



Lauro Henriko Garcia Alves de Souza

**Identificação e Mapeamento das Propriedades
das Ondas através de Sensor Remoto de Vídeo**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção
do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Infor-
mática da PUC-Rio .

Orientador: Prof. Waldemar Celes Filho

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2021

Lauro Henriko Garcia Alves de Souza

Identificação e Mapeamento das Propriedades das Ondas através de Sensor Remoto de Vídeo

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Informática da PUC-Rio . Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Waldemar Celes Filho

Orientador

Departamento de Informática – PUC-Rio

Prof. Alberto Barbosa Raposo

Departamento de Informática – PUC-Rio

Prof. Marcelo Gattass

Departamento de Informática – PUC-Rio

Prof. Aristófanês Corrêa Silva

Departamento de Engenharia Elétrica – UFMA

Rio de Janeiro, 10 de Fevereiro de 2021

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Lauro Henriko Garcia Alves de Souza

Graduado em Ciências Econômicas pelo IBMEC - Business School (2009). É aluno de Mestrado da PUC-Rio, onde pesquisa soluções tecnológicas para problemas reais.

Ficha Catalográfica

Garcia Alves de Souza, Lauro Henriko

Identificação e Mapeamento das Propriedades das Ondas através de Sensor Remoto de Vídeo / Lauro Henriko Garcia Alves de Souza; orientador: Waldemar Celes Filho. – Rio de Janeiro: PUC-Rio , Departamento de Informática, 2021.

v., 54 f: il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Informática.

Inclui bibliografia

1. Informática – Teses. 2. Detecção de ondas;. 3. Detecção por variação de gradiente;. 4. Agrupamento;. 5. Calibração de câmera;. 6. Reestruturação de dados;. 7. Câmeras de Rede..

I. Celes, Waldemar. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. III. Título.

CDD: 004

À minha esposa, meus pais, irmãos e família pelo apoio e encorajamento.

Agradecimentos

Ao meu orientador, professor Waldemar Celes, pelos ensinamentos, questionamentos, incentivo e parceria nos desafios enfrentados para a realização deste trabalho.

À PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

À minha esposa pelo apoio aos meus estudos e desenvolvimento.

Aos meus pais, pelo amor, criação e preparo para esse momento.

Aos meus irmãos, que me inspiram a ser melhor.

À professora Noemi Rodriguez, por ter me orientado durante essa jornada. Ao professor, Marcus Poggi, por me ensinar a boa programação.

Aos meus colegas da PUC-Rio.

Aos professores que participaram da Comissão Examinadora.

A todos os professores e funcionários do Departamento pelos ensinamentos e pela ajuda.

A todos os amigos e familiares que me apoiaram ao longo da jornada.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Garcia Alves de Souza, Lauro Henriko; Celes, Waldemar. **Identificação e Mapeamento das Propriedades das Ondas através de Sensor Remoto de Vídeo**. Rio de Janeiro, 2021. 54p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A avaliação das condições do mar por meio de instrumentos *in situ* na zona de surfe é muito desafiante. Nesse ambiente, temos a quebra das ondas e presença de banhistas. A quebra das ondas gera grande dissipação de energia, o que pode danificar os instrumentos e possivelmente causar um choque entre o instrumento e os banhistas. Uma solução para auferir as condições do mar com sensor remoto pode apresentar grande vantagem. Neste trabalho, é proposto um método de visão computacional tradicional, uma vez que não há um banco público de imagens de ondas para a utilização de redes neurais. Utilizamos câmeras de rede convencionais e de baixo custo já largamente instaladas nos principais pontos de surfe do Brasil e do mundo fazendo com que o nosso método fique mais acessível a todos. Com ele, conseguimos extrair propriedades das ondas, como distância, frequência, direção, posição no mundo, percurso, velocidade, intervalo entre séries e altura da face da onda, e prover uma análise quantitativa das condições do mar. Esses dados devem servir às áreas de Oceanografia, de Engenharia Costeira, de Segurança do mar e ao novo esporte olímpico: surfe.

Palavras-chave

Detecção de ondas; Detecção por variação de gradiente; Agrupamento; Calibração de câmera; Reestruturação de dados; Câmeras de Rede.

Abstract

Garcia Alves de Souza, Lauro Henriko; Celes, Waldemar (Advisor). **Identifying and Mapping Waves Properties Using Remote Sensing Video**. Rio de Janeiro, 2021. 54p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Evaluating sea conditions in the nearshore through in situ instruments can be challenging. This environment is exposed to wave breaking and civilian recreation. Wave breaking dissipates energy, which can lead to damaging the instrument and possibly causing shock with civilians. A solution to acquire sea conditions data through remote sensing can be of great advantage. This work, presents a traditional computer vision method, since there is no public wave image dataset. Low cost conventional network cameras are used, which are already installed in the main surfing spots around the world making our method more accessible to the general public. With it, we are able to extract wave properties such as length, frequency, direction, world position, path, speed and sets interval. This data should serve as input to areas such as Oceanography, Coast Engineering, water safety and the new Olympic Game: Surfing.

Keywords

Wave Detection; Gradient Variance Detection; Clustering; Camera Calibration; Data Restructuring; Network Cameras.

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Motivação	15
1.2	Contribuições e benefícios desta dissertação	16
1.3	Estrutura da dissertação	17
2	Conceitos Básicos	19
2.1	Formação das Ondas	19
2.2	Definição da quebra de onda	20
2.3	Altura da onda	21
3	Trabalhos relacionados	23
4	Método Proposto	25
4.1	Pré-processamento	25
4.2	Algoritmo de detecção de onda	28
4.3	Algoritmo de cálculo de altura das ondas	31
4.4	Algoritmo de agrupamento de ondas	34
4.5	Propriedades das ondas	36
5	Resultados	39
5.1	Calibração da câmera	39
5.2	Detecção das ondas	42
5.3	Altura da onda	44
6	Conclusão e trabalhos futuros	50
7	Referências bibliográficas	53

Lista de figuras

Figura 1.1	a - Técnicos fazendo manutenção em uma boia. Fonte: Miro Group - , b - Boia respondendo à passagem das ondas. Fonte: Swellnet e c - Banhistas na zona de surfe. Fonte: Veja Rio em Dezembro de 2016	14
Figura 1.2	a - Ilustração da previsão das ondas feita pelo INPE/CPTEC - , b - Ciclovia Niemeyer destruída pelas ondas fonte: O Globo e c - Salva-vidas observando banhistas. Fonte: GMAR	16
Figura 2.1	Altura de onda variável deixando a zona de geração (fetch). Setas indicam a direção variável do vento em torno de uma direção principal, um dos colaboradores do espalhamento direcional. Adaptado de: The COMET Program. Fonte:(7)	19
Figura 2.2	Processo de quebra de onda: crista (X), base (O) antes da quebra, ponto de impacto () , espirro máximo de água (). De um ângulo lateral na foto em preto e branco (A; fonte: Shand, 2009 (11)) e ângulo frontal na foto colorida (B; fonte: Thomas, Donald e Roger (2))	20
Figura 2.3	Quadrados 1 e 2 exemplificando onde e em que momento do processo de quebra da onda o algoritmo 2.3 fará a detecção	21
Figura 2.4	Características da onda: crista, base, comprimento e amplitude. Fonte: (14)	21
Figura 2.5	Definição de crista e base. Fonte: The Comet Program	22
Figura 4.1	Coordenadas adquiridas para calibração da câmera. Fonte: Google Earth	25
Figura 4.2	Coordenadas na imagem. Fonte: Print da câmera	26
Figura 4.3	Transformação projetiva para mapear pontos entre o mundo e a imagem. Fonte: Unicamp	26
Figura 4.4	Imagem ilustrativa exibindo uma coordenada a cada 3 metros. Fonte: Google Maps	27
Figura 4.5	Grid da câmera. Fonte: print da câmera	27
Figura 4.6	Exemplo de cálculo de valor de um elemento (i, j) da Matriz M^t .	28
Figura 4.7	Pivô sendo detectado: parte da onda recém-quebrada - espuma branca - ao lado de parte da onda calma - mais escura.	29
Figura 4.8	Variação fotossintética ao longo do dia. Fonte: (18)	30
Figura 4.9	Dinâmica do valor da intensidade dos pixels na vizinhança do pivô de detecção	31
Figura 4.10	Análise dos pontos críticos e a sua correspondência na imagem.	32
Figura 4.11	Exibição dos pontos de início e fim em diferentes ondas.	32
Figura 4.12	Um pivô detectado	34
Figura 4.13	Uma onda sendo rastreada pelo método	35
Figura 5.1	Câmera instalada no topo do posto salva-vidas	39
Figura 5.2	Projeção 3D para 2D. Em vermelho, vemos coordenadas em pixels, que foram projetadas a partir de coordenadas no mundo. Pontos em verdes são as posições reais na imagem	40

Figura 5.3	Projeção 2D para para 3D. Em vermelho, vemos coordenadas no mundo, que foram projetadas a partir de coordenadas na imagem. Pontos em verdes são as posições reais na imagem	41
Figura 5.4	Onda com espuma e parede brancas.	43
Figura 5.5	Ferramenta criada para validação das detecções do observador experiente.	43
Figura 5.6	Detecção do algoritmo e do humano na crista e base da onda. Em verde, o algoritmo e, em vermelho, o especialista.	44
Figura 5.7	Comparação da altura estimada do algoritmo com a estimada pelo especialista	45
Figura 5.8	Observação do tamanho dos erros. Linha verde representa ± 1 desvio padrão dos dados reais. 67% dos erros se encontram dentro de ± 1 desvio padrão dos dados reais.	47
Figura 5.9	Altura da onda estimada pelo algoritmo (verde) e pelo observador experiente (vermelho).	47
Figura 6.1	Percurso das ondas em coordenadas do mundo	51
Figura 6.2	Posição e frequência das ondas no mundo	51

Lista de tabelas

Tabela 5.1	Projeção em pixel a partir de coordenadas no mundo (lat-long)	40
Tabela 5.2	Erro em metros da posição estimada no mundo	41
Tabela 5.3	Resultados da detecção	42
Tabela 5.4	Altura estimada pelo algoritmo e especialista em pixels	45
Tabela 5.5	Altura estimada pelo algoritmo e observador experiente em metros	48

Lista de algoritmos

Algoritmo 1	Algoritmo de detecção de ondas	29
Algoritmo 2	Algoritmo de calibração de θ	30
Algoritmo 3	Algoritmo de cálculo de altura da onda	33
Algoritmo 4	Algoritmo de agrupamento de ondas	35

*The more I study, the more insatiable do I
feel my genius for it to be.*

Ada Lovelace, .

1

Introdução

A quebra de onda é o mecanismo de maior força no litoral (1), e a obtenção de informação acurada sobre características da zona de surfe é essencial para entender os vetores do processo costal para obras de engenharia, prevenção de danos e planejamento recreativo (2). Além disso, a principal causa de afogamento em muitas praias são as correntes de retorno (3).

Entretanto, como pode ser visto na Figura 1.1, os instrumentos *in situ* que medem as atividades de ondas são grandes (a) e sofrem bastante movimentação com a passagem das ondas (b). A zona de surfe também costuma receber um grande número de banhistas (c) e a instalação desses equipamentos nessas áreas pode trazer riscos às pessoas.

Portanto, o objetivo desta pesquisa é desenvolver um método que consiga informação acurada sobre as características do mar na zona de surfe, utilizando um sensor remoto para, assim, reduzir os riscos às pessoas e os custos que os equipamentos *in situ* apresentam. Para isso, criamos um método de visão computacional que, por meio de imagens de vídeo, consegue identificar as propriedades das ondas na zona de surfe, como extensão, velocidade, frequência, posição de quebra, direção e percurso. Assim, objetiva-se fornecer um conjunto de estatísticas para engenheiros, oceanógrafos, autoridades, civis e surfistas sobre as condições do mar na costa.

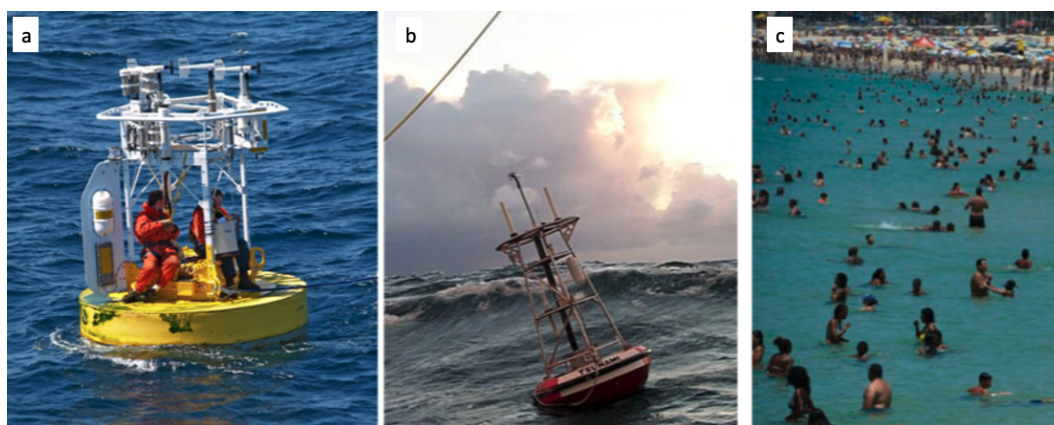


Figura 1.1: a - Técnicos fazendo manutenção em uma boia. Fonte: Miro Group - , b - Boia respondendo à passagem das ondas. Fonte: Swellnet e c - Banhistas na zona de surfe. Fonte: Veja Rio em Dezembro de 2016

1.1

Motivação

Sabe-se que diversas áreas do conhecimento necessitam de informações sobre as condições do mar. A Oceanografia utiliza imagens de satélite e boias marítimas em alto mar para fazer a previsão das propriedades das ondas que chegarão à costa. Pode-se observar, na Figura 1.2(a), a previsão das ondas para o Brasil feita pelo INPE/CPTEC. Para que essa previsão seja validada, um observador experiente interpreta esses dados. Portanto, a velocidade com que os modelos recebem validação é lenta e não sistêmica, o que pode levar à variação de observador para observador.

A previsão das ondas é importante para atividades portueiras que, a depender da altura, pode impedir a chegada e saída de navios. Também afeta a recreação da população que deseja se banhar no mar, tornando seguro ou perigoso tal atividade. Enfim, toda atividade costeira sujeita à interação com o mar pode ser afetada pelas suas condições. Portanto, é de suma importância que os modelos possam ter informações reais de forma sistêmica e com uma boa frequência.

Uma outra área que motivou o desenvolvimento deste trabalho é a engenharia costeira que é responsável por grandes obras perto ao mar. Para isso, ela precisa entender bem como são os processos de atividade oceânica na área da obra. Construções, como pontes, estradas, ciclovias, entre outras, precisam saber qual é a dinâmica e interação das ondas nas proximidades da construção, a fim de evitar deterioração precoce das estruturas e, no limite, evitar que sejam destruídas, o que não ocorreu no caso da ciclovia Tim Maia (Figura 1.2(b)), reportado pelo Jornal O Globo em 21 de Abril de 2016. Não apenas é importante um estudo prévio para a construção de obras, como também um acompanhamento da dinâmica costeira. Tempestades oceânicas geram ondas de diferentes magnitudes e duração. Com o tempo, movem sedimentos nos entornos das construções, e isso pode ter um impacto perigoso na estrutura.

A segurança dos banhistas que usam o mar como lazer também serviu de motivação. Atualmente, a segurança é feita pela observação humana da zona de surfe. Os salva-vidas, posicionados em torres de observação, são responsáveis por monitorar banhistas no mar ao longo dia (Figura 1.2(c)). Pela continuidade da tarefa por longas horas e área de monitoramento extensa, existe a possibilidade de janelas de tempo sem monitoramento. Pela continuidade da tarefa por longas horas e área de monitoramento extensa, existe a possibilidade de janelas de tempo sem monitoramento.

Por fim, o surfe é um esporte que depende das condições do mar na zona do surfe para ser praticado. A quantidade de praticantes no Brasil tem crescido

de forma mais acelerada nos últimos anos, apoiada no sucesso que os atletas brasileiros têm obtido. Apesar desse crescimento, a avaliação das condições do mar ainda é feita de forma manual e qualitativa. Cada surfista interessado em surfar, precisa observar por um determinado tempo as condições do mar para formar uma opinião sobre as ondas. Apesar de haver mais de 1.000 câmeras espalhadas nos principais pontos de surfe no mundo, as propriedades das ondas ainda não são extraídas de forma automatizada e, portanto, esse sistema pode ser útil a um grande público.



Figura 1.2: a - Ilustração da previsão das ondas feita pelo INPE/CPTEC - , b - Ciclovía Niemeyer destruída pelas ondas fonte: O Globo e c - Salva-vidas observando banhistas. Fonte: GMAR

1.2

Contribuições e benefícios desta dissertação

Este trabalho contribui com um método de visão computacional que pode gerar diversas estatísticas sobre as condições do mar na zona do surfe como a altura, frequência, direção e outras métricas de ondas, utilizando apenas uma câmera de rede de baixo custo e com internet convencional. Considerando que esse tipo de câmera já se encontra instalado nas principais praias do Brasil e do mundo, o método pode ser facilmente replicado.

A utilização desse método pode beneficiar das seguintes maneiras:

1. Validador das previsões das ondas para Oceanografia:

Como a Oceanografia não consegue de forma constante e sistemática conhecer os dados que, de fato, ocorrerão, esta pesquisa tem como objetivo contribuir com um método para auferir, em tempo real, as propriedades das ondas e alimentar os modelos de previsão, provendo mais dados para que os modelos estatísticos possam ser aprimorados.

2. Sistema de alerta para construções costeiras:

Com a invasão do mar cada vez maior na costa, é importante que a Engenharia Costeira seja constantemente informada quanto ao processo morfodinâmico que está ocorrendo perto das construções. A entrada de ressacas pode comprometer as estruturas à medida que ondas de maior energia estouram na zona de surfe e se encaminham para a praia. Por sua vez, estruturas fragilizadas põem em risco a vida de civis. Com a detecção de onda pelo método apresentado, conseguimos a posição determinada da onda. Cada vez que essas ondas terminarem perto da costa e ,possivelmente, mais perto das construções, podemos ter um sistema de aviso de risco potencial.

3. Apoio na base dos salva-vidas:

A água que chega à costa por meio das ondas precisa voltar para o mar. Isso gera as correntes de retorno, que são lugares de maior risco para os banhistas. Com o método proposto, encontraremos o caminho percorrido pelas ondas e, com isso, pode-se visualizar no mapa as regiões mais intensas -bancos de areia - e menos intensas - valas de retorno. Além de ter essa informação em um corte do tempo, ela é atualizada de forma automática à medida que a atividade das ondas mudam. O conhecimento dessas propriedades por meio de sistema proposto pode ser usado nas torres de observação, que ficam na praia, e nas bases do Corpo de Bombeiros.

4. Surfe:

O método proposto pode servir como uma ferramenta de análise para avaliação das condições do mar e pode ajudar praticantes de surfe a tomarem decisões mais assertivas e mais rápidas sobre a prática ou não do esporte naquele momento. Cada praticante tem as suas preferências em termos de altura, direção e velocidade das ondas. Ter acesso a esse conjunto de estatísticas pode evitar acidentes, além de ajudar iniciantes no esporte a entenderem melhor sobre condições do mar.

1.3

Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte forma: no Capítulo 2, apresentamos alguns conceitos básicos e definições sobre a mecânica das ondas. No Capítulo 3, apresentamos alguns métodos de detecção de ondas por visão computacional presentes na literatura; no Capítulo 4, apresentamos a metodologia desenvolvida neste trabalho; no Capítulo 5, apresentamos os

resultados obtidos e, por fim, no Capítulo 6, apresentamos algumas conclusões e propomos trabalhos futuros.

2

Conceitos Básicos

Neste capítulo, apresentamos os principais conceitos definidos pela Oceanografia sobre as ondas e suas propriedades, relacionados ao método proposto.

2.1

Formação das Ondas

As ondas são geradas pela transferência de energia do vento para a superfície do oceano (4) (5) (6). As suas características - altura, período, direção e energia - são regidas pela velocidade e duração do vento na área de formação e também pelo tamanho da pista – fetch (7) (Figura 2.1).

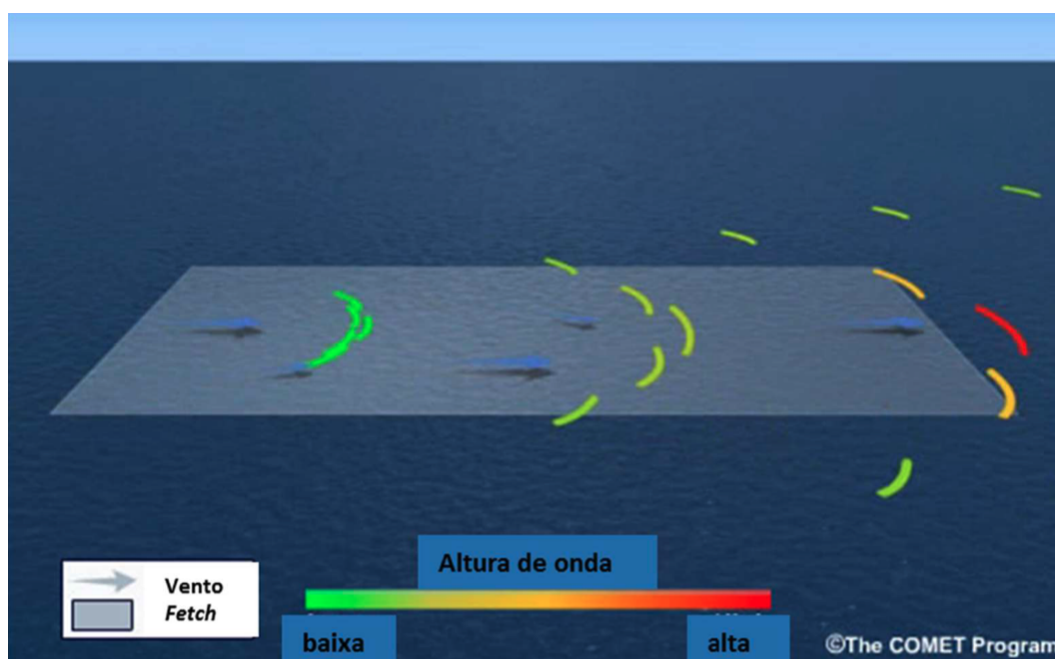


Figura 2.1: Altura de onda variável deixando a zona de geração (fetch). Setas indicam a direção variável do vento em torno de uma direção principal, um dos colaboradores do espalhamento direcional. Adaptado de: The COMET Program. Fonte:(7)

Conforme as ondas se aproximam de águas rasas, onde a profundidade é metade do comprimento original da onda, elas sofrem transformações por interagirem com o fundo do mar. No geral, a celeridade e o comprimento da onda diminuem, a altura aumenta e as cristas vão se tornando mais íngremes, ou seja, aumentam sua esbelteza, tornando-se instáveis, quando quebram (7).

2.2

Definição da quebra de onda

Com o objetivo de se desenvolver uma metodologia para avaliação das ondas na zona de surfe, é fundamental que se explique o que determina a quebra de uma onda. Diversas definições já foram propostas na literatura (8). Uma descrição prática foi proposta por Smith e Kraus (1991) e considera o ponto em que a face da onda quase se torna vertical (9). A partir desse momento, a onda desce progressivamente a sua face (10) ou joga sua água à frente, impactando a parte inferior da onda (?), como pode ser visto na Figura 2.2, que exhibe esse processo pelo ângulo lateral (coluna A) e frontal (coluna B).

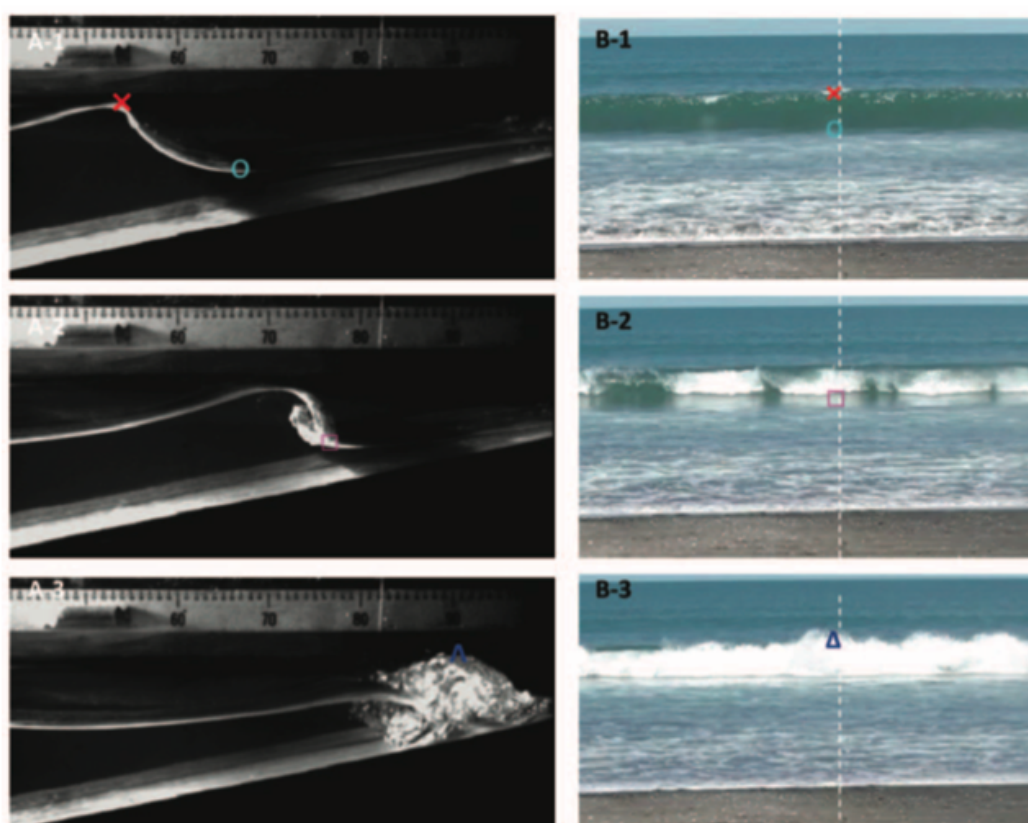


Figura 2.2: Processo de quebra de onda: crista (X), base (O) antes da quebra, ponto de impacto (\square), espirro máximo de água (Δ). De um ângulo lateral na foto em preto e branco (A; fonte: Shand, 2009 (11)) e ângulo frontal na foto colorida (B; fonte: Thomas, Donald e Roger (2))

No momento do impacto, ocorre uma inserção de ar na água, e as bolhas geradas (12) aumentam a refletância de frequências visíveis, contrastando fortemente com a parte da onda que ainda não quebrou (13). O algoritmo 2.3 começa a detectar a onda a partir dessa diferença de intensidade dos pixels como exemplificado na figura 2.3 pelos quadrados 1 e 2.

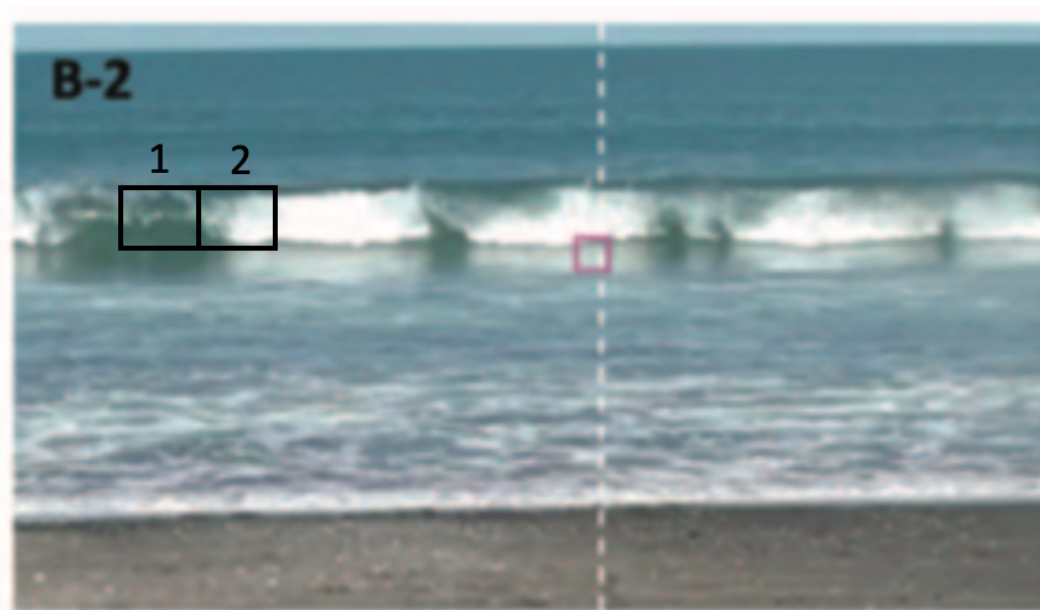


Figura 2.3: Quadrados 1 e 2 exemplificando onde e em que momento do processo de quebra da onda o algoritmo 2.3 fará a detecção

2.3

Altura da onda

Como parte do objetivo deste estudo é estimar a altura da onda a partir da imagem, colocamos nesta seção a definição da altura das ondas de acordo com a Dinâmica dos Fluidos e Oceanografia.

De acordo com a Dinâmica dos Fluidos, a altura da onda é definida como a diferença de elevação entre a crista e a base da onda (Figura 2.4) (14). Segundo a Oceanografia, a crista da onda é o valor máximo atingido em uma passagem de onda, e a base é o oposto da crista, como exibido de forma mais ilustrativa pela Figura 2.5.

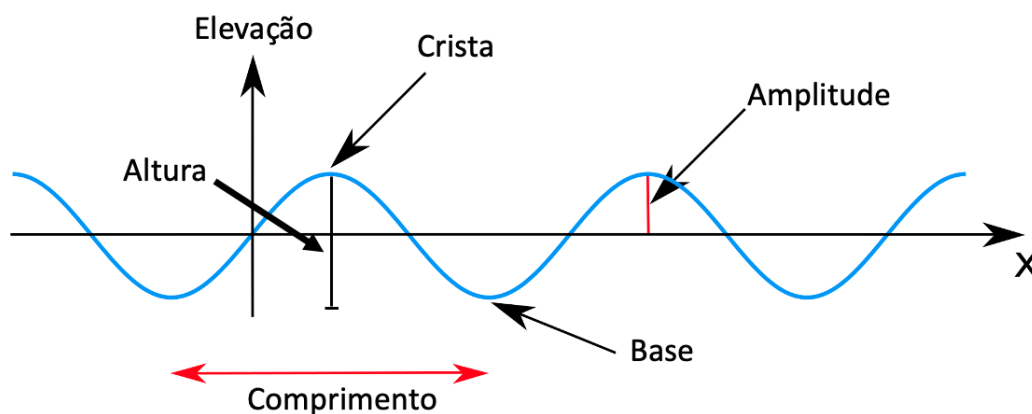


Figura 2.4: Características da onda: crista, base, comprimento e amplitude. Fonte: (14)

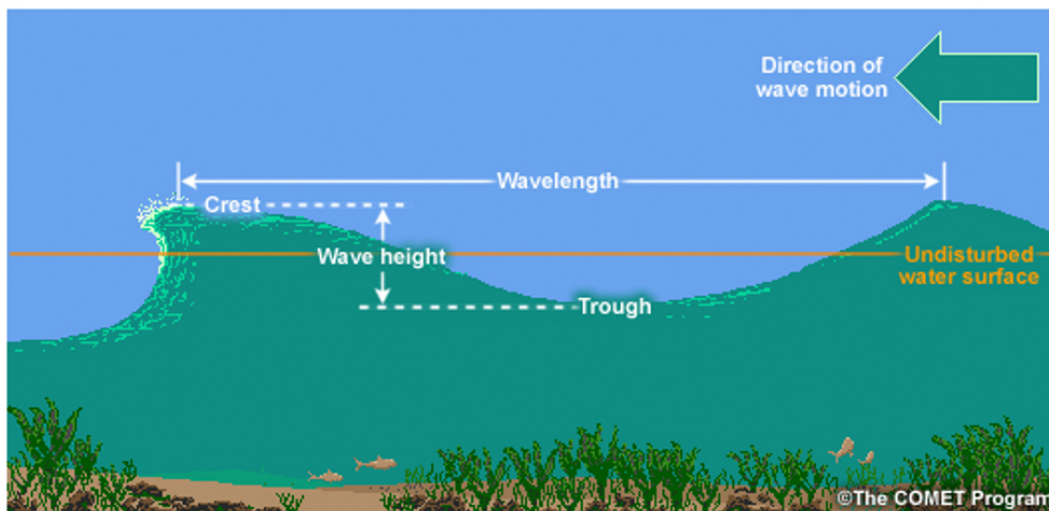


Figura 2.5: Definição de crista e base. Fonte: The Comet Program

Neste estudo, usaremos essa definição de altura de onda para estimar essa métrica.

3

Trabalhos relacionados

Neste capítulo, apresentamos alguns trabalhos, que têm como foco caracterizar as ondas na zona de surfe, com diferentes abordagens.

Daniel et al (15) propuseram o uso de redes neurais para classificar o tipo de onda quebrada na zona de surfe: derrame, espiral ou vagalhão. Eles utilizaram câmera infravermelha termal pela sensibilidade a pequenas diferenças de temperatura entre espuma ativa (quente) e espuma residual (fria). Com essa câmera, eles captaram 9400 imagens que foram manualmente rotuladas com o seu tipo de onda.

As imagens coletadas foram realizadas em apenas dois dias. Apesar de o objetivo do trabalho ser determinar o tipo de onda que está quebrando, do total de imagens submetidas a teste, 73% eram imagens sem onda. Os resultados obtidos nesse trabalho ficaram em torno de 90% de acurácia de classificação em 6 redes neurais do estado da arte.

Kevin (16) utilizou três 2D Light Detection and Ranging (LiDAR) scanners para monitorar a variação da superfície da água ao longo do tempo na zona de surfe durante 10 dias no sul da França. As ondas são definidas pela identificação de sua crista e são rastreadas até a areia. A transformação das ondas observadas pelo estudo de Kevin foi comparada a modelos teóricos de transformação linear das ondas na zona de surfe e encontrou diferenças de até 30% na altura individual da onda no momento de quebra, assim como diferenças significativas no formato das ondas. Portanto, o estudo concluiu que há uma excelente oportunidade de obter medidas mais precisas quanto à altura da onda na zona de surfe.

Thomas et al. (17) utilizaram as imagens de duas câmeras para encontrar a altura da onda por meio de uma análise time-stack entre 20 e 22 de janeiro de 2010. Isso foi feito com a extração de uma linha de pixel de uma sequência de imagens e colocada em ordem cronológica, de forma a permitir a avaliação da variação da intensidade do pixel no espaço e no tempo. O uso de duas câmeras, uma no nível do mar e outra a 30 metros do nível do mar, contribui para uma melhor calibração, gerando um erro de posição estimada em torno de 4%. A menor onda encontrada teve um erro de 11% e a maior onda de 3%.

Em comparação ao nosso estudo, utilizamos um subconjunto de imagens que foram coletados ao longo de 60 dias, trazendo mais robustez para validação de nossos resultados. Utilizamos apenas uma câmera que, por sua vez, é popular e já se encontra instalada em diversas praias do Brasil e do mundo.

Somado a isso, para calibrar a câmera, fizemos a aquisição de coordenadas usando o GPS de um smartphone convencional, permitindo, assim, que nosso método seja mais acessível para a comunidade de forma geral. Por fim, nosso método também é computacionalmente eficiente para gerar os dados em tempo real e transmitir por internet convencional.

4

Método Proposto

Neste capítulo iremos descrever as etapas necessárias, o tratamento da imagem e os algoritmos elaborados para a extração das propriedades das ondas por visão computacional.

4.1

Pré-processamento

Para obtermos as propriedades das ondas em unidades do mundo real, é necessário que se descubra a matriz da câmera. Portanto, foi feito um mapeamento projetivo de coordenadas do pixel para coordenadas do mundo com restrição de pontos 3D coplanares ($Z = 0$). Para tanto, obtivemos as coordenadas em latitude e longitude dentro do campo de visão da câmera, utilizando GPS de *smartphone*, conforme exibido na Figura 4.1. Trabalhamos com coordenadas em latitude e longitude por termos pontos próximos e, portanto, a inclinação da Terra tem pouco efeito sobre as distâncias entre os pontos. Em seguida, encontramos as coordenadas em pixels referentes a cada uma das coordenadas em latitude e longitude, conforme exibido pela Figura 4.2. Por fim, realizamos uma transformação projetiva planar mapeando os pontos no mundo com os pontos na imagem. Esse mapeamento pode ser escrito conforme a Figura 4.3 onde vemos do lado esquerdo da equação as coordenadas na imagem e, no lado direito, a matriz da câmera (matriz H) multiplicada pelas coordenadas no mundo. Esse problema de equação linear foi resolvido por mínimos quadrados. Com a solução desse problema, obtivemos a matriz da câmera.



Figura 4.1: Coordenadas adquiridas para calibração da câmera. Fonte: Google Earth

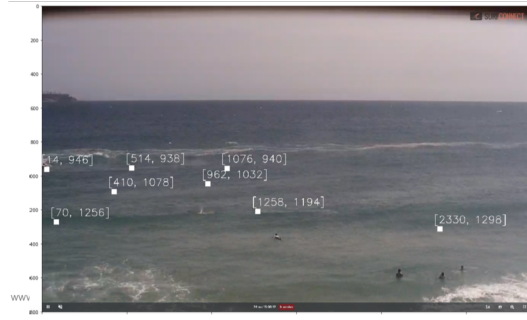


Figura 4.2: Coordenadas na imagem. Fonte: Print da câmera

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ w'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ w_i \end{bmatrix}$$

Figura 4.3: Transformação projetiva para mapear pontos entre o mundo e a imagem. Fonte: Unicamp

Com a câmera calibrada, passamos para a etapa de detecção das ondas. Para o método ser robusto a ruídos e desconsiderar pequenas diferenças de contraste na imagem, além de ter alto desempenho, particionamos a imagem em células, como ilustra a Figura 4.5. Para o cálculo de altura das células, executamos o seguinte procedimento:

1. Definimos uma coordenada inicial e final para marcarmos a zona de surfe no mundo.
2. Baseado em observação visual, definimos que a distância entre essas duas coordenadas no ponto acima será dividida em intervalos de 3 metros (Figura: 4.4).
3. Utilizando a matriz da câmera, convertemos cada uma dessas coordenadas em coordenadas na imagem e, assim, obtemos as alturas de cada célula.

Como a imagem tem uma menor deformação perspectiva na horizontal, para trabalharmos com células retangulares, mantivemos a largura de cada célula fixa.



Figura 4.4: Imagem ilustrativa exibindo uma coordenada a cada 3 metros.
Fonte: Google Maps



Figura 4.5: Grid da câmera. Fonte: print da câmera

O resultado da grade formada sobre a imagem é uma matriz M , na qual cada elemento refere-se a uma célula da grade, e o valor de cada elemento é calculado a partir da média dos valores de luminância dos pixels contidos na respectiva célula. Portanto, quando o algoritmo recebe um quadro do vídeo, que chamaremos de IMG, em um tempo t , converte-se ele para escala de cinza e calcula-se o valor de um elemento $[i][j]$ da seguinte maneira:

$$M^t[i][j] = \frac{1}{w_{i,j}h_{i,j}} \sum_{k=0}^{h_{i,j}} \sum_{l=0}^{w_{i,j}} IMG^t \left(\sum_{r=0}^{i-1} h_{r,j} + k, w_i * j + l \right) \quad (4-1)$$

M^t representa a matriz de células de um quadro t em escala de cinza do vídeo de entrada. Cada célula tem coordenadas (i, j) e possui tamanho $(w_i, h_{i,j})$, com $h_{r,j}$, representando a altura das células anteriores à célula em questão.

Por exemplo, para obtermos os valores do elemento $(i, j) = 2,3$, ilustrado pela Figura 4.6, temos que percorrer $w_i * 3$ pixels para chegarmos no início da coluna da célula em questão, uma vez que todas as células têm larguras iguais e como as alturas variam, somamos as alturas das células anteriores para chegarmos no início da linha da referida célula. Dadas as posições iniciais da célula, percorremos cada pixel, somando seu valor de intensidade. Por fim, dividimos pelo tamanho da célula e chegamos ao valor do elemento da matriz.

0	1	2	3	4
1				
2			Elemento (i,j) = 2,3	
3				

Figura 4.6: Exemplo de cálculo de valor de um elemento (i, j) da Matriz M^t .

4.2

Algoritmo de detecção de onda

Considerando uma morfologia não uniforme do fundo do mar em águas rasas, quando uma onda começa a interagir com o fundo, ela se torna mais íngreme e, em certo momento, quebra. Em um fundo não uniforme, partes da onda quebrarão em diferentes momentos, fazendo com que a espuma se desenvolva de acordo com a batimetria. Neste estudo, iremos considerar que o percurso da espuma pode ir para a esquerda ou para direita, considerando o ponto de vista da câmera e a não uniformidade do fundo.

Consideramos como ponto chave da detecção a parte da onda quebrada mais recentemente (maior energia), com sua parede de onda adjacente antes da quebra (menor energia). Fazendo-nos valer da característica ótica da espuma recentemente desenvolvida (cor branca) e a parte calma da face (cor escura) 2.2, iremos detectar essa diferença e chamar esse ponto de pivô, exemplificado na Figura 4.7.

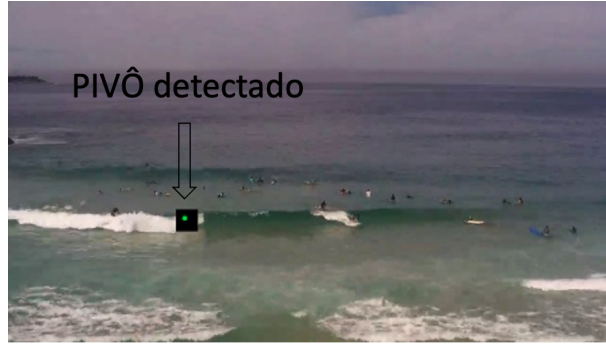


Figura 4.7: Pivô sendo detectado: parte da onda recém-quebrada - espuma branca - ao lado de parte da onda calma - mais escura.

Logo, para identificar a onda, executamos o seguinte algoritmo:

Algoritmo 1: Algoritmo de detecção de ondas

- 1 Percorre-se M^t horizontalmente, mapeando as diferenças $\Delta_{i,j}^t$ entre intensidades de células vizinhas, para identificar pivôs:

$$\Delta_{i,j}^t = M^t[i][j] - M^t[i][j + 1]$$

- 2 Verifica-se se a diferença está acima de um determinado valor limite θ
 - 4.2.1. Para cada célula e por frame, mapeamos se há ou não onda e sua orientação por O^t :

$$O^t = \begin{cases} \text{esquerda,} & \text{se } \Delta_{i,j}^t \geq \theta \\ \text{direita,} & \text{se } \Delta_{i,j}^t \leq -\theta \\ \text{sem onda} & \text{senão} \end{cases}$$

4.2.1

Calibração dinâmica do limite inferior para detecção (θ)

É necessário, portanto, definir o valor de θ para a detecção da onda. Devido ao ambiente externo – praia – , com muita reflexão de luz por causa do mar, foi observado ao longo deste estudo que o Sol tem um grande efeito sobre os valores dos pixels. Isso pode ser exemplificado pela Figura 4.8, que mediu a radiação ativa fotossintética em ambiente externo ao longo do dia em 27 e 28 de setembro de 2014 (18):

Por isso, evidencia-se necessário o ajuste do limite θ , ao longo do tempo, para que a detecção se mantenha robusta. Para tanto, implementamos um método que guarda a diferença máxima entre células em cada quadro por um

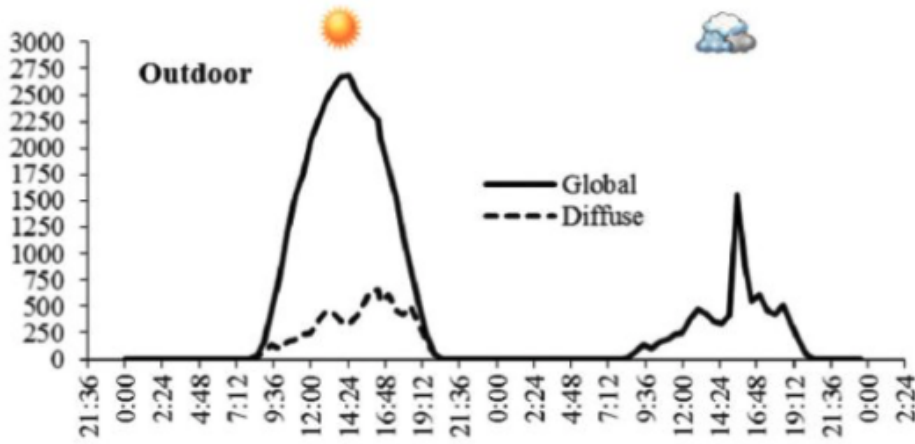


Figura 4.8: Variação fotossintética ao longo do dia. Fonte: (18)

determinado tempo e depois atualiza o valor limite com a média dos maiores valores. Descreve-se o algoritmo 2 abaixo:

Algoritmo 2: Algoritmo de calibração de θ

1. Define-se uma frequência de calibração f em quantidade de quadros
2. Define-se um valor limite θ inicial de detecção
3. Para cada quadro recebido armazenamos, a maior diferença entre células δ^t , ou seja:

$$\delta_t = \max_{i,j} \Delta_{i,j}^t$$

4. Ao alcançar a quantidade de frames definida em 1, seleciona-se o subconjunto $\{\sigma\}$ dos $r(\%)$ maiores valores de $\{\delta\}$, e define-se θ como média aritmética desses valores. Ou seja:

$$\theta = \frac{\sum \sigma_k}{|\sigma|}$$

5. Com o novo valor limite, esvazia-se o conjunto $\{\delta\}$ e retornamos ao passo 3.
-

A detecção do pivô caracteriza o início da quebra de uma onda. A partir dele, extraímos diferentes propriedades, como altura, frequência, direção e arrebenção.

4.3

Algoritmo de cálculo de altura das ondas

Ao detectarmos o início da quebra de uma nova onda, deseja-se estimar a sua altura. Para isso, observamos as características de refletância de luz em torno de sua crista e base (Figura 4.9). Para isso, selecionamos um bloco de pixels na adjacência de um pivô, giramos esse bloco 90° à esquerda e avaliamos o perfil da intensidade dos pixels em cada coluna desse bloco. Podemos observar nos gráficos à direita da Figura 4.9 o valor de intensidade de cada pixel de cada coluna do bloco.

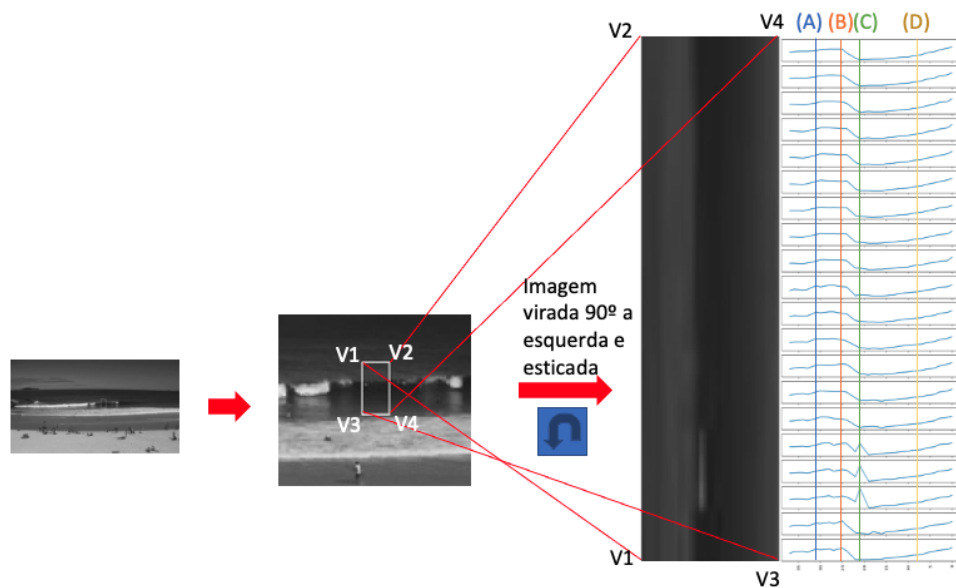


Figura 4.9: Dinâmica do valor da intensidade dos pixels na vizinhança do pivô de detecção

É possível notar no perfil de intensidade dos pixels os seguintes eventos:

1. Início do aumento na intensidade: ponto A.
2. Formação de máximo local em B.
3. Formação de mínimo local em C.
4. Aumento gradual na intensidade para níveis similares a pontos anteriores a A em D

Realizando diversas regressões polinomias, foi observado que o sexto grau tinha o menor erro e, portanto, realizamos uma regressão de sexto grau nesse conjunto de pontos. Foi possível observar com mais detalhes o comportamento nos pontos críticos P_i de máximos, mínimos e inflexão, conforme ilustrado na Figura 4.10. Para ilustrar, estamos exibindo a imagem colorida, mas trabalhamos com a imagem em escala de cinza:

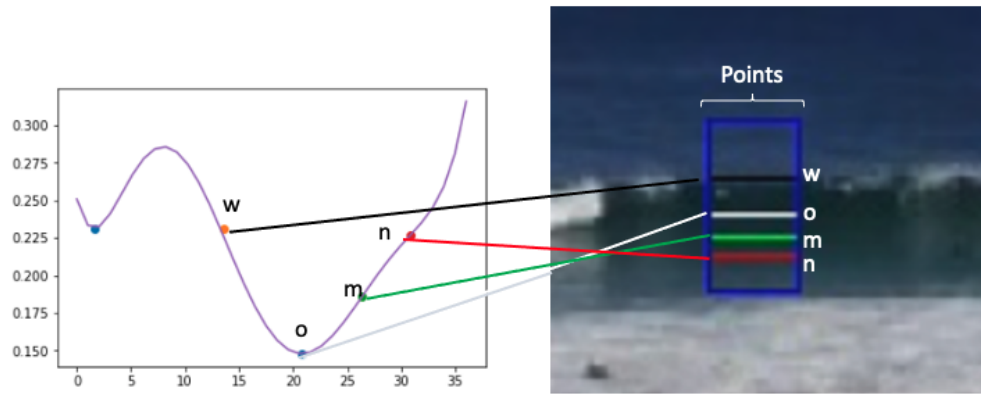


Figura 4.10: Análise dos pontos críticos e a sua correspondência na imagem.

Os pontos w,o,m,n correspondem a:

1. w: Primeiro ponto de inflexão após o primeiro ponto de máximo.
2. o: Mínimo global.
3. m: Segundo ponto de inflexão após o mínimo global.
4. n: Terceiro ponto de inflexão após o mínimo global.

Observando outras ondas (Figura 4.11), com diferentes luzes, direções e tamanhos, assumimos a heurística de que a altura da onda na imagem deve ser definida como a diferença entre o ponto D e o ponto A, de acordo com o algoritmo 3.

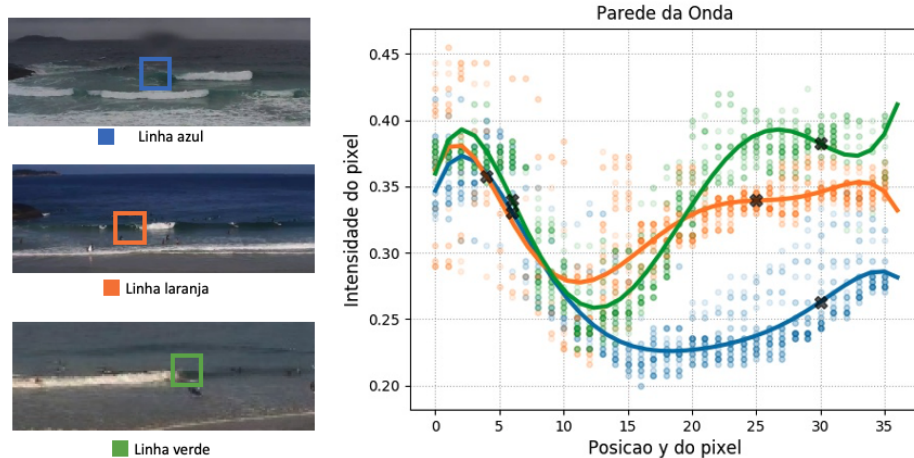


Figura 4.11: Exibição dos pontos de início e fim em diferentes ondas.

Algoritmo 3: Algoritmo de cálculo de altura da onda

1. Caso identifiquemos uma onda em $M[i][j]$, definimos uma nuvem de pontos P como:

$$P_{i,j}^t = \begin{cases} M[i][j+1], & \text{se } \Delta_{i,j}^t \geq \theta \\ M[i][j], & \text{se } \Delta_{i,j}^t \leq -\theta \end{cases}$$

isto é, formamos P com os pixels da célula adjacente na direção de propagação da onda.

2. Realizamos uma regressão polinomial de grau $d = 6$ em P tal que:

$$\min\left(\sqrt{\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \mid Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2^2 + \dots + \beta_d X_d^d + \epsilon\right)$$

3. Seleciona-se o subconjunto de pontos, P_i dos $w(\%)$ menores valores de

$$\sqrt{\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}$$

4. Repetimos o passo 2 no subconjunto de pontos do passo 3.

5. Encontramos os pontos críticos C_i em que $\frac{dy}{dx} = 0$.

6. Nos pontos C_i calculamos $\frac{d^2y}{dx^2}$ e definimos:

$$C_i = \begin{cases} \text{máximo,} & \text{se } \frac{d^2y}{dx^2} < 0 \\ \text{mínimo,} & \text{se } \frac{d^2y}{dx^2} > 0 \\ \text{inflexão} & \text{senão} \end{cases}$$

7. Retornamos $C_i^k = \{C_i^{\text{maximo}}, C_i^{\text{minimo}}, C_i^{\text{inflexão}}\}$

8. Encontramos:

$$\text{Maximo}_{\text{local}} = \max\{Y(C_i^{\text{max}}) \mid \text{dado} : C_i^{\text{max}} < \frac{1}{3} \cdot |P_j^t|\}$$

$$\text{Inicio Onda} = C_i^{\text{inf}}[0] > \text{Maximo}_{\text{local}} = P_{y0}$$

$$\text{Minimo}_{\text{global}} = \min\{Y(C_i^{\text{minimo}})\}$$

$$\text{Base da Onda} = C_i^{\text{inf}}[2] > \text{Minimo}_{\text{global}} = P_{y1}$$

9. Calculamos a altura H

$$H = P_{y1} - P_{y0}$$

4.4

Algoritmo de agrupamento de ondas

Após a detecção do início da quebra de uma onda e o cálculo de sua altura, deseja-se entender como essa onda se forma e varia ao longo dos quadros (do tempo) t e, por isso, fazemos um rastreamento.

Como a matriz M^t varia ao longo do tempo, passa-se a organizar os pivôs encontrados em uma lista L , respectivamente, de ondas que navegam para a esquerda e para a direita. Dessa maneira, o k -ésimo pivô encontrado em um determinado quadro t , na posição (i, j) é unicamente identificado por orientação, posição e tempo. Logo:

$$L_k = (O^t, (i, j), t)$$

Um exemplo de pivô, pode ser observado na Figura 4.12, em que temos $O^t =$ esquerda, $(i, j) = (5, 11)$ e quadro $t = 150$.



Figura 4.12: Um pivô detectado

Dispondo dos tempos e das posições de cada pivô, uma onda Z é definida por uma sequência crescente no tempo de pivôs, com orientação igual.

$$Z = \{L[1], L[2], \dots, L[n]\} \quad (4-2)$$

Por exemplo: uma onda

$$Z = \{L_1, L_2, L_3\} \quad (4-3)$$

$$= \{(esq, (5, 11), 150), (esq, (5, 14), 180), (esq, (6, 16), 210)\} \quad (4-4)$$

$Z = \{L_1, L_2, L_3\} = \{(esq, (5, 11), 150), (esq, (5, 14), 180), (esq, (6, 16), 210)\}$ é formada por 3 pivôs, localizados nos frames 150, 180 e 210, e se encontram

nas células $M^{150}[5][11]$, $M^{180}[5][14]$, E $M^{210}[6][16]$, respectivamente, conforme ilustrado pela Figura 4.13.



Figura 4.13: Uma onda sendo rastreada pelo método

O desafio é, a partir dos pivôs $\{L\}$, agrupá-los a fim de obter uma onda Z . Para isso, elabora-se um procedimento para determinar se um novo pivô detectado faz parte de uma onda já existente ou não. Para determinarmos isso, avalia-se se esse pivô está a uma distância Euclideana limite β do pivô mais recente na lista de ondas (maior tempo) e se ele ocorre dentro de um tempo limite α de um pivô antecessor. Esse procedimento é descrito no algoritmo 4.

A Distância Euclideana é definida por:

$$||(i, j) - (k, l)|| = \sqrt{(i - k)^2 + (j - l)^2}$$

Algoritmo 4: Algoritmo de agrupamento de ondas

```

1  Entrada: pivô  $L_k$ , lista de ondas:  $\{W\}$ 
2  Tempo Limite =  $\alpha$ 
3  Distância Limite =  $\beta$ 
4  Encontra-se  $L_m$ : // 0 pivô de maior tempo em  $\{W\}$ 
5
    $L_m = \max_n \{L_{n_t} \mid L_{k_t} - L_{n_t} \leq \alpha, ||L_{k_p} - L_{n_p}|| \leq \beta\}$ 
6  se  $L_m$  é verdadeiro então
   | Agrupa  $L_k$  a lista de  $L_m$ ;
7  senão
   | Inicia uma nova onda  $Z$  em  $\{W\}$ ;
8
9
```

Neste experimento, foi observado em testes que os valores mais adequados para α são 2 segundos e para β são 80 pixels e, portanto, esses são os valores atribuídos a essas variáveis.

O algoritmo de agrupamento das ondas permite encontrar as seguintes propriedades:

1. Percurso.
2. Tempo de duração.
3. Velocidade das ondas.
4. Angulação da onda em relação à areia.
5. Distância percorrida.

Na Figura 4.13, pode ser observado o rastreamento de uma onda.

4.5

Propriedades das ondas

Nesta seção, serão formalizadas matematicamente as propriedades das ondas que estão sendo extraídas a partir das saídas dos algoritmos do método.

Definições básicas:

1. Pivô: $L_k = (O^t, (i, j), t)$
em que O é orientação da onda, (i, j) é a posição e t o tempo de ocorrência.
2. Onda: $Z = \{L[1], L[2], \dots, L[n]\}$, ou seja um encadeamento de pivôs.
3. Conjunto de ondas: $W = \{Z[1], Z[2], \dots, Z[n]\}$, ou seja uma lista de ondas.
4. Início da onda k : L_k^{Ini}
5. Fim da onda k : L_k^{Fim}
6. Matriz da câmera: M_c
7. Intervalo tempo de análise: T , ou seja, o tempo de duração para apuração das propriedades das ondas.

A distância percorrida em metros d_k de uma determinada onda Z_k é a diferença entre as posições geográficas de seus pivôs finais e iniciais. Ou seja:

$$d_k = ||M_c^{-1} \left((L_k^{Fim})_p \right) - M_c^{-1} \left((L_k^{Ini})_p \right) || \quad (4-5)$$

onde p é a posição em pixel do pivô.

A distância média percorrida em metros é dada por:

$$D_m = \frac{\sum d_k}{|W|} \quad (4-6)$$

A duração média das ondas é dada por:

$$t_m = \frac{1}{|W|} \sum_{k=1}^{|W|} \left((L_k^{Fim})_t - (L_k^{Ini})_t \right) \quad (4-7)$$

onde t é o momento em que o pivô foi detectado.

O ponto de arrebentação, dado em coordenada geográfica, durante um determinado período de análise, é definido como a maior profundidade que uma onda quebra em relação à areia. Em outras palavras, o pivô de maior posição vertical.

$$a = M_c^{-1} \cdot \max_i \{ (L_i^{Ini})_{p_y} \} \quad (4-8)$$

onde p_y é o ponto de início da onda na imagem no eixo y.

As ondas da série são ondas formadas próximas ao ponto de arrebentação, dado um limite de distância β :

$$B = \{ L_k \mid a - M_c^{-1} \cdot (L_k^{Ini})_{p_y} \leq \beta \} \quad (4-9)$$

Grupos da série G_k são constituídos pelas ondas da série que formam uma sequência em que a onda seguinte se inicia em no máximo um limite de γ segundos após a onda anterior. Ou seja:

$$Z_i, Z_{i+1} \in G_k \iff Z_i, Z_{i+1} \in B, (Z_{i+1}(L_k^{Ini}))^t - (Z_i(L_k^{Fim}))^t \leq \gamma \quad (4-10)$$

Define-se também o início e fim de uma série por G_k^{Ini} e G_k^{Fim} . Consideramos que o conjunto $\{G_k\}$ é ordenado pelos tempos dos pivôs, o intervalo médio entre os grupos de série é a média dos intervalos de tempo entre grupos de série consecutivos, ou seja:

$$I_m = \frac{1}{|G| - 1} \sum_{k=1}^{|G|-1} \left((G_{i+1}^{Ini})_t - (G_i^{Fim})_t \right) \quad (4-11)$$

A frequência de ondas em um determinado intervalo de tempo t , denominada por f^t é:

$$f^t = \frac{t}{T}|W| \quad (4-12)$$

E por fim, a altura das ondas é dada por:

$$H_k = ||M_c^{-1}((P_{y1})) - M_c^{-1}((P_{y0}))|| \quad (4-13)$$

P_{y1} e P_{y0} é a crista e a base da onda, respectivamente.

5 Resultados

Neste capítulo, será descrito a forma de captura dos dados de entrada e as métricas de acurácia para avaliação do método.

Para a captura de imagens, foi utilizada uma câmera de rede convencional, da marca Intelbras, modelo VIP 5212 e com resolução de 1280 por 720 pixels. Essa é uma câmera popular, de baixo custo, amplamente utilizada por civis para monitoramento remoto. A câmera foi instalada no topo do posto salva-vidas número 7 (Figura 5.1) na Praia de Ipanema, conectada à internet com velocidade de 2MB de upload para envio das imagens. Os dados foram coletados no período de julho a agosto de 2020.



Figura 5.1: Câmera instalada no topo do posto salva-vidas

5.1 Calibração da câmera

Para a captura das coordenadas no mundo, foi utilizado aplicativo de mapas - Google Maps - em smartphone convencional com internet Edge e GPRS - baixa potência. Foram capturadas 8 coordenadas do mundo que estavam dentro do campo de visão da câmera. A partir desses dados e considerando o mar como uma superfície plana ($z=0$), foi feito o cálculo da

matriz da câmera. Com a matriz da câmera, projetamos a posição na imagem a partir de coordenadas no mundo (lat-long), conforme ilustrado pela Figura 5.2 e detalhado na Tabela: 5.1.



Figura 5.2: Projeção 3D para 2D. Em vermelho, vemos coordenadas em pixels, que foram projetadas a partir de coordenadas no mundo. Pontos em verdes são as posições reais na imagem

Ponto	Projeção (x,y)	Dado (x,y)
1	(28,228)	(32,220)
2	(427,300)	(428,306)
3	(480,349)	(480,344)
4	(226,353)	(228,346)
5	(170,285)	(182,286)
6	(581,234)	(560,238)
7	(1022,192)	(1032,196)
8	(13,337)	(8,346)

Tabela 5.1: Projeção em pixel a partir de coordenadas no mundo (lat-long)

Também foi feita a projeção de coordenadas no mundo a partir das coordenadas na imagem conforme ilustrado na Figura 5.3.

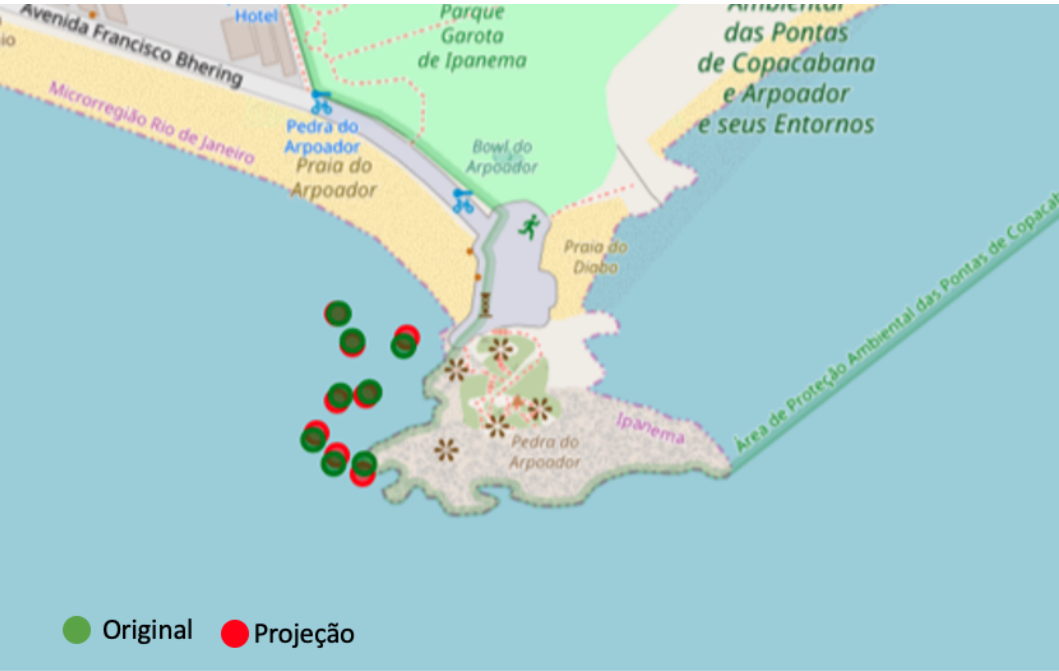


Figura 5.3: Projeção 2D para para 3D. Em vermelho, vemos coordenadas no mundo, que foram projetadas a partir de coordenadas na imagem. Pontos em verdes são as posições reais na imagem

Para mensurar o tamanho do erro na estimativa da coordenada em latlong a partir de coordenadas em pixels, foi utilizada a equação de Harvisine (19), que calcula a distância em metros a partir de duas coordenadas. Para cada coordenada estimada, foi calculada a distância entre ela e a coordenada adquirida com o GPS do celular. A distância entre cada ponto é ilustrada na Tabela 5.2. A partir dessas diferenças, foi calculada a média aritmética, e o resultado foi de 2.80 metros. De acordo com a gps.gov - fonte oficial do governo americano sobre GPS - , o erro médio de acurácia de GPS de celular é 4.90 metros, ou seja, nosso erro foi abaixo do erro médio e , portanto, consideramos nossa calibração como satisfatória.

Ponto	Diferença entre projeção e real (m)
1	3.89
2	2.90
3	3.54
4	4.82
5	2.36
6	1.71
7	0.66

Tabela 5.2: Erro em metros da posição estimada no mundo

5.2

Detecção das ondas

O algoritmo de detecção de onda foi programado para salvar quadros do vídeo quando fazia uma detecção de onda, assim como quando não fazia uma detecção. Um outro programa selecionou aleatoriamente um subgrupo dessas imagens e as exibiu em uma interface web (Figura 5.5). Nessa interface, um observador experiente era solicitado para clicar em uma onda caso identificasse uma na imagem. O observador validou 1.013 imagens, das quais 763 eram imagens com ondas detectadas pelo algoritmo e 250 imagens de momentos em que o algoritmo não detectou ondas. Para determinar um resultado verdadeiro positivo, adotamos uma tolerância máxima de distância Euclideana entre o clique do especialista e o ponto da detecção da onda (pivô) de 80 pixels. Já o resultado verdadeiro negativo é quando a imagem não tem um pivô e nem foi clicada pelo especialista, Falso positivo é quando há pivô, mas não há clique e falso negativo é quando há clique, mas não há pivô. Os resultados estão na tabela 5.3.

		Valor Preditivo		Total
		Sim	Não	
Real	Sim	496	89	585
	Não	151	277	428
Total		647	366	1.013

Tabela 5.3: Resultados da detecção

Por estarmos interessados em avaliar as condições das ondas na zona de surfe, utilizamos a métrica de sensibilidade que calcula a quantidade de ondas que o método detectou dentro do subconjunto de imagens com ondas.

Assim sendo, temos:

$$Sensibilidade = \frac{Verdadeiro\ Positivo}{Verdadeiro\ Positivo + Falso\ Negativo} = 84.78\%$$

Analisando visualmente as imagens que tiveram resultado de classificação como falso negativo, foi constatado que eram ondas que não exibiam um contraste suficiente entre a espuma e a parede da onda. Um exemplo é ilustrado pela Figura 5.4. Isso ocorre quando uma onda quebra após a outra em um curto espaço de tempo, de forma que a espuma da primeira onda ainda não tenha se dissipado.



Figura 5.4: Onda com espuma e parede brancas.

Not Secure — 165.227.87.19

Gallery Lauro - Online LaTeX Editor Overleaf

Validação da dissertação do mestrado

Aluno: Lauro Souza

Matricula: 1912713

Orientador: Waldemar Celes



Email:

Figura 5.5: Ferramenta criada para validação das detecções do observador experiente.

5.3
Altura da onda

Em uma outra validação, 44 imagens com ondas detectadas pelo algoritmo foram exibidas de forma aleatória para a especialista. Era solicitado à especialista que clicasse na crista e na base da onda (Figura 5.6).



Figura 5.6: Detecção do algoritmo e do humano na crista e base da onda. Em verde, o algoritmo e, em vermelho, o especialista.

Pode-se observar na Figura 5.7, assim como na Tabela 5.4, as alturas calculadas pelo o algoritmo e mensuradas pelo especialista.

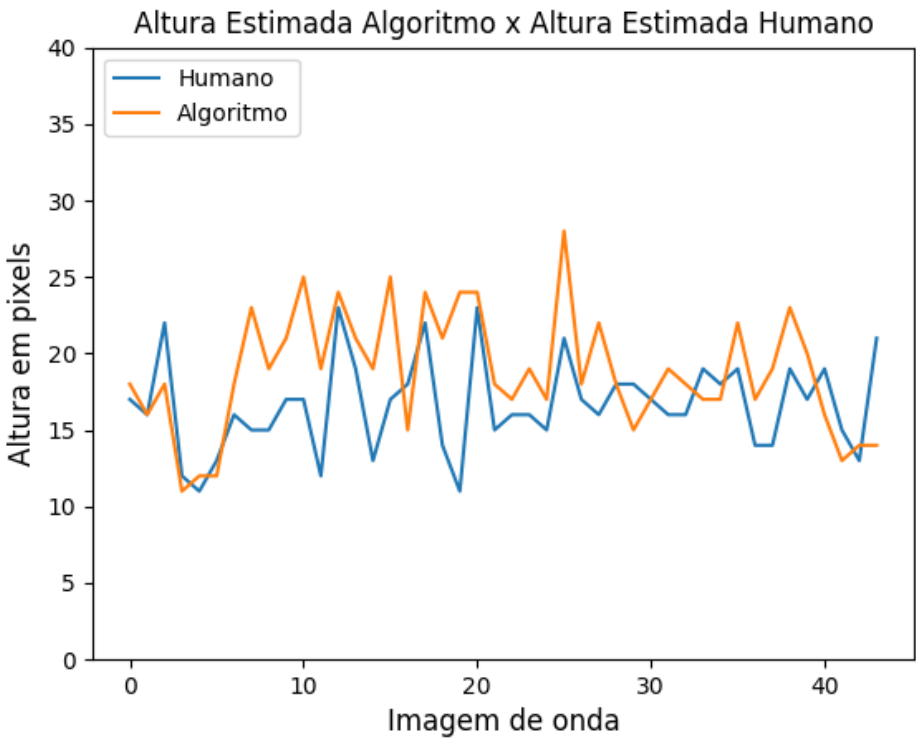


Figura 5.7: Comparação da altura estimada do algoritmo com a estimada pelo especialista

Tabela 5.4: Altura estimada pelo algoritmo e especialista em pixels

Imagem	Algoritmo	Real	Diferença	Diferença/Real
1	18	17	1	0.06
2	16	16	0	0.0
3	18	22	-4	0.18
4	11	12	-1	0.08
5	12	11	1	0.09
6	12	13	-1	0.08
7	18	16	2	0.13
8	23	15	8	0.53
9	19	15	4	0.27
10	21	17	4	0.24
11	25	17	8	0.47
12	19	12	7	0.58
13	24	23	1	0.04
14	21	19	2	0.11
15	19	13	6	0.46

Continua na próxima página

Tabela 5.4 – Continuação da página anterior

Imagem	Algoritmo	Real	Diferença	Diferença/Real
16	25	17	8	0.47
17	15	18	-3	0.17
18	24	22	2	0.09
19	21	14	7	0.5
20	24	11	13	1.18
21	24	23	1	0.04
22	18	15	3	0.2
23	17	16	1	0.06
24	19	16	3	0.19
25	17	15	2	0.13
26	28	21	7	0.33
27	18	17	1	0.06
28	22	16	6	0.38
29	18	18	0	0.0
30	15	18	-3	0.17
31	17	17	0	0.0
32	19	16	3	0.19
33	18	16	2	0.13
34	17	19	-2	0.11
35	17	18	-1	0.06
36	22	19	3	0.16
37	17	14	3	0.21
38	19	14	5	0.36
39	23	19	4	0.21
40	20	17	3	0.18
41	16	19	-3	0.16
42	13	15	-2	0.13
43	14	13	1	0.08
44	14	21	-7	0.33

Pode-se observar, a partir da Figura 5.8, que 67% dos erros se encontram dentro de ± 1 desvio padrão (linha verde) dos dados reais, e portanto, concluímos que a maior parte dos erros estão dentro de uma banda aceitável.

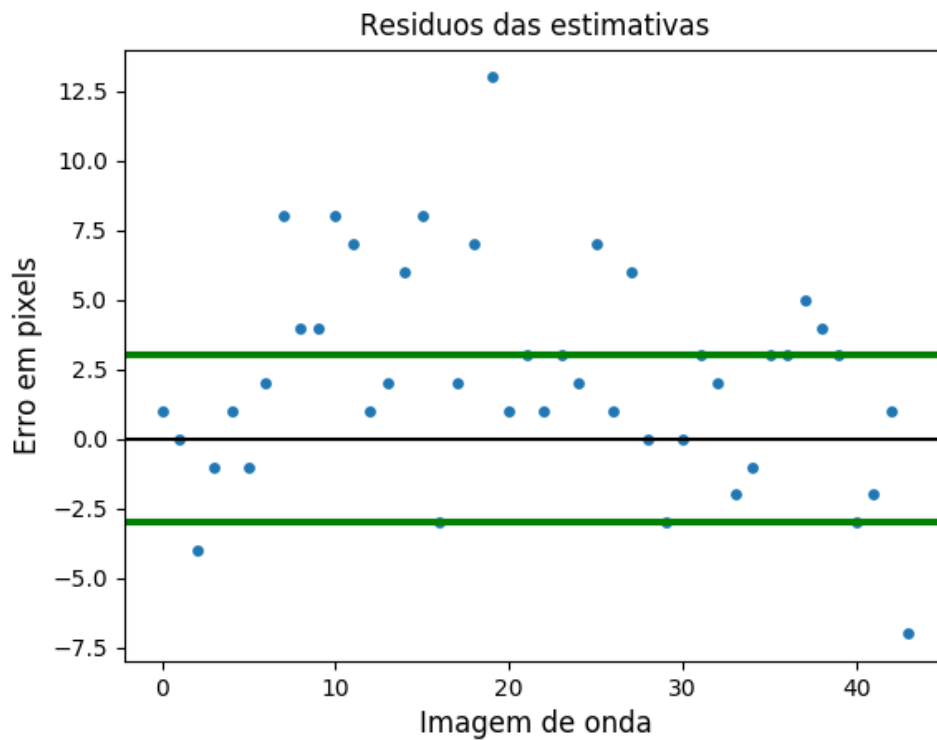


Figura 5.8: Observação do tamanho dos erros. Linha verde representa ± 1 desvio padrão dos dados reais. 67% dos erros se encontram dentro de ± 1 desvio padrão dos dados reais.

Convertendo dados da altura de pixels para dados no mundo real por meio da matriz da câmera, pode-se observar os resultados em metros da estimativa da altura na Figura 5.9, assim como na Tabela 5.5.



Figura 5.9: Altura da onda estimada pelo algoritmo (verde) e pelo observador experiente (vermelho).

Tabela 5.5: Altura estimada pelo algoritmo e observador experiente em metros

Imagem	Algoritmo	Real	Diferença	Diferença/Real
1	0.99	0.91	0.08	0.09
2	1.06	1.06	-0.0	0.0
3	0.84	1.08	-0.23	0.22
4	0.68	0.76	-0.08	0.1
5	0.6	0.54	0.06	0.12
6	0.53	0.61	-0.08	0.14
7	0.76	0.68	0.08	0.12
8	1.58	0.99	0.59	0.6
9	1.06	0.83	0.23	0.28
10	1.08	0.91	0.17	0.19
11	1.14	0.76	0.39	0.51
12	0.91	0.6	0.3	0.5
13	1.13	1.08	0.05	0.05
14	1.14	1.14	-0.0	0.0
15	1.14	0.84	0.3	0.36
16	1.22	0.83	0.39	0.47
17	1.06	1.21	-0.15	0.12
18	1.37	1.37	-0.0	0.0
19	1.51	0.98	0.53	0.54
20	0.99	0.45	0.54	1.2
21	0.88	0.79	0.09	0.12
22	0.99	0.83	0.16	0.19
23	1.14	1.06	0.08	0.08
24	1.06	0.84	0.22	0.26
25	1.21	1.06	0.15	0.14
26	1.44	1.14	0.3	0.26
27	0.99	0.91	0.08	0.09
28	1.66	1.21	0.45	0.37
29	0.99	0.99	0.0	0.0
30	1.6	1.98	-0.39	0.2
31	1.14	1.21	-0.07	0.06
32	1.21	0.99	0.22	0.22
33	1.06	0.99	0.07	0.07
34	0.68	0.91	-0.23	0.25
35	0.76	0.76	-0.0	0.0

Continua na próxima página

Tabela 5.5 – *Continuação da página anterior*

Imagem	Algoritmo	Real	Diferença	Diferença/Real
36	1.06	0.91	0.15	0.17
37	0.76	0.6	0.15	0.25
38	0.91	0.69	0.22	0.31
39	0.91	0.76	0.15	0.2
40	1.21	0.99	0.22	0.22
41	0.84	0.84	-0.0	0.0
42	0.53	0.61	-0.08	0.14
43	0.84	0.76	0.09	0.11
44	0.53	0.76	-0.23	0.3

Apesar de termos conseguido apenas uma validação pequena para a estimativa da altura - apenas 44 imagens - , as imagens validadas incluíram dias, luzes e tamanhos de ondas diferentes e, portanto, tivemos uma amostra bem diversificada. Também vale ressaltar o grau de precisão que é requisitado do observador para clicar exatamente na linha de pixels que ele observa a crista e a base da onda. Algumas vezes, em função da luz ou da onda, essas características não estão tão claras o que pode gerar uma variação no dados considerados reais. De forma geral, tivemos uma média de erro de 20% da altura. Então, por exemplo, se o observador estimou a altura de uma onda com 1 metro, nossa estimativa deve ficar no intervalo entre 80 centímetros e 1 metro e 20 centímetros e consideramos esse resultado aceitável.

6

Conclusão e trabalhos futuros

Nesta dissertação, foi proposto um método de visão computacional para extrair propriedades das ondas na zona de surfe por meio de câmeras de rede convencionais conectadas à internet padrão. Para o funcionamento do método, colocamos sobre a imagem uma grade com células que computavam a média dos pixels contidas nelas. Dessa forma, foi possível reduzir o efeito de ruídos e ter performance satisfatória para a computação em tempo real. Operando em cima da grade da imagem, combinamos três algoritmos para termos a saída de dados desejada neste trabalho. O algoritmo faz a detecção da onda por meio de um cálculo de variância de gradiente com orientação horizontal entre células da grade. Após a detecção ser feita, uma análise no perfil de intensidade dos pixels na célula vizinha é feita para o cálculo da altura e, por fim, é feito um rastreamento dessa onda por um agrupamento por similaridade espacial e temporal.

Com o método proposto, fomos capazes de descobrir as seguintes propriedades das ondas: altura da onda (metros) , distância percorrida e distância média percorrida (metros), duração média da onda (segundos), ponto de arrebentação (geocoordenadas), tamanho das séries (quantidade de ondas), intervalo entre as séries (minutos) e frequência de ondas (número de ondas por um tempo determinado). Essas medidas são calculadas a partir de uma detecção de ondas feita corretamente para 4 ondas a cada 5 ondas reais e, portanto, concluímos que o método é satisfatório para uso no monitoramento das condições do mar por acertar a grande maioria das ondas que passam.

Selecionamos algumas propriedades das ondas, como o início e o fim, percurso, angulação, posição e frequência das ondas, e exibimos o resultado de uma execução do método nas Figuras 6.1 e 6.2.



Figura 6.1: Percurso das ondas em coordenadas do mundo

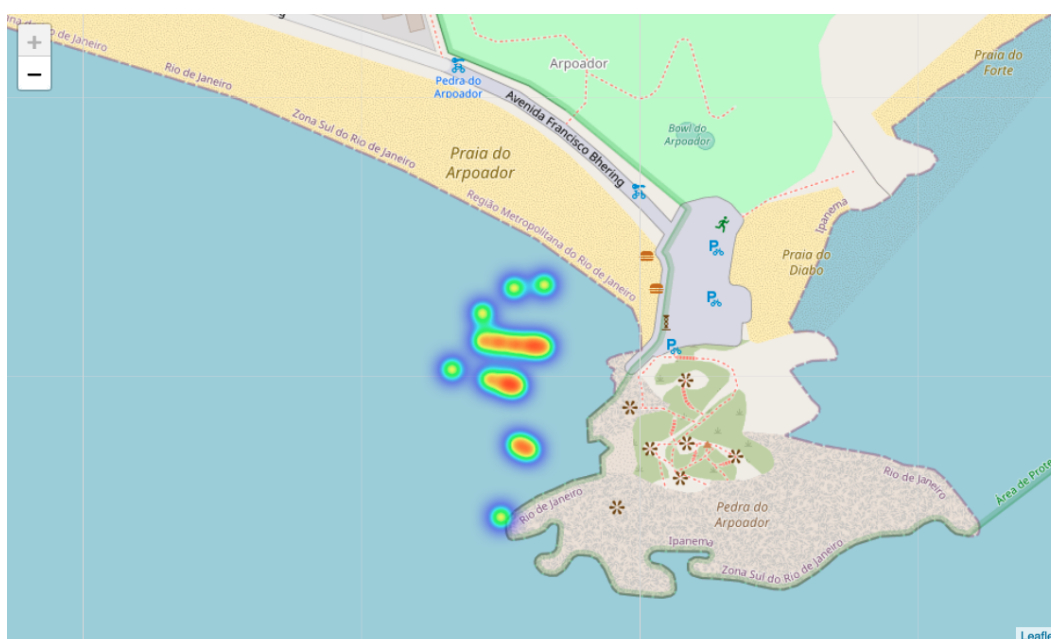


Figura 6.2: Posição e frequência das ondas no mundo

Os próximos passos dessa pesquisa incluem conseguir uma validação de novos observadores experientes para termos uma maior diversidade de opinião sobre o que é considerado dado real. Também desejamos aumentar o número de validações para a altura da onda. É possível, também, aprimorar a forma de detecção para que ondas que passem seguidas das outras também sejam detectadas. Desejamos testar a solução atual em outras câmeras calibradas e descobrir se o método pode ser aplicável em outras captações de imagens com

câmeras posicionadas em ângulos diferentes. Além disso, intenciona-se elaborar novas informações sobre a zona de surfe, como profundidade da água na área de análise, geocoordenadas do ponto máximo de invasão da água na praia e a força da corrente e direção. Por fim, objetiva-se criar um conjunto de dados e conhecer e comparar os resultados desse método com o uso de rede neurais.

- [1] CARINI, R. J.. **Estimating energy dissipation due to wave breaking in the surf zone using infrared imagery.** J. Geophys. Res. Oceans, 120, 3937– 3957, 2014. 1
- [2] THOMAS D. SHAND, DONALD G. BAILEY, R. D. S.. **Automated detection of breaking wave height using an optical technique.** Journal of Coastal Research 1 May 2012; 28 (3): 671–682., 2012. (document), 1, 2.2
- [3] PIERRE D'ERIAN, R. A.. **Wavelet-based optical flow estimation of instant surface currents from shore-based and uav video.** IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 55, no. 10, pp. 5790-5797, 2017. 1
- [4] KOMAR, P. D.. **Beach processes and sedimentation.** Prentice Hall, 1976. 2.1
- [5] YOUNG, I.. **Wind generated ocean waves.** Elsevier, 1999. 2.1
- [6] DEAN, D.. **Coastal processes with engineering applications.** Elsevier, 1999. 2.1
- [7] DE LIMA SOARES, J.. **Sensibilidade de parâmetros de ondas incidentes para definição de condições de projeto.** Dissertação de Mestrado UFRJ, 2016. (document), 2.1, 2.1
- [8] SINGAMSETTI; WIND. **Characteristics of breaking and shoaling periodic waves normally incident onto plane beaches of constant slope.** Delft Hydraulics Laboratory, 1980. 2.2
- [9] SMITH; KRAUS. **Laboratory study of wave-breaking over bars and artificial reefs.** Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, vol. 117, no. 4, pp. 307-325, 1991. 2.2
- [10] DUNCAN, J.. **Spilling breakers.** Annual Review of Fluid Mechanics 33(1):519-547, 2001. 2.2
- [11] SHAND, T.. **The effect of wave grouping on shoaling and breaking processes.** Tese de Doutorado da University of New South Wales, 2009. (document), 2.2

- [12] RAPP, W. K. M. . R. J.. **Momentum flux in breaking waves**. Nature 317, 514–516, 1985. 2.2
- [13] ALEXEY S, MIRONOV, V. A. D.. **Detection of wave breaking using seasurface video records**. Marine Hydrophysical Institute, vol. 19, no. 1, pp. 015405, 2007. 2.2
- [14] KINSMAN, B.. **Wind waves: their generation and propagation on the ocean surface**. Dover Publications, 1984. (document), 2.3, 2.4
- [15] DANIEL BUSCOMBE, R. J. C.. **A data-driven approach to classifying wave breaking in infrared imagery**. Remote Sens. 11, no. 7: 859, 2019. 3
- [16] MARTINS, K.. **Wave transformation in the surf-zone**. Tese de Doutorado da University of Bath, UK, 2017. 3
- [17] THOMAS D. SHAND, D. G. B.; SHAND, R. D.. **Automated detection of breaking wave height using an optical technique**. Journal of Coastal Research, 28 (3): 671–682, 2012. 3
- [18] MATTI MÖTTUS, MADIS SULEV, B. F. R. L.-L. A. R. N.. **Photosynthetically active radiation: Measurement and modeling**. Springer, 2010. (document), 4.2.1, 4.8
- [19] SINNOTT, R.. **Virtues of the haversine**. Sky and Telescope, vol. 68, no. 1, pp. 59, 1984. 5.1