta de zoneamento ecológico-econômico do departamento de Cusco, apresentada ainda em 2005, apenas um mês após a instituição da Lei n° 28611 de 2005 (PCM, 2005), a qual regula o Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE). Na proposta de ZEE do departamento de Cusco há menção a áreas sujeitas a inundações, porém há somente a descrição das áreas e não as condições influentes no uso dessas áreas, o que poderia auxiliar na avaliação de outras áreas com a mesma problemática (GOBIERNO REGIONAL DEL CUSCO, 2005).

MINAM (2019) elaborou o guia "*Conociendo la Zonoficación Ecológica y Economica (*ZEE)", o qual apresenta o conceito de ZEE, a finalidade, os passos para se construir o ZEE e como validar a proposta do mesmo.

Entende-se que o planejamento e ordenamento territorial são áreas ainda não consolidadas no Peru, porém, existem esforços isolados, ainda que insuficientes, para a ampliação e consolidação das práticas relacionadas a esses temas. Assim, exemplos específicos de ações podem resultar em modelos a serem seguidos e consolidados.

Ressalta-se ainda que, em Trujillo, na tentativa de gerir os problemas ocasionados pelo *El Niño*, na forma de inundações decorrentes, elaborou-se o estudo intitulado de Criação do serviço de proteção contra inundações na quebrada de San Idelfonso nos distritos de El Porvenir, Trujillo e Victor Larco Herrera na província de Trujillo – Departamento de La Libertad (AC PÚBLICA, 2019), traz três alternativas para mitigar o impacto das precipitações sobrea a área urbana de Trujillo. Além da instalação de bacias de contenção na quebrada de San Idelfonso, sugere-se a construção de uma barragem de captação e dutos subterrâneos fechados que cruzam a cidade e entregam o fluxo ao mar, ou a construção de uma barragem de captação e um canal paralelo ao canal Chavimochic até o rio Moche, pelo distrito de Laredo e a parte baixa da quebrada de San Carlos e mais uma estrutura em rocha no rio Moche ou ainda a construção de uma barragem de captação e um canal paralelo ao canal Chavimochic até o rio Moche, pela cidade de Laredo e mais uma estrutura em rocha no rio Moche;

2.2 DESASTRES NATURAIS

À medida que a demanda de espaço aumenta, os ambientes suscetíveis a eventos físicos, como encostas, áreas adjacentes aos cursos de água e áreas de risco de forma geral passam a ser ocupados pela população muitas vezes de forma irregular. No caso de eventos extremos, as populações de baixa renda sofrem os impactos mais graves, pois são as que geralmente ocupam essas áreas (BARREDO; ENGELEN, 2010; NUNES, 2015; KILVINGTON; SAUNDERS, 2019).

Os processos físicos sempre ocorreram na natureza, a exemplo de terremotos, inundações e erupções vulcânicas. Suas interações com a sociedade, à qual causam danos, são chamadas de desastres naturais. O termo “natural” neste caso indica a causa, mas os impactos são medidos em termos socioeconômicos. Estes estão intimamente relacionados à vulnerabilidade da população local, principalmente no que diz respeito ao uso da terra (AGUIRRE, 2004; SAITO; SORIANO; LONDE, 2015).

Em outras palavras, eventos extremos assumem um significado negativo quando estão associados à sociedade e aos impactos sofridos por ela, como exemplo, quantas pessoas foram atingidas, quantas mortes ocorreram e os danos econômicos causados pelo evento.

Entre os eventos naturais que podem ocorrer, destacam-se as tempestades. Estas podem ser o resultado de vários fenômenos, incluindo os encontros de diferentes sistemas atmosféricos e que podem resultar em movimentos de massa e inundações (VÖRÖSMARTY

et al., 2013; NUNES, 2015). Os impactos das tempestades incluem inundações, que estão associadas a perdas econômicas, mas também a proliferação de vetores e perdas humanas. Tempestades também podem desencadear movimentos de massa e podem ser altamente destrutivas (NUNES, 2015).

Segundo o Ministério da Integração Nacional (2013), inundações são submersões de áreas fora dos limites normais de um determinado curso hídrico em áreas que usualmente não se encontram submersas, isso ocorre de forma gradual normalmente ocasionado por altos níveis de precipitação, como exemplo da Figura 1 onde observa-se a inundação do centro urbano de Trujillo, no Peru, em 2017.

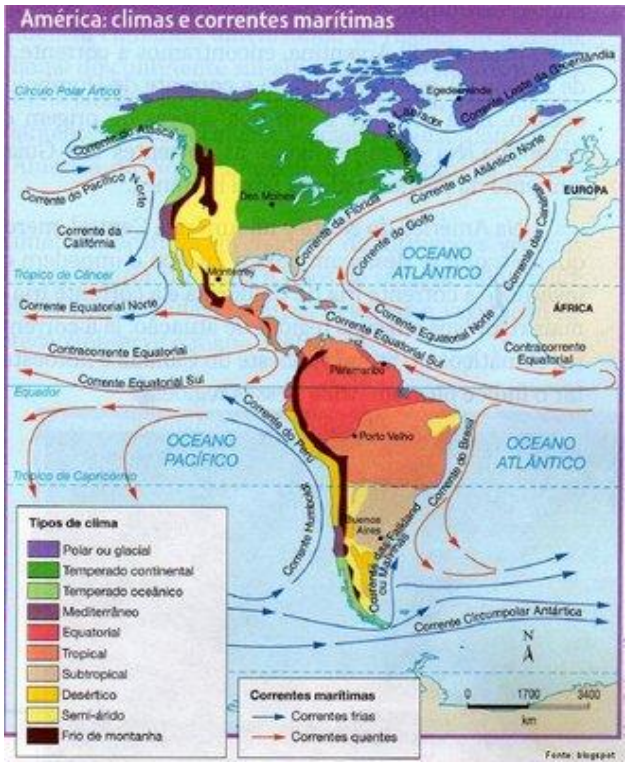
Figura 1. Área Inundada em Trujillo no ano de 2017

Fonte: El Comercio (2019).

Na região próxima ao Equador, a zona de convergência intertropical, caracterizada por um sistema de baixa pressão, apresenta nebulosidade constante, chuvas acentuadas, como resultado da convergência dos alísios dos hemisférios Norte e Sul. Na América do Sul atuam massas equatoriais (Equatorial Continental e Equatorial Pacífica), tropicais (Tropical Atlântica, Tropical Pacífica e Tropical Continental) e extratropicais (Polar Pacífica e Polar Atlântica). As características desses sistemas são diferentes e podem causar graus variados de risco à medida que agem (GOLDSTEIN; MAGILLIGAN, 2011; NUNES, 2015). Além dessas se destaca a Corrente de Humboldt, corrente marítima que provém da Antártida trazendo assim águas frias (RUESTA, OHISHI, OLIVEIRA, 2011). Essa segue em direção as regiões equatoriais, onde

encontram correntes de maior temperatura. A corrente segue as áreas costeiras da América do Sul no Oceano Pacífico conforme pode ser observado na Figura 2.

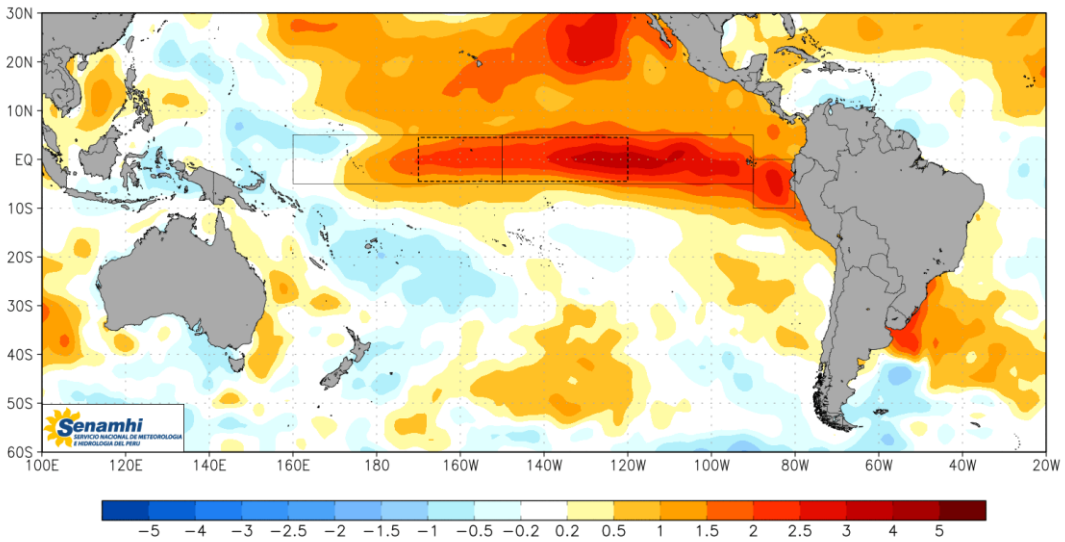
Figura 2. Correntes Marítimas na América do Sul



Fonte: Portal Dia a Dia Educação (2013).

Durante fenômenos de *El Niño*, ocorre o aquecimento das águas frias trazidas pela Corrente de Humboldt em que a temperatura do Oceano Pacífico apresenta aumento especialmente nas faixas próximas aos trópicos, o que atinge fortemente o Peru (Figura 3). Em consequência do aquecimento anormal das águas do Pacífico, a temperatura e a umidade das regiões tropicais são alteradas. Esse fenômeno age em intensidades variando de moderadas a muito fortes, tendo sido registrados 115 eventos entre 1525 e 1987 (NUNES, 2015). Dessa forma, há a alteração dos regimes de chuva nas regiões tropicais e de latitudes médias (CPTEC/INPE, 2020).

Figura 3. Exemplo do aquecimento das águas do Pacífico em decorrência do Fenômeno El Niño



Fonte: SENAMHI (2021).

Segundo Nunes (2015), as Nações Unidas (UN, 2011) e a base de dados de eventos emergenciais (EM-DAT, 2019), o Peru tem a quarta maior proporção de desastres naturais por área na América do Sul, superada apenas pelo Equador, Uruguai e Colômbia, respectivamente.

Considerando o percentual de eventos, pessoas afetadas, mortes e lesões, entre 1960 e 2009, o Peru registrou 48,8% das mortes, apresentando o terceiro maior percentual de eventos da América do Sul (15,2%) e o segundo maior percentual de pessoas afetadas (14,6 %) (EM-DAT, 2019).

Dos desastres naturais catalogados entre 1960 e 2009 no Peru, as maiores recorrências foram inundações (39), terremotos (31) e movimentos de massa úmida (28). Quanto ao número de óbitos, considerando os fenômenos hidrometeorológicos, climáticos e geofísicos, 88,9% resultaram de terremotos, 4,3% dos movimentos de massa úmida, 2,6% de movimentos de massa seca e 2,26% devido a inundações (EM-DAT, 2019).

Na América do Sul, segundo Quinn *et al.* (1978), levantando os registros de eventos de *El Niño* ocorridos desde o século XVI, foram 46 eventos de alta e muito alta magnitudes. Segundo os autores, a frequência dos eventos, que no século XX girava em torno de 10 a 12 anos entre os eventos de grande escala, nos séculos anteriores apresentava uma variação irregular, em um intervalo de 5 a 20 anos entre eventos fortes e muito fortes.

Hocquenghem e Ortlieb (1992) e Hamilton e Garcia (1986) apontam que o Peru foi atingido por 24 eventos fortes e muito fortes de *El Niño* entre os séculos XVI e XX. Verificou-se que a frequência de ocorrência dos eventos fortes de *El Niño* aumentou após o século XVII.

Uma das consequências dos eventos de precipitações intensas causadas pelo fenômeno *El Niño* são as inundações. Somente entre 2001 e 2010 a Defesa Civil peruana (INDECI, 2010) registrou 10 inundações de grande magnitude no país, atingindo milhares de pessoas, com destaque para o evento ocorrido em Puno, cidade localizada nas margens do Lago Titicaca, no ano de 2003, o qual atingiu direta e indiretamente 59.000 pessoas. Monetariamente, o evento de *El Niño* que atingiu o Peru no período de 1982-1983 resultou em perdas estimadas em 3.283 milhões de dólares e para o evento de 1997-1998 as perdas foram estimadas em 3.500 milhões de dólares (SENAMHI, 2014).

Na descrição do fenômeno elaborada pelo SENAMHI (2014), pondo foco nos eventos de *El Niño* ocorridos em 1982-1983 e 1997-1998 identificaram-se aumentos das temperaturas mínimas em 8°C a 10°C. E enquanto na costa norte houve a precipitação de 3.000 mm no período de setembro a maio, na Serra Sul houve déficit de precipitação, nos dois eventos. Além disso, o SENAMHI (2014) descreve como manifestações do *El Niño* no Peru, no oceano, o aumento da temperatura superficial e subsuperficial do oceano, o aumento do nível do mar na região de aquecimento, diminuição do afloramento das águas frias e nutrientes na superfície, variação da salinidade costeira e aumento do oxigênio. Já na atmosfera as manifestações do *El Niño* no Peru são caracterizadas pela alteração nos ventos alísios na costa, aumento da temperatura do ar na região costeira e o aumento da umidade do ar. Há também o aumento da nebulosidade no verão e primavera e diminuição da pressão atmosférica.

O mesmo material (SENAMHI, 2014) identifica os impactos diretos e indiretos, tanto positivos quanto negativos, dos eventos de *El Niño* no Peru. Como impactos negativos destacam-se a aceleração do degelo glacial, perda de terrenos agrícolas, salinização de solos, danificação da infraestrutura de canais de irrigação e da infraestrutura de saneamento básico, colmatação em reservatórios, colapso de vias e pontes, morte ou migração de espécies animais e vegetais, baixa na produção agropecuária (carne, leite, batata), aumento de doenças como malária, cólera, infecções estomacais e conjuntivite. Apesar de todos os efeitos negativos sobre o sistema ocasionados pelo *El Niño*, existem também os efeitos positivos. Embora o *El Niño* prejudique a produção de batata, ao mesmo tempo favorece a produção de arroz, enquanto a precipitação também favorece a regeneração de bosques secos, crescimentos de pasto temporário e a recarga dos aquíferos.

Nas regiões costeiras cercadas por cadeias de montanhas, as inundações ocorrem pelo rápido fluxo de água que atinge essas montanhas formando rios intermitentes que alcançam os centros urbanos.

Nos eventos de precipitações intensas ocorridos em 1998 e 2017 a província de Trujillo foi inundada em decorrência da ativação da *quebrada* da bacia de San Idelfonso. Em 1998, como resultado das chuvas intensas, que carrearam material de rocha da montanha e resíduos sólidos, o rompimento de um dique entre a montanha e a cidade, no cemitério de Mampuesto, ocasionou a inundação da área urbana danificando mais de 2,4 mil residências. Na ocasião a lâmina d'água chegou a alcançar 1,5 metros de altura (CAF, 2000). Em 2017 novamente houve o rompimento de um dique, localizado na zona de montanha da bacia de San Idelfonso, que em um período de 8 dias (14 a 22 de março) levou a formação de 7 *huaicos* (EL COMERCIO, 2017), que são os fluxos superficiais gerados pela precipitação (ALLCCA *et al*., 2017).

Ainda segundo a Real Academia Española (2020), *huaico* é um termo de origem peruana, caracterizada pela massa de lama e pedras desprendidas das montanhas em decorrências de chuvas torrenciais que ao alcançar os cursos d'água causam inundações (Figura 4).

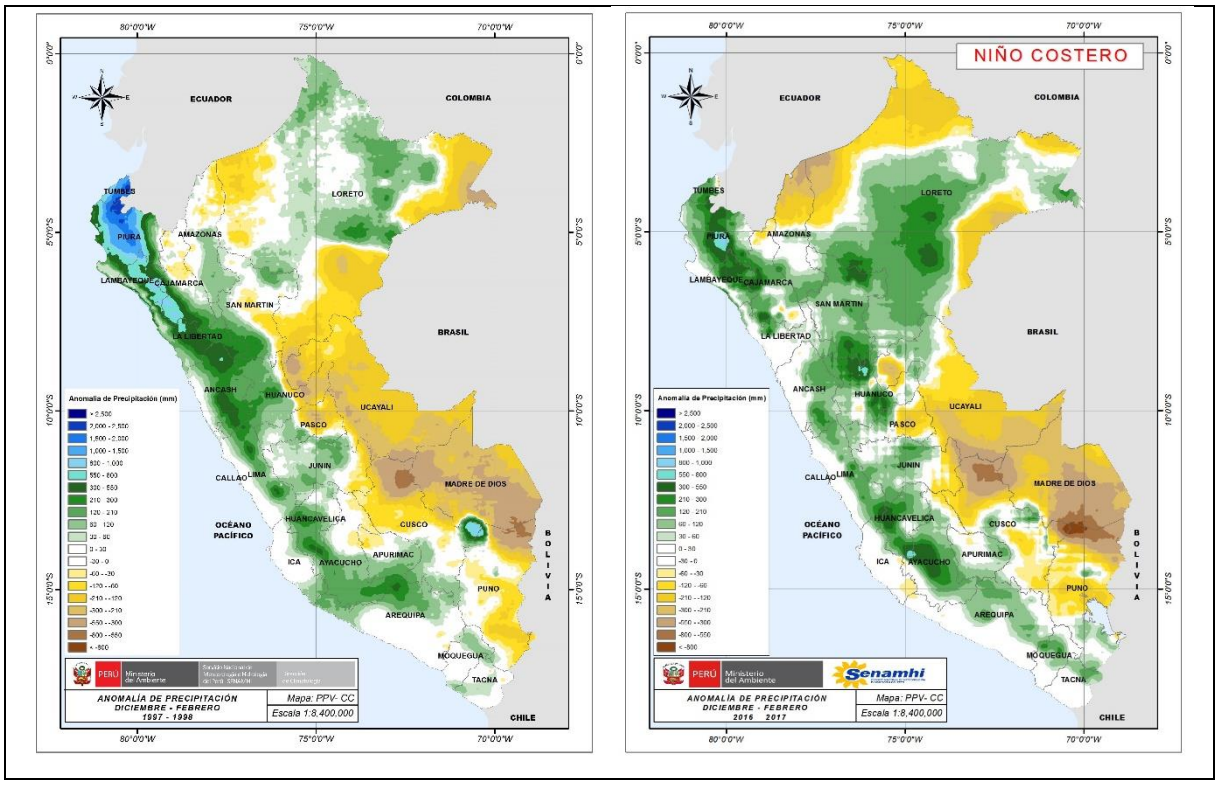
Figura 4. Exemplo de *huaico*

Fonte: Andina (2017).

Segundo dados do SENAMHI (2021), o fenômeno de *El Niño* ocorrido em 1998 foi classificado com extraordinário em nível de chuvas no qual precipitaram mais de 2.500 mm no

período de janeiro, fevereiro e março sendo que no departamento de La Libertad, no qual está localizada a província de Trujillo ocorreram até 800 mm nesse período (Figura 5). O fenômeno de 2017 foi classificado pelo SENAMHI (2021) como forte, onde ocorreram precipitações totais de até 1.000 mm no período de janeiro, fevereiro e março, sendo que no departamento de La Libertad foram até 1.000 mm precipitados no período.

Figura 5. Precipitação nos Fenômenos de *El Niño* em 1998 e 2017



Fonte: SENAMHI (2021).

Compreende-se então que historicamente não somente a área de Trujillo, mas como todo o Peru de maneira geral é atingido por desastres naturais relacionado aos eventos de *El Niño*.

2.2.1 Movimentos de massa e inundações

Wilson (1998) descreve que inicialmente, o termo movimento de massa era utilizado para se referir as variedades de processos em que uma grande porção de materiais da crosta da Terra se movia, por gravidade, de um ponto a outro. Na época, o termo incluía também desmoronamentos em áreas confinadas. Além disso, normalmente esses processos envolvem a presença de água. Esse conjunto contribui grandemente para a alteração da paisagem. Onde o

clima é caracterizado como tropical úmido, o intemperismo químico e bioquímico é intenso, produzindo assim, mais material passível de movimentação (LOPES; ARRUDA JUNIOR, 2015).

Para Louzeiro et al. (2019) nos movimentos de massa deve-se destacar a influência humana, considerando os usos incompatíveis das áreas. Perdomo e Ladeira (2010) ainda ressaltam que, apesar de os movimentos de massa serem condicionados pela geomorfologia, pedologia, geologia e fatores climáticos, a ação antrópica intensifica esse fenômeno. Essa intensificação pode impactar tanto na magnitude quanto na frequência.

Os movimentos gravitacionais de massa são processos que não são contínuos, porém são naturais. No entanto, a ocorrência desses tem sido cada vez mais relacionada as ações antrópicas (PERDOMO; LADEIRA, 2010). Um termo intimamente associado a movimentos de massa é a instabilidade de encostas, que é o que ocorre em parte dos movimentos de massa (SÁNCHEZ-NÚÑEZ et al., 2012).

Em virtudes dos diferentes enfoques na análise dos escorregamentos, não existe uma classificação unificada desses movimentos de massas (LOPES; ARRUDA JUNIOR, 2015). Identificam-se, porém, alguns processos recorrentes. As quedas, geralmente associadas a material rochoso, os rastejos, configurando movimentos constantes, sazonais ou intermitentes, os escorregamentos, que podem ser planares, circulares ou em cunha e as corridas, as quais movimentam solo, rochas, detritos e água (AUGUSTO FILHO, 1992).

Os escorregamentos de terra são configurados pela movimentação de solo onde há o limite entre uma zona de material instável separada do material base mais estável e essa movimentação pode ser rotacional ou translacional. A primeira consiste em uma superfície de ruptura côncava e o movimento é paralelo a superfície e transversal ao longo do deslizamento (Figura 6). A movimentação translacional ocorre de forma praticamente planar com relação a base do movimento, com pouquíssimo movimento rotacional. Há ainda o escorregamento de blocos, onde ocorre a movimentação translacional gravitacional de uma ou poucas unidades coesas de massa. Os escorregamentos de terra são mais propícios em relevos acentuados em climas secos ou semiáridos que mediante a chuvas abundantes criam as condições ideais para a ocorrência desse fenômeno, possuindo então elevada força destrutiva (PERDOMO; LADEIRA, 2010; LUMEN LEARNIG, 2021).

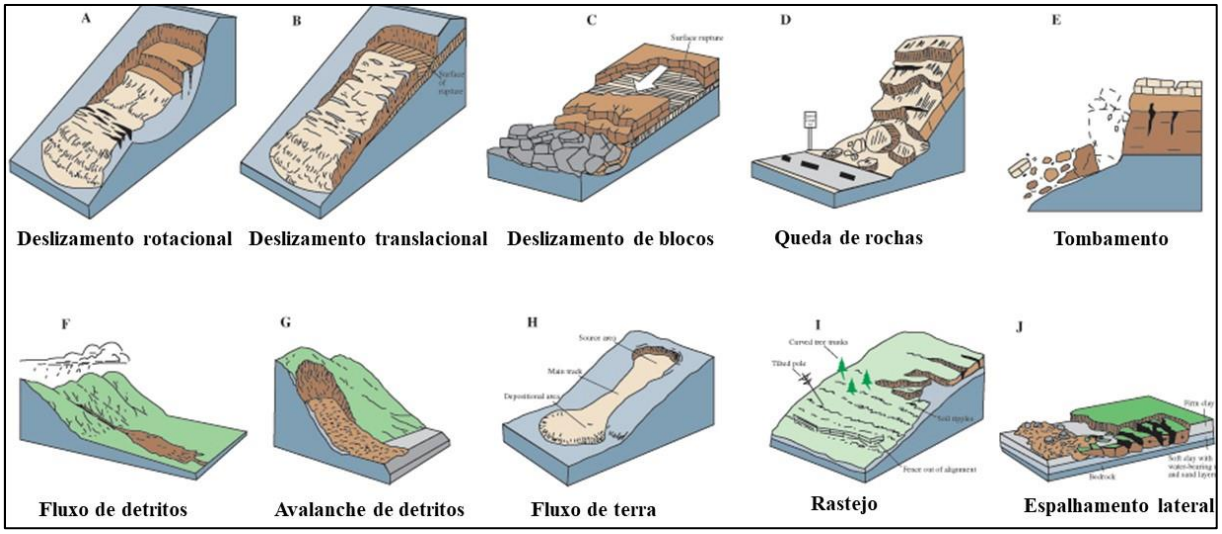
As quedas são movimentos abruptos de rochas ou pedregulhos que se desprendem de zonas de relevo acentuado ou escarpas, ocasionados pela gravidade, intemperismo e a presença

de água intersticial (Figura 6). A separação ocorre em descontinuidades como fraturas e junções e o movimento pode ser de queda livre, ressalto ou rolamento (LUMEN LEARNIG, 2021).

Os fluxos de lama, de detritos ou de terra ocorrem na presença de água, em encostas com grande presença de materiais argilosos, pouca vegetação para segurar a camada de solo, tudo sob ação da gravidade (Figura 6). Esse tipo de movimentação acompanha os cursos d'água, comportando-se como um fluído altamente viscoso, atingindo pontes, moradias e o que mais estiver em seu caminho (PERDOMO; LADEIRA, 2010; LUMEN LEARNIG, 2021).

Existem ainda os movimentos lentos, que são as quedas de grandes rochas através de uma superfície curva, que ocorrem especialmente quando já há uma fragilidade na porção inferior do maciço, seja por erosão ou corte e os rastejos (Figura 6), causados pela tensão de cisalhamento. Esses rastejos podem ser sazonais, relacionados à umidade e temperatura do solo, ou contínuos, quando a tensão de cisalhamento é sempre superior a resistência do material (LUMEN LEARNIG, 2021).

Figura 6. Tipos de movimentos de massa



Fonte: Lumen Learning (2021).

No Peru utiliza-se o termo *huaico* para descrever fluxos aluviais, os quais se configuram em fluxo de escoamento superficial ocasionados por precipitação, normalmente em áreas de declividade acentuada, acompanhados do arraste de partículas sólidas, proveniente de solos pouco coesivos ou quedas e deslizamentos de rochas (RIVERA; VILCHEZ; VELA, 2018).

Felices (2011) aponta como causas de inundações o excesso de escoamento ocasionado pelas precipitações e ausência de sistemas de evacuação, a invasão de áreas urbanas por fluxos

provenientes de braços fluviais criados de maneira súbita por rios próximos, a incapacidade dos cursos hídricos de conter em seu leito o volume de água ou o caso de Trujillo, o centro urbano estar localizado sobre o leito do rio ou sua planície de inundação e *quebradas.*

No Peru a ocorrência dos *huaicos* normalmente está associada às *quebradas*, bacias montanhosas de rios intermitentes, ativadas em eventos de precipitação elevada. Os *huaicos* por sua vez, descem por gravidade até as áreas mais planas, inundando essas áreas, as quais usualmente abrigam regiões urbanizadas. Essa é a situação recorrente na província de Trujillo, em que a ocorrência de *huaicos* e inundações são decorrentes das precipitações ocasionadas especialmente pelo fenômeno *El Niño*.

No evento ocorrido em 2017 os *huaicos* se formaram na bacia de San Idelfonso. Nessa situação, a área urbanizada de Trujillo, que se encontra entre a zona de montanha e o mar foi atingida fortemente pelo escoamento superficial. Assim conforme indicam a Figura 7 e a Figura 8, o fluxo de lama e rochas passou pela área urbanizada até alcançar o mar.

Figura 7. *Huaico* atingindo o centro urbano de Trujillo em 2017

Fonte: El Comercio (2017).

Figura 8. *Huaico* alcançando o mar em Trujillo em 2017

Fonte: La Mula (2017).

Há ainda na região o agravante da condição costa, a qual em decorrência da erosão costeira (Figura 9), que já consumiu praias de Trujillo, obrigou a construção de muros de rochas para impedir o avanço da erosão (Figura 10), especialmente sobre as áreas urbanizadas localizadas próximas ao mar, isso ainda em 2014 (EL COMERCIO, 2019).

Quando houve a formação dos *huaicos* em 2017, parte dessa proteção teve que ser removida para dar vazão ao fluxo proveniente da montanha. E em situações de novos eventos que gerem *huaicos*, deverão ser removidas novamente essas estruturas, agravando ainda mais a situação de vulnerabilidade das áreas atingidas (EL COMERCIO, 2019).

Os processos de movimentação de massa em Trujillo se traduzem de forma mais dramática nos chamados *huaicos*. A ocorrência dos *huaicos*, apesar de associadas ao *El Niño* e a alta precipitação são de ocorrência imprevisível e por esse motivo causam ainda mais impactos.

Figura 9. Erosão costeira causada pelo mar

Fonte: Trujillo em Linea (2015).

Figura 10. Muro de rochas para impedir o avanço da erosão costeira

Fonte: El Comercio (2019).

2.3 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL PERUANA

Em termos de Mercosul, em 1992 houve a realização da Reunião Especializada em Meio Ambiente (REMA), na qual, além de definirem medidas básicas para as legislações

ambientais, os participantes firmaram o compromisso de monitorar as ações sobre o meio ambiente, tornando obrigatório então o licenciamento de atividades impactantes ao meio ambiente (ACADEMIA PEARSON, 2010).

A Lei Geral do Meio Ambiente, Lei n° 28.611 de 2005 (PCM, 2005) além de conceituar a gestão ambiental aponta o ordenamento territorial como ferramenta da gestão ambiental. No Art. 19 são apresentados os conceitos e condições do ordenamento territorial, ressaltando o aspecto do planejamento do futuro da unidade. A legislação aponta que os governos locais devem atentar para os usos incompatíveis nas suas áreas de atuação (Art. 23) e que a designação dos usos de cada área deve ser realizada por meio do Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE).

No Art. 20 são descritos os objetivos para o ordenamento territorial, dentre eles promover a proteção, recuperação e reabilitação dos ecossistemas degradados ou frágeis e fomentar o desenvolvimento e utilização de tecnologias limpas (PCM, 2005). Não há, porém, na legislação itens específicos para situações singulares como a das bacias hidrográficas de rios intermitentes, caso da província de Trujillo, no departamento de La Libertad.

A Lei Orgânica para o aproveitamento sustentável dos recursos naturais, Lei nº 26.821 de 1997 (PCM, 1997), ressalta a importância do Estado na conservação dos recursos naturais por intermédio do ZEE, destacando o patrimônio nacional e espécies em extinção. Assim como a Lei n° 28.611/2005, não há abordagens específicas para as *quebradas* e bacias hidrográficas na Lei nº 26.821 de 1997. Essa, porém, remete ao Decreto Supremo n°087 de 2004, que regra o Zoneamento Ecológico-Econômico.

Após a conceituação do ZEE, o decreto apresenta os níveis de zoneamento, que varia conforme o tamanho da área. Para a província de Trujillo, um mesozoneamento, na escala de 1:100.000, é suficiente para especificar as macrozonas de utilização da área. Pelo tamanho da bacia de San Idelfonso, a lei indica um microzoneamento, com escala igual ou maior a 1:25. 000. Ainda segundo o Decreto Supremo nº 087 de 2004 (PCM, 2004), as etapas para a elaboração do ZEE passam pela identificação e caracterização das unidades relativamente homogêneas, as Unidades Ecológicas Econômicas (UEE). Essas unidades integram variáveis físicas, biológicas, sociais, econômicas e culturais.

Assim como as categorias de uso (Art. 9), os critérios de avaliação das zonas (Art. 8) recomendam a avaliação do valor produtivo (Zonas produtivas), bio-ecológico, histórico-cultural (Zonas de tratamento especial), vulnerabilidade ambiental (Zonas de proteção e conservação ecológica, Zonas de recuperação), aptidão urbana e industrial (Zonas urbanas ou

industriais) e conflitos de usos (Zonas de recuperação) (PCM, 2004). Devem ser identificados para cada zona os usos recomendáveis, usos recomendáveis com restrição e usos não recomendáveis (PCM, 2004). No caso específico da província de Trujillo e a bacia de San Idelfonso, as zonas a serem adotadas podem ser mais restritas e com sugestões de ações estruturais na área.

A proposta de condicionamento territorial da província de Trujillo indica a área dos cursos hídricos intermitentes principais da bacia de San Idelfonso e parte de sua zona de inundação como zona de tratamento especial pelo perigo que representam. Na própria descrição da zona há a indicação da necessidade de uma avaliação específica para a mitigação dos efeitos das inundações sobre a comunidade ali localizada (MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE TRUJILLO, 2012).

No plano de acondicionamento territorial de Trujillo, a elaboração da proposta (incluindo a aprovação e implementação do ZEE) seguiu as seguintes etapas até alcançar a proposição final: a etapa preparatória, onde houve a solicitação da elaboração da proposta, a criação e firmamento do grupo técnico do ZEE, a elaboração da logística, elaboração do sistema de informação e comunicação, revisão de fontes e determinação da metodologia. Seguiu-se a etapa de diagnóstico integrado: com a situação atual do território, identificação das potencialidades e limitações da área através da análise da dinâmica econômico-produtiva, análise dos perigos e vulnerabilidades e análise do sistema de centros povoados urbanos e rurais. Após foram elaborados cenários considerando a tendência atual, a situação desejável e a situação mais adequada além da análise estratégica do território, na etapa de prognóstico (MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE TRUJILLO, 2012).

Para a etapa da proposta e aprovação houve a definição do objetivo principal, dos eixos e objetivos estratégicos, delineamento das políticas de uso e ocupação, ajustes, propostas específicas, aprovação e regramento. Após segue-se a etapa de implementação, na qual são definidas as ações de gestão e investimento e por último a etapa de monitoramento e avaliação, onde são definidas as ações para monitoramento e avaliação localizada (MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE TRUJILLO, 2012).

E como resultado da proposta de ZEE para Trujillo foram identificadas as seguintes zonas: Zona de proteção e associada a potencialidades diversas, Zona de proteção restrita, Zona de conservação e desenvolvimento marinho e costeiro, Zona de tratamento especial de borda marinha e costeira, Zona de tratamento especial das zonas de perigo, Zona exclusiva de desenvolvimento agrícola, Zona de desenvolvimento agrícola associado, Zona de

desenvolvimento pecuário, Zona de desenvolvimento pecuário associado, Zona de produção florestal, Zona de produção energética, Zona de desenvolvimento de potencial turístico, Zona produtiva portuária e aeroportuária, Zona produtiva urbana e industrial, Zona em processo de consolidação urbana e industrial e Zona de aptidão urbana e industrial (MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE TRUJILLO, 2012).

Retomando a classificação da área da bacia de San Idelfonso na Zona de tratamento especial das zonas de perigo, essa zona foi delimitada considerando probabilidade de ocorrência de inundações ocasionadas em decorrência do fenômeno *El Niño* e pela probabilidade de deslizamentos. Na sua descrição há a recomendação de avaliações e a elaboração de um plano de readequação e, se necessário, realocação de população. E com usos recomendáveis, estão a recuperação, reflorestamento e gestão de risco. Para usos recomendáveis, mas com restrições, estão a proteção e a conservação e não são recomendáveis usos para infraestrutura, uso urbano e uso industrial (MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE TRUJILLO, 2012).

Essas, porém, não apresentam zonas e práticas específicas dentro da bacia e sua área de abrangência, reforçando as indicações do próprio material, da elaboração de estudos específicos para a zona.

Há ainda uma gama de legislações sobre a gestão de risco de abrangência nacional. Primeiramente em fevereiro de 2011 a Lei n° 29.664 (PCM, 2011) institui o Sistema Nacional de Riscos de Desastres e o Decreto Supremo n° 048/2011 (PCM, 2011) que aprova os regramentos da Lei n° 29.664. Nesses documentos são apontadas as entidades responsáveis pela gestão de risco e elaboração do plano e desempenho de atividades, dentre outras disposições. Destaca-se principalmente o conteúdo do Plano Nacional de Gestão de Riscos, contendo a estimativa do risco, prevenção do risco, redução do risco, preparação, resposta, reabilitação e reconstrução. Além do plano nacional geral devem ser elaborados planos nos demais níveis governamentais: Planos de prevenção e redução de risco de desastres, Planos de preparação, Planos de operação de emergência, Planos de educação comunitária, Planos de reabilitação e Planos de contingência.

A versão atual do Plano Nacional abrange o período de 2014 a 2021, aprovado pelo Decreto Supremo n° 034 de 2014 (PCM, 2014). Para Trujillo foi elaborado o Plano de Prevenção e Redução de Risco de Desastres da Província de Trujillo, com validade de 2018 a 2021, concordando com o Plano Nacional (MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE TRUJILLO, 2018).

No Plano há menção à bacia de San Idelfonso como área de risco muito alto de movimentos de massa e como risco hidrometeorológico (chuvas intensas e inundações). Se destaca a fragilidade da área especialmente com relação ao atingimento da população mais próxima ao exutório da bacia e a vulnerabilidade dessa população especialmente pela falta de regramento na construção e localização dessas residências. São recomendas como ações para a minimização do risco, especialmente no Distrito de El Porvenir a realocação da população localizada nas zonas de alto e muito alto risco de inundação. E para o Distrito de Trujillo, sugerem-se obras de drenagem (MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE TRUJILLO, 2018).

Observa-se então uma certa preocupação com a situação das áreas mais vulneráveis durante os eventos de precipitação em algumas das esferas de planejamento. Essas, porém devem ser integradas e ampliadas para abarcar as necessidades da área de uma forma efetiva.

2.4 GEOTECNOLOGIAS

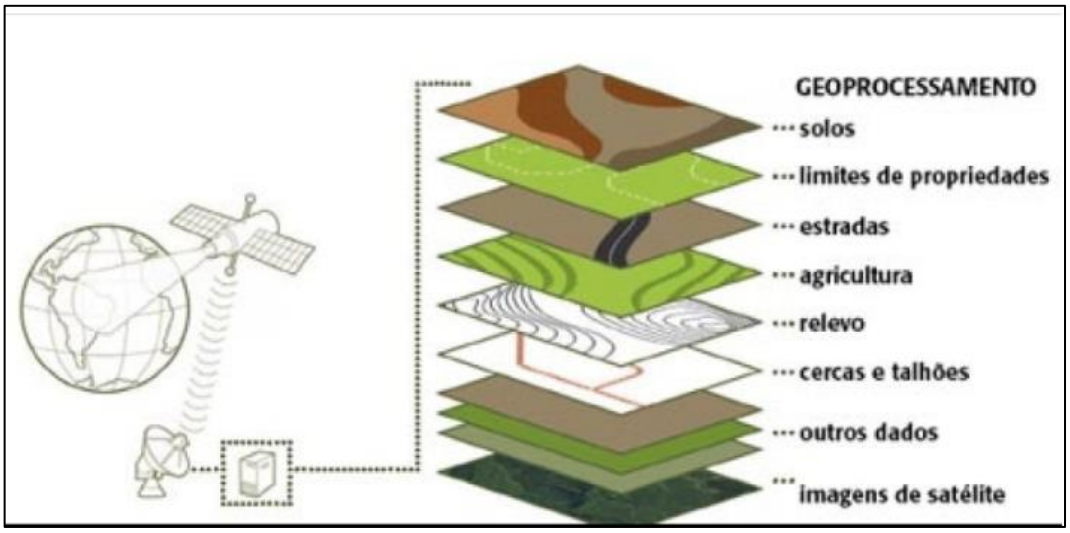
A partir do posicionamento espacial de uma área e o auxílio de ferramentas computacionais e bases de dados georreferenciados é possível gerar diagnósticos ambientais para unidades territoriais. Para avaliar as condições ambientais de uma área, normalmente grandes bacias, municípios ou estados, aconselha-se o uso de geotecnologias e modelagem, pois permitem quantificar, especializar e simular de forma rápida a dinâmica ambiental.

2.4.1 Geoprocessamento

O geoprocessamento pode ser entendido como as técnicas matemáticas e computacionais usadas para tratar dados georreferenciados, que ganharam força a partir da década de 1980, quando se percebeu o potencial da ferramenta, que atualmente é aplicada em várias áreas do conhecimento, como planejamento rural e urbano.

Ibrahin (2014) define de forma similar, sendo para o autor o geoprocessamento um conjunto de técnicas, métodos e ferramentas que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica, influenciando e proporcionando a análise de recursos naturais, o transporte, as comunicações, energia, o planejamento urbano, entre outros aspectos. Alguns dos usos recorrentes do geoprocessamento estão demonstrados na Figura 11, que são usos que envolvem mapeamento. E as áreas inseridas no geoprocessamento estão identificadas na Figura 12.

Figura 11. Usos recorrentes do geoprocessamento

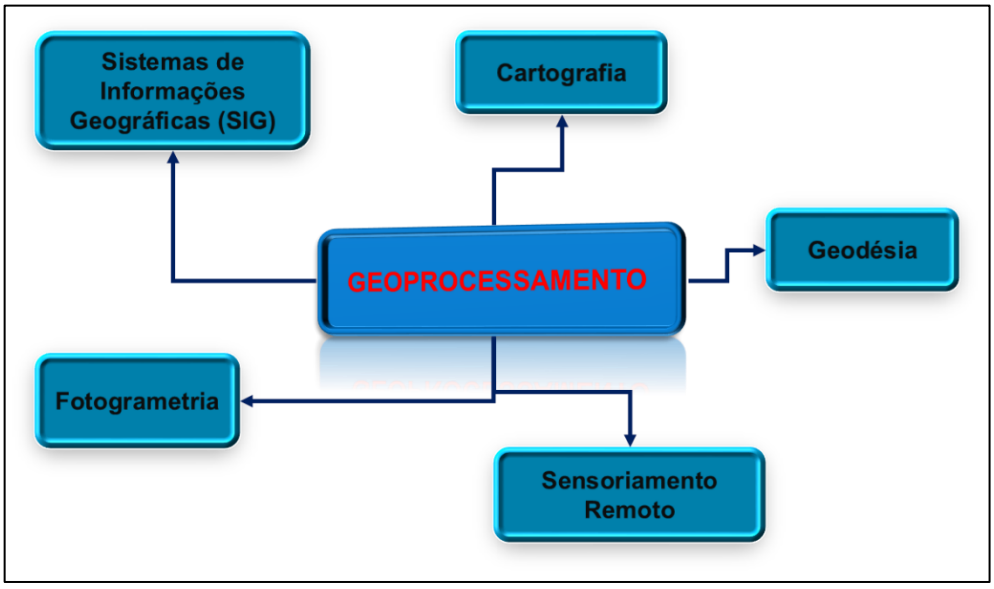


Fonte: IBRACAM (2021).

Já a cartografia é definida pela Associação Cartográfica Internacional (*International Cartographic Association* - ICA) como o

> conjunto de estudos e operações científicas, técnicas e artísticas que, tendo por base o resultado de observações diretas ou da análise da documentação, se voltam para a elaboração de mapas, cartas e outras formas de expressão e representação de objetos, fenômenos e ambientes físicos e socioeconômicos, bem como sua utilização (ICA, 1967).

Figura 12. Fluxograma do geoprocessamento



Fonte: SIEG (2013).

Uma das principais ferramentas do geoprocessamento são os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), do inglês *Geographic Information System* (GIS), que são *softwares* que reúnem ferramentas destinadas ao tratamento e processamento dos dados georreferenciados (MOREIRA, 2005), ou seja, de dados que possam ser localizados sobre a superfície terrestre. Ainda segundo o autor, os SIGs devem permitir a criação de bases de dados com informações provenientes de diferentes fontes, como imagens de satélite, dados censitários e modelos numéricos do terreno (MNT). Além disso, devem oferecer ferramentas para manipulação destes dados.

Também é de grande valia o sensoriamento remoto, que é a obtenção de dados sem contato físico entre o sensor e a superfície da Terra. A coleta desses dados é possível através da captação da energia eletromagnética refletida pela superfície da Terra pelos sensores a bordo dos satélites. O produto (energia) da interação entre a energia eletromagnética e a superfície da terra, acrescido da energia emitida pela superfície, é captado pelos sensores. Uma vez captada, a energia é transformada em sinais elétricos, transmitidos para as estações de recepção, onde são transformados em tabelas, gráficos e imagens (FLORENZANO, 2002).

A fotogrametria, derivada do sensoriamento remoto, provém do grego e significa “medir graficamente usando a luz” (TOMMASELLI, 2009). E para a *American Society of Photogrammetry* a "fotogrametria é a arte, ciência e tecnologia de obtenção de informação confiável sobre objetos físicos e o meio ambiente através de processos de gravação, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética radiante e outras fontes" (ASP, 1979).

Entende-se que o sensoriamento remoto pode ser aplicado à prevenção e mitigação de desastres, identificando vulnerabilidades e criando cenários. Além disso, o sensoriamento remoto é de suma importância no monitoramento e alerta de situações de risco. Isso ainda pode ser usado em resposta e recuperação para identificar as áreas mais afetadas e que devem receber prioridade após o evento (DI GREGORIO; SAITO; SAUSEN, 2015; SAUSEN; LACRUZ, 2015).

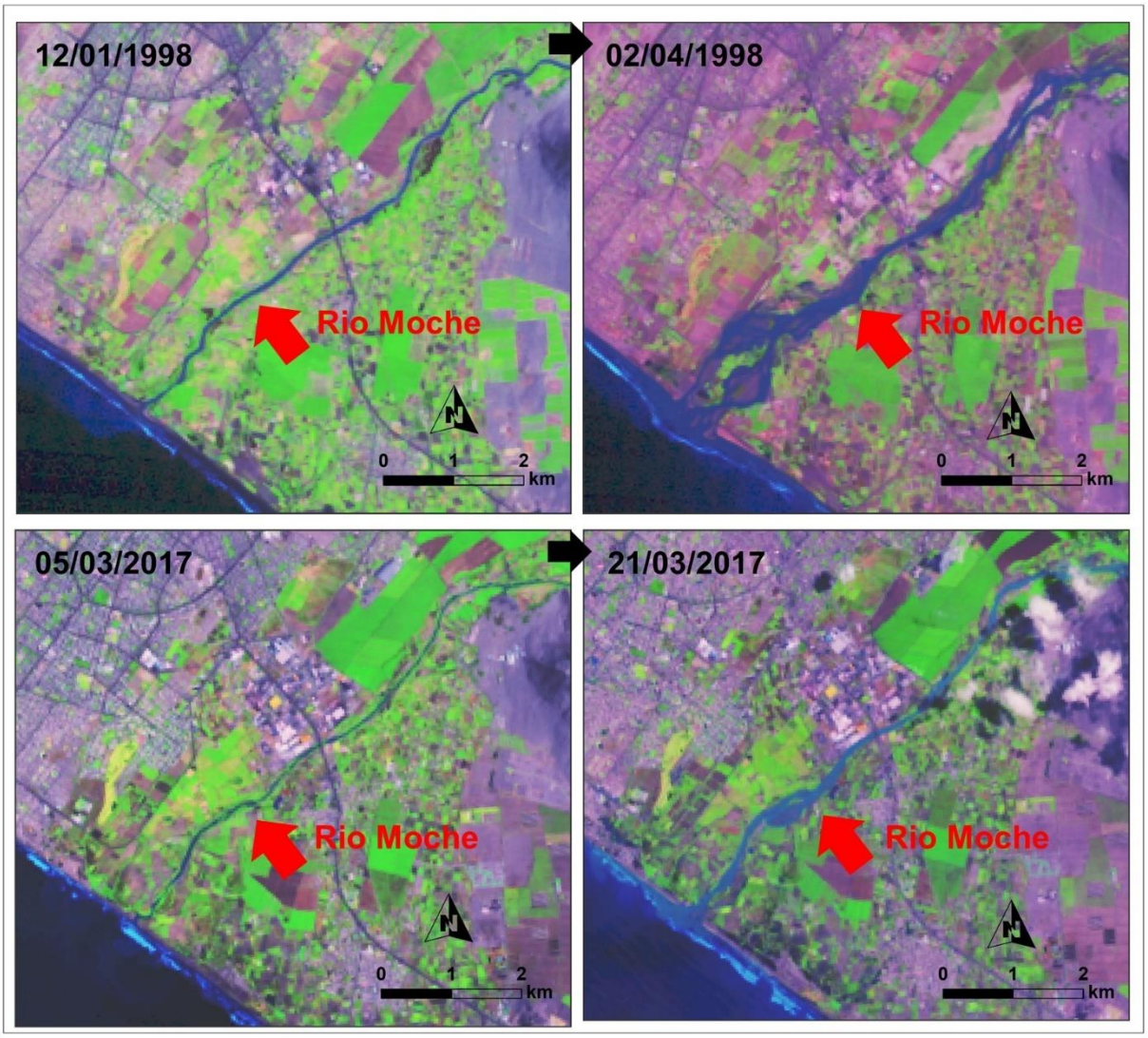
De acordo com Di Gregorio, Saito e Sausen (2015) para monitorar as áreas de risco, é necessário conhecer os pontos mais suscetíveis, as forças causais dos eventos e a probabilidade de sua ocorrência. Também é extremamente importante medir em intervalos e escalas compatíveis com os fenômenos para gerar alertas de risco; modelos meteorológicos dinâmicos, hidrológicos, de estabilidade, de fluxo de detritos, entre outros.

A compreensão dos fenômenos meteorológicos depende da observação da atmosfera, que pode ser feita através de imagens de satélite, radares meteorológicos e sensores terrestres (DI GREGORIO; SAITO; SAUSEN, 2015). Esse tipo de informação permite a avaliação em escala de grade, proporcionando um entendimento dos fenômenos como um todo.

Esses dados podem ser usados tanto para monitorar condições meteorológicas momentâneas quanto para alimentar modelos que rastreiam o comportamento do ambiente sob condições climáticas extremas. Em casos de inundação, por exemplo, modelos de fluxo podem ser criados em resposta à precipitação, que servem de base para sistemas de alerta em áreas de risco (DI GREGORIO; SAITO; SAUSEN, 2015).

Como exemplo da utilização dos dados de sensores remotos, a Figura 13 demonstra a foz do rio Moche, em Trujillo, Peru, antes e após as inundações em 1998 e 2017. A sequência de imagens, dos satélites Landsat 5 e Landsat 8 busca evidenciar que é possível observar alterações de cobertura do solo na forma de inundações.

Figura 13. Exemplo de utilização de sensoriamento remoto em inundações



Fonte: o autor (2021).

Esse exemplo indica a importância da análise desse tipo de situação como um todo, ou seja, de cima. Além de ser possível analisar a periodicidade de ocorrência desse tipo de evento, é possível também delimitar a área atingida em cada evento e compará-las entre si e igualmente calibrar modelos de inundação.

2.5 MODELAGEM

Um modelo pode ser entendido como uma aproximação ou simplificação da realidade, representada por símbolos ligados a operações matemáticas para manipular esses dados

(BRIASSOULIS, 2000). As informações obtidas pelo sensoriamento remoto podem alimentar as modelagens.

Pode-se dizer que um modelo é linear quando as relações de superposição e de homogeneidade são satisfeitas. O modelo também pode ser classificado como contínuo ou discreto. O primeiro representa os modelos onde os fenômenos são contínuos no tempo, enquanto o segundo apresenta mudanças de estado em intervalos discretos. Eles também podem ser concentrados ou distribuídos, onde o modelo concentrado não considera variações espaciais, enquanto o modelo distribuído varia de acordo com o tempo e o espaço. A classificação pode ser conceitual ou empírica. O modelo conceitual envolve equações baseadas em processos físicos, enquanto o segundo envolve relações independentes dos processos físicos presentes no fenômeno (TUCCI, 1998).

Os modelos podem ser, em geral: determinísticos, que determinam as relações funcionais entre as variáveis analisadas e, para uma situação inicial, sempre se comportam da mesma maneira, ou seja, possuem uma saída fixa para uma entrada específica. Eles geralmente se originam em medições de campo (SKIDMORE, 2003). Os modelos podem ser também estocásticos, onde se considera a possibilidade de vários eventos ocorrerem ao longo do tempo, prevendo efeitos probabilísticos. Como os parâmetros de entrada geralmente são aleatórios, as saídas são variáveis (SKIDMORE, 2003).

Tucci (1998) ressalta que a escolha do modelo a ser utilizado é dependente não somente dos objetivos da modelagem, mas também dos dados disponíveis para o modelo. Porém de maneira geral, um modelo se apresenta dentro de um estudo conforme a Figura 14. As escolhas dos dados de entrada e saída de um modelo são dinamicamente relacionadas com as fases de andamento de um projeto. São realizadas retroalimentações e experimentações até alcançar os objetivos iniciais, que ao final resultam em subsídios à tomada de decisões.

Figura 14. O modelo em um estudo

Fonte: adaptado de Tucci (1998).

2.5.1 Estabilidade de encostas

Como a bacia hidrográfica de San Idelfonso apresenta não apenas o escoamento de água quando ativada em eventos de precipitação extrema, mas inclui a mobilização de solo e fragmentos de rocha, os modelos de verificação de potencialidade de estabilidade de encostas podem fornecer indicativos de áreas mais frágeis. Dessa forma na sequência está descrito o modelo SHALSTAB, utilizado para essa verificação.

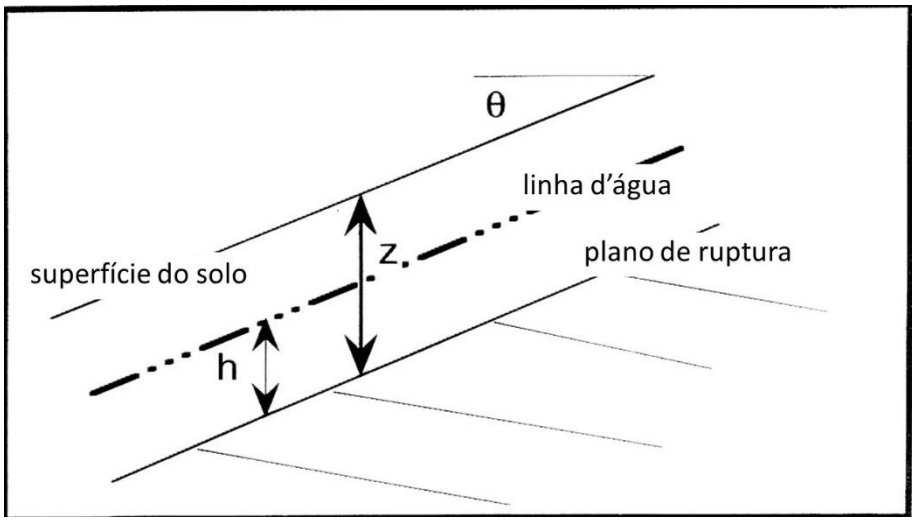
2.5.1.1 SHALSTAB

O Shalstab (*shallow landsliding stability model*) desenvolvido por Dietrich e Montgomery (1998) e disponibilizado pela Universidade da Califórnia, é descrito como um modelo determinístico com base na combinação dos modelos de estabilidade de encosta infinita e do modelo hidrológico de estado uniforme. As vantagens do modelo são a replicabilidade em

qualquer ambiente, e dessa forma a comparabilidade entre resultados, além de ser de fácil aplicação.

A teoria por trás do SHALSTAB inicia com a aproximação unidimensional do modelo de estabilidade de encostas na qual o plano de ruptura, a superfície do solo e a lâmina d'água são paralelos conforme a Figura 15.

Figura 15. Aproximação do modelo de estabilidade de encostas



Fonte: Dietrich e Montgomery (1998)

A equação do modelo de estabilidade de encosta infinita tem como base o critério de resistência de Mohr-Coulomb, porém em uma abordagem bidimensional, onde, no momento que ocorre a ruptura da encosta, o peso do solo é igual às forças estabilizadoras conforme a Equação 1, onde τ é a tensão cisalhante no momento da ruptura, c o intercepto de coesão, σ a tensão normal no plano de ruptura, u a poropressão (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998).

$$\tau = c + (\sigma - u) tg\ \phi \qquad \text{Equação 1}$$

O modelo ainda faz a simplificação de considerem a coesão nula, além dessa, a força das raízes também foi eliminada. Reescrevendo a equação sem a coesão e em termos de proporção entre a coluna de solo saturada no momento da instabilidade a equação se apresenta conforme a Equação 2, onde h/z é a proporção entre a coluna de solo saturada no momento da instabilidade, ρ_s e ρ_w as respectivas densidades do solo e da água, θ a declividade da encosta e ϕ o ângulo de atrito interno do solo (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998).

$$\frac{h}{z} = \frac{\rho_s}{\rho_w}\left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) \qquad \text{Equação 2}$$

Para o modelo hidrológico de estado uniforme, usando a lei de Darcy e igualando a transmissividade ao fluxo subterrâneo saturado pode-se escrever a Equação 4 em termos de h/z, onde q é a precipitação efetiva, T a transmissividade, a área de drenagem, b a largura do escoamento e θ a declividade da encosta (Equação 3) (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998).

$$\frac{h}{z} = \frac{q}{\mathrm{T}}\,\frac{a}{b\sin\theta} \qquad \text{Equação 3}$$

Ao final, unindo as equações de estabilidade e do modelo hidrológico, a Equação 4 fica em termos do parâmetro q/T. Como resultado, as áreas são classificadas conforme a Tabela 1.

$$\frac{q}{T} = \frac{\sin\theta}{a/b}\,\frac{\rho_s}{\rho_w}\left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) \qquad \text{Equação 4}$$

Tabela 1. Condições de estabilidade do SHALSTAB

Estabilidade	**Condição**
Incondicionalmente estável, saturado	$\tan\theta = \tan\phi\,(1-\rho_w/\rho_s)$; $a/b>(T/q)\sin\theta$
Incondicionalmente estável, não-saturado	$\tan\theta = \tan\phi\,(1-\rho_w/\rho_s)$; $a/b<(T/q)\sin\theta$
Instável, saturado	$\frac{a}{b} \geq \frac{\rho_s}{\rho_w}\left(1-\frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right)\frac{T}{q}\sin\theta$; $a/b>(T/q)\sin\theta$; $\tan\phi>\tan\theta=\tan\phi\,(1-\rho_w/\rho_s)$
Instável, não-saturado	$\frac{a}{b} \geq \frac{\rho_s}{\rho_w}\left(1-\frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right)\frac{T}{q}\sin\theta$; $a/b<(T/q)\sin\theta$; $\tan\phi>\tan\theta=\tan\phi\,(1-\rho_w/\rho_s)$
Estável, não-saturado	$\frac{a}{b} < \frac{\rho_s}{\rho_w}\left(1-\frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right)\frac{T}{q}\sin\theta$; $a/b<(T/q)\sin\theta$; $\tan\phi>\tan\theta=\tan\phi\,(1-\rho_w/\rho_s)$
Incondicionalmente instável, saturado	$\tan\phi>\tan\theta$; $a/b>(T/q)\sin\theta$
Incondicionalmente instável, não-saturado	$\tan\phi>\tan\theta$; $a/b<(T/q)\sin\theta$

Fonte: Dietrich e Montgomery (1998).

O SHALSTAB roda no *software* ArcView, não podendo ser utilizada a extensão nas versões atuais do ArcGIS. O modelo, porém, ainda é utilizado através da aplicação manual do equacionamento em qualquer plataforma SIG tendo como base o modelo digital do terreno (MDT).

2.5.2 Modelos precipitação – vazão

A análise do ciclo hidrológico da bacia para definir a vazão para a verificação do fluxo que ocorre durante os eventos extremos de precipitação é relevante especialmente para a delimitação da mancha de inundação que atinge a área urbana durante esses eventos. É apresentado na sequência o *software* HEC-HMS para essa finalidade.

2.5.2.1 HEC-HMS

O HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*), criado pelo *US Army Corps of Engineers* (USACE), foi delineado para simular os processos hidrológicos em sua totalidade para sistemas de bacias dendríticos. O *software* inclui as análises hidrológicas usuais, como infiltração, unidades hidrográficas e mapeamento de corpos hídricos. Além desses há a simulação de evapotranspiração, derretimento de neve e umidade do solo. Existem ainda as ferramentas para otimização de modelos, avaliação da incerteza do modelo, previsão do fluxo de água, erosão e transporte de sedimentos e qualidade da água (USACE, 2020).

No HEC-HMS são informadas as características da bacia, o que inclui sub-bacias, reservatórios, fontes, junções e depressões, além dos parâmetros climáticos e uso e cobertura do solo. Os resultados obtidos no *software* podem ser utilizados de forma direta ou servir como base para outros estudos (USACE, 2020).

2.5.3 Mancha de inundação

O mapeamento de inundação para a bacia intermitente de San Idelfonso é de extrema importância calibração da vazão e da altura de lâmina d’água que desencadeia o processo de inundação da área urbana, o que serve de base para a elaboração de ações de alerta e evacuação em eventos de precipitação extrema. Além disso, a avaliação das áreas atingidas faz com que possam ser verificadas as áreas alcançadas em eventos de precipitação superior as já ocorridas, para novamente basear ações de gestão da área.

2.5.3.1 HEC-RAS

O HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*) do US Army Corps of Engineers é um *software* de sistemas integrados, que realiza simulações hidráulico-hidrológicas. O *software* permite a análise unidimensional de escoamento constante, análise unidimensional e bidimensional de escoamento variável, transporte de sedimentos e leito móvel, e análises de temperatura e qualidade da água (USACE, 2020).

Com o *software* é possível elaborar um gráfico x/y do esquema da área de interesse, inserir as seções de corte, perfis, curvas de nível, hidrogramas e mapas de inundação. Os resultados ainda podem ser vistos de forma tridimensional. O mapeamento de inundação é elaborado pela ferramenta Mapper do HEC-RAS, que é a ferramenta que permite a criação e elaboração de dados georreferenciados. É possível ainda realizar a animação dos dados de inundação acoplando diversas camadas, como imagens aéreas e relevo como base para a animação da inundação. Além da exibição gráfica, os resultados também estão disponíveis na forma tabular (USACE, 2020).

Rincón e Perozo (2014) utilizaram o HEC-RAS para uma situação semelhante ao objetivo deste trabalho. Os autores investigaram o comportamento de uma ponte localizada em uma bacia intermitente. Para a situação do estudo de Rincón e Perozo (2014) existem 3 estações pluviométricas com longas séries históricas, diferentemente da situação deste trabalho. De forma similar, foram gerados hidrogramas no HEC-HMS para simular o fluxo não permanente e foram também realizadas simulações de fluxo permanente. Para simular os efeitos da vazão no leito intermitente, inicialmente os autores desenharam a geometria do canal e demais estruturas de interesse, nesse caso, a ponte, considerando a rugosidade do leito. E após inseriram os dados de fluxo, tanto não permanente quanto permanente, seguida da execução do modelo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os métodos aplicados para obtenção dos resultados deste trabalho (Figura 16). Os itens referentes aos dados climáticos, geomorfologia, geologia, hidrogeologia, relevo e uso e cobertura do solo e modelagem de instabilidade buscam atender o objetivo de caracterizar as variáveis ambientais relacionadas à inundação da área urbana de Trujillo. Os itens relacionados à modelagem, sejam eles de modelagem hidráulica ou hidrológica, buscam atender o objetivo de simular diferentes cenários de escoamento na bacia. O item que trata do zoneamento ambiental busca atender o terceiro objetivo de sugerir um zoneamento para a área da bacia e área atingida pela inundação.

Figura 16. Fluxograma metodológico

Fonte: o autor.

3.1 DADOS CLIMÁTICOS

Foram utilizados os dados históricos de precipitação disponíveis para a região do distrito de La Libertad, no *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú*

(SENAMHI, Figura 17), o qual dispõe de dados de precipitação desde 1963 para o departamento de La Libertad.

A estação, do tipo convencional, utilizada no trabalho está localizada no distrito de Sinsicap, nas coordenadas 7°51' 1.75"S de latitude e 78°45'18.11"O de longitude. Os dados são disponibilizados no formato diário, disponíveis para descarga dos dados históricos de setembro de 1963 a fevereiro de 2014. Os dados diários do período de dezembro de 2014 até os dados atuais (2019) são disponibilizados para descarga mensal.

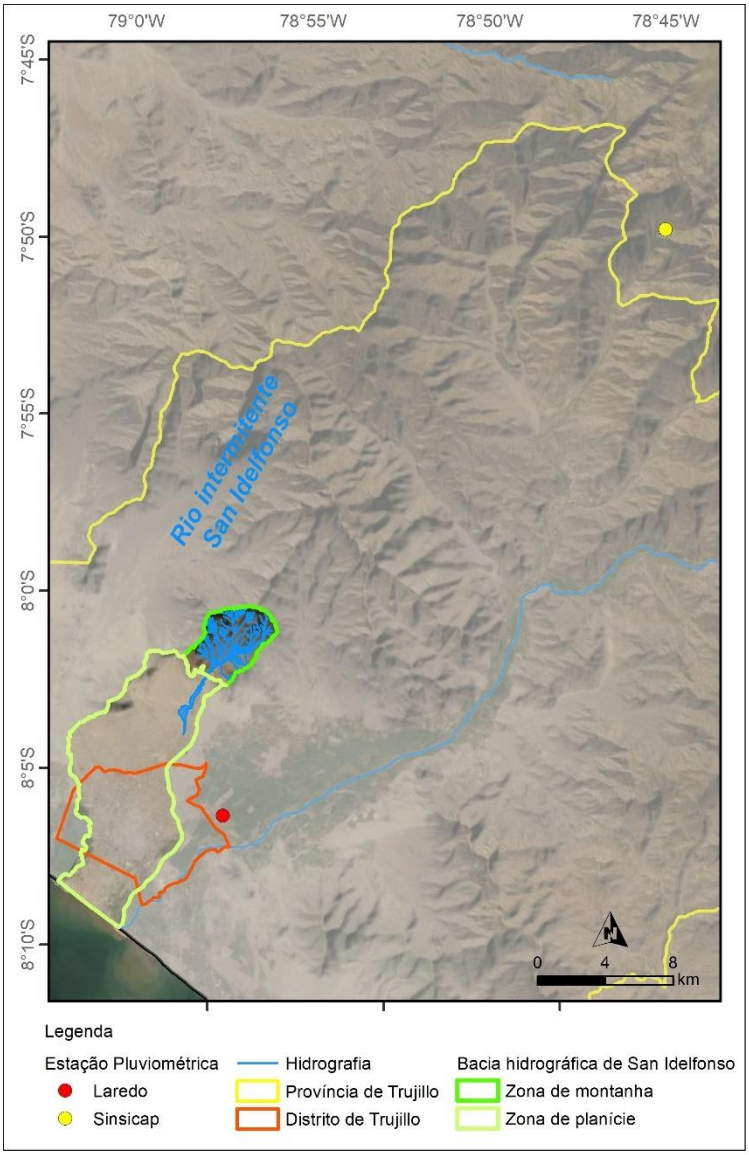
Apesar da pequena série de dados, foram avaliados também os dados da estação de Laredo (latitude: 8° 6' 43.29"S, longitude: 78° 59' 6.36"O), em Trujillo, inserida na região de interesse. A estação convencional possui dados desde fevereiro de 2016 até março de 2021, período de monitoramento que engloba o evento de 2017 e de forma mais precisa pela proximidade a sua ocorrência. Os dados nessa estação também são coletados diariamente.

Os dados descarregados do SENAMHI foram compilados em uma planilha para a formatação em dados mensais. Na sequência, foram calculadas através de funções matemáticas as precipitações médias e máximas anuais, e médias e máximas mensais. A partir disso, foram elaborados os gráficos desses dados, com vistas a facilitar a identificação dos picos e tendências da precipitação. Os gráficos de médias e máximas anuais comparam a precipitação em milímetros e o tempo em anos, enquanto os gráficos de médias e máximas mensais relacionam a precipitação em milímetros e o tempo em meses. Foram elaborados gráficos de frequências mensais e anuais também.

Por se tratar de uma área com problemas de inundação, optou-se por não incluir dados de mínimas anuais e mínimas mensais, pois não apresentariam informações relevantes à compreensão da precipitação frente ao fenômeno de interesse.

O gráfico da tendenciosidade utiliza os dados de precipitação total sobre o qual foi aplicada a linha de tendência para verificar o comportamento da precipitação na região de estudo, especialmente para identificar a tendência futura.

Figura 17. Estações do SENAMHI



Fonte: adaptado de SENAMHI (2021).

3.2 GEOMORFOLOGIA, GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA

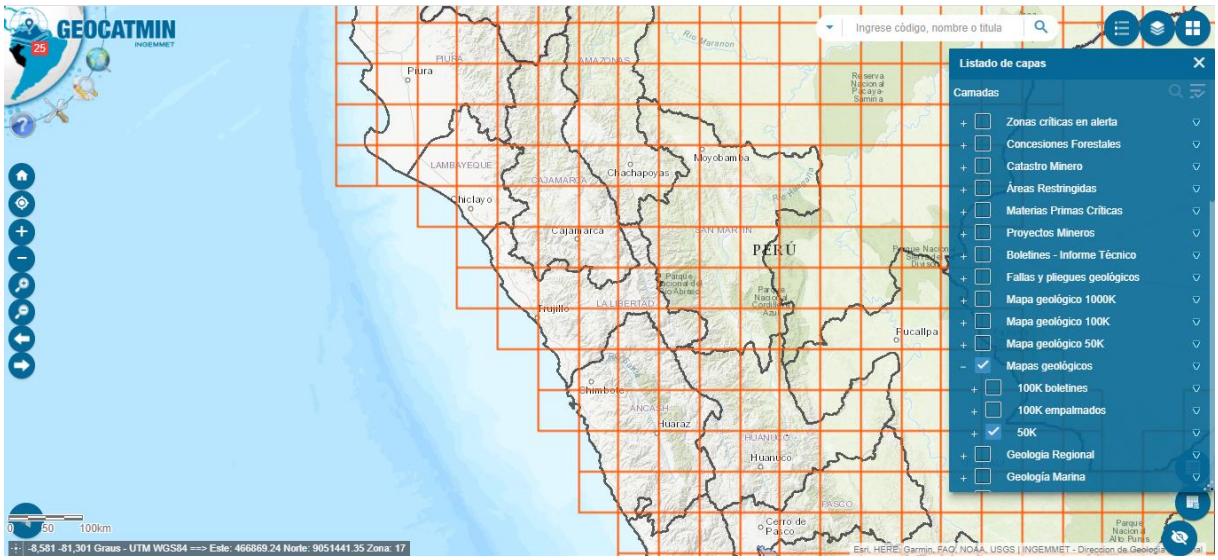
Os dados de geologia foram obtidos através do *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico* (INGEMMET) em formato shapefile (.shp) e na escala 1:50.000, no formato de quadrículas (Figura 18).

A partir da identificação das classes existentes na bacia, foram buscadas em Huarache et al. (2002), Ingemmet (2012, 2016, 2017), Museo Virtual de Geología (2020) as características de composição e de comportamento físicos de cada uma das classes de interesse.

Dessa forma foi possível compreender a relação entre formação geológica e o comportamento da bacia frente aos fenômenos de precipitação.

Os dados de geomorfologia na escala 1:250.000 e hidrogeologia, na escala 1:2.000.000, foram obtidos na mesma fonte de dados (INGEMMET), porém são disponibilizados para o país inteiro, ao invés de quadrículas. No entanto, a rotina de elaboração dos mapas de geomorfologia e hidrogeologia foi a mesma aplicada no mapa de geologia. Da mesma forma, buscou-se bibliografias para descrever as classes contidas na área de estudo.

Figura 18. Geocatmin, base de dados do INGEMMET



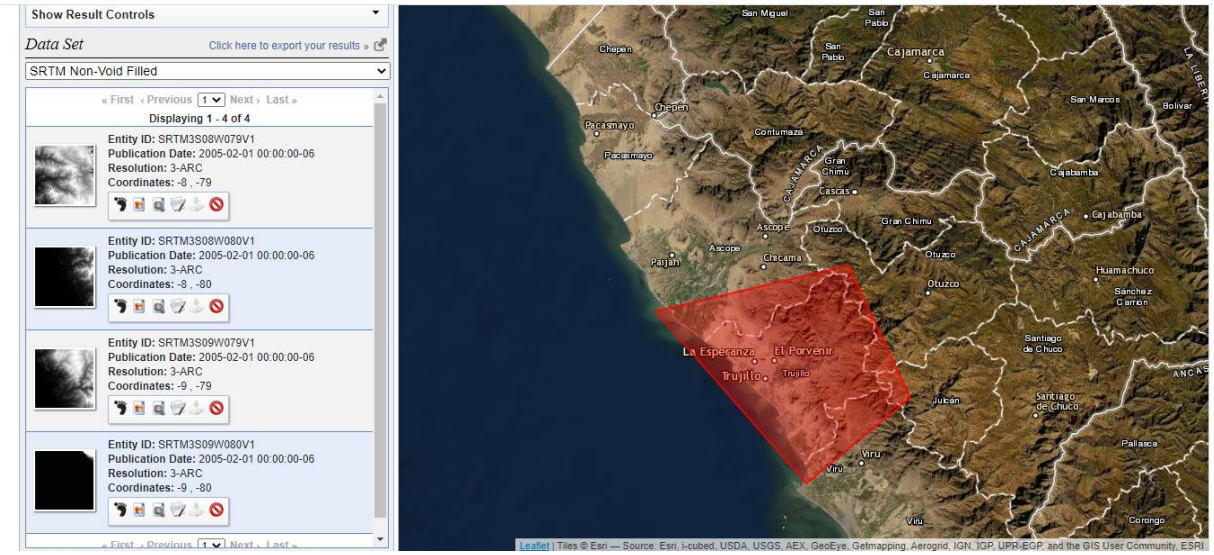
Fonte: INGEMMET (2020).

3.3 RELEVO

Os dados do SRTM de 30 metros de resolução espacial, foram obtidos por intermédio do USGS (*U.S. Geological Survey*), conforme a Figura 19. Foram utilizados para a elaboração dos mapas de relevo através do recorte para a área de interesse e reclassificação dos dados, para o mapa hipsometria e a geração da declividade no *software* Idrisi, sendo ambos os mapas apresentados no *software* ArcGIS.

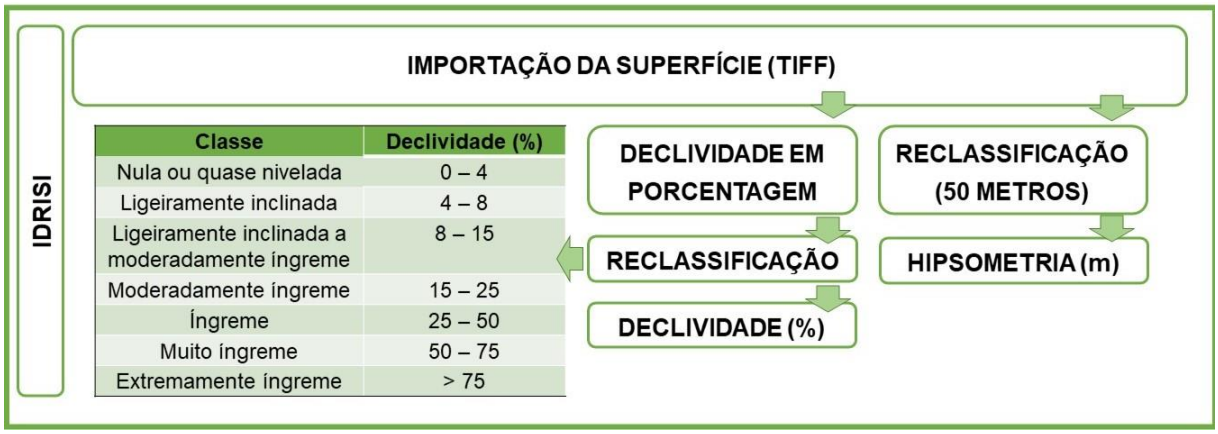
Os dados, na forma de superfície foram importadas para o ambiente SIG Idrisi onde seguiram o fluxo de ações da Figura 20 para a geração dos mapas de hipsometria e declividade. A reclassificação do mapa de declividade considerou as classes adotadas para os mapas de declividade de Cajamarca e Puno, no Peru, conforme adotado pelas equipes de elaboração do ZEE (EQUIPO ZEE, 2012).

Figura 19. Aquisição de dados SRTM



Fonte: USGS (2021).

Figura 20. Fluxograma de elaboração da hipsometria e declividade



Fonte: o autor.

3.4 USO E COBERTURA DO SOLO

A evolução do uso e cobertura do solo da área de estudo, utilizou as imagens dos satélites da série Landsat, de 30 metros de resolução espacial, disponíveis para a região desde 1975 através do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS).

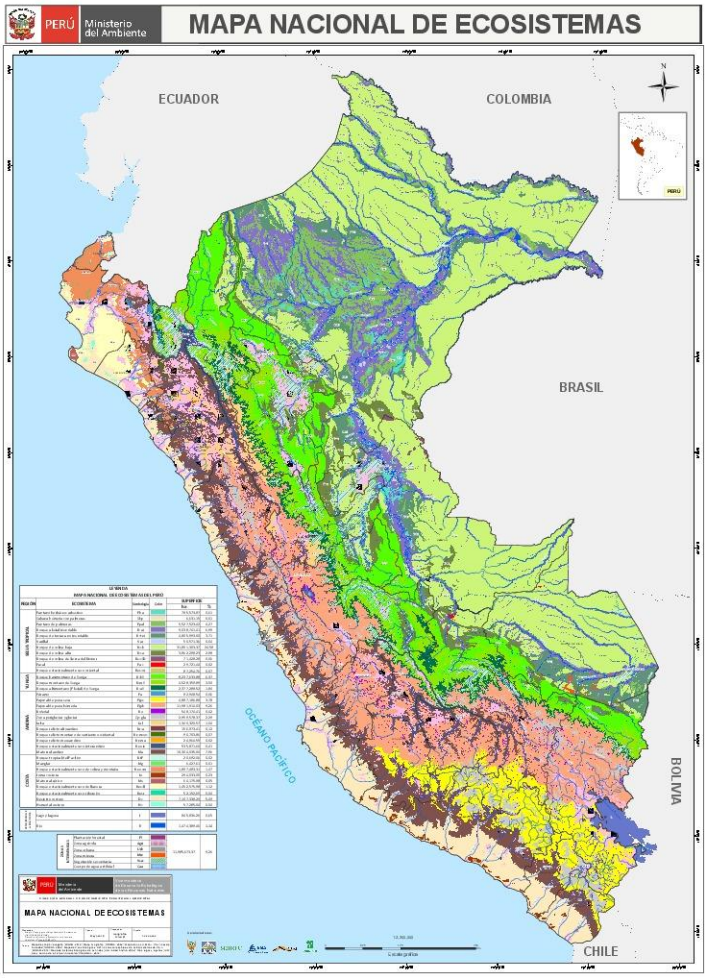
Os mapas foram elaborados para os anos de 1975, 1985, 1998 (evento extremo), 2006, 2017 (evento extremo) e 2020. A imagem de 1975, órbita-ponto 009-066, foi adquirida do satélite Landsat 2, com resolução espacial de 80 metros. As imagens de 1985, 1998 e 2006, de mesma órbita-ponto, 009-066, porém de resolução espacial de 30 metros foram obtidas do

satélite Landsat 5, enquanto as imagens de 2017 e 2020, de mesma órbita-ponto e resolução foram do satélite Landsat 8. A escolha das imagens envolveu a disponibilidade dessas, com qualidade elevada, ou seja, com baixa presença de nuvens e a partir da data mais antiga possível. A partir dessa, foram sendo identificadas imagens em intervalos de aproximadamente 10 anos para a avaliação da mudança do uso e cobertura do solo. Foram inclusos os anos onde ocorreram grandes eventos de precipitação, para os quais foram avaliadas as mudanças antes e após o evento.

Os mapas foram produzidos no *software* SIG Idrisi Selva a partir da importação das imagens, reprojeção para o hemisfério sul (ferramenta *project*), para as imagens a partir de 2017, georreferenciamento para as imagens até 2017 (ferramenta *resample*), recorte para a área de interesse (ferramenta *window*) e classificação pixel a pixel no algoritmo não supervisionado *isoclust* e ao final a reclassificação dos resultados para as classes de uso e cobertura do solo (ferramenta *reclass*), tendo como base a composição colorida de falsa cor (ferramenta *create color composite*).

A fitogeografia da região foi adicionada ao mapa para melhorar a qualidade do mapeamento (Figura 21). O dado de fitogeografia foi adquirido no Ministério do Meio Ambiente do Peru (MINAM, 2019) na escala 1:200.000. Ao final foram identificadas as classes de agricultura, hidrografia, bosques, deserto costeiro, *humedal* costeiro, elevação costeira e mata andina.

Figura 21. Ecossistemas nacionais



Fonte: MINAM (2019).

3.5 MODELAGENS

Para este trabalho foram utilizados modelos que retornassem resultados de precipitação-vazão, para a alimentação dos demais modelos, estabilidade de encostas, devido ao fluxo de detritos que ocorre na bacia de San Idelfonso e a modelagem da mancha de inundação para a verificação dos resultados mais representativos para área de interesse.

3.5.1 SHALSTAB

Quando o Shalstab (*shallow landsliding stability model*) foi desenvolvido, o programa rodava em ambiente ArcView. Com a atualização do *software* ArcView para o ArcGIS, o mesmo não ocorreu com o SHALSTAB, que não possui versão atualizada para o ArcGIS. O

modelo, porém, continua válido, dessa forma, existe a opção de aplicar a equação diretamente no ArcGIS ou QGIS.

Santos (2015) demonstra a aplicação do modelo SHALSTAB de forma atualizada, por intermédio da extensão TAUDEM (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*). Dentro dessa extensão foi delimitada a área de contribuição da bacia pela propagação de fluxo em infinitas direções sobre o terreno, com base no modelo digital do terreno (MDT). A declividade também foi elaborada e calculada diretamente no *software* ArcGIS.

Para a programação da equação na calculadora raster, foram ainda obtidos, por ensaios ou por bibliografia a densidade do solo (ρs) e o ângulo interno de atrito do solo (ϕ) (SANTOS, 2015).

Para a elaboração do mapa, foi inserido o seguinte código na calculadora raster do ArcGIS.

[tgs] = Tan (([slp]*3.14159265)/180)
[sens] = Sin (([declividade]*3.14159265)/180)
[tgf] = Tan (([ϕ]*3.14159265)/180)
[is] = [tgf]*(1- ρw/ρs)
[qt] = ([sens]/[a/b])*(1- ([tgs]/[tgf]))*([ρs]/1000)
[re] = con([tgs] < [tgf], -10, con([tgs] > [is], 10, log10[qt]))

Os resultados no mapa foram reclassificados conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Classificação do mapa pela metodologia SHALSTAB

Estabilidade	**Amplitude**
Incondicionalmente instável, não-saturado	-10 à -9,9
Incondicionalmente instável, saturado	-9,899999999 à -3,1
Instável, saturado	-3,099999999 à -2,8
Instável, não-saturado	-2,799999999 à -2,5
Estável, não-saturado	-2,499999999 à -2,2
Incondicionalmente estável, não-saturado	-2,199999999 à 9,9
Incondicionalmente estável, saturado	9,900000001 à 10

Fonte: Santos (2015).

Para a área de estudo, foram adotados diferentes valores de densidade para as diferentes composições. Para a região de mantos de areia foi utilizado o peso da areia e na parte da montanha o peso do material rochoso. Da mesma forma, o ângulo de atrito também possui valores diferentes para as diferentes composições.

Ledesma Villalba (2005) traz como faixas de ângulo interno de atrito interno para granodioritas de baixo grau de intemperismo os valores de 40° a 51° e de 35° a 40° para as granodioritas de alto grau de intemperismo. Para as areias, o autor traz valores de 29 a 36°. Para ITGE (1991) a densidade da granodiorita é de 2,74 g/cm³ e para Plata (2009), o valor é de 2,65 g/cm³. Para as areias os valores de densidade variam entre 1,88 e 1,99 g/cm³ (PLATA, 2009) e 1,60 g/cm³ para a província de Tacna no Peru (VILLANUEVA; GARCÍA; LIZARZABURU, 2020).

Foram então considerados os valores de 35° como ângulo interno de atrito para a granodiorita, e 29° como ângulo interno de atrito para as areias, por critério de segurança considerando as situações mais críticas. A densidade adotada para as granodioritas foi de 2,65 g/cm³ e para as areias o valor foi de 1,60 g/cm³, seguindo o mesmo critério.

Os dados de geomorfologia foram reclassificados para adotar os valores dos ângulos internos de atritos e de densidades. Na sequência os dados foram convertidos em raster com as mesmas características do modelo digital do terreno para possibilitar o cruzamento dos dados na calculadora raster.

3.5.2 HEC-HMS

No software HEC-HMS o objetivo foi gerar o hidrograma da bacia de San Idelfonso com base nos dados de precipitação da estação de Laredo, a mais próxima a área de estudo. Para isso, foram utilizados particularmente os registrados no evento de março de 2017, para o qual há o mapeamento das áreas inundadas. O hidrograma, que segundo o Cambridge Dictionary (2021), é um gráfico que mostra a vazão com relação ao tempo. Esse é então um dos dados de entrada requeridos para a modelagem hidráulica, que vincula a modelagem hidrológica (hidrograma) ao modelo hidráulico da mancha de inundação.

Dentro do programa, inicialmente foram inseridos os elementos que compõem o sistema, como sub-bacias, junções, reservatórios, curso de origem. No caso do estudo, há a inserção de apenas uma sub-bacia, considerando a bacia de San Idelfonso e a área de inundação,

a qual somadas resultaram em 75 km² de área, informação que deve ser inserida na caracterização da sub-bacia.

Foram selecionados os métodos de perda e transformação do hidrograma. Para o primeiro foi selecionado o método SCS CN e o método de transformação foi o do Hidrograma Unitário SCS. No método SCS CN foi considerado o Coeficiente CN 85, conforme Tucci (1993) e USACE (2021), considerando especialmente a ocupação residencial de grande parte da área.

Como tipo de transformação dentro do método de Hidrograma Unitário SCS, foi selecionado o tipo de gráfico *Peak Rate Factor 600* e o tempo de concentração, fator também necessário para o método, foi calculado por Kirpich (USDA, 1996).

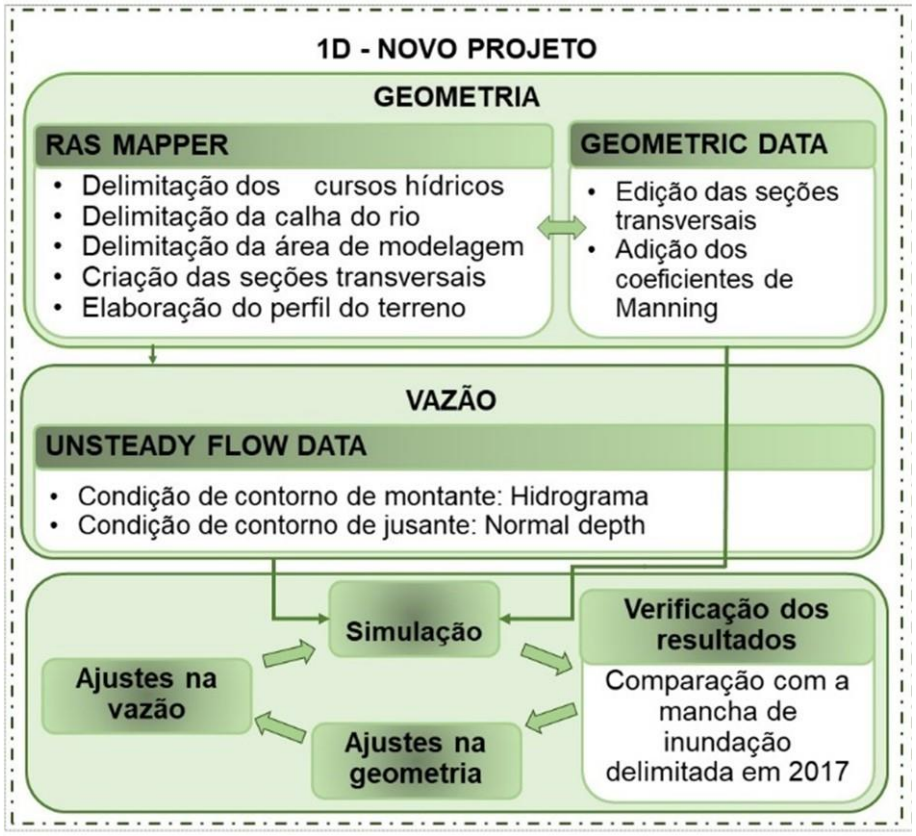
Na modalidade *Precipitation Gage* foram inseridos os dados de precipitação ocorridos no evento de março de 2017, registrados na estação de Laredo, tendo como data inicial o dia 13 de março de 2017 e data final dia 22 de março de 2017. Após finalizada a inserção dos dados, foi gerado o hidrograma na opção *compute*. Os dados gerados puderam ser exibidos em tabela ou gráfico.

3.5.3 HEC-RAS

No *software* HEC-RAS o objetivo foi elaborar um modelo hidráulico onde o resultado foi a mancha de inundação da área. Esse modelo subsidiou o cálculo da precipitação e consequente vazão que desencadeia o alagamento na zona urbanizada.

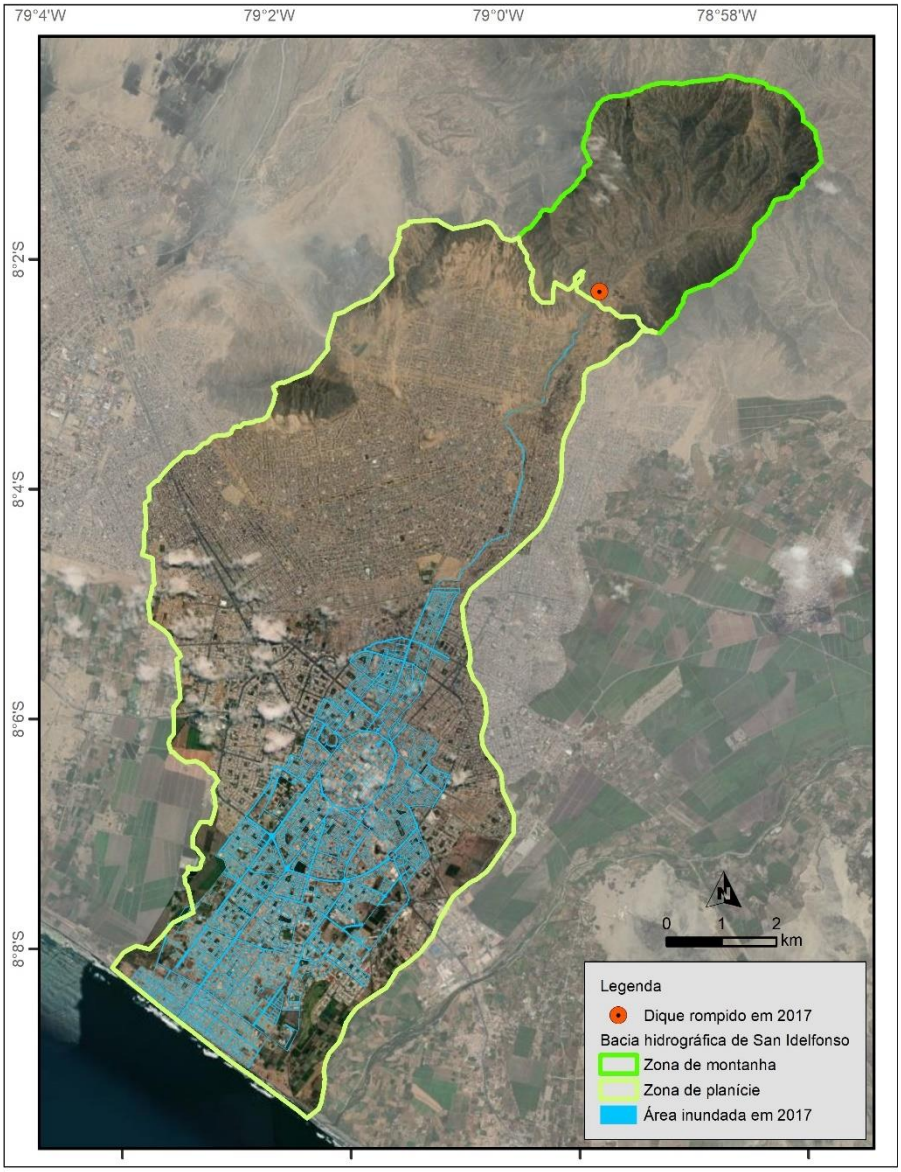
O fluxograma da Figura 22 demonstra como ocorreu a modelagem no ambiente do software HEC-RAS. Em linhas gerais, fazem parte da modelagem da mancha de inundação o relevo da área de interesse e as condições de vazão. E para a comparação com os resultados, utilizaram-se os dados espaciais da Figura 23, a mancha de inundação mapeada em 2017 pelo *Gobierno Regional de La Libertad* em conjunto com o INDECI (2017). Após criado o modelo, foi rodada a simulação e comparada com a mancha de inundação registrada em 2017 e repetiu-se o processo de ajustes na geometria e na vazão até alcançar resultados compatíveis com a mancha registrada em 2017.

Figura 22. Fluxograma de utilização do HEC-RAS



Fonte: o autor.

Figura 23. Mancha de inundação registrada em 2017



Fonte: Adaptado de Gobierno Regional de La Libertad e INDECI (2017).

3.6 ZONEAMENTO AMBIENTAL

Primeiramente pontua-se que embora a revisão bibliográfica e em especial a legislação peruana e brasileira atualmente tratam do zoneamento ecológico-econômico (ZEE), neste trabalho foi elaborado um zoneamento ambiental, ou seja, um zoneamento simplificado. Compreende-se que a elaboração de um zoneamento ecológico-econômico exigiria um diagnóstico social e econômico da bacia. Não sendo possível realizar esse diagnóstico, optou-se por alterar a nomenclatura.

A partir dos resultados obtidos na modelagem e as informações primárias, foi elaborada a proposta de zoneamento ambiental da bacia, através do cruzamento dos mapas da bacia e com base na legislação peruana, indicando as áreas de maior fragilidade ambiental, áreas de risco de inundação e demais classes para o regramento da bacia com vistas a mitigação dos efeitos das inundações. A esquematização da elaboração do zoneamento ambiental para a bacia de San Idelfonso está apresentada na Figura 24.

Figura 24. Fluxograma para a elaboração do zoneamento ambiental para a bacia de San Idelfonso

Fonte: o autor (2021).

4 RESULTADOS

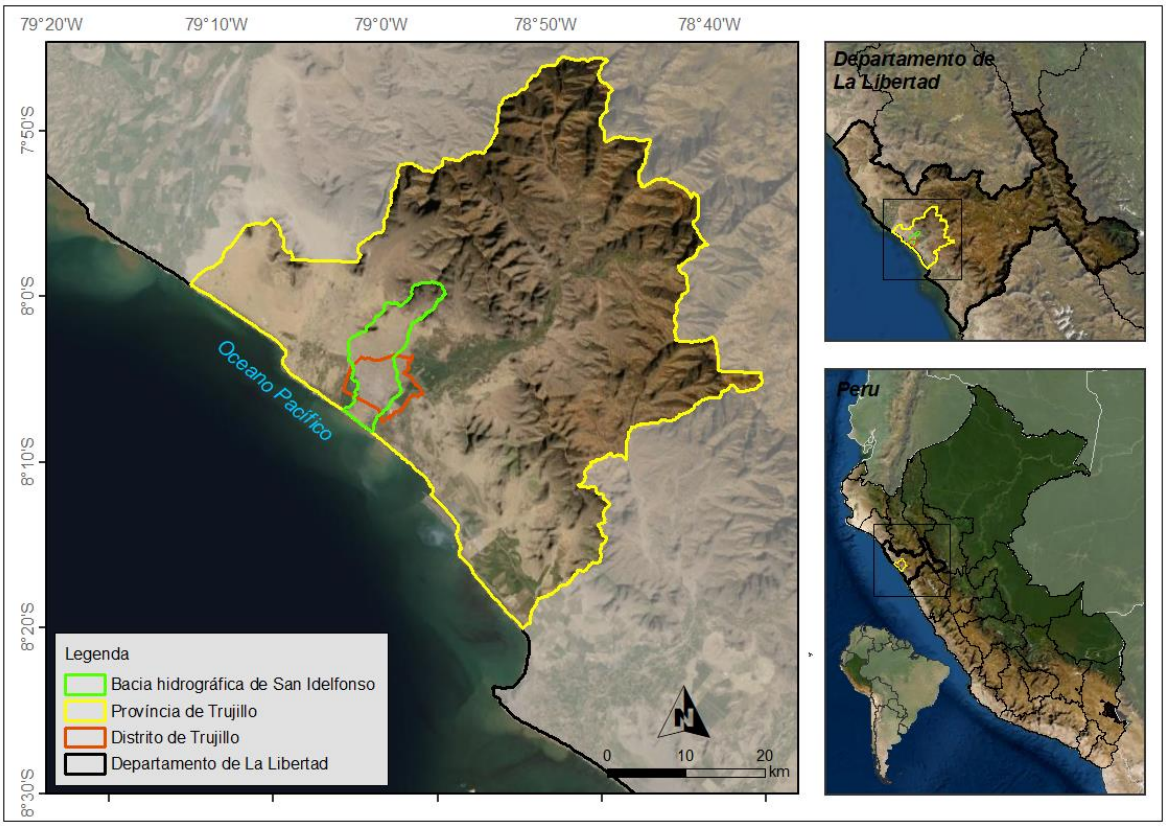
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA PROVÍNCIA DE TRUJILLO E DA BACIA DE SAN IDELFONSO

Tratando especificamente da área de estudo, a cidade de Trujillo (Figura 25) foi fundada em 1535, perto do vale de Chimús, no Peru. O clima de Trujillo é descrito como quente e seco, com apenas duas estações, verão e inverno. Naquela época, já se sabia sobre as fortes chuvas ocorridas na região, devido ao vento norte (FEIJOO, 1763). Originalmente o tamanho da cidade era bastante pequeno, apresentando a forma oval cercada por um muro, para proteger a cidade (FEIJOO, 1763).

Do relevo plano da área, as ruas da cidade, como Feijoo (1763) aponta, eram retas e niveladas. A isto é adicionada a descrição de casas elevadas para evitar danos causados pela chuva.

Sobre a caracterização física, a província de Trujillo está localizada em uma planície costeira (inclinação de 1%) a uma altitude de 34 metros. Os bairros mais ao norte, Laredo, El Porvenir e El Milagro, estão a uma altura de mais de 100 metros e áreas costeiras como Salaverry, Las Delicias, Buenos Aires e Huanchaco, cerca de 3 metros; O restante dos bairros, incluindo o centro histórico, está localizado em altitudes intermediárias. O rio Moche, ao sul da cidade com uma inclinação de 4%, drena uma bacia de 1.864 quilômetros até Quirihuaca. As demais áreas recebem riachos de pequeno porte, mas que esporadicamente podem produzir altos fluxos (ALONSO *et al*., 2013).

Figura 25. Localização da província de Trujillo

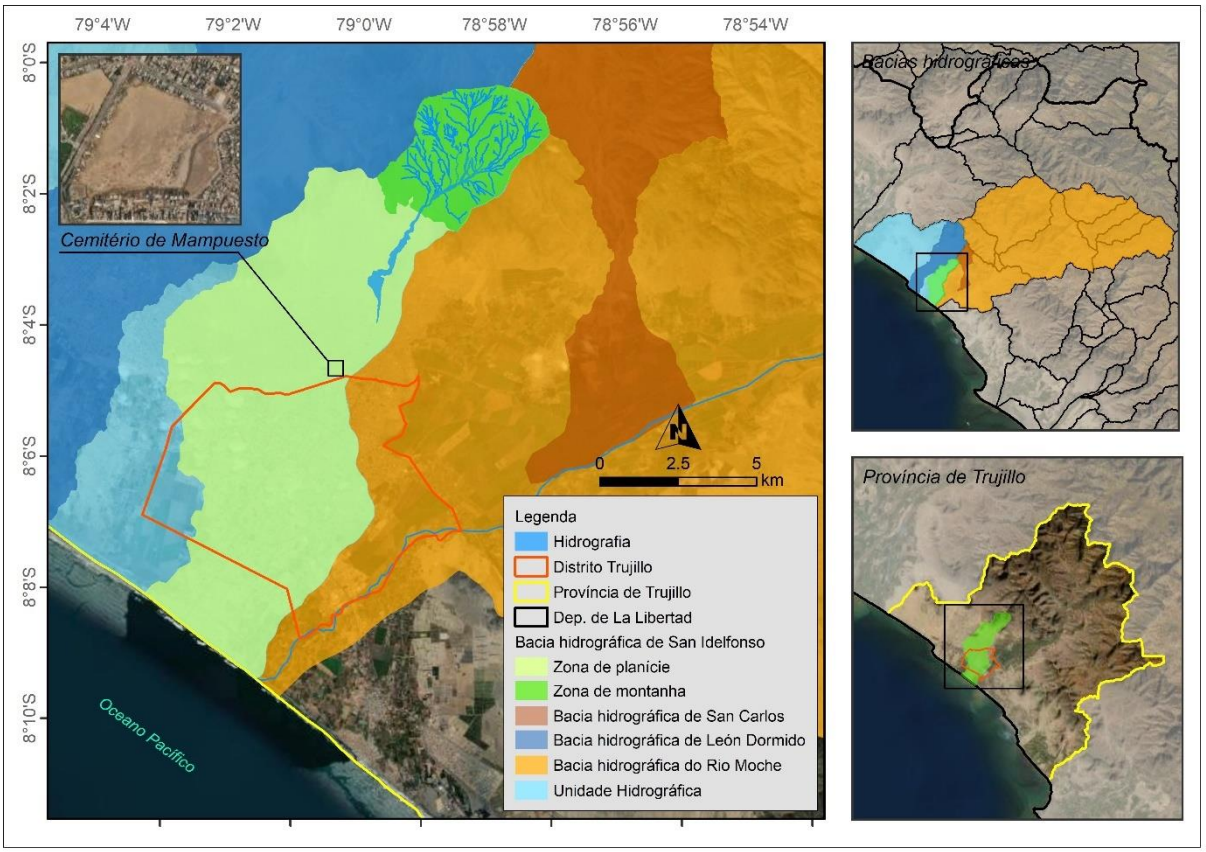


Fonte: o autor.

Aranda *et al*. (2014) comentam que em Alto Trujillo, o risco de inundação vem da presença de *quebradas* aluviais que são ativadas periodicamente pelo Fenômeno *El Niño*, sendo a *quebrada* de San Idelfonso (Figura 26) que coloca em risco a área urbana. Através de obras de engenharia, o canal natural foi canalizado nas ruas Hipólito Unanue e Atahualpa para proteção, mas não houve a análise da funcionalidade hidráulica dessas estruturas.

A área montanhosa de San Ildefonso, ou seja, a *quebrada*, tem uma área de 12,19 km², aproximadamente semicircular. A área total da bacia, considerando a área de planície e de montanha é de 74,78 km², sendo a área de planície correspondente a 62,59 km². E é na área de planície onde ocorrem os impactos do fluxo gerado na área de montanha. É esperada nessa bacia uma resposta rápida à precipitação, na forma de descargas repentinas, os chamados *huaicos*. Após os eventos do ano de 1925, a cidade sofreu chuvas nos anos de 1940, 1941, 1945, 1946, 1956, 1957, 1972, 1973, 1982, 1983, 1997 e 1998. O fenômeno *El Niño* de 1997-1998 causou o colapso da barragem de Mampuesto, causando danos à propriedade e inundações na cidade de Trujillo. Ressalta-se ainda a preocupação com o fluxo de material sólido carregado com a água (NARVAÉZ *et al*., 2014). O evento mais recente ocorreu em 2017 causando grandes perdas econômicas.

Figura 26. Localização da bacia de San Idelfonso



Fonte: o autor.

Alonso *et al*. (2013) propõem soluções para a mitigação de problemas ambientais relacionados à área urbana de Trujillo causados pela ativação da *quebrada* de San Idelfonso. No rio Moche, sugere-se a construção de uma proteção nas edificações adjacentes ao rio e a análise da estabilidade da ponte da estrada panamericana sobre o rio Moche. Na cidade de Trujillo, sugere-se, descarregar o fluxo da *quebrada* de San Idelfonso no rio Moche ou a execução de uma rede de águas pluviais no centro urbano de Trujillo. O último envolve uma rede de coletores principais interceptores, de esgotos ou coletores secundários com peneiras que despejam nas áreas principais, de detenção ou de armazenamento temporário, e entrega em um canal para o mar. Em El Milagro, propõe-se definir um espaço sem edifícios para o corredor do rio e isolá-lo, por meio de um muro construído nas proximidades do canal de água da *quebrada* La Cumbre. Ao sul de El Milagro, recomenda-se a construção de um sistema de drenagem urbana para evacuar a avenida. Porém, essas sugestões não possuem estudos técnicos que comprovem a sua eficácia, sendo necessário então realizar testes que comprovem ou descartem essas possibilidades.

O estudo intitulado de Criação do serviço de proteção contra inundações na *quebrada* de San Idelfonso nos distritos de El Porvenir, Trujillo e Victor Larco Herrera na província de

Trujillo – Departamento de La Libertad (AC PÚBLICA, 2019) traz três alternativas para mitigar o impacto das precipitações sobrea a área urbana de Trujillo, conforme o Quadro 1.

As propostas diferem nas Ações 2, onde cada uma das alternativas sugere um meio de descarregar o fluxo proveniente da *quebrada*.

Os autores ainda sugerem para a Ação 1 a construção de 33 pequenos diques ao longo de toda a *quebrada* (em série e paralelos) para a contenção parcial do fluxo. Ainda sugerem como melhor alternativa a Alternativa III. A escolha se deve à dificuldade técnica de execução da Alternativa I e pelo fluxo não conhecido que pode ocorrer na Alternativa II (*quebrada* de San Carlos). Ressalta-se novamente a condição de subida do nível do mar, o que dificulta ainda mais a execução da Alternativa I. Porém, não estão claros os critérios técnicos que garantam a funcionalidade da Alternativa III. Ou seja, não fica claro que a calha do rio Moche suporta além do próprio fluxo gerado na bacia nos eventos de precipitação, o fluxo proveniente da *quebrada* de San Idelfonso também.

Quadro 1. Propostas de mitigação dos impactos da precipitação decorrentes da *quebrada* de San Idelfonso

Projeto	Descrição
Alternativa I	- Ação 1: Construção de diques de contenção que permitam controlar e reter o fluxo de detritos e retardar a acumulação de diferentes vazões geradas nas subunidades hidrográficas que formam a *quebrada* e evitar sua concentração; - Ação 2: Construção de uma barragem de captação e dutos subterrâneos fechados que cruzam a cidade e entregam o fluxo ao mar; - Ação 3: Construção de drenagem pluvial para a cidade; - Ação 4: Implementação de um sistema de alerta na *quebrada*.
Alternativa II	- Ação 1: Construção de diques de contenção que permitam controlar e reter o fluxo de detritos e retardar a acumulação de diferentes vazões geradas nas subunidades hidrográficas que formam a *quebrada* e evitar sua concentração; - Ação 2: Construção de uma barragem de captação e um canal paralelo ao canal Chavimochic até o rio Moche, pelo distrito de Laredo e a parte baixa da *quebrada* de San Carlos e mais uma estrutura em rocha no rio Moche; - Ação 3: Construção de drenagem pluvial para a cidade; - Ação 4: Implementação de um sistema de alerta na *quebrada*.
Alternativa III	- Ação 1: Construção de diques de contenção que permitam controlar e reter o fluxo de detritos e retardar a acumulação de diferentes vazões geradas nas subunidades hidrográficas que formam a *quebrada* e evitar sua concentração; - Ação 2: Construção de uma barragem de captação e um canal paralelo ao canal Chavimochic até o rio Moche, pela cidade de Laredo e mais uma estrutura em rocha no rio Moche; - Ação 3: Construção de drenagem pluvial para a cidade; - Ação 4: Implementação de um sistema de alerta na *quebrada*.

Fonte: AC Pública (2019).

Ressalta-se que nos eventos de ativação das *quebradas*, não é apenas água que alcança a área urbana de Trujillo, mas também fragmentos de rocha e solo provenientes da montanha e resíduos sólidos dispostos no caminho do rio, como exemplificado na Figura 27.

Figura 27. Resíduos sólidos ao longo do leito intermitente

Fonte: o autor.

4.2 RELEVO DA BACIA DE SAN IDELFONSO

Com relação ao relevo costeiro (Figura 28), esse varia do nível do mar (0 m) a 1.030 metros de altura, considerando a o ponto mais alto do divisor de águas e a planície de inundação que alcança o oceano.

O formato indica também que, após o exutório da zona de montanha, na base da montanha, há o estreitamento do fluxo, que aumenta a área de alcance conforme o relevo vai se tornando mais plano.

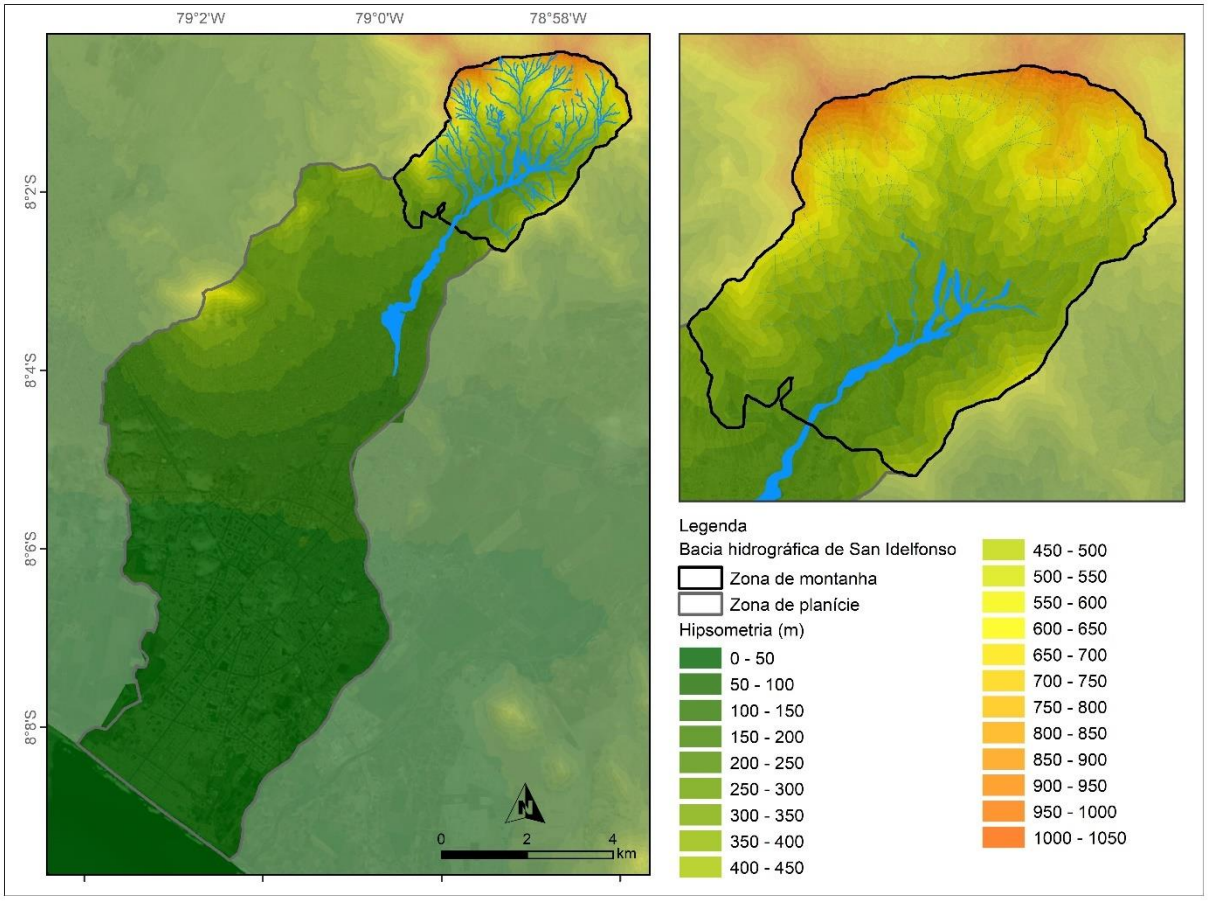
Observa-se que a planície de inundação (zona de planície) da bacia se espalha abaixo do exutório da zona de montanha, que se inicia a partir de 170 metros de altitude. Identifica-se uma grande porção de áreas mais baixas em contraposição a grande variação de altitude que ocorre na zona de montanha. Aproximadamente 64% da área total da bacia se encontra entre 0 metros e 150 metros de altitude. A parte montanhosa, que configura a *quebrada*, segue partir de 170 metros de altitude até 1.030 metros. Analisando a Tabela 3 e observando o mapa Figura 28, confirma-se a grande variação de altitude na bacia.

Tabela 3. Hipsometria da bacia de San Idelfonso

Hipsometria (m)	Zona de montanha		Zona de planície		Área total da bacia	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
0 – 50	-	-	2.765,20	44,19	2.765,20	36,98
50 – 100	-	-	1.121,58	17,92	1.121,58	15,00
100 - 150	-	-	852,06	13,62	852,06	11,40
150 – 200 (170)	23,35	1,92	663,30	10,60	686,65	9,18
200 - 250	155,45	12,75	458,72	7,33	614,17	8,21
250 - 300	119,59	9,81	231,68	3,70	351,27	4,70
300 - 350	147,62	12,11	75,39	1,20	223,01	2,98
350 - 400	127,56	10,46	42,64	0,68	170,20	2,28
400 - 450	113,22	9,29	20,74	0,33	133,96	1,79
450 - 500	99,48	8,16	10,29	0,16	109,77	1,47
500 - 550	90,80	7,45	9,28	0,15	100,07	1,34
550 - 600	77,86	6,39	5,17	0,08	83,03	1,11
600 - 650	66,26	5,44	1,57	0,03	67,83	0,91
650 - 700	60,74	4,98	-	-	60,74	0,81
700 - 750	52,09	4,27	-	-	52,09	0,70
750 - 800	32,31	2,65	-	-	32,31	0,43
800 - 850	19,77	1,62	-	-	19,77	0,26
850 - 900	13,53	1,11	-	-	13,53	0,18
900 - 950	10,07	0,83	-	-	10,07	0,13
950 - 1000	7,12	0,58	-	-	7,12	0,10
1000 - 1050	2,13	0,17	-	-	2,13	0,03
Total	1.218,94	100,00	6.257,63	100,00	7.476,57	100,00

Fonte: o autor.

Figura 28. Hipsometria da bacia de San Idelfonso

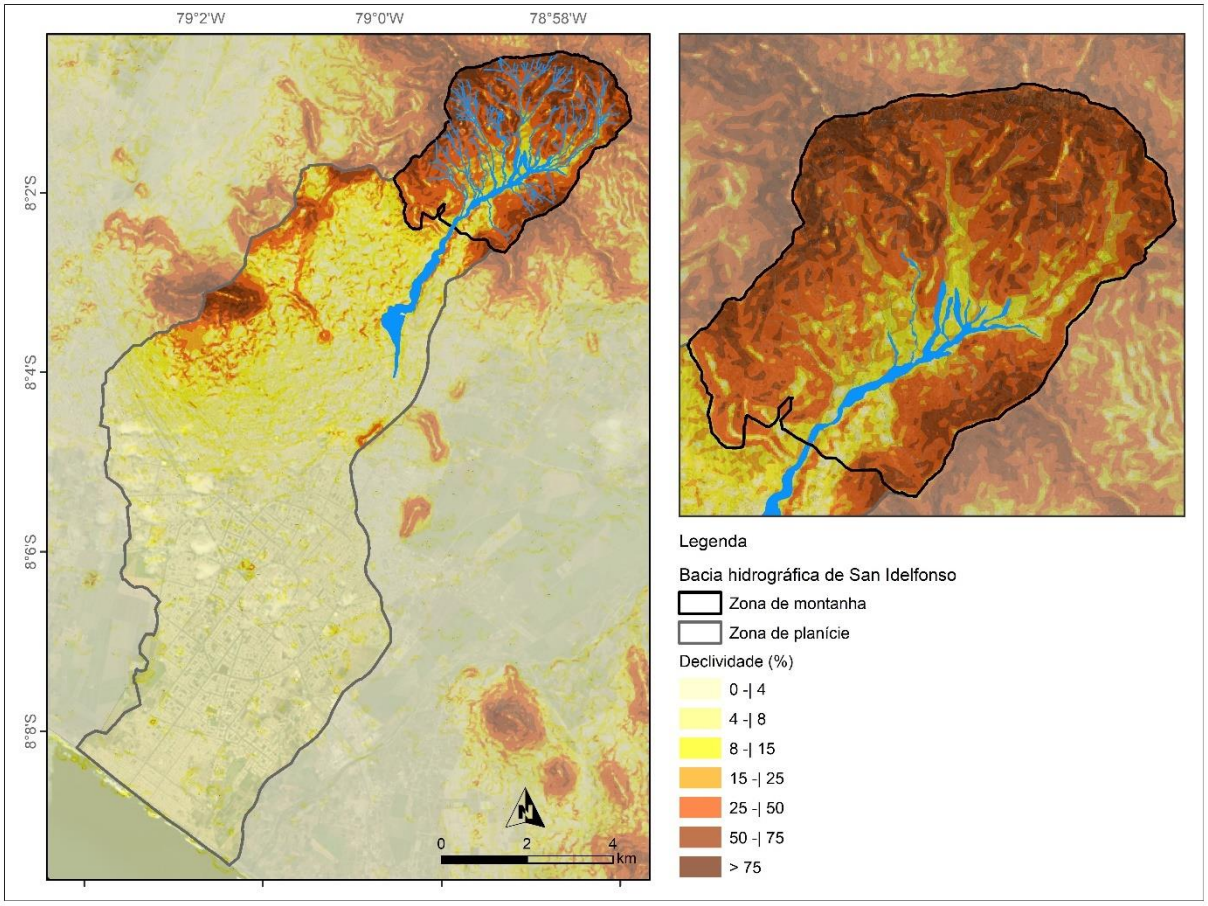


Fonte: o autor.

A declividade da bacia de San Idelfonso (Figura 29) indica nas áreas da zona de planície da bacia declividades de até 8%. A partir do exutório da zona de montanha até os divisores de água, são identificadas áreas de declividades a partir de 8% até áreas, alcançando em alguns pontos, declividades superiores a 75%. Isso ocorre devido à grande variação de altitude em um pequeno intervalo horizontal. Dessa forma, as maiores inclinações são encontradas especialmente nas áreas de maiores altitudes.

Observa-se ainda na Tabela 4 que a maior porcentagem de ocupação corresponde a classe de 0% a 4%, ocupando 49% da área da bacia, na zona de planície.

Figura 29. Declividade da bacia de San Idelfonso



Fonte: o autor.

Tabela 4. Declividade da bacia de San Idelfonso

Declividade (%)	Zona de montanha		Zona de planície		Área total da bacia	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
0 - 4	15,07	1,24	3.671,66	58,67	3.686,73	49,31
4 - 8	26,05	2,14	1.223,62	19,55	1.249,67	16,71
8 - 15	120,69	9,90	741,52	11,85	862,20	11,53
15 - 25	181,62	14,90	309,08	4,94	490,70	6,56
25 - 50	507,32	41,62	81,64	1,30	588,96	7,88
50 - 75	296,70	24,34	13,89	0,22	310,58	4,15
> 75	71,48	5,86	216,23	3,46	287,71	3,85
Total	1.218,94	100,00	6.257,63	100,00	7.476,57	100,00

Fonte: o autor.

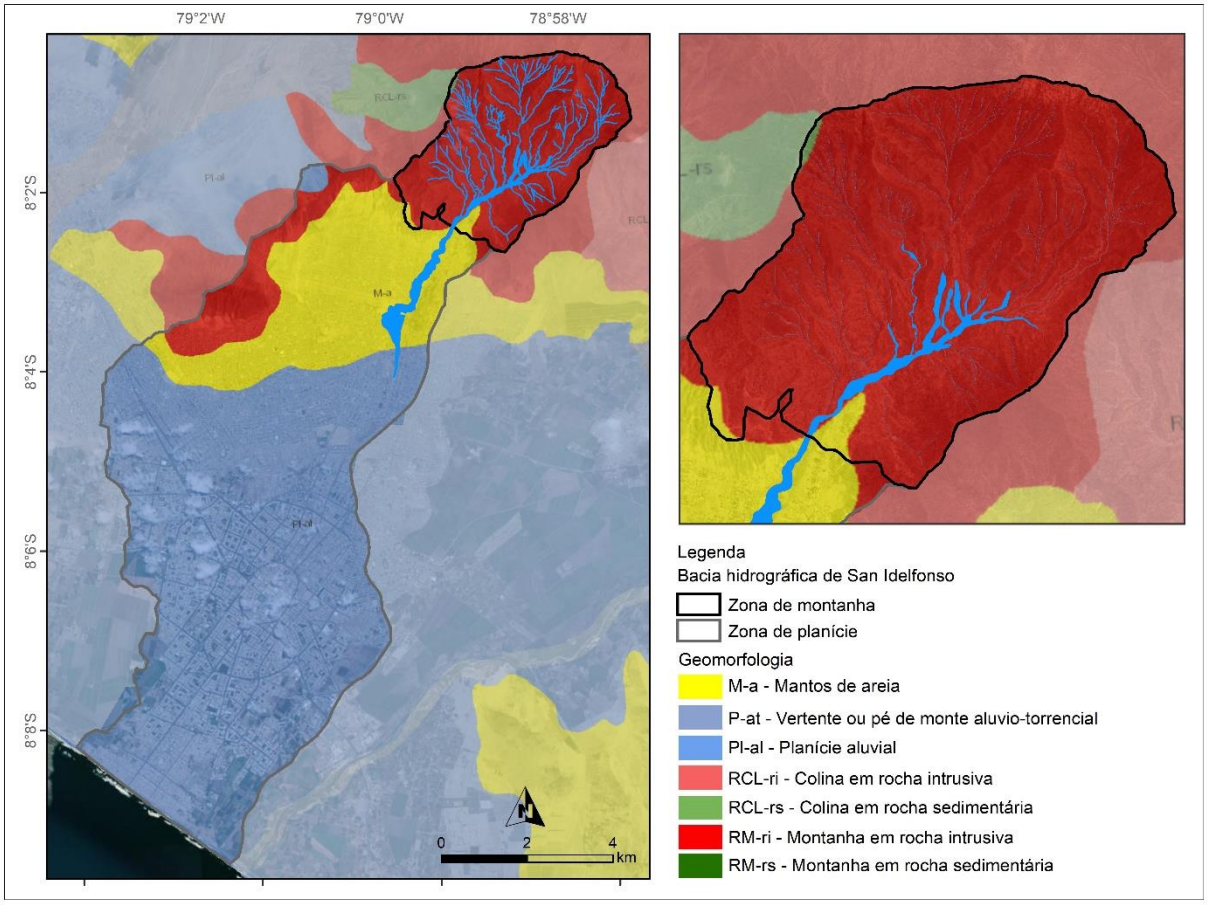
Essas informações relacionadas ao relevo da bacia, tanto a hipsometria quanto a declividade indicam a tendência de geração de fluxo acelerado na bacia e desaceleração na planície de inundação gerando uma grande área atingida pelo fluxo, essa caracterizada como área urbanizada.

4.3 GEOMORFOLOGIA

A zona de montanha é classificada em 98,14% de sua totalidade (1.196 ha) de montanha em rochas intrusivas. Apenas 1,86 % (23 ha) da zona de montanha correspondem a mantos de areia. A classe de montanhas de rochas intrusivas corresponde a afloramentos produzidos por processos de desnudação, de conformação elevada e alargada e declividade moderada a alta (INGEMMET, 2019b). Os mantos de areia são descritos como a migração das areias litorâneas, depositadas em forma de mantos sobre colinas de rochas vulcânicas sedimentárias (INGEMMET, 2019a).

Observando o mapa da Figura 30 percebe-se como constituição base da bacia as rochas intrusivas mas ao longo do trajeto do rio intermitente da bacia de San Idelfonso há uma larga faixa de mantos de areia, moldáveis a ação humana. E até alcançar o oceano, há a constituição de planície aluvial, caracterizados pela baixa declividade e largura variável (INGEMMET, 2019b).

Figura 30. Mapa Geomorfológico da bacia de San Idelfonso



Fonte: Adaptado de INGEMMET (2016).

4.4 GEOLOGIA DA BACIA DE SAN IDELFONSO

Diversas classes geológicas são encontradas na bacia de San Idelfonso, especialmente nas áreas próximas ao oceano, e relacionadas aos cursos d'água, encontram-se depósitos, aluviais, eólicos, fluviais, associados a área mais baixas (Figura 31).

Esses materiais depositados são provenientes das regiões mais altas, classificadas como grupos e formações de rochas. As descrições das classes geológicas presentes em Trujillo estão disponíveis no Quadro 2.

Na zona de planície da bacia de San Idelfonso, existem depósitos eólicos e marinhos e na região próxima ao rio Moche, os depósitos são fluviais. No leito do rio intermitente são encontrados depósitos aluviais e fluviais. As formações rochosas Chicama e Simbal estão localizadas em pequenas áreas tanto na zona de planície quanto na zona de montanha. A zona de montanha é composta por granodiorita em toda a parte de formação dos recursos hídricos e nas partes mais baixas, de acumulação dentro da própria *quebrada*, áreas deposicionais. De acordo com o Quadro 2, a granodiorita é altamente suscetível a geração de fluxos de detritos, erosão de encostas, quedas de rochas, deslizamentos e movimentos complexos.

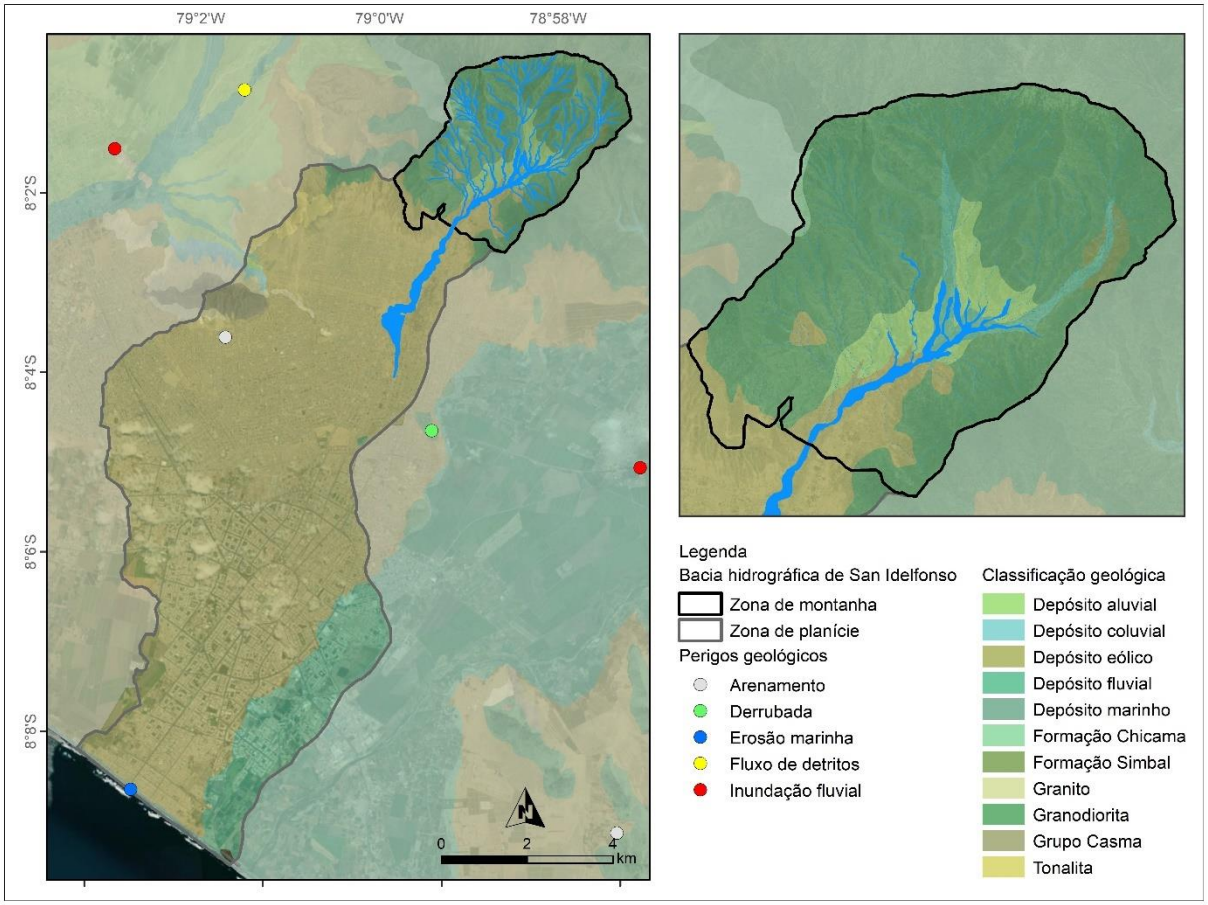
Reforça-se a condição de fragilidade da bacia frente não somente a formação de fluxo de água acelerado pela sua configuração de relevo, mas também pela composição geológica que adiciona material carreável ao fluxo.

Um dos estudos elaborados pelo INGEMMET (2017) apontou a identificação de perigos geológicos na província de Trujillo associados a movimentos de massa do tipo fluxo de detritos (*huaicos*), inundação e erosão fluvial e ativação de leitos eólicos também, isso apenas em 2017. Esses eventos foram resultantes de precipitações intensas ocasionadas pelo evento *El Niño*. Como fator condicionante associado ao *El Niño* foi identificada a morfologia da área, o substrato altamente intemperizado e os depósitos eólicos nas encostas de morros forneceram material para arraste.

Adicionalmente ao estudo da situação específica de 2017, na Figura 31 localizam-se outros perigos associados a geologia. Na província de Trujillo foram identificados 40 pontos com risco a fluxo de detritos. De maneira geral, destaca-se a associação dos pontos de risco aos recursos hídricos, sejam eles perenes ou intermitentes.

As áreas ocupadas por cada classe geológica estão descritas na Tabela 5.

Figura 31. Classificação geológica da bacia de San Idelfonso



Fonte: adaptado de INGEMMET (2016).

Tabela 5. Geologia da bacia de San Idelfonso

Geologia	Zona de montanha		Zona de planície		Área total da bacia	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Depósito aluvial	97,61	8,01	4,52	0,07	102,13	1,37
Depósito coluvial	-	-	11,51	0,18	11,51	0,15
Depósito eólico	133,85	10,98	5269,10	84,28	5402,95	72,32
Depósito fluvial	59,34	4,87	706,99	11,31	766,33	10,26
Depósito marinho	-	-	35,25	0,56	35,25	0,47
Formação Chicama	7,51	0,62	-	-	7,51	0,10
Formação Simbal	18,04	1,48	-	-	18,04	0,24
Granito	-	-	38,36	0,61	38,36	0,51
Granodiorita	902,59	74,05	54,07	0,86	956,67	12,81
Grupo Casma	-	-	70,08	1,12	70,08	0,94
Tonalita	-	-	62,02	0,99	62,02	0,83
Total	1218,94	100,00	6251,91	100,00	7470,85	100,00

Fonte: o autor.

Quadro 2. Descrição e quantificação da classificação geológica da bacia de San Idelfonso

Unidade	**Sigla**	**Descrição**
Depósito aluvial	Qh-al	De formação no período Holoceno, os depósitos aluviais são acúmulos de cascalho, areia, silte e argila com clastos sub-angulares a angulares de composições diferentes. São constituídos por extensas planícies aluviais e terraços (alto e médio) em diferentes níveis acima dos principais vales e principais afluentes. São depósitos semi-consolidados. Esses depósitos, geralmente correspondem a uma mistura heterogênea de cascalhos e areias, arredondados para sub-arredondados e sedimentos de boa seleção, e diferentes níveis e estratos que mostram atividade fluvial dinâmica e sua permeabilidade é média a alta. Há a possiblidade de deslizamentos de terra.
Depósito eólico	Q-eo	De formação no período holoceno, os depósitos eólicos são acumulações de areia solta distribuídas nas planícies e pampas costeiros e encostas mais baixas, que penetram progressivamente em direção ao continente. Eles são suscetíveis à dinâmica do vento, que provoca dunas e restinga. Sua composição é de areias quartzosas.
Depósito fluvial	Q-fl	São acúmulos de cascalho, areia, silte e argila transportados no leito do rio e riachos. Os depósitos fluviais são constituídos de materiais localizados no leito de rios e riachos, terraços baixos alagados e planícies de inundação. São depósitos heterométricos constituídos por seixos, cristas e cascalhos sub-arredondados em uma matriz arenosa ou siltoso, uma mistura de lentes arenosas e arenosas. São depósitos não consolidados, de permeabilidade é alta. E são suscetíveis à erosão do rio e inundações periódicas.
Depósito marinho	Q-ma	De formação no período holoceno, os depósitos marinhos estão localizados ao longo da costa ou litoral formando baías ou praias estreitas. Geralmente, eles são constituídos de areias de espessuras muito finas semi-consolidadas. São suscetíveis à erosão marinha.
Formação Chicama	Js-ch	Consiste em uma espessa série sedimentar composta principalmente por xistos de ardósia, folhelhos arenosos e horizontes ocasionais de arenito entremeados a diques e peitoris de andesito e diabásio, bem como pequenos corpos de granodiorito. Devido à sua baixa resistência aos agentes de intemperismo, esta formação possui um relevo de formas topográficas suaves, com pequenas colinas formadas por xistos e arenitos compactados.
Formação Simbal	Js-si	De formação na era mezozóica a Formação Simbal é composta por grossas sequências de folhelhos cinzentos escuros intercalados com camadas de espessura fina de arenitos cinzentos esverdeados, no nível superior contém folhelhos intercalados com arenitos com laminação paralela, apresentam intercalações com calcário.
Granodio-rita	KsP-gd	Tem predominância de quartzo e plagioclásio, mas com certo teor de feldspato alcalino. É uma rocha muito comum no ambiente continental, pertence aos granitóides, está localizada na parte final da diferenciação magmática. Seus afloramentos possuem relevo de moderado a muito forte. Têm alta suscetibilidade à ocorrência de fluxo de detritos ou *huaicos*, erosão em encostas, queda de rochas, deslizamentos de terra, slides e movimentos complexos.
Total		

Fonte: adaptado de Huarache et al. (2002), Ingemmet (2012, 2016, 2017), Museo Virtual de Geología (2020).

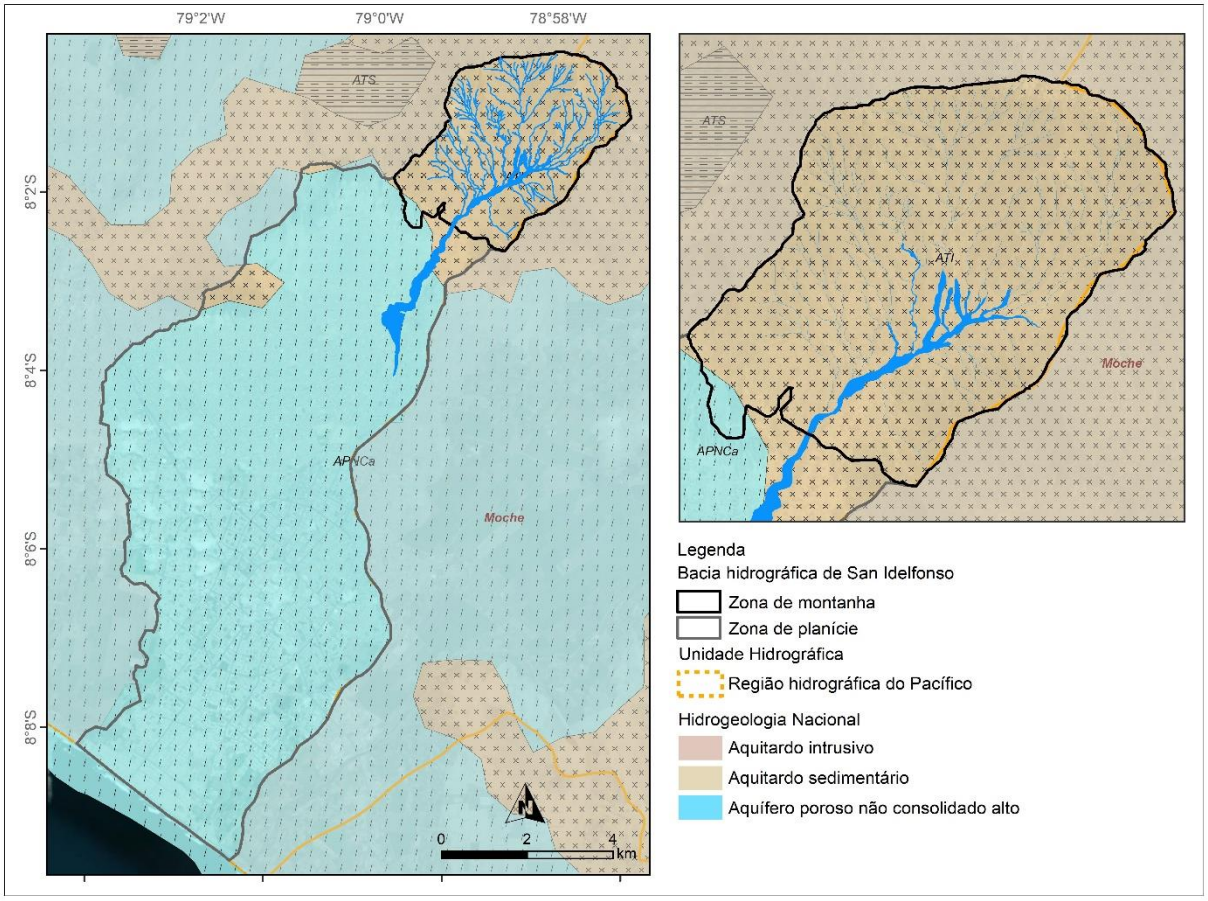
4.5 HIDROGEOLOGIA

De acordo com a Figura 32, a zona de montanha da bacia de San Idelfonso está localizada em uma zona classificada como aquitardo intrusivo, de extensão local, descontínuo, de permeabilidade secundária, superficial, que dificulta o armazenamento e a circulação de água subterrânea. São de profundidade baixa, impermeáveis mas podem existir fluxos subsuperficiais (INGEMMET, 2019). Já o aquífero poroso não consolidado, é uma formação detrítica permeável, contínuo e de extensão local, de alta porosidade e permeabilidade (INGEMMET, 2019).

A classe aquitardo intrusivo corresponde a 98,52% da área da zona de montanha da bacia de San Idelfonso (1.201 ha) enquanto os 1,48% (18 ha) restantes, correspondem a classe aquífero poroso não consolidado.

Já a zona de planície da bacia de San Idelfonso ocupa em sua quase totalidade a zona de aquífero poroso não consolidado alto. Esses aquíferos coincidem com a formação geológica de depósitos, os quais facilitam o deslocamento e o armazenamento de água subterrânea em seu interior (INGEMMET, 2019).

Figura 32. Mapa Hidrogeológico da bacia de San Idelfonso



Fonte: Adaptado de INGEMMET (2016).

Adicionalmente, deve-se considerar porém, o nível freático na zona de montanha, o qual Quiroz Moreno e Mostacero-Leon (2020) observaram variar entre 9 metros abaixo do solo até a 10 centímetros abaixo do solo. Esse, pode variar em um único dia até 3,90 metros devido à pressão atmosférica. De um dia para o outro no período chuvoso, a variação chegou a 6,40 metros, sendo uma precipitação de 11 mm responsável pela subida de 20 centímetros no nível freático.

Dessa forma, deve-se considerar o rápido escoamento superficial da bacia, a rápida saturação no nível freático, especialmente em períodos chuvosos, não sendo possível adotar soluções que considerem a infiltração no solo para minimização dos impactos do escoamento superficial.

4.6 PRECIPITAÇÃO

A estação pluviométrica com uma longa série de dados, mais próxima da bacia hidrográfica de San Idelfonso é estação de Sinsicap (Tabela 6), localizada 30 quilômetros da bacia, avançando continente adentro. A estação registra dados diários desde setembro de 1963, de forma contínua sem apresentar falhas anuais e poucas falhas mensais.

Tabela 6. Estação de Sinsicap

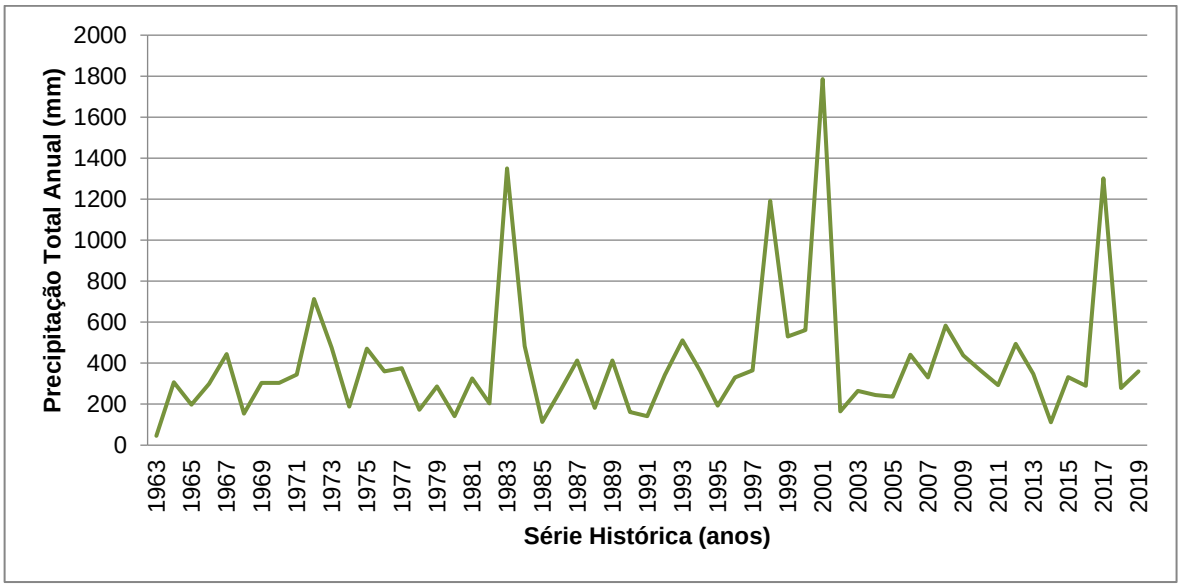
Estação	**Sinsicap**
Departamento	La Libertad
Província	Otuzco
Distrito	Sinsicap
Tipo	Convencional
Latitude	7° 51’ 0.75”
Longitude	78° 45’ 18.11”
Altitude	2.315 m
Início de operação	1963

Fonte: SENAMHI (2021).

Ao analisar a Figura 33 e a Figura 34 que apresentam respectivamente a precipitação total anual e a precipitação média anual para a série histórica, identificam-se em ambos os gráficos os mesmos picos, nos anos de 1983, 1998, 2001 e 2017, sendo os eventos de 1998 e 2017 coincidentes com registros de eventos causadores de huaicos e consequentes inundações da área urbana de Trujillo. Esses eventos podem ser classificados como Meganiños, que são eventos de El Niño que causam precipitações acima da média das precipitações já elevadas que ocorrem nesses eventos, e que, em média, ocorriam em um intervalo de cerca de 38 anos (FELICES, 2011), o qual foi reduzido nos últimos anos, com 4 eventos dessa magnitude em um intervalo de 34 anos.

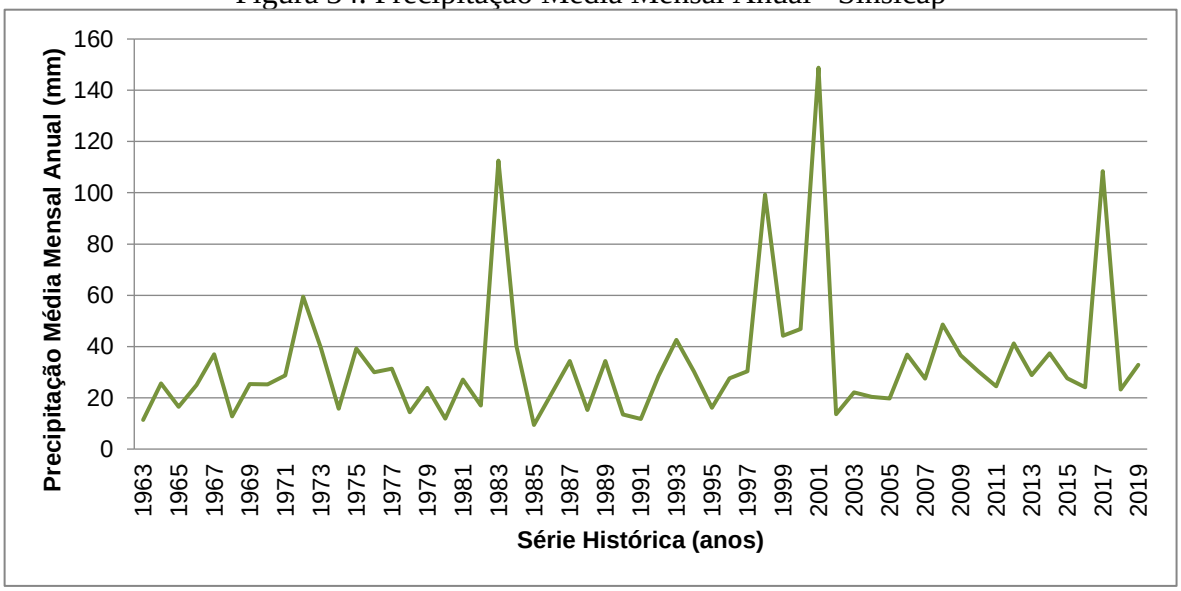
Enquanto a média anual registrada é de 34 mm, nos anos de *Meganiño* foram registradas médias entre 99 e 148 mm de precipitação. Considerando a precipitação máxima, o valor médio é de 400 mm anuais, sendo nos anos de 1983, 1998, 2001 e 2017 registrados totais anuais entre 1.192 e 1.786 mm.

Figura 33. Precipitação Total Anual – Sinsicap



Fonte: o autor.

Figura 34. Precipitação Média Mensal Anual - Sinsicap



Fonte: o autor.

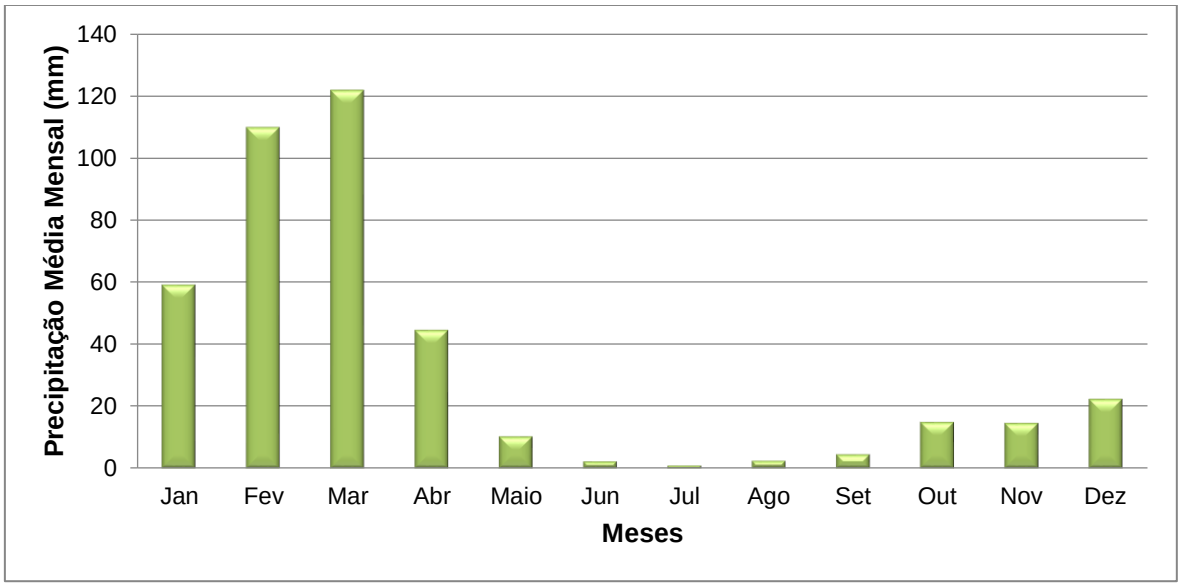
O comportamento da precipitação média mensal (Figura 35) indica o período de janeiro a abril como historicamente mais chuvoso, atingindo médias de 110 mm mensais, período de ocorrência dos eventos extremos de 1998 e 2017 (fevereiro e março). Enquanto o período de maio a dezembro não ultrapassa médias de 20 mm mensais, sendo o mês de julho o de menor precipitação, com média de 1 mm mensal durante a série histórica.

Já o gráfico de máximas mensais (Figura 36) apresenta o mês de fevereiro como o maior valor registrado de precipitação, correspondente ao *Meganiño* registrado em 2001, com

1.004 mm registrados no mês. A curva de variação de precipitação máxima mensal se comporta da mesma forma que as curva média mensal, com os meses entre abril e dezembro apresentando menores precipitações, especialmente o mês de julho, não ultrapassando uma precipitação máxima de 18 mm entre 1963 e 2019.

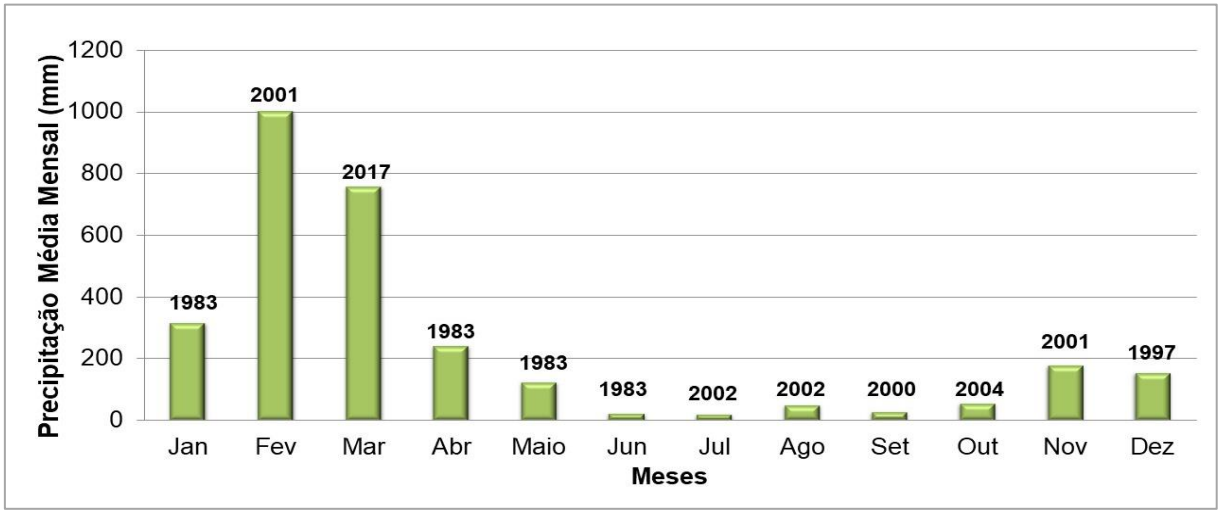
Outro dado relevante é avaliar a frequência em que ocorrem as precipitações, para explicitar dessa forma que, conforme as Figura 37 e Figura 38, mensalmente a maior frequência de ocorrência de precipitações normalmente não ultrapassou 100 mm mensais. E anualmente, grande parte das precipitações alcançaram de 100 a 600 mm, especialmente a faixa de 200 e 400 mm.

Figura 35. Precipitação Média Mensal - Sinsicap



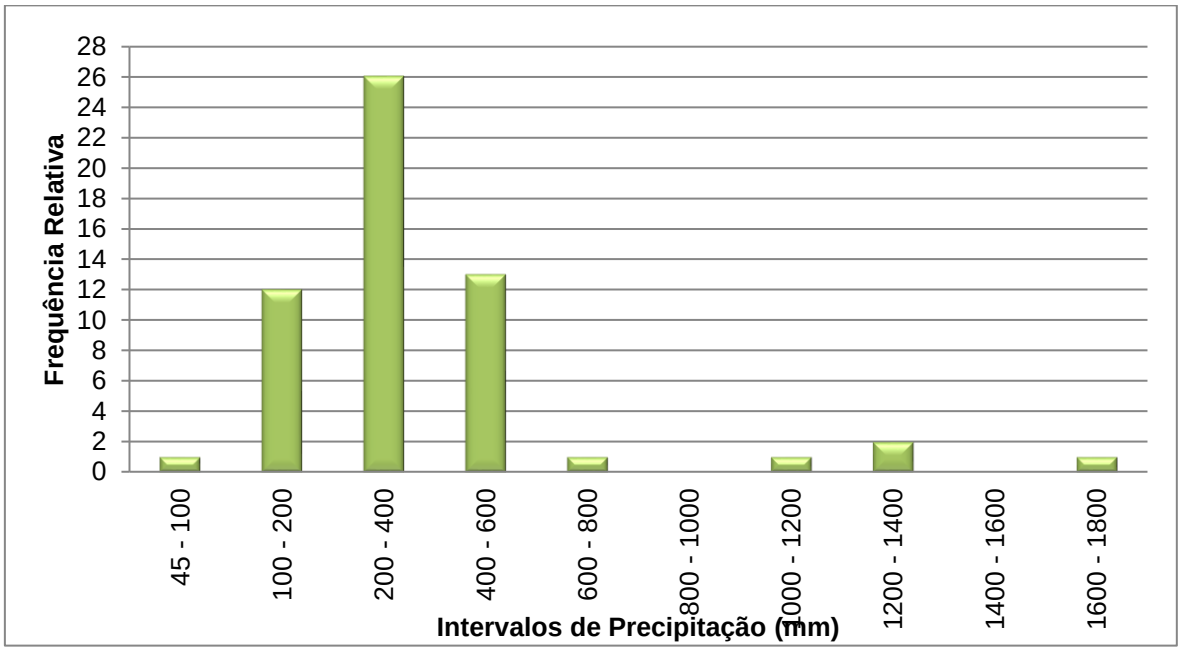
Fonte: o autor.

Figura 36. Precipitação Máxima Mensal - Sinsicap



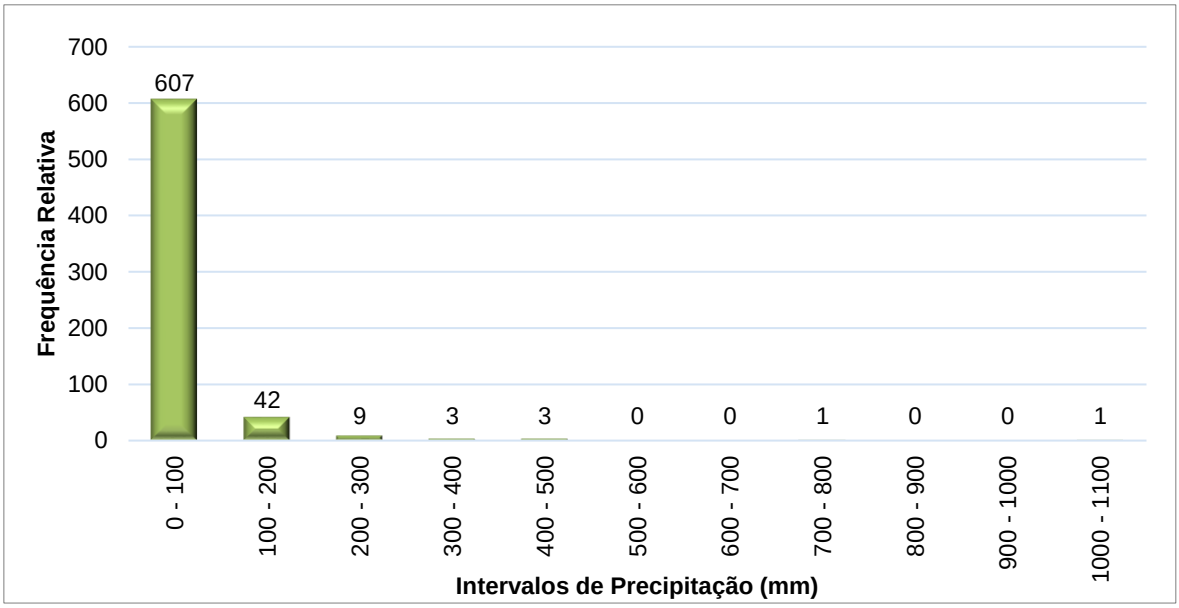
Fonte: o autor.

Figura 37. Histograma total anual - Sinsicap



Fonte: o autor.

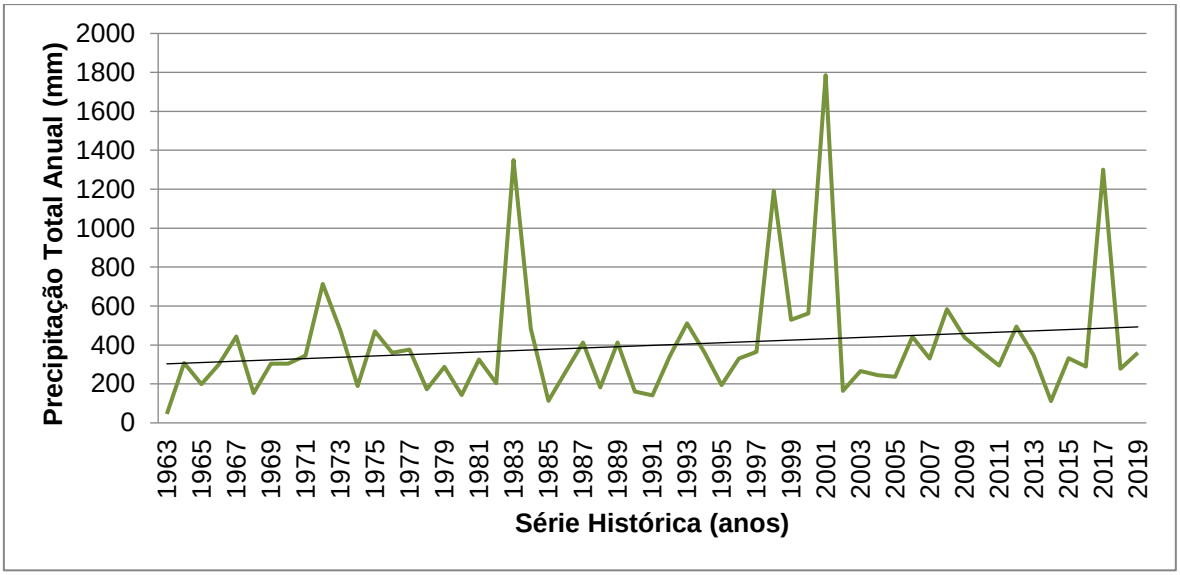
Figura 38. Histograma mensal - Sinsicap



Fonte: o autor.

Importante ressaltar que pela Figura 39, com o gráfico de tendenciosidade, a reta ascendente demostra que, apesar dos resultados apresentarem padrões específicos de variação ao longo do ano, há a identificação do aumento dos níveis de precipitação ao longo do tempo. A tendência de aumento de precipitação ao longo do tempo foi atestada estatisticamente pelo coeficiente de Spearman conforme calculado por Tröger e Pante (2009). Isso indica a probabilidade de aumento dos volumes de precipitação em eventos futuros.

Figura 39. Tendenciosidade - Sinsicap



Fonte: o autor.

A distância entre a área de estudo e a estação de Sinsicap e a diferença de altitude e ecossistemas faz com que tenham diferenças entre os níveis de precipitação de atingem diretamente a área da bacia de San Idelfonso.

Mesmo possuindo uma série curta (2016-2021) existente para a estação de Laredo (Tabela 7), em Trujillo é importante avaliar estes dados, especialmente para avaliar o evento ocorrido em março de 2017. Pela série ser curta, não foi elaborado gráfico de tendenciosidade, por não possuir dados suficientes para essa análise.

Tabela 7. Estação de Laredo

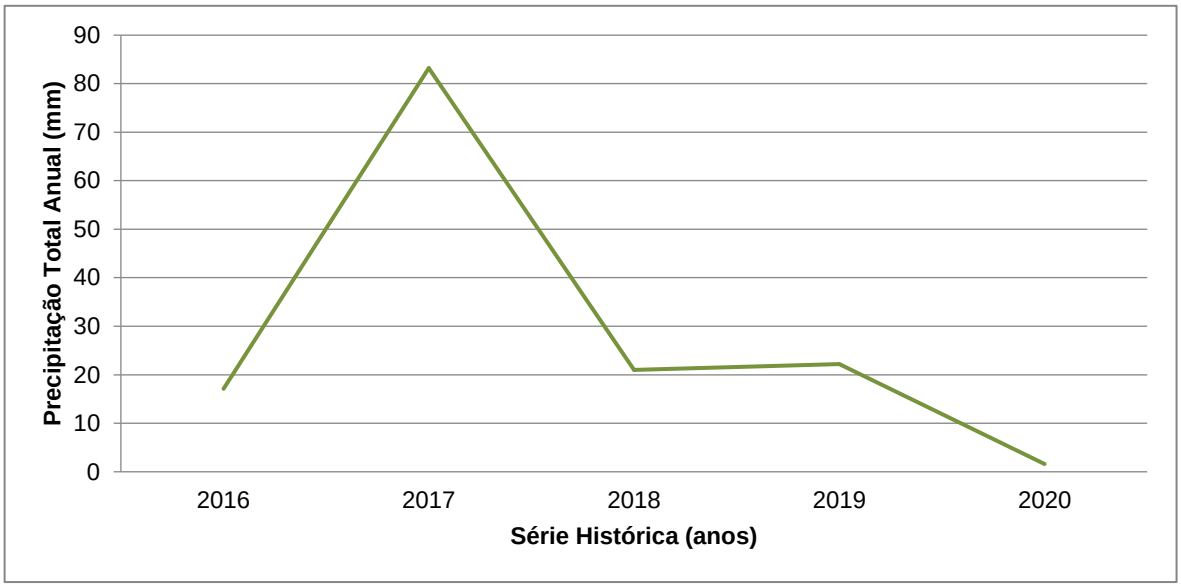
Estação	**Laredo**
Departamento	La Libertad
Província	Trujillo
Distrito	Laredo
Tipo	Convencional
Latitude	8° 6’ 43.29”
Longitude	78° 59’ 6.36”
Altitude	44 m
Início de operação	2016

Fonte: SENAMHI (2021).

Para o gráfico de precipitação total anual (Figura 40) observa-se que como esperado, dentro do período de dados disponíveis para a estação o ano de 2017 apresenta a maior precipitação, tanto total quanto média (Figura 41). A faixa de valores porém, é bastante inferior aos dados de Sinsicap. Na estação de Laredo, as máximas estão na faixa de 90 mm para as máximas e 8 mm para a média anual, enquanto para o mesmo período (2016-2019), na estação de Sinsicap, as máximas anuais alcançam 1300 mm e as médias anuais 108 mm.

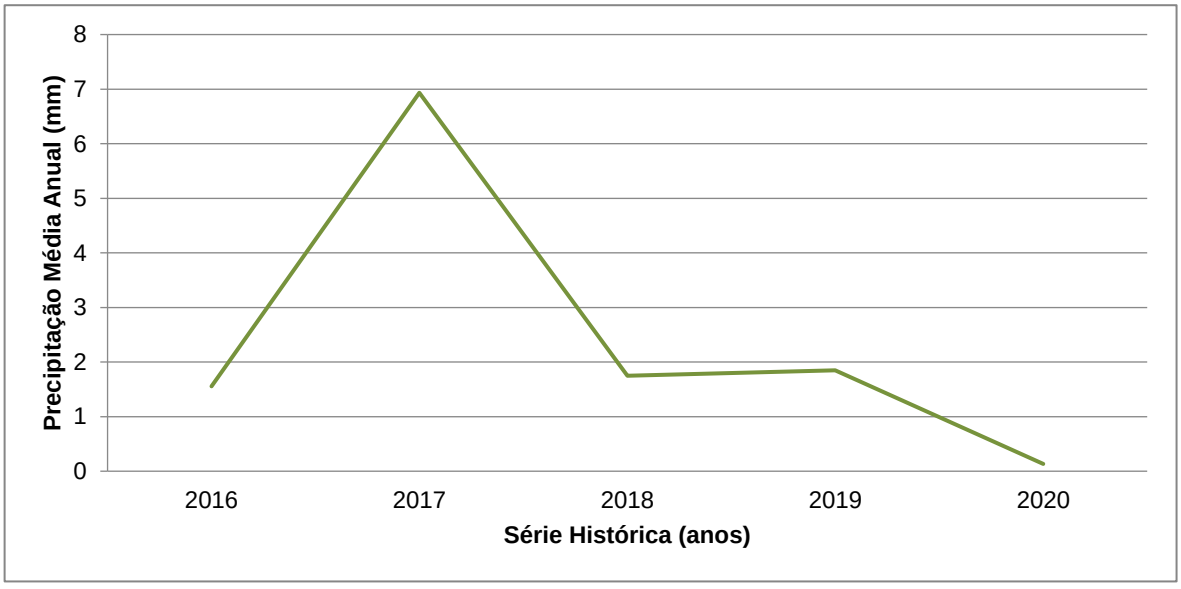
Com relação as precipitações máximas mensais, na estação de Laredo o mês de março possui tanto as maiores médias (14 mm) quanto a maior máxima (69,6 mm). Para o mesmo período, a estação de Sinsicap também apontou o mês de março como os maiores valores de precipitação média mensal e máxima mensal (Figura 42 e Figura 43), com os valores de 236,3 mm e 758 mm, respectivamente.

Figura 40. Precipitação total anual - Laredo



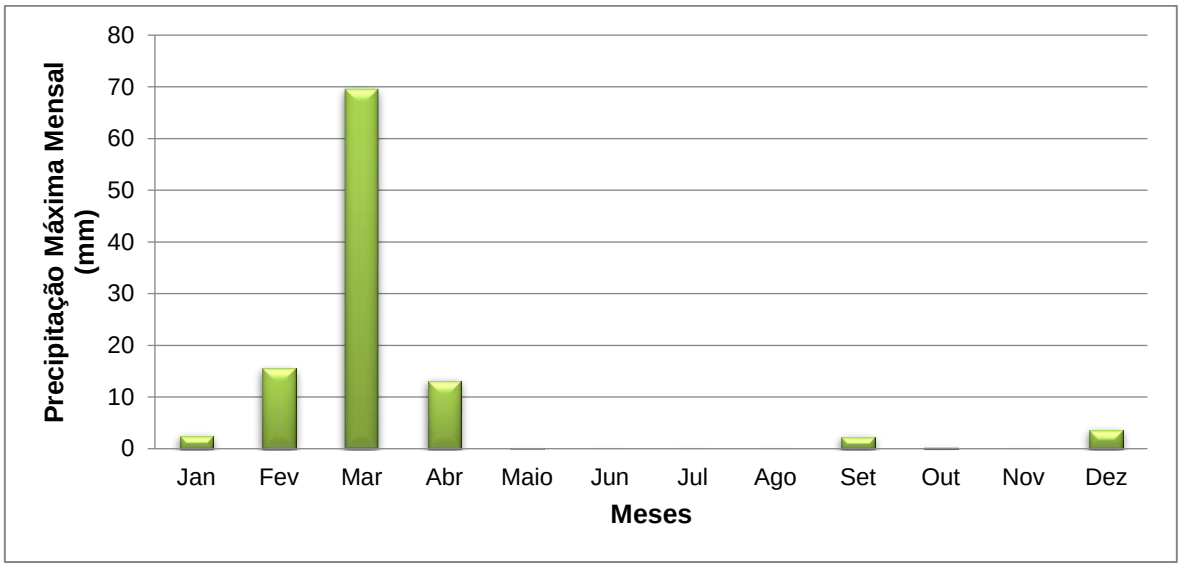
Fonte: o autor.

Figura 41. Precipitação média mensal anual - Laredo



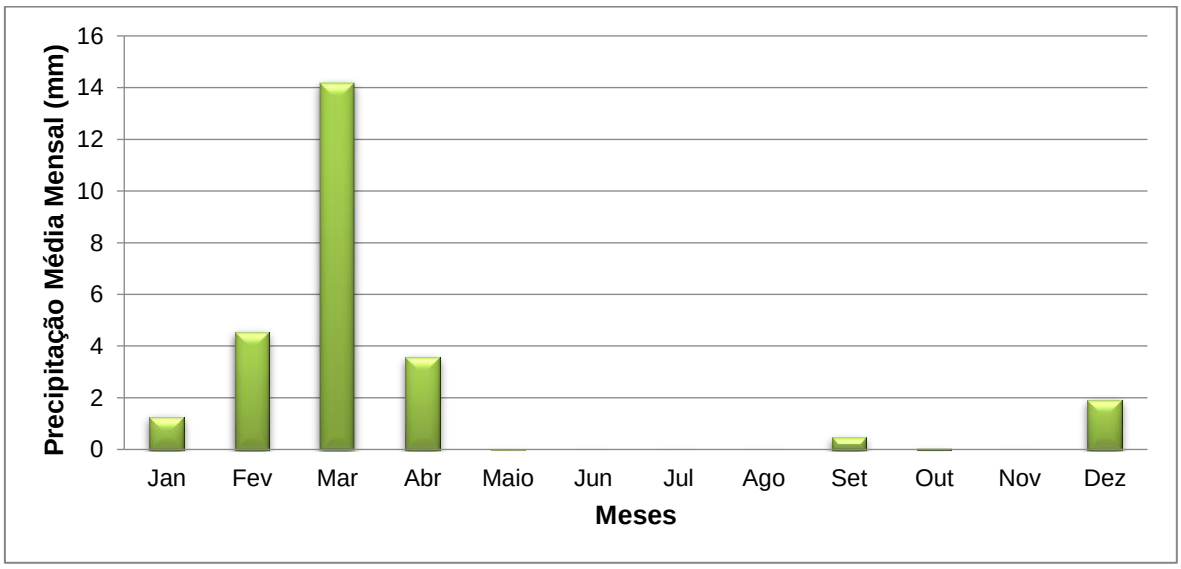
Fonte: o autor.

Figura 42. Precipitação máxima mensal - Laredo



Fonte: o autor.

Figura 43. Precipitação média mensal - Laredo



Fonte: o autor.

Aponta-se então que considerando os dados da estação de Laredo em Trujillo, mais próxima a bacia de San Idelfonso, um evento de aproximadamente 70 mm de precipitação registrado em março de 2017 foi suficiente para causar a inundação, as corridas de detritos e o arraste de resíduos e as consequentes perdas econômicas ocorridas no evento.

4.7 EVOLUÇÃO DO USO E COBERTURA DO SOLO

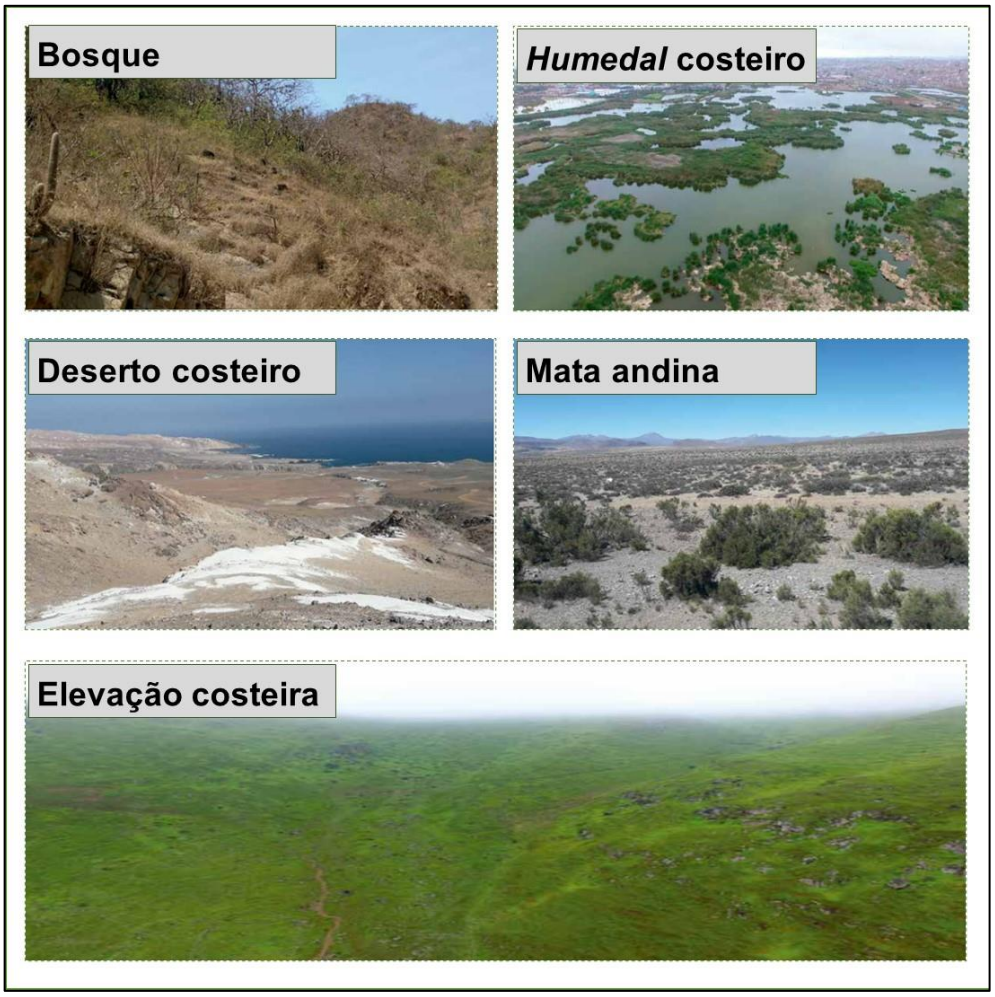
Inicialmente descrevem-se no Quadro 3 as classes utilizadas com base na fitogeografia na província de Trujillo e na Figura 44 a exemplificação visual da vegetação da região.

Quadro 3. Descrição da fitogeografia

Classe	**Descrição**
Bosque	Ecossistema costeiro geralmente decíduo, com clima semiárido com precipitação sazonal e escassa, com grande variação interanual, influenciada pelo fenômeno *El Niño*. A fisionomia corresponde a floresta seca estacional semi densa com dossel ou altura de cúpula de até 8 a 12 metros, com vegetação rasteira de pastagem efêmera, arbustos e cactos. Dominado por árvores espaçadas de *Prosopis pallida* e *P. limensis* “algarrobo”. Esta floresta seca contém poucas espécies, além de *Prosopis*, são *Vachellia macracantha* "*faique*" e *Colicodendron scabridum* "sapote". É distribuída desde o nível do mar até aproximadamente 500 metros de altitude.
Deserto costeiro	Ecossistema árido a hiper árido com áreas em sua maioria desprovidas de vegetação, constituídas por solos arenosos ou com afloramentos rochosos que ocupam áreas planas, onduladas e dissecadas sujeitas à erosão eólica. Estende-se desde as praias e falésias até aos primeiros contrafortes das encostas ocidentais, podendo ocupar extensões significativas. Algumas formações vegetais notáveis são os *Tillandsiales* (*Rosetales*), a zona cactácea (colunar, prostrada e globular), matagais, matagais baixos espinhosos, riachos secos, entre outros. As faixas de altitude variam latitudinalmente, sempre começando no nível do mar: ao norte atinge até 800 m de altitude, pelo centro até 1800 m de altitude e ao sul até 2.500 m de altitude.
Elevação costeira	Ecossistema desértico costeiro, conhecido como "oásis de vegetação de nevoeiro", que corresponde a formações vegetais xerofílicas efêmeras que incluem herbáceas, com árvores dispersas em alguns casos e ricas em endemismos vegetais, que sazonalmente cobrem extensas áreas desérticas em colinas e colinas médias expostas a nevoeiros de inverno , umidade relativa elevada acima de 80% e captação de gotículas de água por vegetação arbustiva e arbórea, a partir de 100 m de altitude até cerca de 1000 m de altitude. Quando presentes, as árvores chegam a atingir 5 a 7 metros. Contém muitas plantas herbáceas que são parentes selvagens de plantas cultivadas: batata, tomate e abóboras.
Humedal costeiro	São extensões ou superfícies cobertas ou saturadas de água, em regime hídrico natural ou artificial, permanente ou temporário, fresco, salobro ou salgado, que abrigam comunidades biológicas características e se encontram ao longo da costa costeira e marítima. Nesse sentido, as zonas úmidas costeiras são consideradas manguezais, lagoas, estuários, lagoas, deltas, oásis, pântanos.
Mata andina	Ecossistema andino de ampla distribuição nacional que inclui três tipos de matagal (matagal montano, matagal seco de puna e matagal andino), com amplitude de altitude de 1.500 a 4.500 m de altitude. É caracterizada pela presença de vegetação lenhosa e arbustiva de composição e estrutura variáveis, com uma cobertura vegetal superior a 10% que se estende por mais de 0,5 hectares e cuja altura acima do solo não ultrapassa 4 metros. No matagal existem extensas áreas de “tola” (*Parastrephia spp*.), bem como *Lepidophyllum quadrangulare, Baccharis spp*, arbustos esclerófilos e pequenas árvores de até 2 metros de altura e presença de epífitas e cactos.

Fonte: MINAM (2019).

Figura 44. Exemplificação da vegetação nativa peruana



Fonte: MINAM (2019).

Os mapas de uso e cobertura do solo tendo como base as imagens dos satélites da série Landsat e os ecossistemas naturais da província de Trujillo apresentam como maiores variações as classes de agricultura e área urbana (Figura 45). Observa-se ainda alterações antes e após eventos de *El Niño* de 1998 e 2017 na hidrografia.

Desde 1975, o primeiro mapa disponível, já se observa a tendência de ocupação do vale do rio Moche com agricultura. Além disso, a área urbanizada já consolidada se encontra na zona de planície da bacia de San Idelfonso.

No mapa de 1985 observa-se a expansão da ocupação da classe de agricultura e principalmente o grande aumento da área urbanizada. Nos mapas de 1998, o destaque é para a classe de hidrografia, a qual mostra a condição do rio Moche antes do evento de precipitação elevada ocorrido em fevereiro de 1998 e cerca de 2 meses após, quando ainda se observa o volume do rio Moche elevado (Figura 46). Ressalta-se que apesar de não fazer parte da bacia

de San Idelfonso, o rio Moche indica de forma visual o impacto das precipitações elevadas na região.

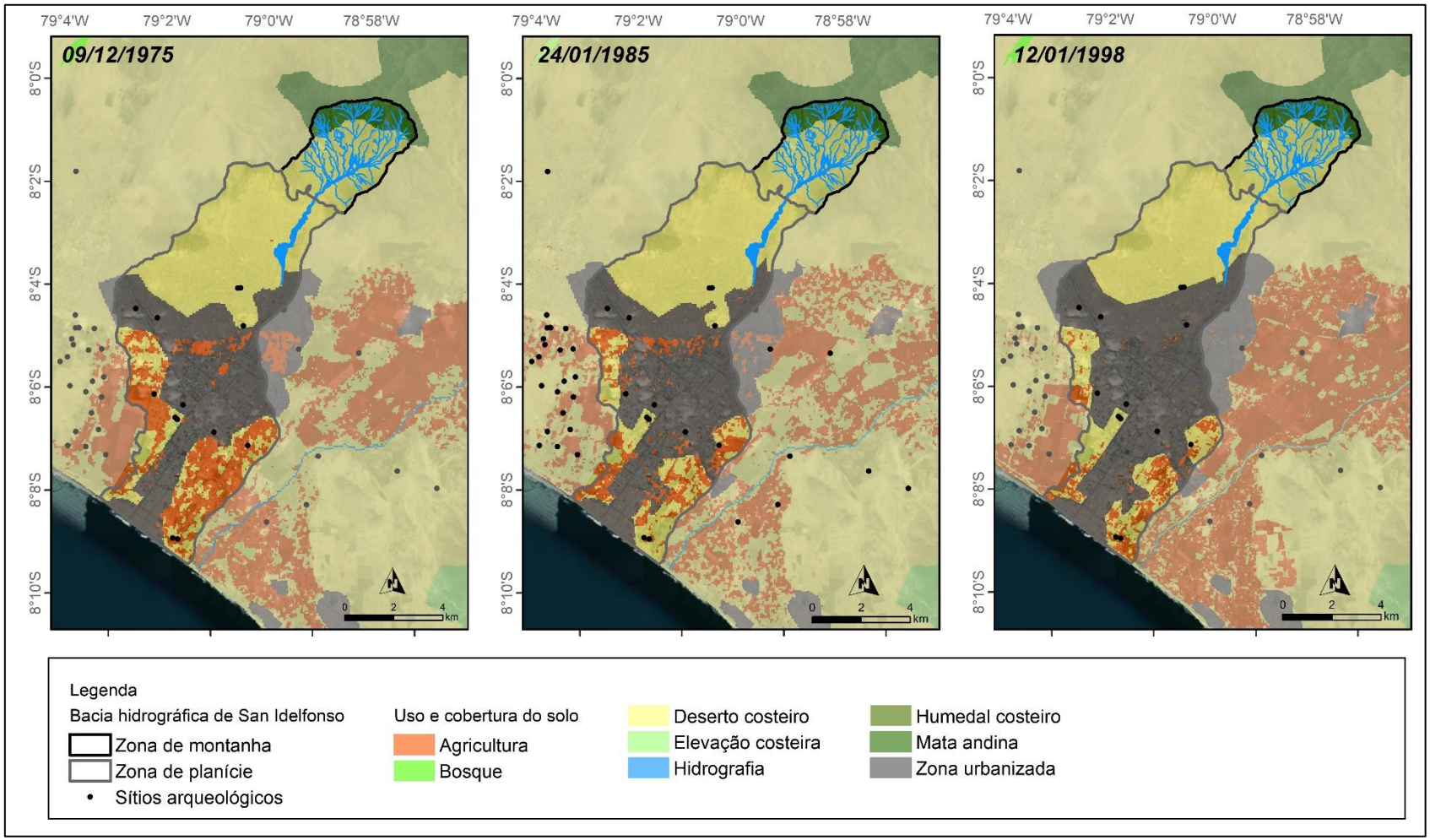
No ano de 2006 observa-se o aumento considerável da área urbana. Para 2016 além disso, houve o aumento das áreas agrícolas na província. Da mesma forma que em 1998, em 2017 (Figura 47), o registro antes e depois do evento de precipitação elevada revela o impacto da precipitação no volume do rio Moche.

O uso e cobertura do solo em 2020, novamente indica o aumento da área de agricultura e a expansão urbana. Na zona de montanha da bacia de San Idelfonso não foram observadas alterações de uso e cobertura do solo, porém, com o passar dos anos, cada vez mais a zona de planície da bacia foi sendo convertida em área urbanizada.

Os dados apresentados na Tabela 8, consideram toda a província de Trujillo, para a compreensão da unidade como um todo. São confirmadas as observações visuais realizadas nos mapas entre 1975 e 2020. Essa tabela indica a tendência da conversão das áreas de deserto costeiro da província de Trujillo, em área de agricultura e área urbanizada ao longo do tempo.

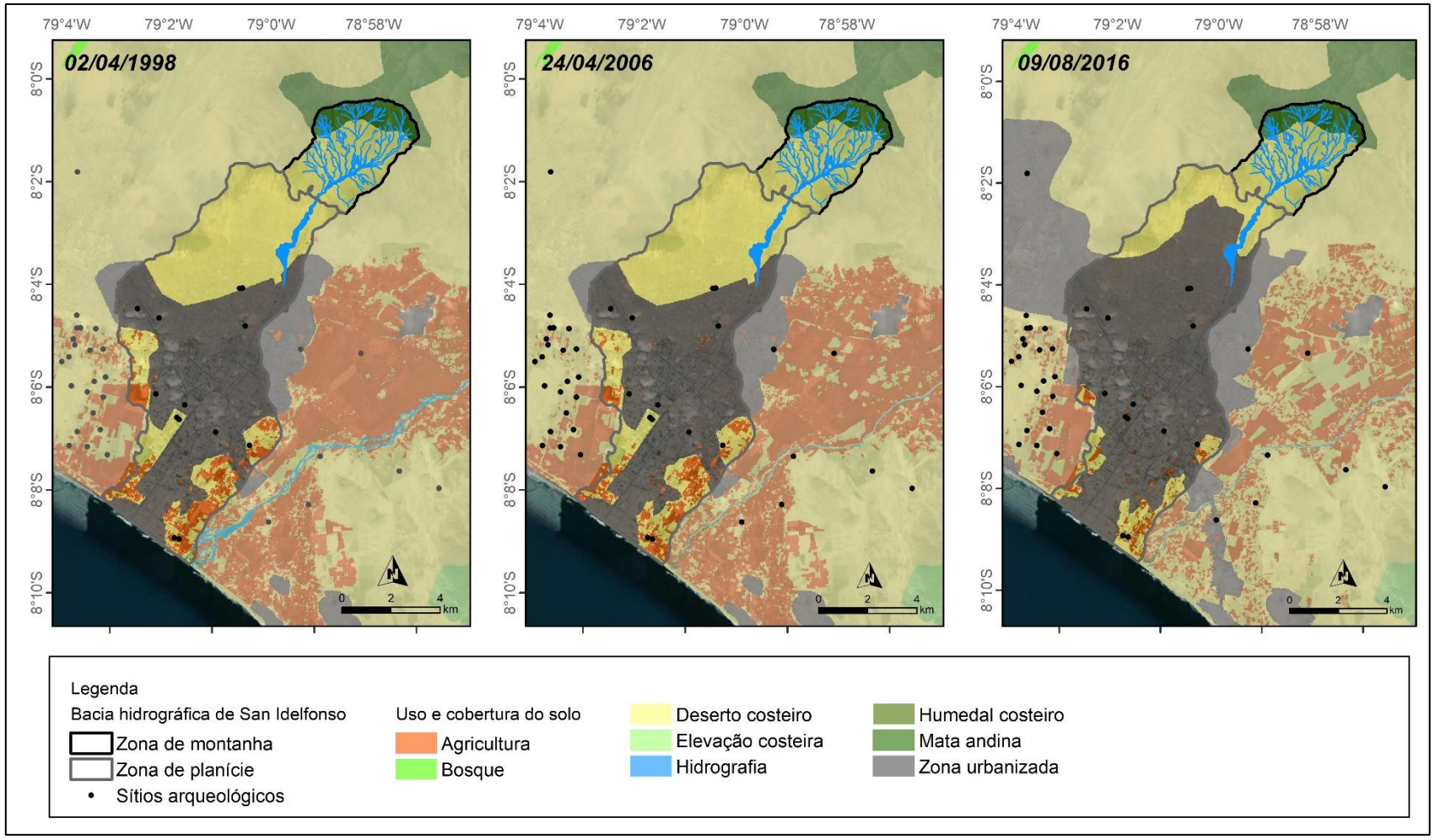
Na Tabela 9 estão compiladas as mudanças de uso e cobertura do solo somente na bacia de San Idelfonso, identificando as mudanças na zona de montanha e na zona de planície. As áreas de mata andina e bosques tendem a se manter principalmente pelo relevo, não sendo a perda de áreas naturais o problema da conversão do uso e cobertura do solo na província de Trujillo e na bacia de San Idelfonso. O problema relacionado ao uso e cobertura do solo reside na ocupação da zona de planície da bacia de San Idelfonso e outras, pelo crescimento urbano desordenado, o qual em eventos de *El Niño* recebem os efeitos da ativação das *quebradas* por meio de *huaicos* que inundam a região urbanizada.

Figura 45. Uso e cobertura do solo dos anos de 1975, 1985 e 1998



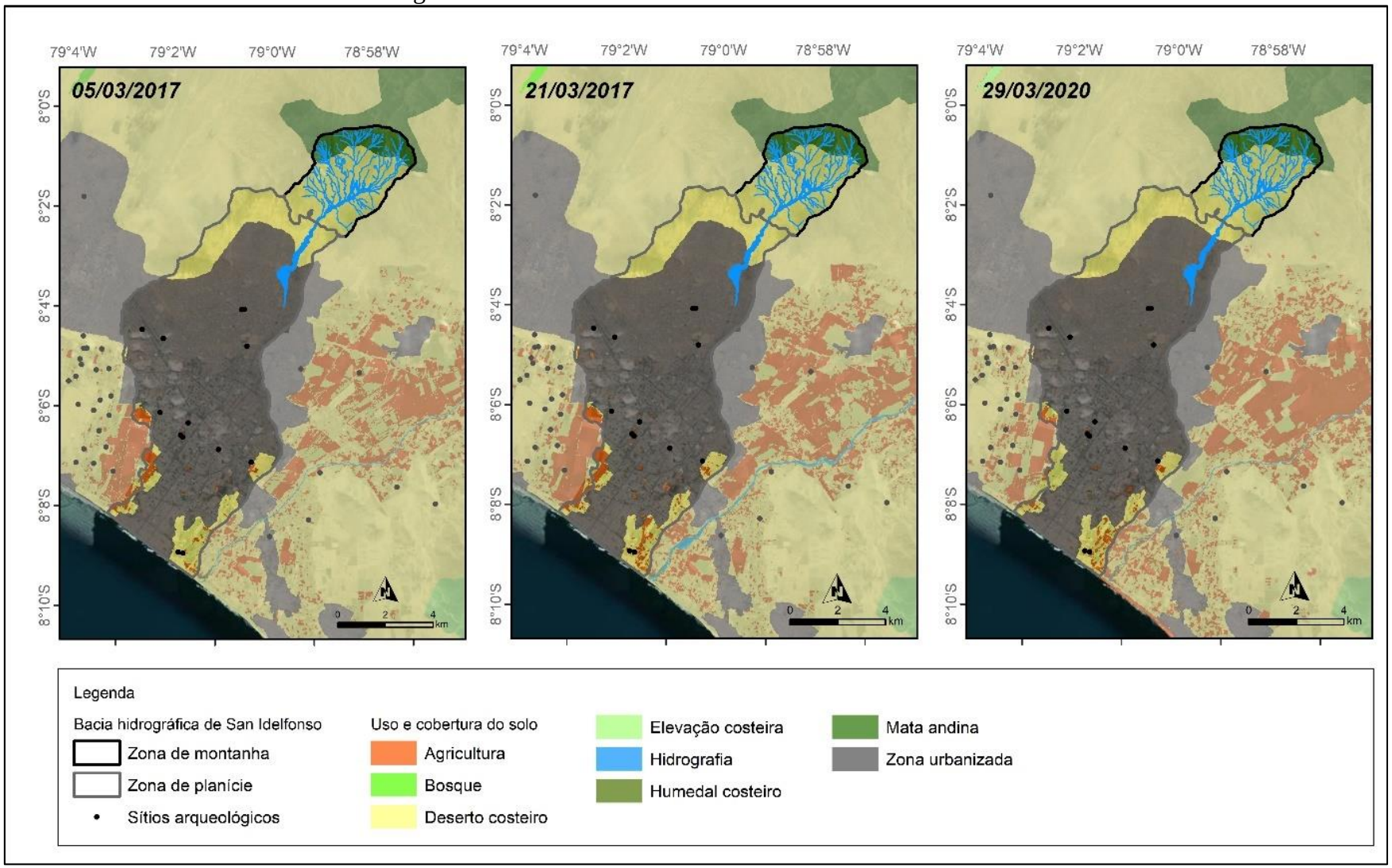
Fonte: o autor.

Figura 46 Uso e cobertura do solo dos anos de 1998, 2006 e 2016



Fonte: o autor.

Figura 47. Uso e cobertura do solo dos anos de 2017 e 2020



Fonte: o autor.

Tabela 8. Quantificação do uso e cobertura do solo na província de Trujillo

Classes de uso e cobertura do solo		**Agricultura**	**Área urbanizada**	**Hidrografia**	**Bosques**	**Deserto costeiro**	***Humedal* costeiro**	**Elevação costeira**	**Mata andina**	**Total**
09/12/1975	Área (km²)	86,73	32,89	7,51	51,97	851,67	0,19	19,90	726,53	1.777,39
	%	4,88	1,85	0,42	2,92	47,92	0,01	1,12	40,88	100,00
24/01/1985	Área (km²)	71,74	37,95	7,51	51,97	860,39	0,21	19,91	727,72	1.777,39
	%	4,04	2,14	0,42	2,92	48,41	0,01	1,12	40,94	100,00
12/01/1998	Área (km²)	130,45	44,80	3,77	51,37	817,86	0,19	19,88	709,02	1.777,35
	%	7,34	2,52	0,21	2,89	46,02	0,01	1,12	39,89	100,00
02/04/1998	Área (km²)	106,24	44,83	7,14	51,72	824,36	0,19	19,88	722,99	1.777,35
	%	5,98	2,52	0,40	2,91	46,38	0,01	1,12	40,68	100,00
24/04/2006	Área (km²)	65,72	85,29	3,77	52,25	821,23	0,22	19,88	728,90	1.777,26
	%	3,70	4,80	0,21	2,94	46,21	0,01	1,12	41,01	100,00
09/08/2016	Área (km²)	107,75	98,44	3,77	52,19	766,56	0,20	19,88	728,55	1.777,35
	%	6,06	5,54	0,21	2,94	43,13	0,01	1,12	40,99	100,00
05/03/2017	Área (km²)	56,69	101,15	3,77	52,25	813,97	0,20	19,88	729,45	1.777,35
	%	3,19	5,69	0,21	2,94	45,80	0,01	1,12	41,04	100,00
21/03/2017	Área (km²)	78,04	100,46	5,67	52,25	791,44	0,18	19,88	729,43	1.777,35
	%	4,39	5,65	0,32	2,94	44,53	0,01	1,12	41,04	100,00
29/03/2020	Área (km²)	102,34	103,47	3,77	51,77	768,22	0,18	19,88	727,73	1.777,36
	%	5,76	5,82	0,21	2,91	43,22	0,01	1,12	40,94	100,00

Fonte: o autor.

Tabela 9. Uso e cobertura do solo na bacia de San Idelfonso

Uso e cobertura do solo na área da bacia		Agricultura	Deserto costeiro		Hidrografia	Mata andina (Zona de montanha)	Zona urbanizada
			(Zona de montanha)	(Zona de planície)			
09/12/1975	Área (ha)	1.113,12	898,90	2.860,56	-	321,00	2.285,64
	%	14,88	12,02	38,25	-	4,29	30,56
24/01/1985	Área (ha)	738,00	898,90	2.867,76	-	321,00	2.653,56
	%	9,87	12,02	38,34	-	4,29	35,48
12/01/1998	Área (ha)	512,00	898,90	2.564,91	-	321,00	3.173,67
	%	6,85	12,03	34,33	-	4,30	42,48
02/04/1998	Área (ha)	-	898,90	2.626,38	5,00	321,00	3.161,88
	%	-	12,82	37,45	0,07	4,58	45,08
24/04/2006	Área (ha)	98,46	898,90	1.996,29	-	321,00	4.161,51
	%	1,32	12,02	26,70	-	4,29	55,66
09/08/2016	Área (ha)	210,69	898,90	1.153,26	-	321,00	4.892,31
	%	2,82	12,02	15,43	-	4,29	65,44
05/03/2017	Área (ha)	128,25	898,90	1.119,24	-	321,00	5.008,77
	%	1,72	12,02	14,97	-	4,29	67,00
21/03/2017	Área (ha)	215,28	898,90	1.070,10	-	321,00	4.970,88
	%	2,88	12,02	14,31	-	4,29	66,49
29/03/2020	Área (ha)	471,60	898,90	907,11	-	321,00	4.877,55
	%	6,31	12,02	12,13	-	4,29	65,24

Fonte: o autor.

4.8 MODELAGENS NA BACIA HIDROGRÁFICA DE SAN IDELFONSO

4.8.1 SHALSTAB

Comparativamente aos dados do Ingemmet (2017) que mapeiam a susceptibilidade a movimentação de massa na província de Trujillo, embora a escala entre esses mapas não seja compatível (1:500.000), no mapa do Ingemmet a bacia de San Idelfonso corresponde às classes de alta e moderada susceptibilidade a movimentação de massa. As recomendações para utilização dessas classes indicam a restrições no desenvolvimento urbano e industrial, especialmente de forma intensa. Além disso, para a construção de vias, atividade mineira, instalação de linhas de energia, há a necessidade de elaboração de estudos geotécnicos.

Dessa forma, embora exista a classificação de movimentação de massa na província de Trujillo, mais uma vez se observa a escala, a qual não favorece a compreensão do fenômeno especificamente na bacia de San Idelfonso, reforçando a importância da elaboração da classificação de estabilidade para bacia de forma detalhada. Adicionalmente, o material

produzido pelo Ingemmet possui viés econômico e social, acrescentando a classificação de susceptibilidade ao movimento de massa às limitações de instalação de infraestrutura, especialmente urbana e industrial, o que não deveria ser encorajado na área que, além de ser susceptível a movimentação de massa, é a área formação de fluxo superficial na bacia.

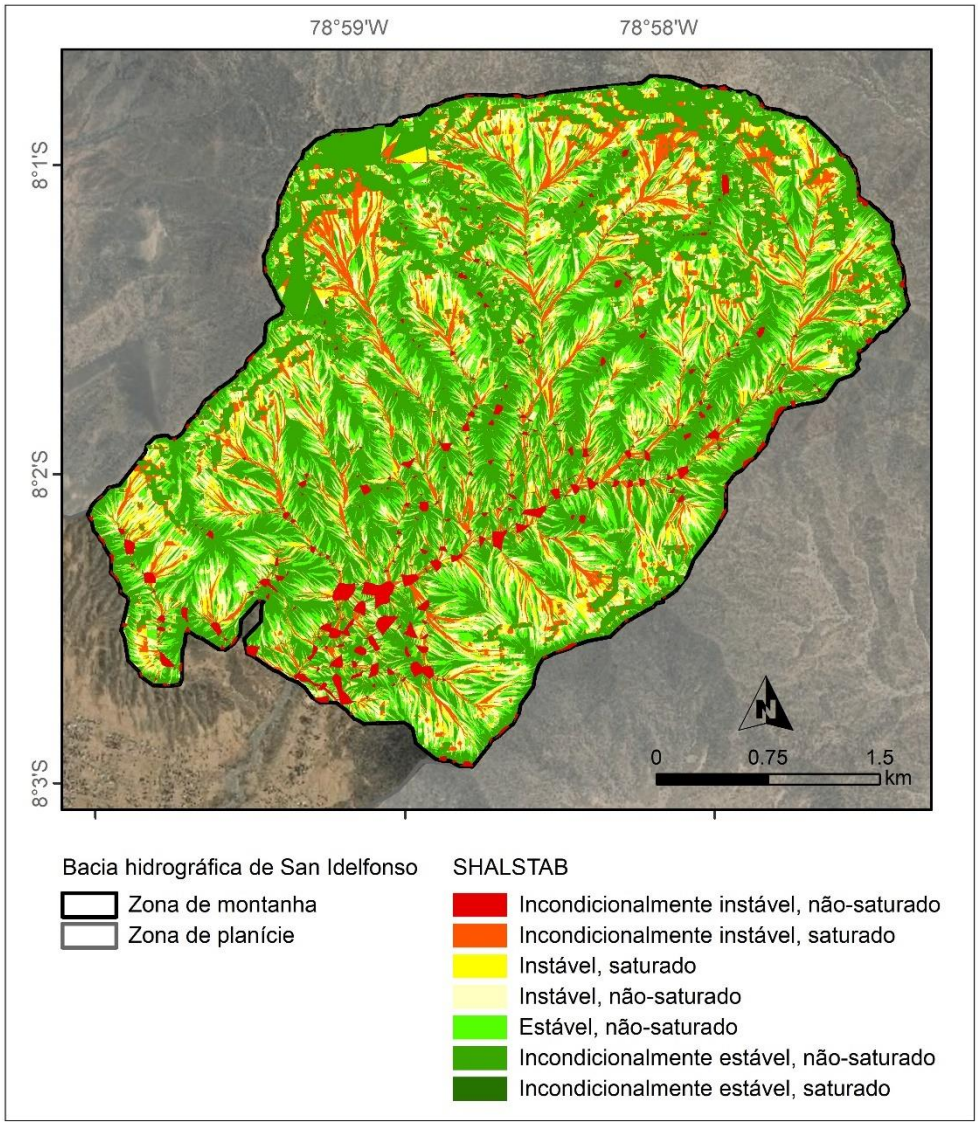
Através da metodologia Shalstab foi elaborado o mapa da Figura 48 onde identificam-se como áreas mais suscetíveis aos escorregamentos nas áreas onde são formados os fluxos, onde também se encontram as deposições de sedimentos. Pelo resultado, o fator mais relevante no resultado da análise é o relevo.

Da área total da *quebrada* (zona de montanha), 61,50% (7,49 km²) correspondem as classes mais estáveis (estável, não-saturado, incondicionalmente estável, não-saturado e incondicionalmente estável, saturado). São 3% da área da zona de montanha (0,33 km²) classificados como incondicionalmente instável, não-saturado. Nas áreas assim classificadas, há o acúmulo de sedimentos e por esse motivo, são áreas onde não há a consolidação das partículas favorecendo a movimentação, além da própria inclinação dos leitos dos canais onde são identificadas as mais altas instabilidades.

Devem ser observadas ainda as áreas classificadas como incondicionalmente instáveis, saturadas, que apresentam perigo durante os eventos de precipitação (10,67%; 1,30 km²). As classes, instável, saturado e instável, não-saturado também apresentam um grau de risco. As áreas enquadradas nessas classes visualmente apresentam a configuração de sulcos, onde são visíveis a erosão e o caminho preferencial dos fluxos, ou seja, onde a água começa a acumular e ter maior força para escoar. As demais classes estão quantificadas na Tabela 10.

Esse material pode embasar a própria instalação das estruturas de contenção na bacia, buscando evitar os pontos incondicionalmente instáveis, não-saturados, pois a instabilidade desfavorece a manutenção das estruturas de contenção, comprometendo a vida útil e a segurança da estrutura.

Figura 48. Estabilidade de encostas por Shalstab



Fonte: o autor.

Tabela 10. Resultados numéricos da metodologia Shalstab

Classe	**Área (ha)**	**%**
Incondicionalmente instável, não-saturado	158,00	12,96
Incondicionalmente instável, saturado	130,11	10,67
Instável, saturado	113,00	9,27
Instável, não-saturado	193,61	15,88
Estável, não-saturado	235,83	19,35
Incondicionalmente estável, não-saturado	388,45	31,87
Total	1218,99	100,00

Fonte: o autor.

4.8.2 HEC-HMS

Tomaram-se como dados de entrada o evento de precipitação ocorrido entre os dias 13 de março de 2017 e 22 de março de 2017, registrado pela estação de Laredo, localizada em relação a bacia conforme a Figura 49. Os valores de precipitação utilizados foram os descritos na Tabela 11. Entende-se que esses dados subestimam a precipitação que originou os *huaicos*. Dessa forma, para ajustar o hidrograma, se recorrereu à simulação no HEC-RAS, para calibrar a vazão e a precipitação.

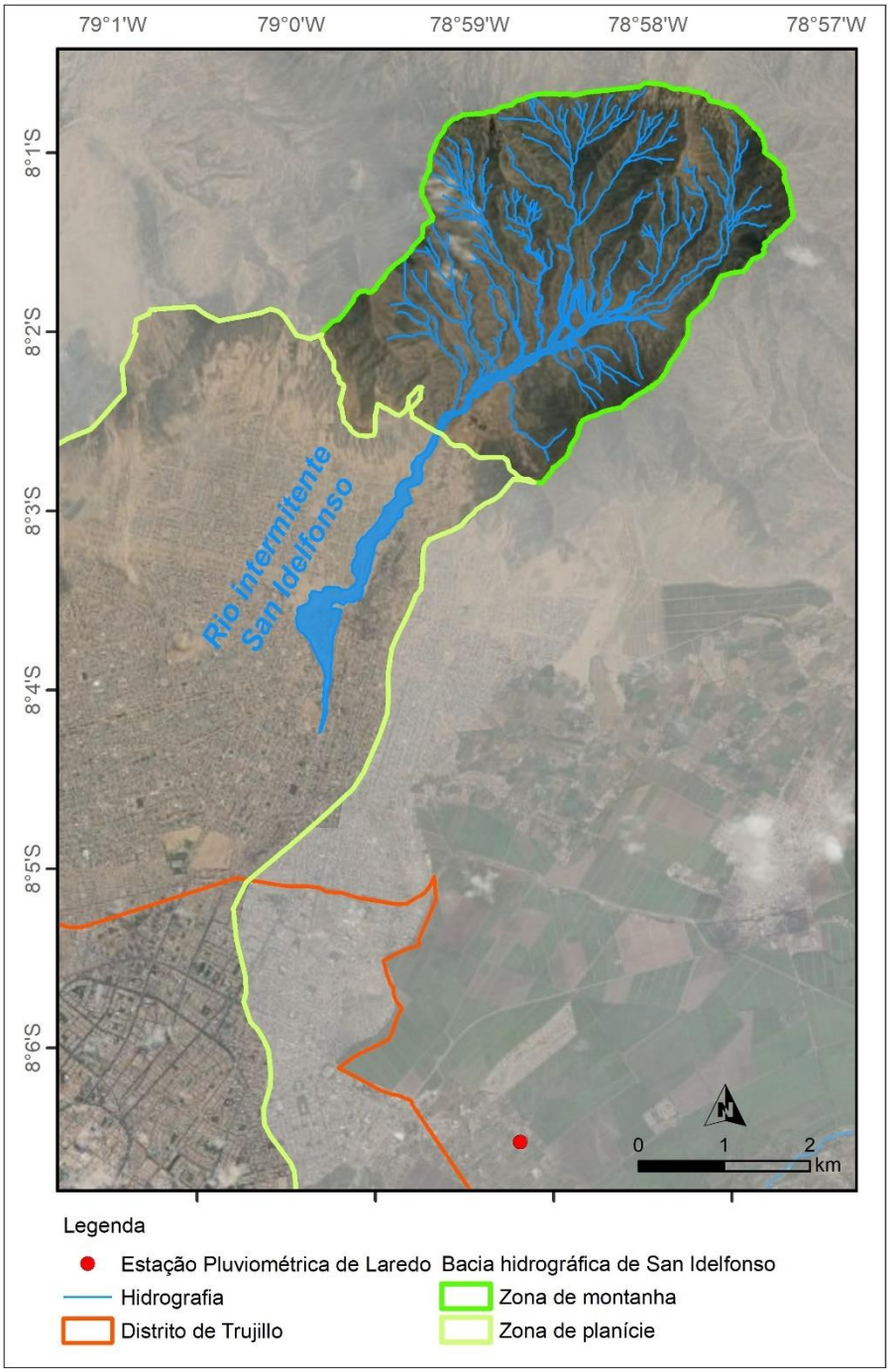
Considerou-se o coeficente de escoamento no valor de 85 (TUCCI, 1993; USACE, 2021), considerando a cobertura da região de interesse, parcialmente sem cobertura vegetal, arenosa e parcialmente urbana. O tempo de concentração calculado para a bacia resultou em 120 minutos. Como resultado, foi gerado o hidrograma da Figura 50.

Tabela 11. Dados de precipitação da estação de Laredo entre 13/03/2017 e 22/03/2017

Data	**Horário de registro**	***Huaico* registrado**	**Precipitação (mm)**
13/03/2017	07:00		0,0
13/03/2017	19:00		5,3
14/03/2017	07:00		4,0
14/03/2017	19:00		16,0
15/03/2017	07:00		0,0
15/03/2017	19:00	Primeiro *huaico*	0,0
16/03/2017	07:00		0,0
16/03/2017	19:00		0,0
17/03/2017	07:00		0,0
17/03/2017	19:00	Segundo e terceiro *huaicos*	0,0
18/03/2017	07:00		0,0
18/03/2017	19:00	Quarto e quinto *huaicos*	5,0
19/03/2017	07:00		0,0
19/03/2017	19:00	Sexto *huaico* (maior)	27,0
20/03/2017	07:00		0,5
20/03/2017	19:00		0,0
21/03/2017	07:00		0,0
21/03/2017	19:00		0,2
22/03/2017	07:00		3,0
22/03/2017	19:00	Sétimo *huaico*	0,0

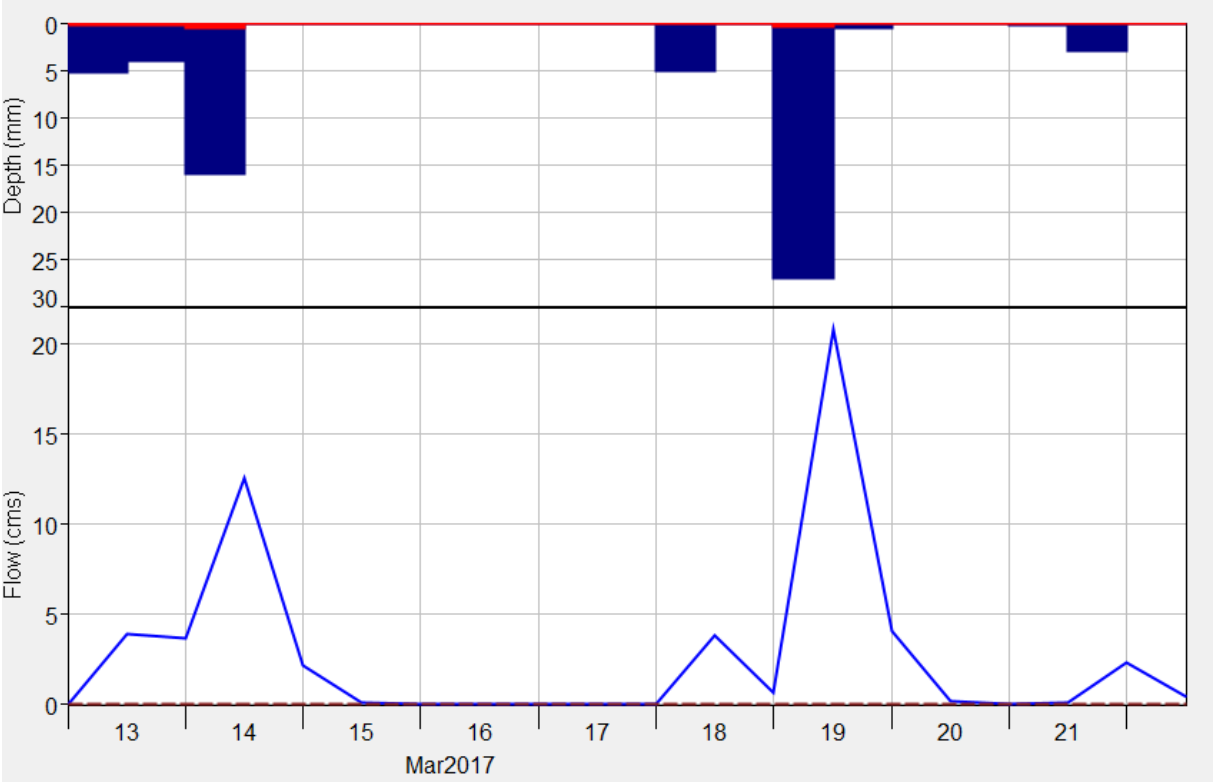
Fonte: Adaptado de Allcca e Sales (2018) e SENAMHI (2020).

Figura 49. Localização da estação de Laredo



Fonte: o autor.

Figura 50. *Hidrograma para a bacia de San Idelfonso para o evento de março de 2017*



Fonte: o autor.

4.8.3 HEC-RAS

A delimitação do caminho preferencial do rio, onde não há a indicação do leito do rio, ocorreu com base na descrição de Allcca e Sales (2018), que aponta o fluxo proveniente do rompimento do dique na *quebrada* (zona de montanha) seguindo pelos distritos de El Porvenir, Florencia de Mora, Trujillo e Víctor Larco Herrera. ARANDA et al. (2014) confirmam o leito preferencial do rio da bacia de San Idelfonso na porção inicial, até o cemitério de Mampuesto.

A planície de inundação da Figura 51 foi delimitada manualmente a partir da área inundada no evento externo de 2017 obtida junto ao Gobierno Regional de La Libertad (2019).

Foram elaborados testes de calibração do modelo conforme descritos na Figura 52. Apesar da repetição de ao menos uma centena de testes em diferentes condições, não foi possível calibrar a mancha de inundação para a situação 1D, na qual é delimitada toda a geometria do canal, a qual tem como base as seções transversais do canal. Para essa situação, tanto para regimes permanentes e não-permanentes, os resultados não foram satisfatórios. Embora a área de alcance tenha sido similar à mancha de inundação de 2017, a altura da lâmina não correspondia à realidade, alcançando até 8 metros de altura de lâmina d'água na zona

urbanizada, sendo que, houve o registro do fluxo ter alcançado 1,90 metros de altura (CASTRO; TORDOYA, 2018) (Figura 53), tendo sido considerada essa a altura máxima para calibração da simulação Figura 54. Somente a alteração da vazão não correspondeu linearmente à diminuição da lâmina d'água, resultando na alteração do alcance da mancha com pouca alteração na profundidade.

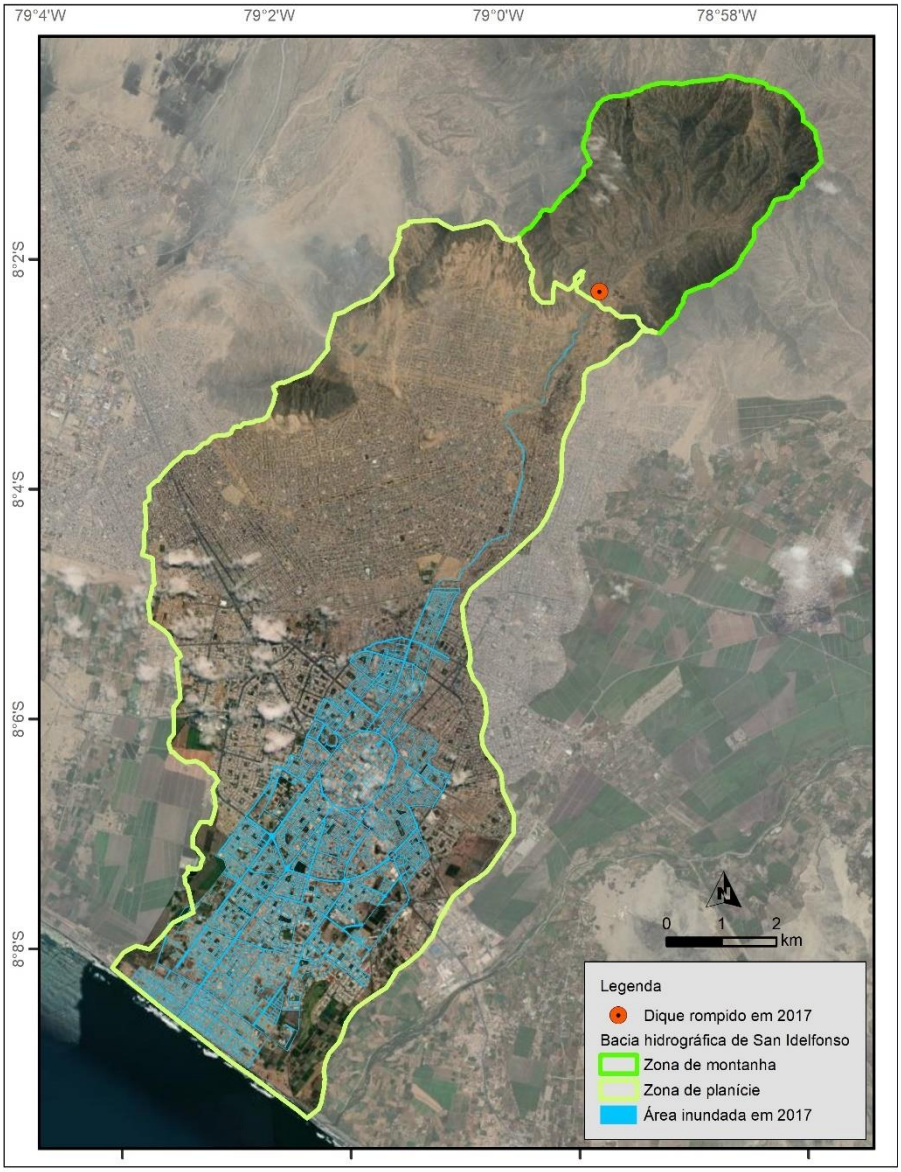
Não foi possível calibrar o modelo de inundação pelo software HEC-RAS. A ausência de dados monitorados de vazão inviabiliza a calibração do modelo. Compreende-se porém, essa ausência, justamente pela condição intermitente do rio, que não necessita de monitoramento, por não possuir fluxo, exceto nos eventos extremos.

Não existem porém, dados fluviométricos para a área de estudo de Rincón e Perozo (2014), tampouco foram indicados os métodos utilizados para a validação do modelo, embora os resultados dos regimes permanente e não-permanente tenham sido consistentes. De qualquer forma, subentende-se que é possível realizar simulações de fluxo permanente e não-permanente para rios intermitentes, sem dados de vazão, aproveitando tanto o HEC-RAS quanto o HEC-HMS. Aponta-se porém a falta de menção da calibração da simulação e a diferença na escala da simulação, que para o estudo de Rincón e Perozo (2014) abrangeu menos de um quilômetro do leito do rio.

Pathan e Agnihotri (2020) também utilizaram o HEC-RAS para a elaboração da mancha de inundação de uma bacia frequentemente inundada, utilizando porém a modelagem em 2D para a área de inundação. Entende-se que essa possibilidade poderia ser testada neste trabalho. Muñoz e Martínez (2016), Moreno e Fontalvo (2017), Castillo (2018), Tang, Leon e Kavvas (2020) fizeram uso do software HEC-RAS para as diferentes finalidades, mas sempre envolvendo inundações, embora todas essas aplicações envolveram rios perenes.

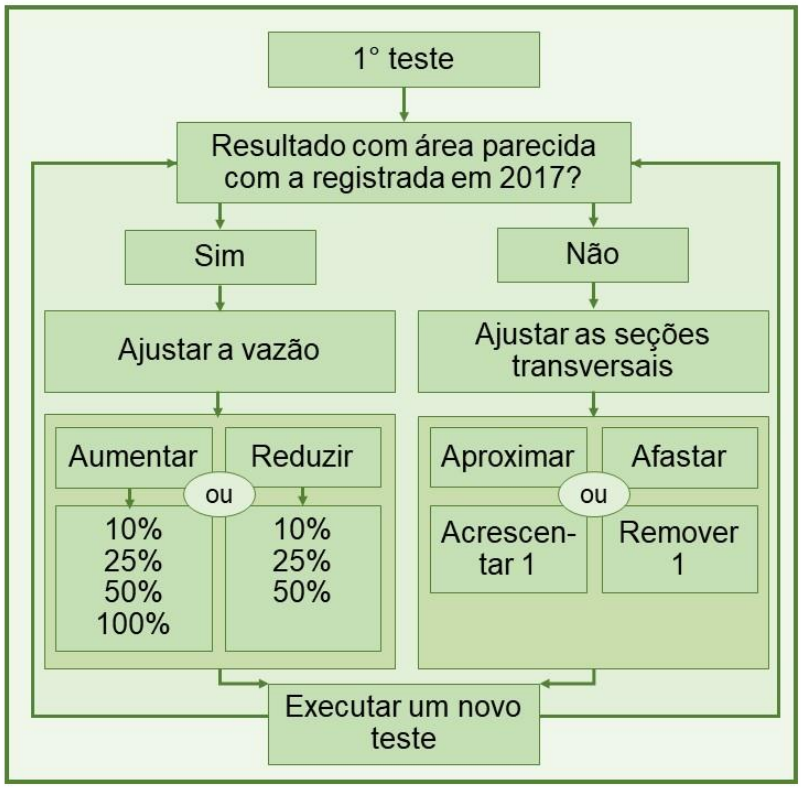
Identificou-se a localização na Figura 51 do dique de contenção elevado para conter o fluxo de detritos provenientes da parte superior da bacia. Esse, foi soterrado pelo acúmulo de sedimentos no evento de 2017, como indica a sequência da Figura 55. O dique foi construído para represar cerca de 600.000 m³ de fluxo superficial e detritos como prevenção contra as inundações, indicando então a ocorrência de um volume superior a esse nesse evento.

Figura 51. Mancha de inundação de 2017



Fonte: o autor.

Figura 52. Fluxograma de testes do modelo

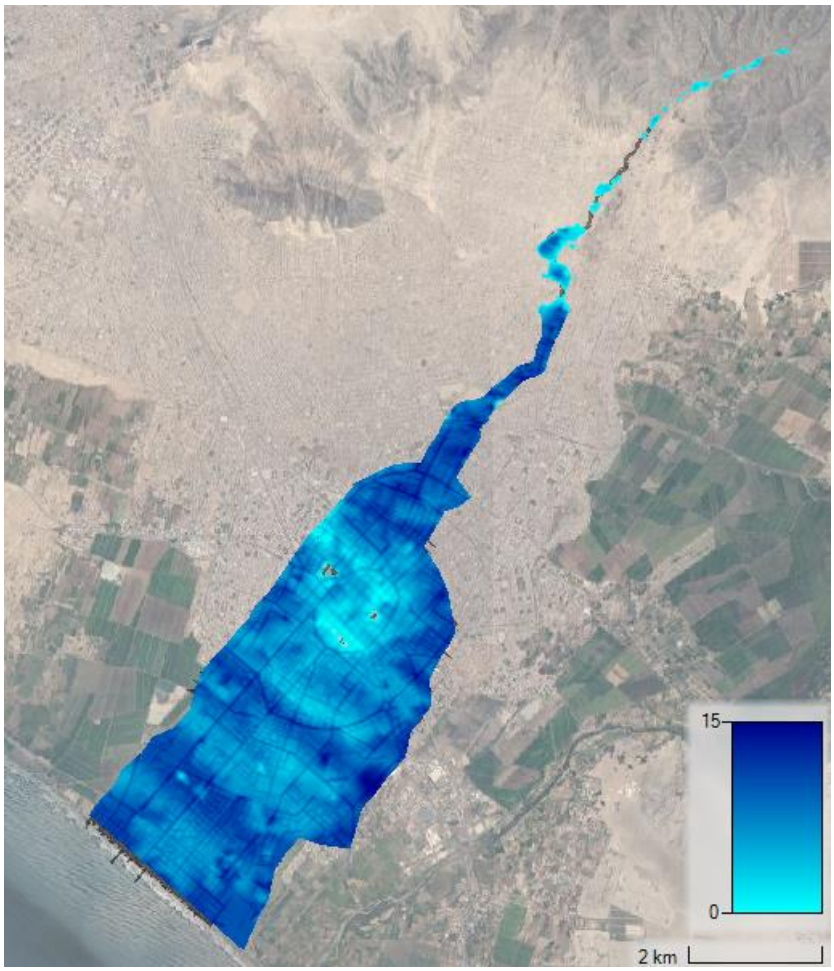


Fonte: o autor.

Figura 53. Edificação atingida

Fonte: o autor.

Figura 54. Mancha de inundação para a simulação 1D



Fonte: o autor.

Figura 55. Dique de contenção da *quebrada* de San Idelfonso ao longo do tempo

Fonte: o autor.

O Ingemmet (2017) produziu um mapa em escala 1:500.000 com a susceptibilidade a inundação e erosão fluvial na província de Trujillo. Embora a escala dos mapas não seja

correspondente, parte da área aqui mapeada como mancha de inundação, na porção urbana, é classificada como de alta susceptibilidade a inundação e erosão fluvial. Parte do leito do rio intermitente, na porção fora da área mais densamente urbanizada apresenta susceptibilidade média a inundação, e na região adjacente a bacia e próxima ao exutório, a classificação é de baixa susceptibilidade.

Diferentemente do material que apresenta a susceptibilidade a movimentação de massa, que possui viés de risco de ocupação, esse material indica apenas as características físicas de cada classe. Como exemplo, a classe de susceptibilidade alta é descrita como uma área de inclinação baixa e planícies de inundação, onde ocorrem inundações periódicas. Assim, em comparação com os resultados aqui elaborados, possuem além de detalhamento na indicação da resposta de um evento ocorrido, a possibilidade manipulação dos potenciais volumes de inundação e consequentes áreas atingidas, trazendo junto, assim como o material do Ingemmet a caracterização física dessas áreas.

Embora a escala não seja proporcional, Sepúlveda et al. (2014) apresentam sugestões de layouts para estruturas de mitigação da corrida de detritos para a sua área de estudo, a qual corresponde a *quebradas* localizadas no deserto do Atacama, Chile. Os autores sugerem a utilização de barragens em série, para a acumulação dos detritos e fluxo e a composição de terraços com muros de gabião para desaceleração e uma barragem vazada no centro com encaminhamento para canalização.

4.9 REQUALIFICAÇÃO DO ZONEAMENTO AMBIENTAL PARA A BACIA DE SAN IDELFONSO

A proposta de zoneamento ambiental para a bacia de San Idelfonso é composta pela compilação Plano de Acondicionamento Territorial da Província de Trujillo, 2012-2021 (MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE TRUJILLO, 2012), o Plano de Prevenção e Redução do Risco de Desastres da Província de Trujillo 2018-2021 (MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE TRUJILLO, 2018) e do estudo intitulado Criação do serviço de proteção contra inundações na *quebrada* de San Idelfonso nos distritos de El Porvenir, Trujillo e Victor Larco Herrera na província de Trujillo – Departamento de La Libertad (AC PÚBLICA, 2019).

A sugestão de zoneamento ambiental da bacia hidrográfica de San Idelfonso possui 8 classes que se sobrepõem: Zona de contribuição lateral, Zona de risco I, Zona de risco II, Zona de risco arqueológico, Zona de proteção ambiental, Zona de implantação de bacias de detenção,

Zona de remoção de população e Zona de remoção de resíduos sólidos conforme a Figura 56. Na Tabela 12 estão descriminadas as características de cada classes, incluindo a área de ocupação de cada uma delas.

A Zona de remoção de população é a primeira área a ser atingida em casos de extravasamento do canal. Em uma situação ideal não deveriam existir edificações nessa região e na Zona de risco I. Além da existência de edificações, é importante a retirada dos resíduos sólidos ao longo do leito intermitente. Salienta-se que, segundo Aranda et al. (2014), na área do Alto Trujillo, que corresponde a área próxima ao exutório da bacia, logo após o ocorrido em 1998, houve a realocação dos moradores da região, porém, esses regressaram à localidade. Além disso, os autores ressaltam a vulnerabilidade das edificações dessa região, que em sua maioria são de adobe, de um único pavimento, não atendendo aos critérios de proteção das edificações.

Essa classe tem como base além do Plano de Acondicionamento Territorial da Província de Trujillo, 2012-2021 (MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE TRUJILLO, 2012) e o Plano de Prevenção e Redução do Risco de Desastres da Província de Trujillo 2018-2021 (MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE TRUJILLO, 2018). No Plano de Acondicionamento, há a classe de "*Tratamiento Especial las Zonas de Peligro*", na qual baseia-se inclusive a elaboração deste zoneamento e inclui a possibilidade de avaliação e elaboração de um plano de readequação e realocação da população com vistas ao ordenamento e regulação territorial, buscando a mitigação do risco e vulnerabilidade da região. Enquanto Plano de Prevenção e Redução de Risco propriamente dito, para *El Porvenir*, recomenda a realocação da população das zonas de risco muito alto e alto, localizadas próximas as áreas de inundação da bacia de San Idelfonso nesse bairro, como medida de redução e prevenção do risco de inundação. Acena-se também para a importância da implementação de um sistema de drenagem desse bairro, assim como nos demais expostos ao risco de inundação associado a bacia de San Idelfonso.

Apesar da possibilidade de instalação de bacias de detenção na parte montanhosa da bacia, essas não são suficientes para impedir a inundação da Zona de risco I. Dessa forma é necessária a associação de ações para a minimização do fluxo que alcança a Zona de risco I, pois a fragilidade do material de formação da bacia dificulta a instalação de contenções. Por esse mesmo motivo e pela rápida saturação do solo na bacia, novamente se reforça a importância da elaboração de contenções em série ou paralelas, para não sobrecarregar uma única estrutura, como a já existente na bacia e que colapsou.

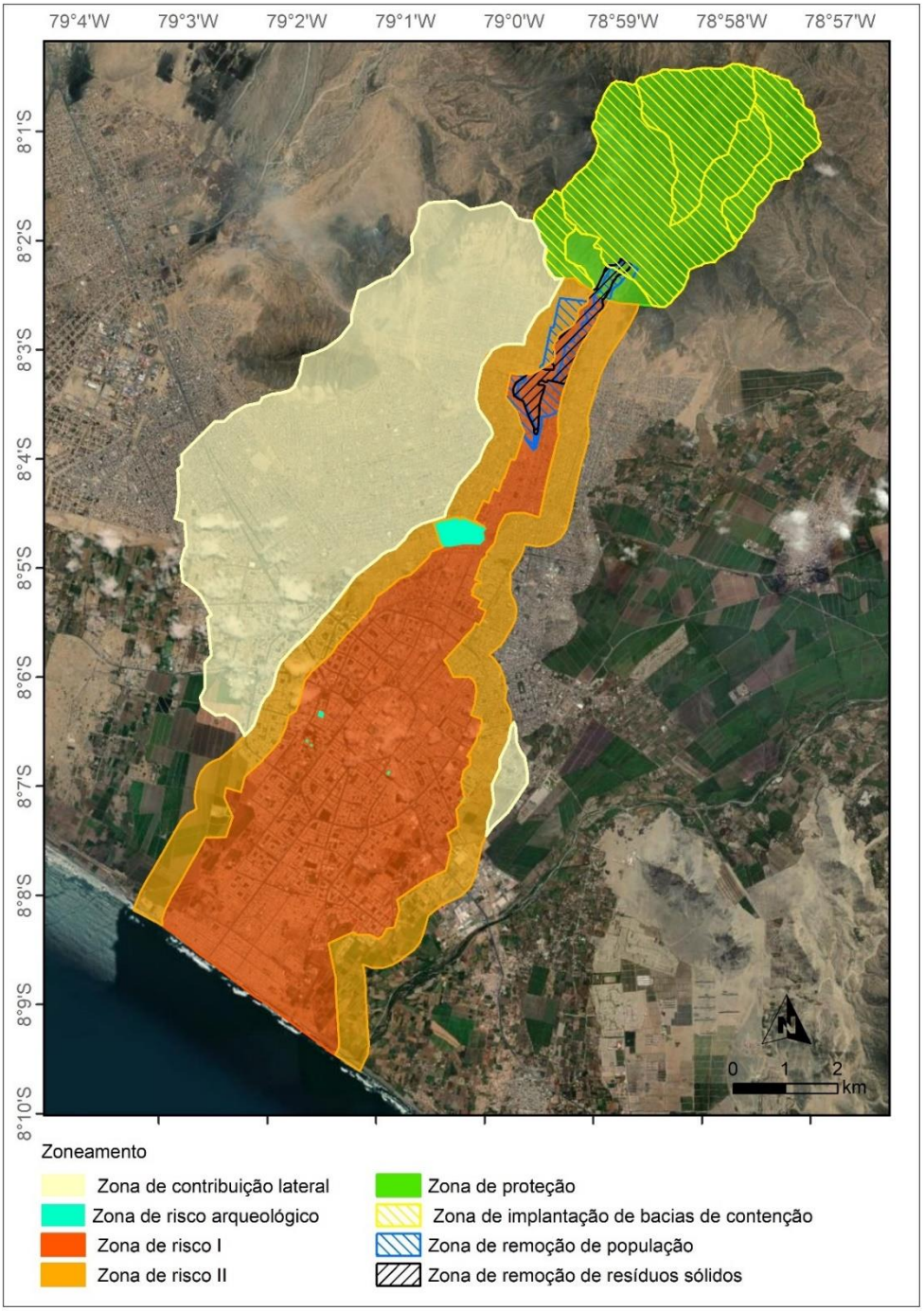
Sugere-se ainda a avaliação da instalação de bacias de contenção fora da área da bacia, a partir da transposição do fluxo em canais de concreto até alcançar as bacias enterradas. Essa água acumulada poderia ainda ser utilizada para irrigação. Aponta-se o dique já existente próximo ao exutório da zona de montanha, o qual foi rompido no evento de 2017 (Figura 55), como estrutura a ser recuperada e melhorada. Essa zona foi baseada na proposta de Criação do serviço de proteção contra inundações na *quebrada* de San Idelfonso nos distritos de El Porvenir, Trujillo e Victor Larco Herrera na província de Trujillo – Departamento de La Libertad (AC PÚBLICA, 2019). O mesmo material sugere a instalação de 33 diques em série e paralelo para a contenção do fluxo.

As bacias (micro quebradas ao longo de toda a zona de montanha) selecionadas como possíveis áreas de contenção, foram escolhidas pela área que ocupam e relevo. Devem ser porém avaliadas separadamente e de forma aprofundada para a verificação da viabilidade da construção das contenções.

Com relação às demais zonas, essas estão descritas, juntamente com suas permissões, restrições e recomendações na Tabela 12.

Ressalta-se porém que na condição de adoção dessa proposta de zoneamento ambiental, esse deve seguir o procedimento legal para a validação. Ou seja, ser elaborada uma comissão governamental com os setores interessados, discussão do acréscimo ou redução de classes além do acréscimo ou redução das permissões, restrições e recomendações das zonas. E a discussão deve ocorrer tanto em âmbito governamental quanto público, ou seja, com a participação popular, para validar as proposições.

Figura 56. Zoneamento ambiental da bacia de San Idelfonso



Fonte: o autor.

Tabela 12. Zoneamento Ambiental

Classe	**Descrição**	**Permissões e Restrições**	**Recomendações**	**Área (km²)**
Zona de contribuição lateral	Zona caracterizada pelas áreas de microbacias que contribuem para a inundação da área urbanizada juntamente ao fluxo originado na *quebrada* de San Idelfonso.	Permissões: - Uso residencial; - Uso comercial; - Uso industrial; - Uso turístico; - Uso agropecuário;	- Sugere-se a alteração dos índices urbanísticos para o impedimento do aumento da urbanização e subsequente aumento de edificações atingidas; - Recomenda-se adoção de sistemas de monitoramento em caso de ativação da *quebrada* de San Idelfonso; - Recomenda-se práticas de reservação de água nos eventos de precipitação elevada e desvio do fluxo para minimização do fluxo que atinge a área urbana, como obras de drenagem.	26,59
Zona de risco I	Zona de risco direto de inundação decorrente da ativação da *quebrada* de San Idelfonso. Corresponde à área inundada pela precipitação histórica de março de 2017. Essa zona é altamente urbanizada, correspondendo inclusive a área central de Trujillo.	Permissões: - Uso residencial; - Uso comercial; - Uso industrial; - Uso turístico; - Uso agropecuário; Restrições: - Aumento da urbanização.	- Sugere-se a alteração dos índices urbanísticos para o impedimento do aumento da urbanização e subsequente aumento de edificações atingidas; - Recomenda-se adoção de sistemas de monitoramento em caso de ativação da *quebrada* de San Idelfonso; - Recomenda-se sempre que possível a adoção nas edificações de sistemas de proteção contra inundação, como muros de proteção fixos ou temporários, de concreto, pré-moldado, alvenaria ou sacos de areia.	25,35

(continua)

(continuação)

Classe	Descrição	Permissões e Restrições	Recomendações	Área (km²)
Zona de risco II	Zona de risco de inundação secundária. Corresponde a 500 metros além da Zona de Risco II.	Permissões: - Uso residencial; - Uso comercial; - Uso industrial; - Uso turístico; - Uso agropecuário.	- Recomenda-se adoção de sistemas de monitoramento em caso de ativação da *quebrada* de San Idelfonso; - Recomenda-se sempre que possível a adoção nas edificações de sistemas de proteção contra inundação, como muros de proteção fixos ou temporários, de concreto, pré-moldado, alvenaria ou sacos de areia.	15,03
Zona de risco arqueológico	Zona de risco de inundação de sítios arqueológico em decorrência da ativação da *quebrada* de San Idelfonso.	Permissões: - Uso turístico; Restrições: - Uso residencial; - Uso comercial; - Uso industrial; - Uso agropecuário.	- Recomenda-se sempre que possível a adoção nas edificações de sistemas de proteção contra inundação, como muros de proteção fixos ou temporários, de concreto, pré-moldado, alvenaria ou sacos de areia.	0,36
Zona de proteção ambiental	Zona de proteção ambiental corresponde à zona de montanha da bacia de San Idelfonso. A área comtempla desde os divisores de água na montanha e segue até o exutório localizado na base da montanha.	Permissões: - Uso turístico; - Uso para obras de contenção; Restrições: - Uso residencial; - Uso comercial; - Uso industrial;	- Recomenda-se atividades para a recuperação e conservação dessa zona para a manutenção dos ecossistemas de mata andina e de deserto costeiro. - Sugere-se ainda a viabilidade da utilização das áreas indicadas na Zona de implantação de bacias de contenção para finalidade de contenção do fluxo.	12,57

(continua)

(continuação)

Classe	Descrição	Permissões e Restrições	Recomendações	Área (km²)
		- Uso agropecuário.		
Zona de implantação de bacias de detenção	Zona para a verificação da viabilidade da implantação de bacias de contenção para minimizar o fluxo de água que alcança a área urbana. As áreas sugeridas são primariamente contempladas na Zona de proteção. Em caso de impossibilidade de utilização como bacias de detenção, essas devem continuar como Zona de proteção.	Permissões: - Uso para obras de contenção; - Irrigação; Restrições: - Uso residencial; - Uso comercial; - Uso industrial; - Uso agropecuário.	- Sugere-se ainda a viabilidade da utilização das áreas indicadas na Zona de implantação de bacias de contenção para finalidade de contenção do fluxo; - Recomenda-se a viabilidade da adoção de bacias de contenção em todas as áreas sugeridas, paralelas e em série, para minimizar assim a energia de transporte do escoamento; - Em caso de viabilidade para bacias de contenção, sugere-se a utilização da água acumulada para irrigação.	16,52
Zona de remoção de população	Zona de recomendação de remoção de população para a minimização dos impactos do extravasamento do canal. A área segue os arredores do leito seco da bacia de San Idelfonso. Na impossibilidade de remoção de população, essas áreas correspondem as Zonas de risco I e risco II.	Permissões: - Obras de contenção/desvio; - Cobertura natural; Restrições: - Uso residencial; - Uso comercial; - Uso industrial; - Uso agropecuário.	- Sugere-se a remoção da população residente nas margens do talvegue. Subentende-se a realocação da população removida. - Na impossibilidade de remoção de população, essas áreas correspondem as Zonas de risco I e risco II.	1,26

(continua)

(continuação)

Classe	Descrição	Permissões e Restrições	Recomendações	Área (km²)
Zona de remoção de resíduos sólidos	Zona de remoção de resíduos sólidos para a minimização de sólidos arrastados com o fluxo de água proveniente da bacia de San Idelfonso e minimização da proliferação de vetores. A área segue o leito seco da bacia de San Idelfonso.	Permissões: - Obras de contenção/desvio; - Cobertura natural; Restrições: - Disposição de resíduos sólidos; - Uso residencial; - Uso comercial; - Uso industrial; - Uso agropecuário.	- Sugere-se a remoção dos resíduos sólidos ao longo do leito do recurso hídrico intermitente e disposição adequada desses.	1,01

Fonte: o autor.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A bacia hidrográfica intermitente de San Idelfonso possui uma situação crítica de inundação em eventos de precipitação elevada causadas pelo fenômeno do *El Niño*. Primeiramente se destaca a condição antrópica da bacia, no que se refere à zona de planície, a qual, pelo crescimento ao longo do tempo da área urbana em direção à montanha, agrava a condição de inundações durante eventos de precipitação elevada. Soma-se a essa condição as características físicas da bacia. A hidrogeologia colabora para a rápida saturação da bacia e subsequente aumento do volume que descende da bacia nos eventos precipitação de *El Niño*. O relevo, por sua vez, contribui para a aceleração do fluxo gerado na montanha, enquanto a geologia agrega material fragmentado ao fluxo de água que desce a montanha, graças a sua composição frágil. Ou seja, cada fator ambiental isolado já dá indícios da situação crítica de Trujillo. Porém, esses não ocorrem de forma isolada na realidade, explicando então os impactos ocorridos em 1998 e 2017.

Ainda sobre a condição de fragilidade da área de montanha, o resultado da metodologia Shalstab pode embasar a própria instalação das bacias de contenção na bacia, buscando evitar os pontos incondicionalmente instáveis, não-saturados, pois a instabilidade desfavorece a manutenção das estruturas de contenção, comprometendo a vida útil e a segurança das estruturas, sendo interessante ainda a importância da elaboração da classificação de estabilidade para bacia de forma detalhada.

Não foi possível calibrar o modelo de inundação no software HEC-RAS, devido à ausência de dados fluviométricos para comparação com o modelo. Sugere-se então, para trabalhos futuros, testar a modelagem em outros softwares, ou se possível, o monitoramento, ainda que temporário (anos de *El Niño,* nos meses de fevereiro e março) da vazão, no exutório da montanha, para posterior calibração do modelo.

Detalhando o zoneamento ambiental da bacia, se observou que a união de materiais já existentes e a consideração da caracterização elaborada neste trabalho apresentam ações de baixa a elevada complexidade que, se implementadas em conjunto, possuem grande potencial para minimizar os impactos das inundações provocadas pelos eventos de *El Niño*.

É importante a verificação das características das demais bacias de *quebradas* que alcançam a área urbana de Trujillo e distritos atingidos por *quebradas*, para a avaliação de ações estruturais que possam mitigar os efeitos da precipitação extrema.

Segue abaixo o quadro resumo (Quadro 4) sobre as considerações finais deste trabalho.

Quadro 4. Quadro resumo

- Relevo contribui para aceleração do fluxo;
- Formação geológica proporciona material fragmentável para corrida de detritos;
- A área montanhosa é rapidamente saturada;
- A problemática relacionada ao uso e cobertura do solo reside na urbanização desordenada;
- A metodologia Shalstab é útil para o posicionamento de estruturas de contenção com maior segurança;
- A ausência de uma série histórica de vazões impediu a calibração da mancha de inundação;
- Sugere-se o monitoramento de futuras vazões durante eventos de *El Niño;*
- O zoneamento ambiental sugere ações de baixo a alto grau de complexidade;
- Sugere-se o estudo das demais *quebradas* próximas.

Fonte: o autor.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR **ISO 14031**: Gestão ambiental – Avaliação de desempenho ambiental – Diretrizes. Rio de Janeiro. ABNT, 2004.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR **ISO 14020**: Rótulos e declarações ambientais - Princípios Gerais. Rio de Janeiro. ABNT, 2002.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR **ISO 14001**: Sistemas da Gestão Ambiental - Requisitos com Orientações para Uso. Rio de Janeiro. ABNT, 2004.

AC PÚBLICA. Estudio de preinversión a nivel de perfil: Creación del Servicio de protección contra inundaciones en la quebrada de San Idelfonso, en los distritos de El Porvenir, Trujillo y Victor Larco Herrera de la provincia de Trujillo - Departamento de La Libertad". Gobierno Regional La Libertad. 2019.

ACADEMIA PEARSON. **Gestão Ambiental**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011. 316 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Manual básico HEC-RAS 5.0.3: Ruptura de Barragem. **AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA**, 2018. Disponível em: https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/simple-search?filterquery=Apostila&filtername=type&filtertype=equals. Acesso em: 08 nov. 2020.

AGUIRRE, B. E. Los desastres en Latinoamérica: vulnerabilidade y resistência. **Revista Mexicana de Sociología**, v. 66, n. 3, p. 485-510, 2004. Disponível em: http://www.scielo.org.mx/pdf/rms/v66n3/v66n3a2.pdf. Acesso em: 06 set. 2019.

ALLCCA, L. C.; SALES, J. C. Peligros geohidrológicos que ocasionaron daños en la ciudad de Trujillo durante "El Niño Costero". **Taller Internacional Fortalecimiento de capacidades para mitigar los impactos de huaicos en Perú,** p. 31 – 33, 2018. Disponível em: https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/1937. Acesso em: 12 ago. 2020.

ALONSO, E. G.; PRIETO, C; ÁLVAREZ, C; MÉNDEZ, F; AGUILAR, O; Y LOSADA, I. Análisis de riesgos hidrológicos bajo cambio climático. Aplicación a la ciudad de Trujillo (Perú). *In*: JORNADAS DE INGENIERÍA DEL AGUA LA PROTECCIÓN CONTRA LOS RIESGOS HÍDRICOS, 3., 2013, Barcelona. **Anais** [...]. Barcelona: Universidad de Cantabria, 2013. p. 1-9. Disponível em: http://www.jia2013.com. Acesso em: 15 ago. 2019.

ALVES, M.E.; MEYER, A.O; FAN, F.M.; PAIVA, R.C.D. **Manual de aplicação do modelo MGB utilizando o IPH-HYDRO Tools**. Manual Técnico, HGE, IPH, UFRGS. 2020.

ANDINA. **Huaicos en Perú: aumenta a 84 el número de muertos**. 2017. Disponível em: http://journal.upao.edu.pe/PuebloContinente/article/view/77/76. Acesso em: 10 mar. 2021.

ARANDA, R. S. J.; JIMENES, G. M; MERA, S. E. Análisis del comportamiento hidráulico de las estructuras de encauzamiento por activación de la quebrada San Ildefonso. **Pueblo Continente**, v. 25, n. 1, p. 79 – 85, 2014. Disponível em: http://journal.upao.edu.pe/PuebloContinente/article/view/77/76. Acesso em: 15 ago. 2019.

ASP – AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. Proceedings of the American Society of Photogrammetry, Annual Meeting, v. 45,1979.

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. *In*: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 1., 1992, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro, 1992. p. 721-733.

BARSANO, R.P., BARBOSA, P.R. **Gestão Ambiental**. Editora Érica. 2014. 206p.

BARREDO, J.; ENGELEN, G. Land Use Scenario Modeling for Flood Risk Mitigation. **Sustainability**, v.2, p.1327-1344, 2010. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/2/5/1327. Acesso em: 15 ago. 2019.

BLITZKOW, D. A evolução dos referenciais usados em geodésia: a era espacial. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 8, n. 1, p. 3-16, 2002. Disponível em: https://repositorio.usp.br/item/001328048. Acesso em: 15 jan. 2021.

BOUERI, R.; COSTA, M. A. **Brasil em desenvolvimento 2013**: estado, planejamento e políticas públicas / Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília: Ipea, 2013. 287p. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/2519/1/Livro-Brasil_em_desenvolvimento_2013_v_1.pdf. Acesso em: 11 jul. 2021.

BRASIL. Decreto nº 4.297 de 10 de julho de 2002. Regulamenta o Art. 9º, inciso II, da lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, estabelecendo critérios para o Zoneamento Ecológico-Econômico Do Brasil - ZEE, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 06, 11 jul. 2002. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ decreto/ 2002/D4297.htm. Acesso em: 13 jul. 2020.

BRASIL. Lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a política nacional do meio ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 16509, 02 set. 1981. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6938.htm. Acesso em: 13 jul. 2020.

BRASIL. Portaria Conjunta n°148, de 18 de dezembro de 2013. para os casos de Inundação Gradual entre a Agência Nacional de Águas - ANA, o Centro Nacional de Monitoramento a Alertas de Desastres Naturais - CEMADEN, representado pela Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento - SEPED/MCTI, o Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres - CENAD, representado pela Secretaria Nacional de Defesa Civil - SEDEC/MI e a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 58, 24 dez. 2013. Disponível em: https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/ index.jsp?data=24/12/2013&jornal=1&pagina=58&totalArquivos=168. Acesso em: 13 jul. 2020.

BRIASSOULIS, H. **Analysis of land use change**: theoretical and modeling approaches. Department of Geography, University of Aegean. Lesvos, 2000. Disponível em: http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents/htm. Acesso em: 21 abr. 2019.

CAF - CORPORACIÓN ANDINA DE FOMENTO. **El Fenómeno del Niño 1997-1998 memoria, retos y soluciones**. Peru: Corporación Andina de Fomento – CAF, 2000. Disponível em: https://floodresilience.net/resources/item/el-fenomeno-del-nino-1997-1998-memoria-retos-y-soluciones-vol-v-peru. Acesso em: 11 jul. 2020.

CAMBRIDGE DICTIONARY. **Hydrograph**. Disponível em: https://dictionary.cambridge.org/pt/dicionario/ingles/hydrograph. Acesso em: 03 maio 2021.

CONSEJO DE EUROPA. Carta Europea de ordenación del territorio. Conferencia Europea de Ministros Responsables de la Ordenación del Territorio. Torremolinos. 1983. Disponível em: https://www.uco.es/~gt1tomam/master/ot/ cartaeuropea1983.pdf. Acesso em: 02 jun. 2020.

CASTILLO, G. M. G. O. **Determinación de zonas inundables mediante simulación hidráulica bidimensional aplicando HEC-RAS 5.0 en un tramo del río Huancabamba, desde la quebrada Chula (km 2.42) hasta la quebrada Lungulo (km 5.51), provincia de Huancabamba, departamento de Piura**. 2020. 124 p. Monografia (Faculdad de Agronomía) – Universidad Nacional de Piura. Piura, 2018.

CASTRO, C. M. A.; TORDOYA, J. C. Z. **Evaluación de la socavación que producirá en pilares y estribos del puente Moche, la derivación del caudal de la quebrada San Idelfonso**. 2018. 116 p. Monografia (Faculdad de Ingenería Civil) – Universidad Privada del Norte. Trujillo, 2018.

CPTEC/INPE - CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS/ INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Monitoramento do El Niño durante NDJ-2019/2020**. Disponível em: http://enos.cptec.inpe.br/. Acesso em: 08 ago. 2020.

DI GREGORIO, L. T.; SAITO, S. M.; SAUSEN, T. M. Sensoriamento Remoto para a gestão (de risco) de desastres naturais. *In*: SAUSEN, T. M.; LACRUZ, M. S. P. (org.). **Sensoriamento remoto para desastres**. São Paulo: Oficina de textos, 2015. p. 43-67.

DIETRICH, W.E.; MONTGOMERY, D.R. **SHALSTAB**: A digital terrain model for mapping shallow landslide potential. 1998. Disponível em: http://calm.geo.berkeley.edu/geomorph/ shalstab/index.htm. Acesso em: 18 abr. 2021.

DUNIN-BORKOWSKI, A. S. Instrumentos de gestión ambiental y los bosques en el Peru: una mirada desde la COP20. **Espacio y Desarrollo**, n. 26, p. 99-108, 2014. Disponível em: http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/espacioydesarrollo/article/view/13968. Acesso em: 14 fev. 2021.

EL-HINNAWI, E.; HASHMI M. H. United **Nations Environment Programme**: The State of the Environment., Butterworth Scientific. 1987. 192p.

EL COMERCIO. **2017, el año en que siete huaicos asolaron Trujillo**. 2017. Disponível em: https://elcomercio.pe/peru/la-libertad/2017-ano-siete-huaicos-asolaron-trujillo-noticia-482385-noticia/**.** Acesso em: 15 abr. 2021.

EL COMERCIO. **Lluvias en Trujillo**: alcalde advierte que retirará enrocado si se activa quebrada. Disponível em: https://elcomercio.pe/peru/la-libertad/lluvias-trujillo-alcalde-

advierte-retirara-enrocado-activa-quebrada-noticia-618605-noticia/?foto=2. Acesso em: 15 abr. 2021.

EL COMERCIO. **Lluvias en Trujillo**: así fue el primer huaico durante El Niño costero del 2017 - Fotos. 2019. Disponível em: https://elcomercio.pe/peru/la-libertad/lluvias-trujillo-primer-huaico-nino-costero-2017-fotos-noticia-617138-noticia/?foto=3. Acesso em: 15 abr. 2021.

EM-DAT – EMERGENCY EVENTS DATABASE. **The OFDA/CRED International Disaster Database**. Disponível em: https://www.emdat.be/emdat_db/. Acesso em: 03 jun. 2019.

EQUIPO ZEE. *Pendientes*: Ordenamiento territorial de la región Cajamarca - Zonificación Económica y Ecológica. Cajamarca. 1:400.000. 2012.

FEIJOO, M. **Relacion descriptiva de la ciudad, y provincia de Truxillo del Peru:** con noticias exactas de su estado politico, segun el Real orden dirigido al excelentismimo señor Virrey conde de Super-Unda. Madrid: Imprenta Real, 1763. 164 p.

FERRÃO, J. Governança, governo e ordenamento do território em contextos metropolitanos. *In*: FERREIRA, A.; SILVA, A. C. P. DA; MARAFON, G. J.; RUA, J. **Metropolização do espaço**: Gestão territorial e relações urbano-rurais. Rio de Janeiro: Consequência, 2012. 257-284. Disponível em: https://repositorio.ul.pt/bitstream/ 10451/10853/1/ ICS_JFErrao_Governanca_CLI.pdf. Acesso em: 11 jul. 2021.

FELICES, A. R. El impacto del fenómeno de El Niño en zonas urbanas. **Revista Ingeniería Civil**, p. 29 – 37. Disponível em: http://www.imefen.uni.edu.pe/ Temas_interes/ROCHA/ Impacto_del_FEN_en_zonas_urbanas.pdf. Acesso em: 08 ago. 2020.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de textos, 2002. 97 p.

GOBIERNO REGIONAL DEL CUSCO. Zonificación Ecológica-Económica: Departamento del Cusco. 2005. MINAM. Disponível em: https://sinia.minam.gob.pe/documentos/ zonificacion-ecologica-economica-zee-departamento-cusco. Acesso em: 18 mar. 2021.

GOLDSTEIN, P. S.; MAGILLIGAN, F. J. Hazard, risk, and agrarian adaptations in a hyperarid watershed: El Niño floods, streambank erosion, and the cultural bounds of vulnerability in the Andean Middle Horizon. **Catena**, v. 85, p. 155-167, 2011. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816210001712. Acesso em: 15 ago. 2019.

GTZ - Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit; CONAM - Consejo Nacional del Ambiente. **Bases Conceptuales y Metodológicas para la Elaboración de la Guía Nacional de Ordenamiento Territorial**. Peru. 2006. 109p.

GUDIÑO, M. E.; REYES PAECKE, S. **Estrategias de integración y transformaciones metropolitanas. Santiago de Chile y Mendoza, Argentina**. EDIUNC. 2005. 160p.

HAMILTON, K.; GARCIA, R.R. El Niño/Southern Oscillation events and their associated midlatitude teleconnections 1531-1841. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 67, n. 11, p. 1354-1361, 1986. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/bams/article/67/11/1354/52628/El-Nino-Southern-Oscillation-Events-and-Their. Acesso em: 10 jul. 2020.

HOCQUENGHEM, A. M. AND ORTLIEB, L. Eventos El Niño y lluvias anormales en la costa del Perú: siglos XVI-XIX. **Bulletin de l'Institut français d'études andines**, v. 21, n. 1, p. 197-278, 1992. Disponível em: https://core.ac.uk/download/pdf/39861379.pdf. Acesso em: 09 jul. 2020.

IBRACAM. **Veja algumas áreas que utilizam o Geoprocessamento**. 2021. Disponível em: https://ibracam.com.br/blog/veja-algumas-areas-que-utilizam-o-geoprocessamento. Acesso em: 09 fev. 2021.

IBRAHIN, F. I. D. **Introdução ao Geoprocessamento Ambiental**. Editora Érica/Saraiva: 2014. 128p.

ICA – INTERNATIONAL CARTOGRAPHIC ASSOCIATION. Third ICA Conference at Amsterdam. 1967.

INDECI – INSTITUTO NACIONAL DE DEFESA CIVIL. **Grandes desastres por inundaciones en el Peru periodo 2001-2010**. 2010. Disponível em: https://floodresilience.net/resources/item/grandes-desastres-por-inundaciones-en-el-peru-periodo-2001-2010. Acesso em: 09 jul. 2020.

INGEMMET – INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO. **Carta Geológica Nacional**. Escala 1:100.000. 2017a. Disponível em: https://www.ingemmet.gob.pe/carta-geologica-nacional-escala-1-100-000. Acesso em: 11 fev. 2020.

INGEMMET – INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO. **Evaluación de peligros geológicos en el Distrito de Punta Hermosa**. Informe Técnico. 2019. Disponível em: http://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//6692_informe-tecnico-n0-a6905-evaluacion-de-peligros-geologicos-en-el-distrito-de-punta-hermosa-provincia-lima-lima.pdf. Acesso em: Acesso em: 05 abr. 2020.

INGEMMET – INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO. **Evaluación Geológica de las zonas afectadas por El Niño Costero 2017 em las regiones La Libertad – Cajamarca**. 2017. 86 p. Disponível em: https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/819. Acesso em: 01 ago. 2020.

INGEMMET – INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO. **Hidrogeología de la cuenca del río Ilo – Moquegua**. Disponível em: https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2269. Acesso em: 01 ago. 2020.

INGEMMET – INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO. **Inspeción Geológica en el asentamiento humano parte alta Nueva Jerusalen**. Informe Técnico. 2019. Disponível em: http://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//6265_informe-tecnico-n0-a6862-inspeccion-geologica-en-el-asentamiento-humano-parte-alta-nueva-

jerusalen-distrito-puente-piedra-provincia-y-region-lima.pdf. Acesso em: Acesso em: 05 abr. 2020.

INGEMMET – INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO. **Riesgo Geológico em la Región La Liberdad**. 2012. 246 p. Disponível em: https://www.ingemmet.gob.pe/carta-geologica-nacional-escala-1-100-000. Acesso em: 11 fev. 2020.

INGEMMET – INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO. **Susceptibilidad a inundaciones y erosión fluvial**: Peligros geológicos y geohidrológicos detonados por el Niño Costero 2017 en la región La Libertad-Cajamarca: Análisis geológico, geomorfológico y de peligros en la ciudad de Trujillo. Escala 1:500.000. 2017b. Disponível em: https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/ 1026/6/A6791Mapa_05_susceptibilidad_a_inundaciones.pdf. Acesso em: 15 jul. 2021.

INGEMMET – INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO. **Susceptibilidad a movimientos en masa**: Peligros geológicos y geohidrológicos detonados por el Niño Costero 2017 en la región La Libertad-Cajamarca: Análisis geológico, geomorfológico y de peligros en la ciudad de Trujillo. Escala 1:500.000. 2017c. Disponível em: https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/ 1026/5/ A6791Mapa_04_susceptbilidad_a_movimientos_en_masa.pdf. Acesso em: 15 jul. 2021.

HUARACHE, J., CASTILLO, J., REÁTEGUI, T. Y PARI, H. Características sedimentológicas del Albiano (Grupo Casma) -valle del río Chillón. **Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica**, v. 5, n. 9, p. 43 – 46. 2002. Disponível em: https://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtual/ Publicaciones/geologia/v05_n9/carac_sedi.htm. Acesso em: 09 jun. 2020.

KILVINGTON, M.; SAUNDERS, W. Gaining public input on natural hazard risk and land-use planning A case study from New Zealand. **Disaster Prevention and Management**, v. 28 n. 2, p. 228-244, 2019. Disponível em: https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ DPM-04-2018-0134/full/html. Acesso em: 15 ago. 2019.

LA MULA. **Así quedó Trujillo luego del huaico del domingo**: Fotos. Disponível em: https://redaccion.lamula.pe/2017/03/20/trujillo-huanchaco-lluvias-huaicos/victorliza/. Acesso em: 12 abr. 2021.

LOPES, E. S. S.; ARRUDA JUNIOR, E. R. Sensoriamento Remoto para deslizamentos. *In*: SAUSEN, T. M.; LACRUZ, M. S. P. (org.). **Sensoriamento Remoto para desastres**. São Paulo: Oficina de textos, 2015. p. 213-248.

LOUZEIRO, A. DOS S.; SALES, C. B. DE.; MENDES, D. L. M.; LIMA, P. H. G. Risco de movimentos de massa: conceitos, metodologias e aplicações. **Revista da Casa da Geografia de Sobral**, v. 21, n. 2, p. 1234-1253, 2019. Disponível em: https://rcgs.uvanet.br/index.php/ RCGS/article/view/551/467. Acesso em: 12 jul. 2021.

LUMEN LEARNING. **Types of Mass Movement**. 2021. Disponível em: https://courses.lumenlearning.com/wmopen-geology/chapter/outcome-types-of-mass-movement/. Acesso em: 12 abr. 2021.

MICHEL, G. P. ; KOBIYAMA, M. . Mapeamento de áreas susceptíveis a fluxos de detritos por meio de modelagem computacional. In: Ladwig, N. I.; Schwalm H.. (Org.). Planejamento e Gestão Territorial. VIed.Criciúma: UNESC, 2015, v. , p. 30-.

MINAM. CONOCIENDO LA ZONIFICACIÓN ECOLÓGICA Y ECONÓMICA (ZEE). 2019. Disponível em: https://sinia.minam.gob.pe/documentos/conociendo-zonificacion-ecologica-economica-zee. Acesso em: 17 mar. 2021.

MINAM - MINISTERIO DEL AMBIENTE. Lineamientos de política para el Ordenamiento Territorial. 4 ed. Lima: MINAM, 2015. 35 p. Disponível em: https://www.minam.gob.pe/ordenamientoterritorial/wpcontent/uploads/sites/18/2013/10/Lineamientos-Politica-OT.pdf. Acesso em: 16 maio. 2021.

MINAM - MINISTERIO DEL AMBIENTE. Mapa nacional de Ecosistemas del Perú. 1:200.000. 2019. Disponível em: https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-nacional-ecosistemas-peru. Acesso em: 05 abr. 2021.

MINAM - MINISTERIO DEL AMBIENTE. Mapa nacional de Ecosistemas del Perú: memoria descriptiva. 2019. Disponível em: https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-nacional-ecosistemas-peru. Acesso em: 18 abr. 2019.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. Políticas de Desenvolvimento Regional (SDR). – Brasília: MI, 2005. p. 43-49. Disponível em: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNPU/Biblioteca/publicacoes/ordenamento_territorial.pdf. Acesso em: 17 jun. 2021.

MORAES, A. C. R. Algumas Considerações Preliminares sobre o Ordenamento Territorial. In: Para pensar uma política nacional de ordenamento territorial: anais da Oficina sobre a Política Nacional de Ordenamento Territorial, Brasília, 13-14 de novembro de 2003.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2005. 320 p.

MORENO, A. R.; FONTALVO, J. A. P. Análisis hidrológico e hidráulico de la cuenca del río Frio, municipios de Ciénaga y zona bananera, departamento del Magdalena. **Revista Logos Ciencia & Tecnología**, v. 9, n. 1, p. 156-178, 2017. Disponível em: https://www.redalyc.org/journal/5177/517752178014/html/. Acesso em: 15 jul. 2021.

MUNARETTO, L. **Vant e drones** – a aeronáutica ao alcance de todos. 2 ed. São Paulo: Edição Independente, 2017.176 p.

MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE TRUJILLO. **Plan de Acondicionamiento Territorial de la Provincia de Trujillo, 2012-2021**. 2012. Disponível em: http://sial.segat.gob.pe/documentos/plan-acondicionamiento-territorial-provincia-trujillo-2012-2021. Acesso em: 09 abr. 2020.

MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE TRUJILLO. **Plan de prevención y reducción del riesgo de desastres de la Provincia de Trujillo 2018 – 2021**. 2018. 117p. Disponível em:

http://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//6188_plan-de-prevencion-y-reduccion-del-riesgo-de-desastres-de-la-provincia-de-trujillo.pdf. Acesso em: 09 abr. 2020.

MUÑOZ, A. F. M.; MARTÍNEZ, J. F. B. Modelación de tránsito de crecientes en el río Aburrá-Medellín para una propuesta de su restauración. **Revista EIA**, v. 13, n. 26, p. 153-168, 2016. Disponível em: http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n26/n26a12.pdf. Acesso em: 15 jul. 2021.

MUSEO VIRTUAL DE GEOLOGÍA. **Geología en fotos – Museo Natural**. 2020. Disponível em: https://www.geovirtual2.cl/Museovirtual/mvgeo000.htm. Acesso em: 09 jun. 2020.

NAKATANI, K. **GUI Equipped user-friendly debris flow simulator "Kanako 2D (Ver.2.02)" handy manual**. Laboratory of Erosion Control. Disponível em: http://www.stc.or.jp/ 10soft/file_E/E.Kanako2.02manual.pdf. Acesso em: 26 ago. 2019.

NARVÁEZ, R.S; JIMENES, G.M; MERA, S.E. Análisis del comportamiento hidráulico de las estructuras de encauzamiento por activación de la quebrada San Ildefonso. **Pueblo Continente**, v. 25, n. 1, p. 79-85, 2014. Disponível em: http://journal.upao.edu.pe/PuebloContinente/article/view/77/76. Acesso em: 26 ago. 2019.

NUNES, L. H. **Urbanização e desastres naturais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 112 p.

PATHAN, A. K. I.; AGNIHOTRI, P. G. 2-D Unsteady Flow Modelling and Inundation Mapping for Lower Region of Purna Basin Using HEC-RAS. **Nature Environment and Pollution Technology**, v. 19, n. 1, p. 277-285, 2020. Disponível em: https://neptjournal.com/upload-images/(28)B-3622.pdf. Acesso em: 11 jul. 2021.

PCM - PRESIDENCIA DEL CONSEJO DE MINISTROS. Decreto Supremo nº 034 de 13 de mayo del 2014. Aprueba el Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres-PLANAGERD 2014-2021. Lima, 2014. Disponível em: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1229859/DS-N_-034-2014-PCM-PLANAGERD20200812-2906259-1x7m674.pdf. Acesso em: 11 mar. 2021.

PCM - PRESIDENCIA DEL CONSEJO DE MINISTROS. Decreto Supremo nº 048 de 26 de mayo del 2011. Aprueba el Reglamento de la Ley nº 29664, que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD). Lima, 2011. Disponível em: https://www.geoidep.gob.pe/images/descargas/DS-048-2011-PCM.pdf. Acesso em: 11 mar. 2021.

PCM - PRESIDENCIA DEL CONSEJO DE MINISTROS. Decreto Supremo nº 087 de 23 de diciembre del 2004. Reglamento de Zonificación Ecológica y Económica. Lima, 2004. Disponível em: https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-reglamento-zonificacion-ecologica-economica-zee. Acesso em: 09 abr. 2020.

PCM - PRESIDENCIA DEL CONSEJO DE MINISTROS. Ley nº 26.821 de 26 de junio del 1997. Ley Orgánica para el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales. Lima, 1997. Disponível em: http://www.minam.gob.pe/disposiciones/ley-n-26821/. Acesso em: 09 abr. 2020.

PCM - PRESIDENCIA DEL CONSEJO DE MINISTROS. Ley nº 28.611 de 13 de octubre del 2005. Ley General del Ambiente. Lima, 2005. Disponível em: https://www.refworld.org.es/ pdfid/5d7fc09ba.pdf. Acesso em: 09 abr. 2020.

PCM - PRESIDENCIA DEL CONSEJO DE MINISTROS. Lei n° 29.664 de 19 de febrero del 2011. Ley que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD). Lima, 2011. Disponível em: https://busquedas.elperuano.pe/ normaslegales/ley-que-crea-el-sistema-nacional-de-gestion-del-riesgo-de-de-ley-n-29664-605077-1/. Acesso em: 11 mar. 2020.

PERDOMO, C. V.; LADEIRA, S. B. Levantamento pedológico em vertente sujeita a movimentos de massa – Ubatuba (São Paulo, Brasil). **Territorium**, v. 17, p. 145-150, 2010. Disponível em: https://impactum-journals.uc.pt/territorium/article/view/1647-7723_17_15/2401. Acesso em: 18 jun. 2021.

PORTAL DIA A DIA EDUCAÇÃO. **Climas e Correntes Marítimas da América**. 2013. Disponível em: http://valdineiandrade.blogspot.com/2013/02/climas-e-correntes-maritimas-da-america.html. Acesso em: 18 mar. 2021.

QUINHOES, J. A. R. C.; YAKABI, K. Planificación y ordenamiento territorial: Consideraciones a partir del caso peruano. **Revista Política e Planejamento Regional**, v. 3, n. 2, p. 137 a 158, 2016. Disponível em: http://www.revistappr.com.br/artigos/publicados/ Planificacion-y-Ordenamiento-Territorial.-Consideraciones-a-partir-del-caso-peruano.pdf. Acesso em: 18 mar. 2021.

QUINN, W. H.; ZOPF, D. O.; SHORT, K. S.; KUO YANG, R. T., Historical trends and statistics of the Southern Oscillation, El Niño, and Indonesian droughts. **Fishery Bulletin**, v. 76, p. 663-678, 1978. Disponível em: https://agris.fao.org/agrissearch/search.do?recordID= US19840097750. Acesso em: 09 jul. 2020.

QUIROZ MORENO, C. E.; MOSTACERO-LEON, J. Influencia de la presión atmosférica y temperatura ambiental en el subsuelo de la microcuenca San Idelfonso Trujillo, Perú. **Manglar**, v. 17, n. 1, p. 47-53, 2020. Disponível em: http://erp.untumbes.edu.pe/revistas/index.php/manglar/article/view/145. Acesso em: 08 abr. 2021.

REAL ACADEMIA EPAÑOLA. Huaico. Disponível em: https://dle.rae.es/huaico. Acesso em: 01 fev. 2021.

RINCÓN, J. C.; PEROZO, M. de los A. Comportamiento hidráulico de la quebrada Atarigua en el cruce con el puente ubicado sobre la troncal 7, Municipio Jiménez, Edo. Lara. **Revista Ingeniería UC**, v. 21, n. 1, p. 77-86, 2014. Disponível em: https://www.redalyc.org/ articulo.oa?id=70732642009. Acesso em: 09 jul. 2021.

RIVERA, M.; VÍLCHEZ, M. & VELA, J. Peligros por huaicos en la ciudad de Arequipa. Taller Internacional Fortalecimiento de capacidades para mitigar los impactos de huaicos en Perú, Lima y Arequipa. 2018: Libro de Resúmenes. Arequipa: INGEMMET, p. 45-49.

RUESTA, C.; OHISHI, T.; OLIVEIRA, J. R. Um modelo de planejamento da produção de uma indústria pesqueira. In: XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Ubatuba. 15

a 18 agosto de 2011. p. 82-94. Disponível em: http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2011/pdf/87683.pdf. Acesso em: 09 jul. 2020.

SAITO, S. M.; SORIANO, E.; LONDE, L.R. Desastres naturais. *In*: SAUSEN, T. M.; LACRUZ, M. S. P. (org.). **Sensoriamento Remoto para desastres**. São Paulo: Oficina de textos, 2015. p. 23-42.

SÁNCHEZ, C. H. V. Ley orgánica de ordenamiento territorial y gestión del territorio. Proyecto de Ley n° 2758/2017: Proyecto de Ley orgánica de ordenamiento territorial y gestión del territorio. Congreso de la República. Disponível em: https://leyes.congreso.gob.pe/Documentos/2016_2021/Proyectos_de_Ley_y_de_Resoluciones_Legislativas/PL0275820180419.pdf. Acesso em: 12 abr. 2021.

SÁNCHEZ-NÚÑEZ, J. M.; MACÍAS, J. L.; ZAMORANO-OROZCO, J. L.; SAUCEDO, R.; TORRES, J. R.; NOVELO, D. Mass movement processes at the Motozintla Basin, Chiapas, Southern Mexico. **Geofísica Internacional**, v. 51, n. 2, p. 169-186, 2012. Disponível em: http://www.scielo.org.mx/pdf/geoint/v51n2/v51n2a6.pdf. Acesso em: 25 maio. 2021.

SANTOS, V. dos. **Influência da escala no mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa com o Shalstab na microbacia do Ribeirão do Baú, Ilhota/SC**. Mnografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

SAUSEN, T. M.; LACRUZ, M. S. P. Sistemas sensores e desastres. *In*: SAUSEN, T. M.; LACRUZ, M. S. P. (org.). **Sensoriamento Remoto para desastres**. São Paulo: Oficina de textos, 2015. p. 69-92.

SENAMHI – SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROGRAFÍA DEL PERU. **El Fenômeno El Niño en el Perú**: Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres – PLANAGERD 2014 - 2021 (Objetivo Nacional y Objetivo Estratégico 1). Lima: Impresiones y Servicios Generales TAWA, 2014. Disponível em: https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/07/Dossier-El-Ni%C3%B1o-Final_web.pdf. Acesso em: 11 jul. 2021.

SENAMHI – SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROGRAFÍA DEL PERU. **Histórico de lluvias**: 1998 – Enero – Febrero - Marzo. 2021. Disponível em: https://www.senamhi.gob.pe/?&p= escenarios-lluvia. Acesso em: 14 fev. 2021.

SENAMHI – SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROGRAFÍA DEL PERU. **Histórico de lluvias**: 2017 – Enero – Febrero - Marzo. 2021. Disponível em: https://www.senamhi.gob.pe/?&p= escenarios-lluvia. Acesso em: 14 fev. 2021.

SENAMHI – SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROGRAFÍA DEL PERU. **Fenômeno El Niño**: Anomalía de la temperatura superficial del mar. 2021. Disponível em: https://www.senamhi.gob.pe/ ?&p=fenomeno-el-nino. Acesso em: 14 fev. 2021.

SIEG - SISTEMA ESTADUAL DE GEOINFORMAÇÃO. **Geoprocessamento**. 2013. Disponível em: http://www2.sieg.go.gov.br/post/ver/169642/geoprocessamento. Acesso em: 09 fev. 2021.

SKIDMORE, A. **Environmental Modelling with GIS and Remote Sensing**. London: Taylor & Francis, 2002. 268p.

SOUZA, T. M. DE; OTTONI, A. B. Análise crítica das causas e soluções sustentáveis para o controle de enchentes urbanas: o caso prático da bacia hidrográfica da Praça da Bandeira (estudo de caso). **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 3, n. 17, p. 60-76, 2015. Disponível em: https://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/gerenciamento_de_cidades/article/view/1009/1032. Acesso em: 14 jul. 2021.

SEPÚLVEDA, S. A.; REBOLLEDO, S.; MCPHEE, J.; CARTES, M. L. M. I; RUBIO, E.; I SILVA, D.; CORREIA, N; VÁSQUEZ, J. P. Catastrophic, rainfall-induced debris flows in Andean villages of Tarapacá, Atacama Desert, northern Chile. **Landslides**, v. 11, p. 481-491, 2014.

TANG, Y.; LEON, A. S.; KAVVAS, M. L. Impact of Size and Location of Wetlands on Watershed-Scale Flood Control. **Water Resources Management**, v. 3, p. 1693-1707, 2020. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-020-02518-3. Acesso em: 15 jul. 2021.

TOMMASELLI, A. M. G. **Fotogrametria Básica**. Presidente Prudente. Edição do Autor, 2006.

TRÖGER, F. H.; PANTE, A. R. Análise de estacionariedade em séries de vazões naturais médias anuais de estações da bacia do rio Tapajós. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., Campo Grande. **Anais** [...]. Disponível em: https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/152/8c39d9224e0da600baace28b3bc3f9fb_d4f5b465146efa25a1abc73b3a21bc74.pdf. Acesso em: 07 jan. 2022.

TRUJILLO EM LÍNEA. **Continuán riesgos para vecinos del balneario de Buenos Aires en Trujillo**. 2015. Disponível em: http://www.trujilloenlinea.pe/noticias/locales/22/05/2015/continuan-riesgos-para-vecinos-del-balneario-de-buenos-aires-en-trujillo. Acesso em: 14 fev. 2021.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998. 669 p.

UN - UNITED NATIONS. **World population prospects: the 2011 revision**. 2011. Disponível em: https://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/urbanization/ WUP2011_Report.pdf. Acesso em: 26 ago. 2019.

USACE - US ARMY CORP OF ENGINEERS. **CN Tables**. 2021. Disponível em: https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm/cn-tables. Acesso em: 22 abr. 2021.

USACE - US ARMY CORP OF ENGINEERS. **Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)**. 2020. Disponível em: https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/. Acesso em: 18 abr. 2021.

USACE - US ARMY CORP OF ENGINEERS. **HEC-RAS River Analysis System User's Manual Version 6.0**. 705p. 2020. Disponível em: https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_6.0_UsersManual.pdf. Acesso em: 25 mar. 2021.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Chapter 15: Time of Concentration. Part 630 Hydrology National Engineering Handbook, v. 15, p. 1-29. 2010.

USGS - United States Geological Survey. Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Non-Void Filled. 2021. Disponível em: https://earthexplorer.usgs.gov/. Acesso em: 07 ago. 2020.

VERGARA, E. M. Criterios claves para el ordenamiento territorial-ambiental. **Espacio y desarrollo**, n. 11, p. 6 – 19, 1999. Disponível em: http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/espacioydesarrollo/article/view/8064. Acesso em: 14 fev. 2021.

VILLANUEVA, J. R. Z.; GARCÍA, G. A. R.; LIZARZABURU, M. E. D. Caracterización de agregados de cinco canteras de la provincia de Tacna y su optimación de uso en obras de construcción. **Ingeniaría Investiga**, v. 2, n. 2, p. 341-356, 2020. Disponível em: https://revistas.upt.edu.pe/ojs/index.php/ingenieria/article/ view/410/345**.** Acesso em: 10 jul. 2021.

VÖRÖSMARTY, C. J.; GUENNI, L. B.; WOLLHEIM, W. M.; PELLERIN, B.; BJERKLIE, D.; CARDOSO, M.; D'ALMEIDA, C.; GREEN, P.; COLON, L. Extreme rainfall, vulnerability, and risk: a continental-scale assessment for South America. **Water security, risk and Society**, v. 371, n. 2002, p. 1-17, 2013. Disponível em: https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rsta.2012.0408. Acesso em: 26 set. 2019.

WILSON, M. A. Mass Movement. **Encyclopaedia Britannica**, 1998. Disponível em: https://academic-ebbritannica.ez314.periodicos.capes.gov.br/levels/collegiate/article/ mass-movement/51288. Acesso em: 20 mar. 2021.