

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CAMPUS TIMÓTEO**

Isabela Peixoto

**PRODUÇÃO DE MAPAS TÁTEIS PARA ENSINO DE ASTRONOMIA
A PESSOAS COM DEFICIÊNCIA VISUAL**

Timóteo

2019

Isabela Peixoto

**PRODUÇÃO DE MAPAS TÁTEIS PARA ENSINO DE ASTRONOMIA
A PESSOAS COM DEFICIÊNCIA VISUAL**

Monografia apresentada à Coordenação de Engenharia de Computação do Campus Timóteo do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Weber Hanry Morais e Feu
Coorientador: Odilon Correa da Silva

Timóteo

2019

Isabela Peixoto

Produção de Mapas Táteis para Ensino de Astronomia a Pessoas com Deficiência Visual

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Computação do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, campus Timóteo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Computação.

Trabalho aprovado. Timóteo, 13 de dezembro de 2019:



Prof. Dr. Weber Hanry Morais e Feu
Orientador



Prof. Me. Odilon Corrêa da Silva
Co-orientador



Prof. Me. Márcia Valéria Rodrigues Ferreira
Professora Convidada

Timóteo
2019

Resumo

Apesar da crescente preocupação de diversas áreas do conhecimento com o desenvolvimento acadêmico e psicossocial de pessoas com deficiência visual, ainda há carência de materiais didáticos acessíveis a esse público. Em disciplinas abstratas ou com grande apelo visual, como a astronomia, representações 3D de objetos e fenômenos do céu, são importantes aliados da educação. Diante desse cenário, o *Astronomia na Ponta dos Dedos*, projeto de astronomia inclusiva desenvolvido no CEFET-MG, campus Timóteo, adquiriu o kit didático distribuído pelo AstroBVI, que conta com mapas táteis de seis galáxias. Visando aumentar a variedade de mapas disponíveis para observação, o objetivo deste trabalho é especificar um algoritmo capaz de converter uma imagem bidimensional única em um modelo apropriado para impressão 3D. Dentre as técnicas de processamento de imagens estudadas, o *Shape from Shading* (SFS) foi identificado como o algoritmo mais adequado para tal conversão. O SFS, aliado ao modelo de iluminação de *Phong* foi aplicado sobre imagens de galáxias. Os modelos resultantes foram impressos por meio de uma impressora 3D de baixo custo e, então, submetidos à avaliação de alunos com deficiência visual (cegueira ou baixa visão) do Centro de Referência em Educação Inclusiva Ativa (CREIA). A avaliação se deu por meio da comparação com os mapas fornecidos pelo AstroBVI. Segundo os participantes da pesquisa, os mapas produzidos neste trabalho poderiam ser utilizados para conduzir uma observação tátil, entretanto são necessários aprimoramentos quanto ao relevo, considerado muito suave, o que dificultou a percepção dos objetos representados.

Palavras-chave: Processamento de Imagens. Impressão 3D. Ensino de Astronomia. Deficiência Visual.

Abstract

Despite the growing concern of many fields of knowledge about the academic and psychosocial development of blind and visually impaired people, there is still a lack of accessible teaching material. In abstract subjects or visually appealing disciplines such as astronomy, 3D representations of sky objects and phenomena are important allies of education. Facing this scenario, *Astronomia na Ponta dos Dedos*, an inclusive astronomy project developed at CEFET-MG, Timóteo campus, acquired the teaching kit distributed by *AstroBVI*, which has tactile maps of six galaxies. In order to increase the variety of maps available for observation, the aim of this work is to specify an algorithm capable of converting a single two-dimensional image into a model suitable for 3D printing. Among the studied image processing techniques, Shape from Shading (SFS) was identified as the most suitable algorithm for such conversion. The SFS, associated with Phong's illumination model, was applied to galaxy images. The resulting models were printed using a low-cost 3D printer and then subjected to evaluation of CREIA's visually impaired students (blindness or low vision). The evaluation was made by comparison with the maps provided by AstroBVI. According to the research participants, the maps produced in this work could be used to conduct a tactile observation, however, it is necessary to improve the emboss, considered too soft, which made the perception of the represented objects difficult.

Keywords: Image Processing. 3D Print. Astronomy Teaching. Visually Impairment.

Lista de ilustrações

Figura 1	– Resultado da modelagem do SFM com diferentes maneiras de obtenção das imagens: (a) 70 fotos com movimentação horizontal, (b) 35 fotos das porções superior e inferior do objeto, e (c) 23 fotos das partes superior, central e inferior, além de uma foto do topo do objeto.	9
Figura 2	– Foto e mapa de relevo da galáxia M51 em exposição no projeto <i>Astronomia na Ponta dos Dedos</i>	11
Figura 3	– Arquivo .stl pronto para impressão gerado a partir do <i>Blender</i>	12
Figura 4	– Protótipos dos mapas de textura e elevação.	15
Figura 5	– Vizinhanças de p . Nas imagens, o <i>pixel</i> p aparece em cinza escuro. Os vizinhos estão marcados em cinza claro.	17
Figura 6	– Comparação entre filtragem por média e mediana.	19
Figura 7	– Fluxograma ilustrativo do algoritmo iterativo de Tsai e Shah (1994).	22
Figura 8	– Fluxograma de desenvolvimento do trabalho.	24
Figura 9	– Foto da galáxia M83.	25
Figura 10	– Resultado da aplicação da função $\text{surf}(Z)$ para a Figura 9 como entrada.	26
Figura 11	– Estratégias de filtragem aplicadas sobre a Figura 9.	26
Figura 12	– Resultado da abordagem de Pentland (1988).	27
Figura 13	– Resultado da abordagem de Tsai e Shah (1994) para 200 iterações.	28
Figura 14	– Adaptação na técnica de suavização de Elhabian (2008). (a) Filtro por mediana com vizinhança de 21×21 , conforme Elhabian (2008). (b) Filtro por mediana com vizinhança de 3×3	29
Figura 15	– Galáxia M100.	31
Figura 16	– Comparação entre modelo do <i>Tactile Universe</i> e gerado pelo SFS para a galáxia M100 (Figura 15).	31
Figura 17	– Galáxia M51.	32
Figura 18	– Comparação entre modelo do <i>Tactile Universe</i> e gerado pelo SFS para a galáxia M51 (Figura 17).	32

Lista de abreviaturas e siglas

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
CNN	<i>Convolutional Neural Network</i>
SFS	<i>Shape from Shading</i>
SFM	<i>Structure from Motion</i>
TCLE	Termo de Consentimento Livre e Esclarecido
TLS	<i>Terrestrial Laser Scanner</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Motivação	10
1.2	Objetivos	12
1.3	Estrutura Textual	12
2	TRABALHOS RELACIONADOS	13
2.1	Geração automatizada de modelos 3D	13
2.2	Materiais Didáticos adaptados a pessoas com deficiência visual	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1	Processamento de Imagens Digitais	16
3.2	Vizinhanças de <i>Pixels</i>	16
3.3	Filtragem Espacial	17
3.3.1	Suavização e Remoção de Ruídos	18
3.4	<i>Shape from Shading</i>	19
4	MATERIAIS E MÉTODOS	23
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
5.1	<i>Surf(Z)</i>	25
5.2	<i>Shape from Shading</i> (SFS)	27
5.3	Comparação com os modelos do Tactile Universe	31
5.3.1	Avaliação por Pessoas com Deficiência Visual	33
6	CONCLUSÃO	34
	REFERÊNCIAS	35

1 Introdução

A reconstrução tridimensional (3D) de objetos do mundo real tem aplicações em muitas áreas, tais quais indústria (YANG et al., 2018), saúde (KHAN et al., 2018; CLAUS et al., 2018), arquitetura e planejamento urbano (SCHÖPS et al., 2017; CHHATKULI; SATOH; TACHIBANA, 2015), conservação de patrimônio histórico (HANIPAH; TAHAR, 2018), astronomia (ALEXANDROV; BEYER, 2018), etc. A demanda pela geração de modelos de qualidade, pelo menor custo de mão de obra e tempo, encoraja estudos voltados para a automatização do processo de modelagem.

Uma importante etapa nesse processo é a coleta de informações acerca do objeto, que pode ser feita, dentre outras maneiras, através de *scanners* ópticos. Esses equipamentos utilizam nuvens de pontos ou projeções de padrões sobre a superfície de interesse e calculam com precisão distâncias superiores a algumas centenas de metros (CHHATKULI; SATOH; TACHIBANA, 2015). Outras alternativas, que não demandam *hardware* dedicado, envolvem o uso de múltiplas imagens bidimensionais (2D). Através de imageamento estéreo e triangulação é possível reconstruir o formato 3D do objeto. Alguns algoritmos empregam muito mais que duas imagens, como é o caso do *Structure from Motion* (SFM), onde quanto mais variados os ângulos contemplados pelas imagens, melhor será o modelo resultante. A Figura 1 mostra como, para o mesmo número de fotografias, o resultado do SFM varia de acordo com as diferentes angulações registradas (KIM, 2015).

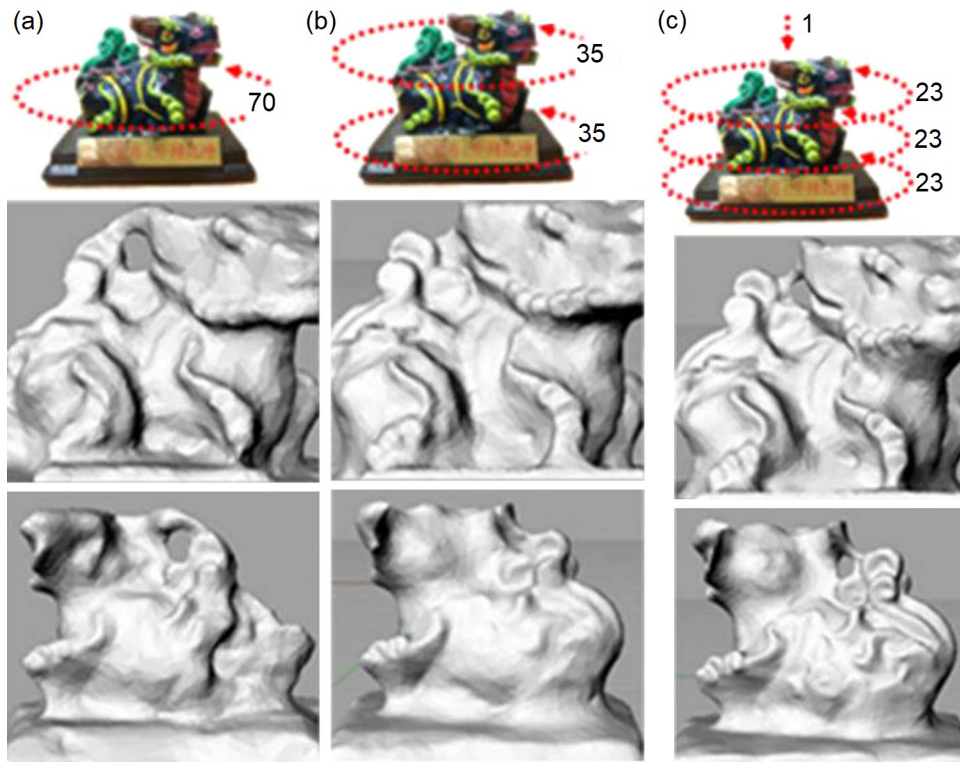
Entretanto, em alguns cenários é impossível ter imagens de diferentes ângulos do objeto de interesse, como é o caso da astronomia: com corpos celestes localizados de centenas de milhares de quilômetros a milhões de anos-luz¹ da Terra, o imageamento desses corpos para um observador terrestre é restrito a projeções de uma única direção. Em casos como estes é possível treinar redes neurais incorporando, além de fotografias, outras informações a respeito do objeto, por exemplo, tipo de simetria, que viabilizem a automatização da modelagem (MAGNOR; KINDLMANN; HANSEN, 2004). Outra alternativa é estimar o formato da superfície a partir de uma imagem 2D única. O resultado será apenas uma aproximação, mas tem aplicações no planejamento de missões de exploração lunar e para ensino de astronomia em escolas, museus e planetários (ALEXANDROV; BEYER, 2018; GRICE et al., 2015).

Representações 3D de objetos e fenômenos do céu são importantes aliados na educação em astronomia, especialmente para alunos com deficiência visual (DOMINICI et al., 2008; SOARES; CASTRO; DELOU, 2015; GRICE et al., 2015).

Sobre deficiência visual, o Artigo 5º do Decreto nº 5.296, de 2 de dezembro de 2004 estabelece que é cego o indivíduo cuja “acuidade visual é igual ou menor a 0,05 no melhor olho, com a melhor correção óptica”. O indivíduo com baixa visão é aquele cuja acuidade visual no melhor olho, com a melhor correção óptica varia entre 0,3 e 0,05, ou cujo somatório

¹ 1 ano-luz equivale à distância percorrida por um feixe de luz movendo-se em linha reta no período de um ano, a saber, aproximadamente, 9,5 trilhões de quilômetros (NASA, 2019; CHANDRA X-RAY CENTER, 2019).

Figura 1 – Resultado da modelagem do SFM com diferentes maneiras de obtenção das imagens: (a) 70 fotos com movimentação horizontal, (b) 35 fotos das porções superior e inferior do objeto, e (c) 23 fotos das partes superior, central e inferior, além de uma foto do topo do objeto.



Fonte – (KIM, 2015, p. 817)

do campo visual em ambos os olhos for menor ou igual a 60°. Também é considerada baixa visão a “ocorrência simultânea de quaisquer das condições anteriores”.

Figueiredo e Kato (2015) constataram uma crescente preocupação de diversas áreas do conhecimento com o desenvolvimento acadêmico e psicossocial de deficientes visuais. Especificamente no domínio da astronomia, há diversas iniciativas de inclusão. Alguns exemplos são os projetos SEE e YAAYS, desenvolvidos pelo observatório *Yerkes* da Universidade de Chicago com recursos dos programas HOU e SOFIA (BACKMAN; HOETTE, 2009); e o AstroBVI ², cuja equipe principal concentra-se no Centro de Astronomia da Universidade de Antofagasta, no Chile, que distribui *kits* didáticos de mapas táteis com gravuras em alto relevo de galáxias, pelos quais é possível perceber, através do toque, áreas de maior brilho e o formato dos objetos.

² AstroBVI – <https://astrobvi.org/>

1.1 Motivação

O *Astronomia no Vale do Aço*³ é um projeto de extensão desenvolvido no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Campus Timóteo, que, dentre outros feitos, promove a *Noite Astronômica*, um evento de observação astronômica e palestras sobre astronomia para o público geral da região do Vale do Aço. Caracteriza-se, portanto, como um ambiente não-formal de ensino de astronomia, que é frequentemente descrita na literatura relacionada como uma ciência motivadora (LANGHI; MARTINS, 2018). Um estudo conduzido por Langhi e Martins (2018) a fim de investigar quais aspectos motivam o aprendizado de astronomia observacional em ambiente não escolar, encontrou indícios de motivação intrínseca nos participantes, apoiando o discurso já difundido pela literatura.

Diante da atuação do *Astronomia no Vale do Aço* na divulgação e ensino de ciências para a comunidade no Vale do Aço, e dado que os eventos de observação tradicionais dependem totalmente da capacidade visual dos participantes, surgiu a preocupação por parte dos organizadores de como tornar as noites de observação astronômica mais inclusivas para pessoas cegas ou com baixa visão.

Para tratar dessa necessidade foi apresentado em 13 de abril de 2019 o projeto *Astronomia na Ponta dos Dedos*, que surgiu com o apoio do *kit* educacional fornecido pelo *AstroBVI*.

O *kit* é composto por seis mapas táteis com modelos em alto relevo de galáxias, disponibilizados pelo projeto *Tactile Universe*⁴, além de fotos em variados comprimentos de onda desses objetos e outros conteúdos multimídia. A Figura 2 mostra a foto e mapa tátil da galáxia M51 em exposição.

Embora esse *kit* possibilite que o público com cegueira ou baixa visão participe da Noite Astronômica, as opções para observação se restringem a algumas galáxias, de forma que essas pessoas, podem sentir-se em desvantagem em relação aos demais visitantes, que observam diversos planetas, nebulosas e aglomerados, de acordo com a disponibilidade desses objetos no céu noturno.

A produção dos modelos pelo *Tactile Universe* é feita através do *Blender*, ferramenta de modelagem 3D de uso livre. O modelo pode ser gerado através da manipulação da interface com o usuário do programa, ou por meio de *scripts*, que automatizam parte do processo, mas exigem a criação de arquivos de configuração para cada fotografia a ser transformada e definição manual dos parâmetros, de modo que alguma habilidade com programação ou familiaridade com a ferramenta seja necessária. O arquivo *.stl* gerado pode ser visto na Figura 3.

Seria possível aumentar a variedade de mapas táteis disponíveis para observação produzindo novos modelos a partir de *softwares* de modelagem, como o *Blender*. Entretanto, a complexidade da interface com o usuário representa um forte limitador de seu uso.

³ Astronomia no Vale do Aço – <http://www.dfgtim.cefetmg.br/astronomia/>

⁴ *Tactile Universe* – <https://tactileuniverse.org/>

Figura 2 – Foto e mapa de relevo da galáxia M51 em exposição no projeto *Astronomia na Ponta dos Dedos*.



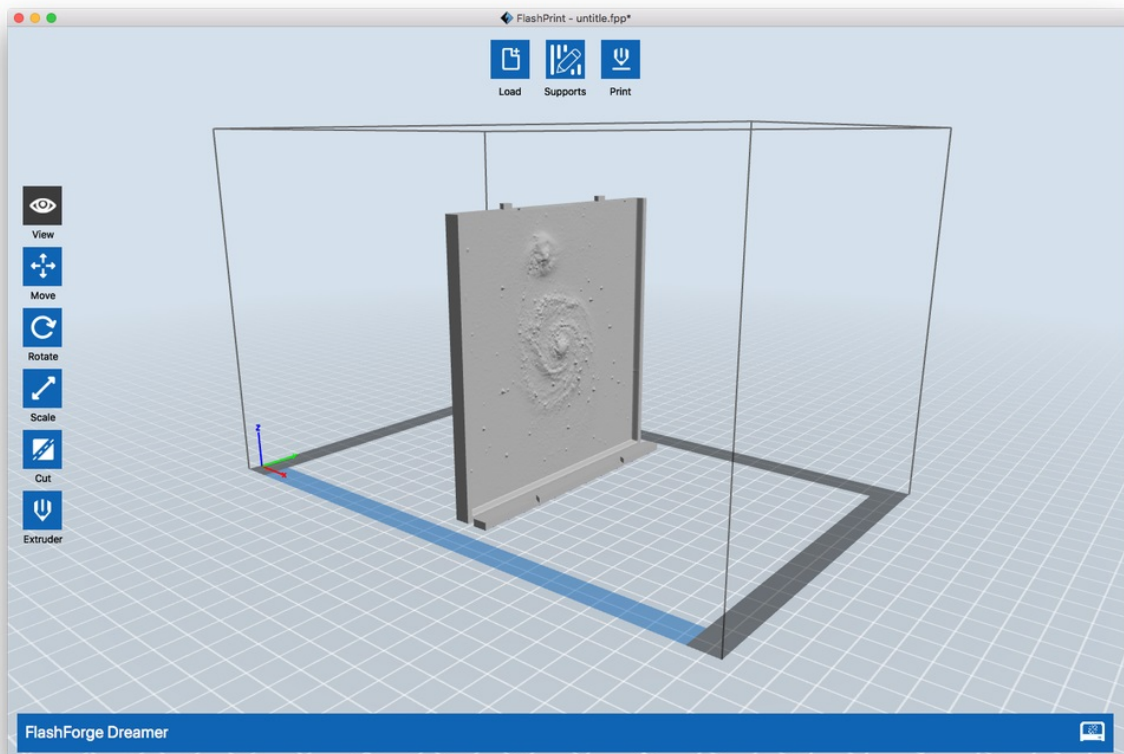
Fonte – Astronomia no Vale do Aço. Disponível em: <https://www.facebook.com/astromianovaleadoaco/>. Acesso em: 15 de Junho de 2019.

Existem outras ferramentas capazes de criar modelos 3D a partir de fotografias, por exemplo o *Autodesk Recap*⁵ e o *Adobe Photoshop*⁶, mas estas exigem muitas etapas manuais ou inúmeras fotos do objeto, tiradas de diversos ângulos, o que não é possível no caso de objetos celestes.

Tendo em vista as limitações do *kit* de mapas táteis adquiridos e das ferramentas existentes no cenário descrito, propõe-se a questão de como transformar uma imagem digital única em um modelo apropriado para impressão 3D.

⁵ Autodesk Recap – <https://www.autodesk.com/products/recap/overview>

⁶ Adobe Photoshop – <https://www.adobe.com/br/products/photoshop.html>

Figura 3 – Arquivo **.stl** pronto para impressão gerado a partir do *Blender*.

Fonte – *Tactile Universe*. Disponível em: <https://tactileuniverse.org/2018/05/18/how-to-make-your-own-models/>. Acesso em: 31 de Maio de 2019.

1.2 Objetivos

Dado o cenário apresentado anteriormente, o objetivo deste trabalho é especificar um algoritmo capaz de converter uma imagem bidimensional (2D) única em um mapa de relevo em três dimensões. Como objetivos específicos, têm-se a impressão dos modelos por meios de uma impressora 3D e a avaliação qualitativa dos mapas táteis gerados.

1.3 Estrutura Textual

Esta monografia constitui-se de 6 capítulos ao todo, organizados conforme segue. Este capítulo inicial introduz ao leitor o cenário de interesse e objetivos de pesquisa. O capítulo 2 apresenta os trabalhos recentes relacionados a materiais didáticos adaptados a pessoas com cegueira ou baixa visão e à geração de modelos 3D e pondera sua aplicabilidade ao contexto estudado. O capítulo 3 trata dos fundamentos teóricos que suportam este trabalho. O capítulo 4 descreve o método adotado e os materiais utilizados. O capítulo 5 discute os resultados das diversas estratégias adotadas na solução do problema. Por fim, o sexto e último capítulo apresenta as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros.

2 Trabalhos Relacionados

Este capítulo apresenta trabalhos relacionados à geração automatizada de modelos 3D a partir de diversas fontes de obtenção de dados (seção 2.1). Trabalhos sobre materiais didáticos adaptados a pessoas com deficiência visual também são apresentados neste capítulo, na seção 2.2.

2.1 Geração automatizada de modelos 3D

Scanners ópticos, a *laser* ou luz estruturada, são um dentre os muitos caminhos para a recuperação de informação 3D acerca de objetos do mundo real. Chhatkuli, Satoh e Tachibana (2015) e Hanipah e Tahar (2018) defendem as vantagens da utilização de um *scanner* a *laser* terrestre, ou *terrestrial laser scanner* (TLS), para aproximação de modelos tridimensionais de construções, ou mesmo cidades inteiras. O TLS coleta os dados de posição e dimensão de objetos através de nuvens de pontos criadas a partir de milhões de pulsos de *laser*. Esse sistema de medição permite que seja aplicado para determinar com precisão distâncias superiores a algumas centenas de metros.

A área da saúde também se beneficia dos *scanners* ópticos. Tomografias 3D auxiliam nos diagnósticos médicos e modelos tridimensionais digitais de arcadas dentárias facilitam o processo de planejamento de tratamentos ortodônticos e a documentação e compartilhamento de dados dos pacientes (CLAUS et al., 2018; KHAN et al., 2018).

Embora as abordagens utilizando *scanners* apresentem bons resultados em termos de acurácia, o alcance máximo de algumas centenas de metros impossibilita seu uso para modelagem de objetos astronômicos, foco do presente trabalho.

No âmbito da visão computacional, muitos esforços são dedicados à reconstrução 3D de faces humanas. Jackson et al. (2017), Richardson et al. (2017) apresentam soluções baseadas no treinamento de uma Rede Neural Convolucional, do inglês *Convolutional Neural Network* (CNN), capazes de modelar o rosto humano a partir de uma única imagem 2D.

Apesar do sucesso das soluções envolvendo redes neurais na produção do modelo 3D do objeto de interesse, o alto custo computacional e o caráter especialista dos algoritmos não estão alinhados com a proposta deste trabalho.

Yang et al. (2018) propuseram uma solução capaz de recuperar o modelo 3D de soldas industriais a partir de uma única imagem 2D para avaliação automática da qualidade da solda. Os autores empregaram o *Shape from Shading* (SFS), algoritmo capaz de recuperar o formato 3D de um objeto relacionando a intensidade da luz refletida e a variação no relevo na superfície. No domínio da Astronomia, a técnica vem sendo empregada para gerar modelos de elevação digitais da Lua e outros corpos planetários (ALEXANDROV; BEYER, 2018).

2.2 Materiais Didáticos adaptados a pessoas com deficiência visual

Apesar da preocupação expressa por diversas áreas do conhecimento com o desenvolvimento acadêmico de pessoas com deficiência visual, há carência de materiais e procedimentos de ensino eficientes. Intervenções adequadas a essa população são especialmente relevantes ao se tratar de temáticas abstratas ou com grande apelo visual (FIGUEIREDO; KATO, 2015; SOARES; CASTRO; DELOU, 2015; FREITAS-REIS et al., 2017).

Freitas-Reis et al. (2017) desenvolveram materiais didáticos acessíveis, para abordagem de modelos atômicos, que ajudaram alunos cegos de uma escola pública em Juiz de Fora, Minas Gerais, no entendimento acerca da evolução do conhecimento científico sobre a estrutura dos átomos.

Dominici et al. (2008) e Soares, Castro e Delou (2015) relatam a elaboração de materiais didáticos com conteúdos de astronomia acessíveis a pessoas com deficiência visual (cegueira ou baixa visão). O trabalho de Dominici et al. (2008) resultou em um *kit* didático composto por mapas celestes em relevo, que mostram as diferenças entre o céu nos hemisférios norte e sul, entre estações do ano e as mudanças ocorridas ao longo de uma noite; há ainda, mapas que abordam os efeitos da poluição luminosa sobre o brilho aparente das estrelas; esferas celestes e material de apoio aos educadores. Soares, Castro e Delou (2015) exploram a compreensão de fenômenos como eclipses solar e lunar. Foi elaborado um caderno ilustrado e um jogo da memória com informações sobre os astros, que valorizam a discriminação tátil, transmitindo informações através da diferenciação de texturas e relevos. Em ambos os trabalhos, os materiais foram confeccionados artesanalmente com insumos como barbaletes, miçangas, papéis texturizados, tinta relevo, entre outros. Os testes foram conduzidos com público vidente e não-vidente e apontam que, mesmo pessoas que enxergam, podem tirar proveito da estimulação multi sensorial no aprendizado.

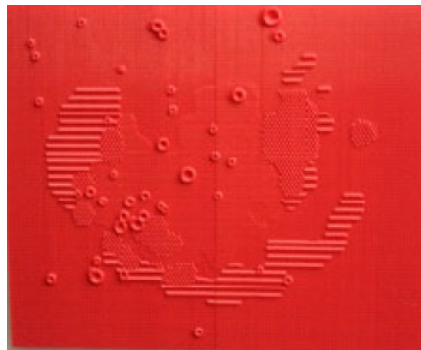
Grice et al. (2015), incentivados pela popularização das impressoras 3D em domicílios e escolas, usaram um algoritmo para representar os dados astronômicos obtidos pelo Telescópio Espacial *Hubble* em um arquivo *.stl* para impressão 3D. Esses autores também exploram diferentes texturas para transmissão de diferentes informações. Os protótipos foram impressos em uma impressora 3D de baixo custo e testado por quatro grupos de pessoas com cegueira, congênita ou adquirida, de diferentes idades. A cada teste, ajustes foram incorporados aos protótipos subsequentes. As avaliações indicaram as melhores texturas e o tamanho ideal para impressão: 20,3 cm × 25,4 cm. A Figura 4 mostra os protótipos desenvolvidos. Na Figura 4b, o mapa de texturas mostra os diferentes elementos que compõe o objeto, e em 4c o mapa de elevação expressa a intensidade de cada elemento da imagem original. O artigo publicado, entretanto, não descreve aspectos importantes do funcionamento do algoritmo, por exemplo, como é feita a separação das regiões e diferenciação dos elementos, isto é, como estrelas, gás e poeira são diferenciados para aplicação das texturas.

Figura 4 – Protótipos dos mapas de textura e elevação.

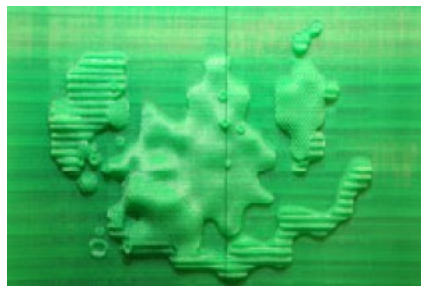
(a) NGC 602. Imagem utilizada para elaboração dos protótipos 4b e 4c.



(b) Mapa de textura de NGC 602. Linhas horizontais simbolizam poeira, pontilhado simboliza gás; pontilhado mais grosso, locais onde gás e poeira se misturam. Pequenos círculos com cavidades centrais representam estrelas individuais.



(c) Mapa de elevação de NGC 602. A altura do eixo z corresponde à intensidade dos elementos medidos analiticamente a partir de dados do *Hubble*.



Fonte – (GRICE et al., 2015, p. 3-4)

3 Fundamentação Teórica

3.1 Processamento de Imagens Digitais

O processamento de imagens digitais pode ser entendido como o processamento de tais imagens por meios de um computador digital. Seja uma imagem monocromática uma função bidimensional de intensidade da luz, $f(x, y)$, onde x e y são coordenadas espaciais, referentes, respectivamente, às linhas e colunas da imagem; e o valor de f no ponto (x, y) é proporcional ao valor na escala de cinza da imagem neste ponto, ela será dita digital, se for discretizada em termos das coordenadas espaciais e dos níveis de brilho. A discretização se dá por meio da obtenção da média local do sinal contínuo em uma pequena área, e ocorre naturalmente em alguns sensores de captura de imagens, por exemplo, em CCD's (*Charge-Coupled Device*). Dado que o eixo z pode ser utilizado para representar o brilho; se, por convenção, opta-se por atribuir valores mais altos para áreas de maior brilho, a altura dos componentes da figura no eixo z será proporcional ao brilho correspondente na imagem.

As funções de processamento de imagens podem operar nos domínios espacial ou da frequência (GONZALES; WOODS, 2000; GONZALES; WOODS; EDDINS, 2009; SOLOMON; BRECKON, 2013).

3.2 Vizinhanças de *Pixels*

Os elementos individuais de uma imagem digital são chamados de *pixels* e são referidos por seus índices espaciais, (x, y) . Seja um *pixel* p localizado pelas coordenadas (x, y) . A vizinhança N_4 deste *pixel* é composta pelos *pixels* adjacentes na vertical e horizontal, localizados em:

$$(x + 1, y), (x - 1, y), (x, y + 1), (x, y - 1),$$

conforme mostra a Figura 5a.

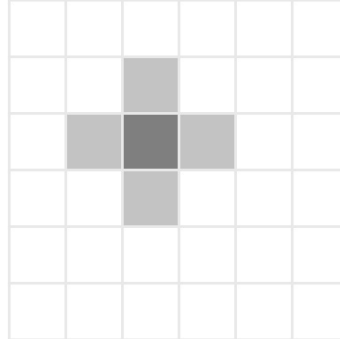
O conjunto dos vizinhos diagonais, representado por $N_d(p)$ (ver Figura 5b) é formado pelos *pixels* cujas coordenadas são as seguintes:

$$(x + 1, y + 1), (x + 1, y - 1), (x - 1, y + 1), (x - 1, y - 1)$$

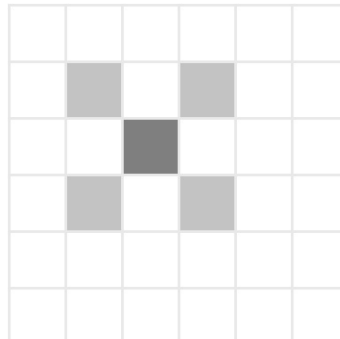
A soma dos conjuntos $N_d(p)$ e $N_4(p)$, produz a *vizinhança-de-8* do *pixel*, denotada por $N_8(p)$ (ver Figura 5c). Note que, se p estiver em alguma das bordas, alguns pontos da vizinhança estarão fora da imagem (GONZALES; WOODS, 2000; GONZALES; WOODS; EDDINS, 2009).

Figura 5 – Vizinhanças de p . Nas imagens, o *pixel* p aparece em cinza escuro. Os vizinhos estão marcados em cinza claro.

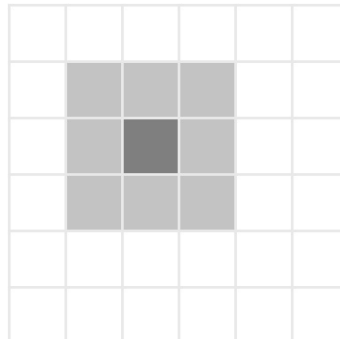
(a) Os vizinhos verticais e horizontais do *pixel* constituem a vizinhança-de-4, $N_4(p)$.



(b) Os vizinhos diagonais de p são representados por $N_d(p)$.



(c) A vizinhança-de-8 de p é formada pela soma dos conjuntos $N_4(p)$ e $N_d(p)$.



Fonte – Elaborado pela autora.

3.3 Filtragem Espacial

O *domínio espacial* refere-se ao plano da imagem e aos *pixels* que a compõem. As funções de processamento no domínio espacial operam diretamente sobre os *pixels*. Tais funções são expressas como:

$$g(x, y) = T[f(x, y)]$$

onde $f(x, y)$ é a imagem de entrada, T é um operador definido sobre uma vizinhança de (x, y) ou sobre um conjunto de imagens de entrada e $g(x, y)$, a imagem processada. As técnicas onde T opera sobre uma vizinhança de 1×1 , ou seja, o próprio *pixel* (x, y) , são

chamadas *processamento ponto-a-ponto* e o valor de $g(x, y)$ depende apenas do valor de f no ponto (x, y) . Se, por outro lado, a vizinhança for maior, por exemplo, 3×3 , então T é denominado *processamento por máscara ou filtragem* e o valor de $g(x, y)$ é influenciado pelos valores de f nos *pixels* vizinhos (GONZALES; WOODS, 2000; CONCI; AZEVEDO; LETA, 2008).

A máscara, ou núcleo, adotada em filtros lineares, é uma matriz de coeficientes centrada no *pixel* de interesse, cujo novo valor é resultado da combinação linear dos *pixels* vizinhos: a soma ponderada do nível de cinza dos *pixels* da vizinhança delimitada pela máscara substitui o nível de cinza do *pixel* central e resultados são copiados em uma nova imagem. Os filtros espaciais não lineares operam de forma semelhante, porém sem o uso da matriz de coeficientes (GONZALES; WOODS, 2000; PEDRINI; SCHWARTZ, 2008; SOLOMON; BRECKON, 2013).

3.3.1 Suavização e Remoção de Ruídos

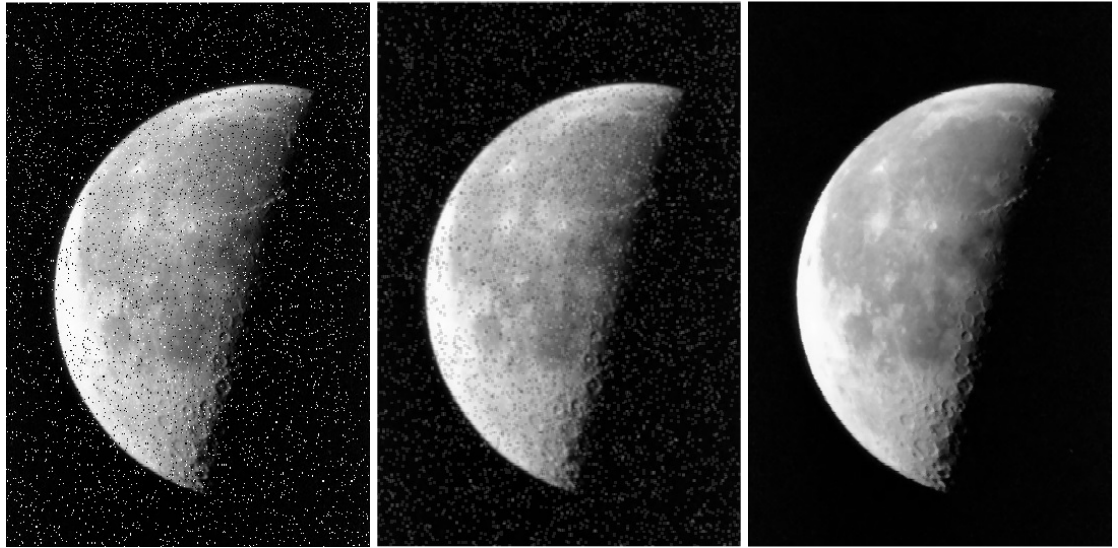
Um dos principais usos dos filtros espaciais é a redução de ruídos, que pode ser alcançada por borramento (suavização) ou filtragem não linear.

O filtro linear *passa-baixas* promove a suavização da imagem, atenuando ou eliminando altas frequências, isto é, bordas e outros detalhes finos. Nesse filtro todos os coeficientes da máscara devem ser positivos, e no caso em que sejam todos iguais, o novo valor do *pixel* alvo corresponde à *média* da vizinhança. Quanto maior o núcleo escolhido, mais eficaz será a remoção dos ruídos, porém mais degradada será a imagem resultante.

A filtragem por *mediana*, obtém a redução de ruídos, sem promover degradação da imagem. Essa abordagem é mais robusta, e mais cara computacionalmente, pois exige a ordenação dos valores na vizinhança do *pixel* alvo. A mediana m de um conjunto é o valor tal, que metade do conjunto é menor que m e a outra metade é maior. Nessa abordagem, o novo valor do *pixel* alvo é o resultado do cálculo da mediana em sua vizinhança. Como esse valor é definido pela própria vizinhança do *pixel*, a mediana não cria valores irreais, prevenindo a perda de detalhes da imagem. Esse filtro, não linear, é especialmente eficaz contra ruídos com padrão de “espigamentos”, ou ruído “sal & pimenta” (GONZALES; WOODS, 2000; SOLOMON; BRECKON, 2013).

A Figura 6 mostra a comparação entre os filtros por média e mediana. Na Figura 6a, imagem com ruído “sal & pimenta” introduzido. Em 6b, o resultado da aplicação da filtragem por média com máscara de dimensões 3×3 e coeficientes iguais a 0,1111. A Figura 6c mostra o resultado da filtragem por mediana.

Figura 6 – Comparação entre filtragem por média e mediana.



(a) Imagem com ruído “sal & pimenta”. (b) Resultado da filtragem por média. (c) Resultado da filtragem por mediana.

Fonte – Adaptado do repositório de imagens do MATLAB R2018b

3.4 Shape from Shading

O *Shape from Shading* (SFS) é um conjunto de técnicas, que estabelece uma relação entre a variação do relevo de uma superfície e a intensidade da luz por ela refletida. Dessa maneira, a partir da intensidade do brilho e da direção da iluminação, é possível estimar o vetor normal da superfície em qualquer ponto e, por consequência, sua orientação no espaço (ELHABIAN, 2008; ALEXANDROV; BEYER, 2018).

Seja $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$ o vetor normal unitário da superfície no ponto (x, y, z) , $\mathbf{n}$ pode ser definido em termos de suas co-ordenadas esféricas, $\mathbf{n} = (\sigma_n, \tau_n)$, sendo τ_n o ângulo entre o eixo x e a projeção de $\mathbf{n}$ sobre o plano $x-y$ (ou *tilt*), e σ_n o ângulo entre $\mathbf{n}$ e o eixo z (ou *slant*), onde $\tau \in [0, 2\pi]$ e $\sigma \in [0, \frac{\pi}{2}]$. Através da relação entre co-ordenadas esféricas e cartesianas, τ_n e σ_n podem ser definidos conforme segue (ELHABIAN, 2008):

$$\tau_n = \tan^{-1} \left(\frac{n_y}{n_x} \right) \quad (3.1)$$

$$\sigma_n = \cos^{-1} (n_z) \quad (3.2)$$

A orientação de uma superfície também pode ser descrita através de seu vetor gradiente. Seja uma dada superfície $Z = Z(x, y)$, o vetor gradiente $[p, q]^T$ no ponto $(x, y, Z(x, y))$ é descrito pelas derivadas parciais nas direções x e y (ELHABIAN, 2008):

$$p = \frac{\delta Z(x, y)}{\delta x} \quad (3.3)$$

$$q = \frac{\delta Z(x, y)}{\delta y} \quad (3.4)$$

Os vetores normais e gradientes da superfície podem ser relacionados conforme estabelece 3.5 (ELHABIAN, 2008).

$$n = \frac{1}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}} [-p, -q, 1]^T \quad (3.5)$$

A direção da iluminação, assim como o vetor normal, é definida em termos de seus ângulos σ e τ , onde $\sigma \in [0, \frac{\pi}{2}]$ e $\tau \in [0, 2\pi]$ (ELHABIAN, 2008):

$$I(\sigma, \tau) = [\sin \sigma \cos \tau, \sin \sigma \sin \tau, \cos \sigma]^T \quad (3.6)$$

A refletividade de uma superfície diz respeito à forma como a luz sobre ela incidente é refletida. Pode ser expressa como uma função das direções de incidência e reflexão. Ela também depende do tipo de superfície. Superfícies opacas refletem a luz quase uniformemente em todas as direções, isto é, possuem *albedo* constante e a intensidade depende apenas do ângulo θ entre a direção da iluminação e a normal da superfície. Tais superfícies são ditas *lambertianas*. Por outro lado, superfícies polidas concentram o brilho em uma pequena região e são chamadas *especulares*. A maioria dos objetos do mundo real apresenta uma combinação dos modelos lambertiano e especular. A refletância em um ponto qualquer, (x, y, z) pode ser expressa da seguinte forma (ELHABIAN, 2008):

$$R(x, y, z) = \rho(x, y, z) \cos \theta \quad (3.7)$$

onde $\rho(x, y, z)$ é o albedo no ponto (x, y, z) .

Dado que θ é o ângulo entre a direção da iluminação e normal da superfície, 3.7 pode ser reescrita como

$$R(x, y, z) = \rho \mathbf{l}^T \mathbf{n} \quad (3.8)$$

Pentland (1988) propôs um algoritmo local baseado na linearidade do mapa de refletância em termos do gradiente (p, q) da superfície. Tsai e Shah (1994) linearizaram o mapa de refletância em termos do mapa de profundidade $Z(x, y)$.

Tsai e Shah (1994) modelam o mapa de refletância para uma superfície lambertiana conforme segue:

$$E(x, y) = R(p, q) = \frac{\cos \sigma + p \cos \tau \sin \sigma + q \sin \tau \sin \sigma}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}} \quad (3.9)$$

onde $E(x, y)$ é o nível de escala de cinza no *pixel* (x, y) , τ é o *tilt* e σ o *slant*. p e q são dados pelas aproximações discretas:

$$p = \frac{\delta Z}{\delta x} = Z(x, y) - Z(x - 1, y) \quad (3.10)$$

$$q = \frac{\delta Z}{\delta y} = Z(x, y) - Z(x, y - 1) \quad (3.11)$$

O mapa de refletância em 3.9 pode ser reescrito como:

$$\begin{aligned} & f(E(x, y), Z(x, y), Z(x - 1, y), Z(x, y - 1)) \\ &= E(x, y) - R(Z(x, y) - Z(x - 1, y), Z(x, y) - Z(x, y - 1)) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (3.12)$$

Para um ponto fixo (x, y) em uma dada imagem $E(x, y)$, uma aproximação linear da função f em 3.12 é dada por

$$Z^n(x, y) = Z^{n-1}(x, y) - \frac{f(Z^{n-1}(x, y))}{\frac{df(Z^{n-1}(x, y))}{dZ(x, y)}} \quad (3.13)$$

onde $Z^{n-1}(x, y)$ é a superfície recuperada na iteração anterior e,

$$\frac{df(Z^{n-1}(x, y))}{dZ(x, y)} = \frac{(p + q)(pi_x + qi_y + 1)}{\sqrt{(1 + p^2 + q^2)^3} \sqrt{1 + i_x^2 + i_y^2}} - \frac{(i_x + i_y)}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} \sqrt{1 + i_x^2 + i_y^2}} \quad (3.14)$$

$$i_x = \frac{\cos \tau \sin \sigma}{\cos \sigma} \quad (3.15)$$

$$i_y = \frac{\sin \tau \sin \sigma}{\cos \sigma} \quad (3.16)$$

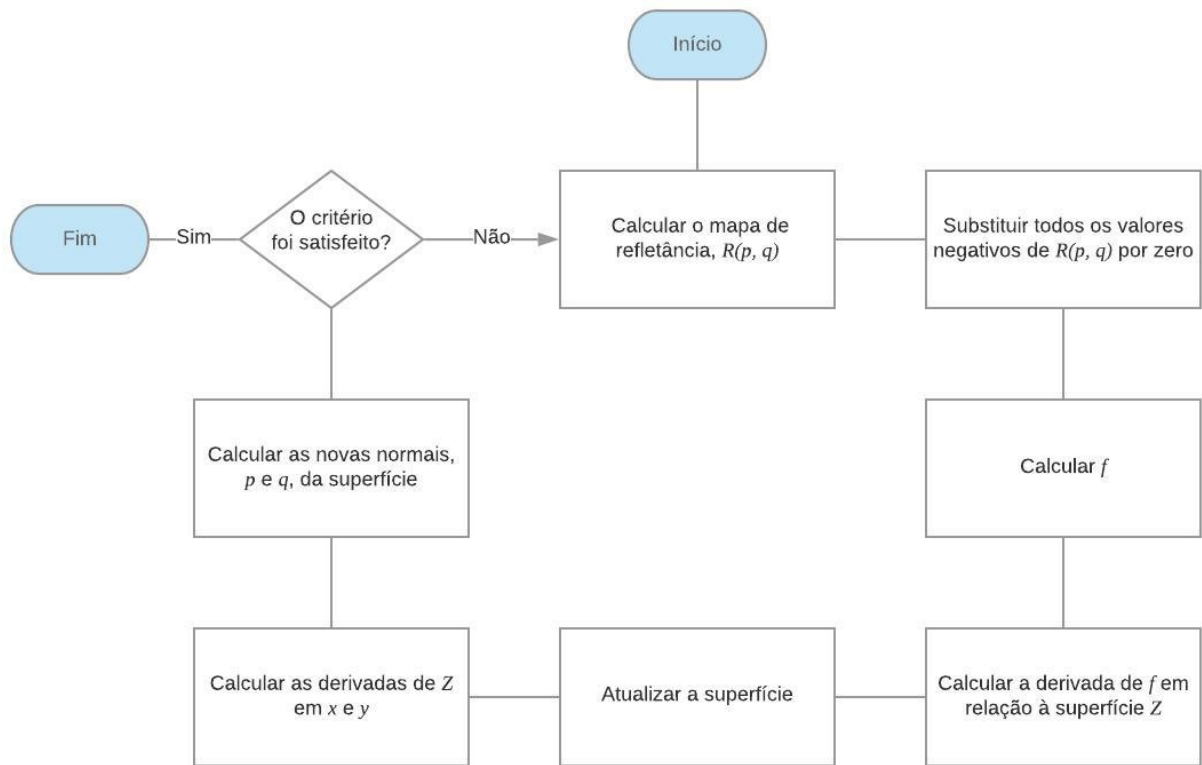
Considerando $Z^0(x, y) = 0$, $Z(x, y)$ pode ser refinado iterativamente a partir de 3.13.

Abaixo encontra-se um resumo em tópicos do algoritmo de Tsai e Shah (1994), apresentado por Elhabian (2008) ilustrado no fluxograma da Figura 13.

- Calcular o mapa de refletância, $R(p, q)$, a partir da direção da iluminação e das normais, p e q , atuais. Referente a 3.9;
- Garantir que o mapa de refletância seja positivo em quaisquer pontos (x, y) , substituindo todos os valores negativos por zero;
- Calcular a função f , que é a diferença/desvio entre o mapa de refletância obtido e a imagem original;
- Calcular a derivada de f em relação à superfície estimada, Z . Referente a 3.14;
- Atualizar a superfície, conforme 3.13;
- Calcular as derivadas da superfície em relação a x e y ;

- A partir da superfície atualizada, calcular as novas normais da superfície, conforme 3.10 e 3.11.
- continuar até que o critério seja atingido (o número de iterações foi utilizado como critério de parada)

Figura 7 – Fluxograma ilustrativo do algoritmo iterativo de Tsai e Shah (1994).



Fonte – Elaborado pela autora

4 Materiais e Métodos

Foi realizado levantamento das iniciativas e trabalhos sobre o ensino de astronomia a pessoas com deficiência visual, no Portal de Periódicos da CAPES/MEC. A partir das buscas e da leitura dos trabalhos encontrados constatou-se a carência de materiais didáticos adaptados a esse público, no Brasil. Constatou-se também que a maioria dos materiais é de produção artesanal.

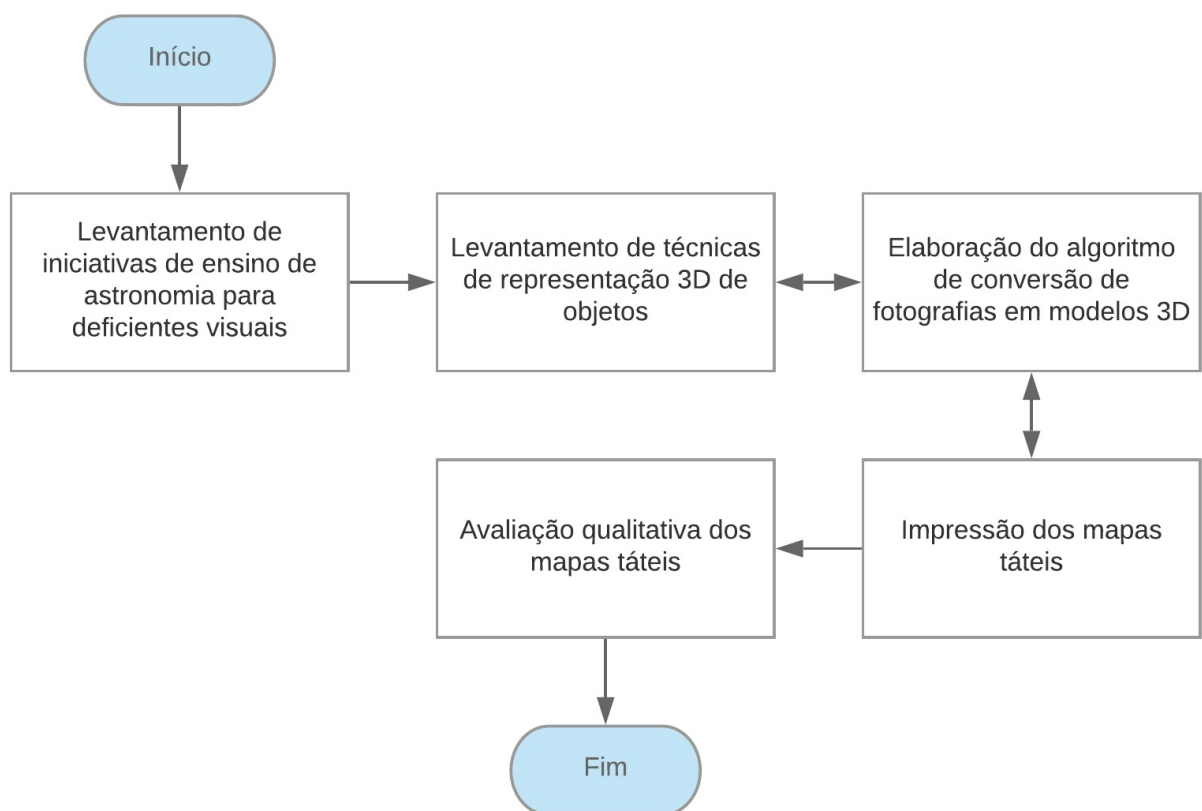
Foi feita busca por técnicas de geração automatizada de modelos 3D, também no Portal de Periódicos da CAPES/MEC. Os resultados apontam que a técnica mais adequada ao cenário de interesse deste trabalho é o SFS, capaz de recuperar o formato 3D a partir de uma única fotografia 2D. Com alguma adaptação, não é necessária informação adicional além do que consta na foto.

Foram utilizadas as implementações feitas por Elhabian (2008) dos algoritmos de Shah e Pentland, que adotam cálculo adicional para estimar o albedo da superfície e direção da iluminação. Outras adaptações, descritas no capítulo 5, foram necessárias para tornar o uso viável para astrofotografia de céu profundo, isto é, objetos fora do sistema solar, como nebulosas e galáxias.

O próximo passo foi a impressão dos mapas táteis em uma impressora 3D de baixo custo, que, a seguir, foram avaliados qualitativamente por pessoas com cegueira ou baixa visão (ver seção 5.3.1). Os participantes da pesquisa assinaram um *Termo de Consentimento Livre e Esclarecido* (TCLE).

As etapas de desenvolvimento deste trabalho estão resumidas no fluxograma da Figura 8.

Figura 8 – Fluxograma de desenvolvimento do trabalho.



Fonte – Elaborado pela autora

5 Resultados e Discussões

As seções seguintes discorrem sobre as diversas estratégias adotadas para a conversão de fotografias em modelos 3D, bem como seus resultados. O MATLAB R2018b foi o *software* utilizado na condução dos testes aqui relatados. A seção 5.1 trata da aplicação da função $\text{surf}(Z)$, nativa do MATLAB. A seção 5.2 discorre sobre a utilização do SFS. Por fim, a seção 5.3 apresenta um comparativo entre os modelos disponibilizados pelo *Tactile Universe* e os provenientes deste trabalho.

5.1 $\text{Surf}(Z)$

A função $\text{surf}(Z)$ ¹ cria uma superfície tridimensional adotando os índices das linhas e colunas da matriz Z como co-ordenadas para os eixos x e y . As cores são mapeadas para valores entre 0 e 255, onde preto total é mapeado para 0 e o branco, para 255. A Figura 10 mostra a saída dessa função tendo a imagem da Figura 9 como entrada.

Figura 9 – Foto da galáxia M83.

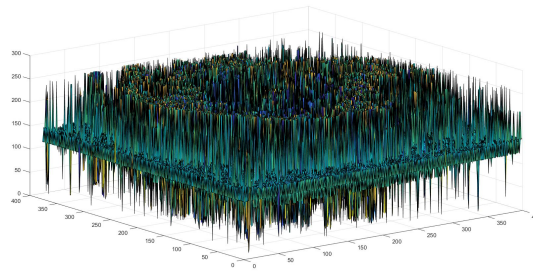


Fonte – Repositório de imagens do MATLAB

Visando reduzir os diversos picos presentes na Figura 10, fez-se uso dos filtros de suavização por média e por mediana, conforme mostra a Figura 11.

¹ Fonte – MathWorks. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/surf.html>. Acesso em 15 de Junho de 2019.

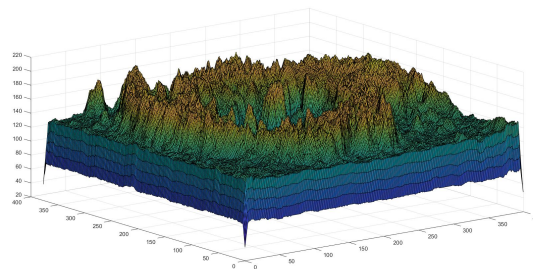
Figura 10 – Resultado da aplicação da função $\text{surf}(Z)$ para a Figura 9 como entrada.



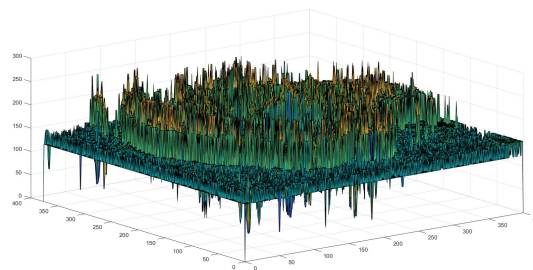
Fonte – Elaborado pela autora

Figura 11 – Estratégias de filtragem aplicadas sobre a Figura 9.

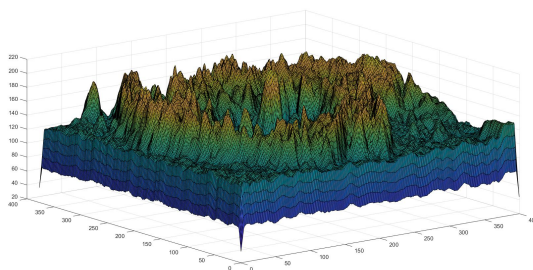
(a) Filtragem por média com vizinhança de 9×9 .



(b) Filtragem por mediana com vizinhança de 3×3 .



(c) Filtros 11a e 11b combinados.



O filtro por média contribuiu para suavização dos numerosos picos em (10), conforme é possível ver em (11a). Já o filtro por mediana é eficiente em remover as estrelas ao redor da galáxia, visto que estas são comparáveis ao ruído “sal & pimenta”, conforme seção 3.3.1 (Figura 11b). Tendo em vista que as estrelas isoladas presentes nas fotografias pertencem à

Via Láctea e não à galáxia fotografada, pode ser interessante removê-las, embora essa não seja uma prioridade neste trabalho. Na Figura 11c, é possível ver o resultado da combinação dos dois filtros.

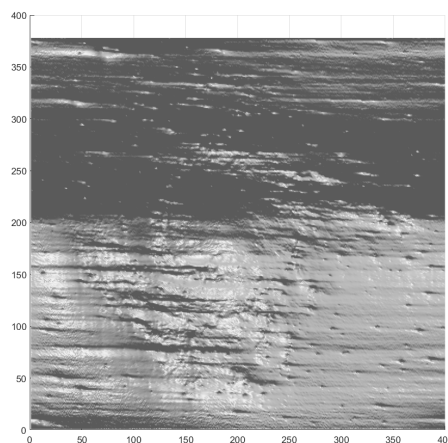
Os resultados obtidos da combinação entre a função $surf(Z)$ e a filtragem espacial não corresponderam às expectativas, logo alguma solução mais elaborada que a simples representação da intensidade do brilho ao longo do eixo z se mostrou necessária. A nova estratégia adotada é descrita na seção seguinte.

5.2 Shape from Shading (SFS)

Elhabian (2008) apresenta as implementações das abordagens propostas por Tsai e Shah (1994) e Pentland (1988) para o SFS adotadas neste trabalho. As Figuras 12 e 13 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos da aplicação dos algoritmos de Pentland (1988) e Tsai e Shah (1994) à imagem da Figura 9.

Figura 12 – Resultado da abordagem de Pentland (1988).

(a) Visão ortogonal.



(b) Visão em perspectiva. Eixos fora de escala.

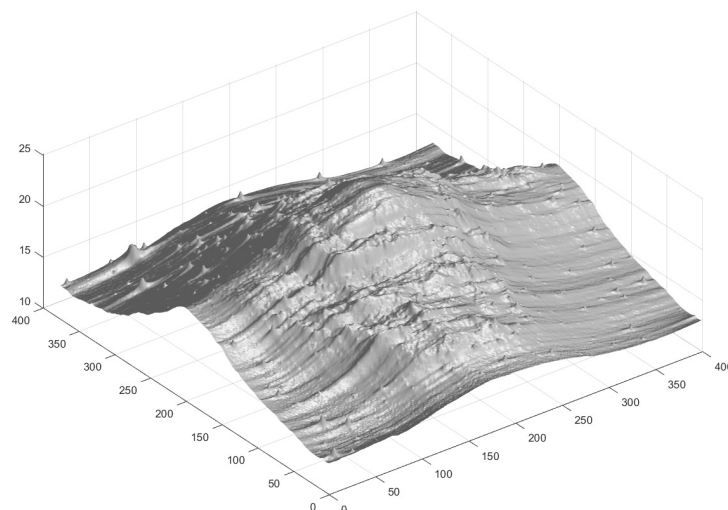
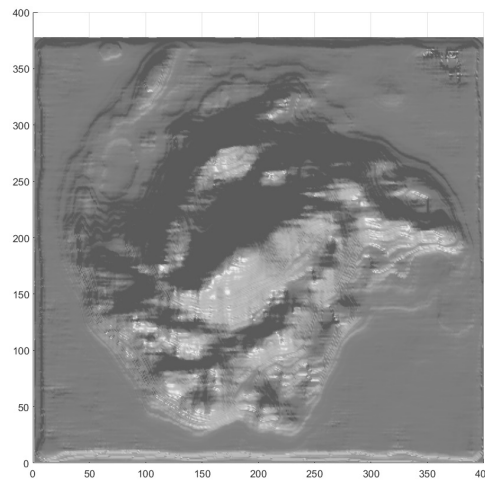
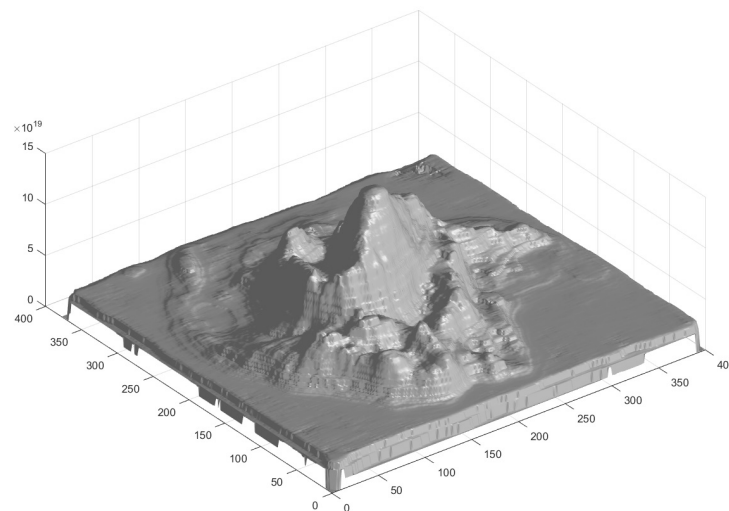


Figura 13 – Resultado da abordagem de Tsai e Shah (1994) para 200 iterações.

(a) Visão ortogonal.



(b) Visão em perspectiva. Eixos fora de escala. Note que o valor máximo registrado para o eixo z é da ordem de 10^{19} , muito superior ao valor máximo dos demais eixos.



Fonte – Elaborado pela autora

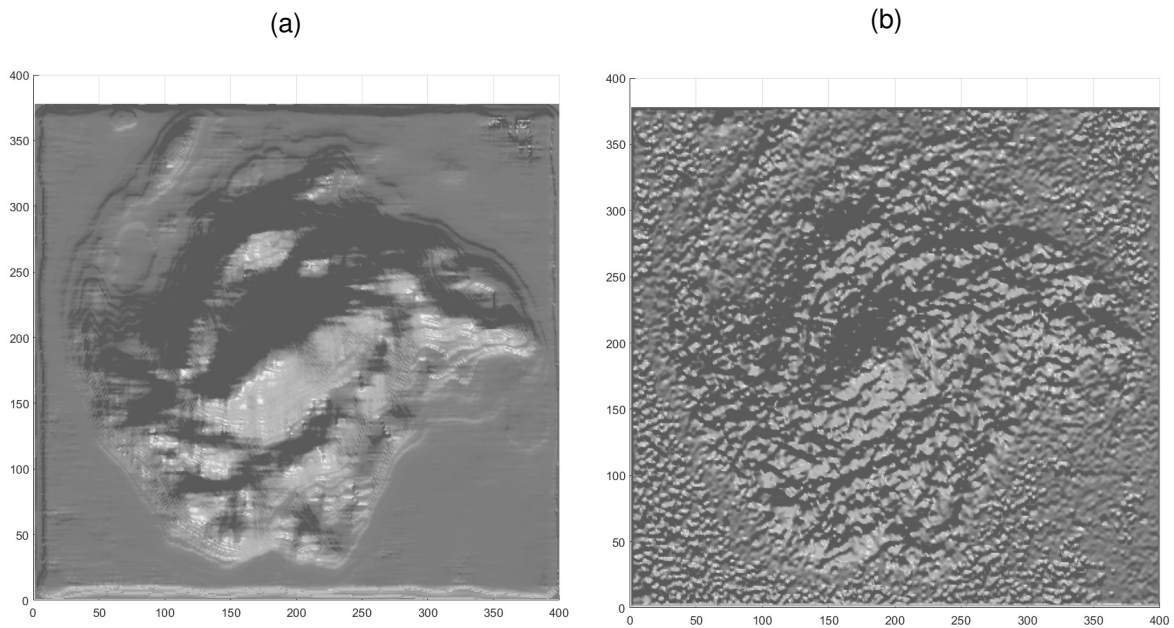
É notável o melhor desempenho do algoritmo de Tsai e Shah (1994), embora este apresente algumas inadequações ao cenário estudado, que devem ser corrigidas. A mais evidente delas é a altura máxima do modelo no eixo z , da ordem de 10^{19} . Essa discrepância em relação aos demais eixos é, provavelmente, causada pelo modelo de iluminação de Phong, que assume uma taxa de reflexão uniforme ao longo de toda a superfície. Do ponto de vista desse modelo, regiões tão brilhantes quanto o centro da galáxia na foto, só podem ser fruto de um ponto muito elevado na superfície. Uma possível solução seria adotar outro modelo de iluminação, como o de *especularidade*. Porém uma solução mais simples consiste em normalizar os valores do eixo z para uma faixa especificada. Dado que o MATLAB adota, por padrão, a escala de 1 mm por *pixel*, a faixa escolhida foi 0 a 4. Dessa forma a elevação máxima no gráfico será de 4 mm, altura que se aproxima das placas do *AstroBVI*.

A normalização é feita através da relação expressa em 5.1, onde z_1 representa o novo valor de z em um ponto (x, y) da imagem Z ; z_0 , o valor atual neste mesmo ponto; Z_{min} é o menor valor de z dentre todos os pontos da imagem, e Z_{max} , o maior valor.

$$z_1 = \frac{(4 - 0) \cdot (z_0 - Z_{min})}{Z_{max} - Z_{min}} \quad (5.1)$$

Outra adaptação necessária, diz respeito à suavização da curva gerada. A implementação de Elhabian (2008) originalmente adota filtro por mediana com vizinhança de 21×21 pixels. Ao reduzir a vizinhança do filtro de 21×21 para vizinhanças menores (3×3 , 7×7 ou 9×9 , por exemplo), foi possível preservar mais detalhes da imagem de entrada. A Figura 14 apresenta um comparativo.

Figura 14 – Adaptação na técnica de suavização de Elhabian (2008). (a) Filtro por mediana com vizinhança de 21×21 , conforme Elhabian (2008). (b) Filtro por mediana com vizinhança de 3×3 .



Fonte – Elaborado pela autora

A seguir, são descritas as etapas para a geração do modelo através do algoritmo de Tsai e Shah (1994), adaptado de Elhabian (2008).

Para melhor desempenho do algoritmo, a imagem foi redimensionada de modo que o maior lado tenha 400 pixels e o menor seja ajustado para manter as proporções originais da imagem. O tamanho de 400 pixels foi escolhido para acompanhar as medidas dos mapas distribuídos pelo *AstroBVI*. Os procedimentos de ajuste nas dimensões da imagem de entrada são ilustrados na Listagem 5.1.

Listagem 5.1 – Ajustes nas dimensões da imagem de entrada.

```

1
2     d_max = 400; % tamanho do maior lado da imagem
3     E = imread('m83.jpg');
4     E = flip(E, 1); % inverter imagem verticalmente
5
6     % -- ajustar dimensoes da imagem --
7     m = size(E, 1); % tamanho na direcao x
8     n = size(E, 2); % tamanho na direcao y
9     % calcular coeficiente r
10    if m > n
11        r = d_max/m;
12    else
13        r = d_max/n;
14    end
15    % novas dimensoes m e n
16    m = m * r;
17    n = n * r;
18    % redimensionar E segundo m e n
19    E = imresize(E, [m n]);

```

Então, a imagem deve ser convertida para escala de cinza e albedo, direção da iluminação (vetor *I*) e ângulos *slant* e *tilt* são estimados, visto que essa é uma restrição do SFS, conforme mostrado na Listagem 5.2.

Listagem 5.2 – Cálculos adicionais para o uso do SFS.

```

1     E = rgb2gray(E); % converter de RGB para escala de cinza
2     [albedo,I,slant,tilt] = albedo_iluminacao(E); % calculos de iluminacao

```

Nesse ponto, todas as informações necessárias ao método de Tsai e Shah (1994) são conhecidas e a superfície pode ser recuperada conforme descrito na seção 3.4. Os passos finais envolvem a suavização, normalização e conversão para o formato **stl** para impressão 3D. As etapas de suavização da curva gerada e conversão para o formato **stl** são ilustradas na Listagem 5.3.

Listagem 5.3 – Suavização e normalização da curva gerada pelo SFS.

```

1     Z = SFS_Shah(E, [albedo,I,slant,tilt]); % calculo da superficie Z
2
3     % suavizar a superficie reconstruida
4     Z = medfilt2(abs(Z), [7 7]); % filtragem por mediana com vizinhanca 7 x 7
5     f = fspecial('average', [9 9]);
6     Z = imfilter(Z, f); % filtragem por media com vizinhanca 9 x 9
7
8     % -- normalizar superficie --
9     M = max(Z(:)); % valor maximo entre todos os elementos de Z
10    m_ = min(Z(:)); % valor minimo entre todos os elementos de Z
11    X = 4 * (Z - m_) / (M - m_);
12
13    %exportar stl
14    stlwrite(X, 'modelo.stl');

```

5.3 Comparação com os modelos do Tactile Universe

O *Tactile Universe* disponibiliza *online* os modelos e as fotografias utilizadas para produzi-los. Foram escolhidos para comparação, os modelos das galáxias M100 e M51, gerados a partir das fotografias 15 e 17, respectivamente. As Figuras 16 e 18 mostram o comparativo entre os modelos em formato **stl** gerados pelo *Tactile Universe* e pelo presente trabalho.

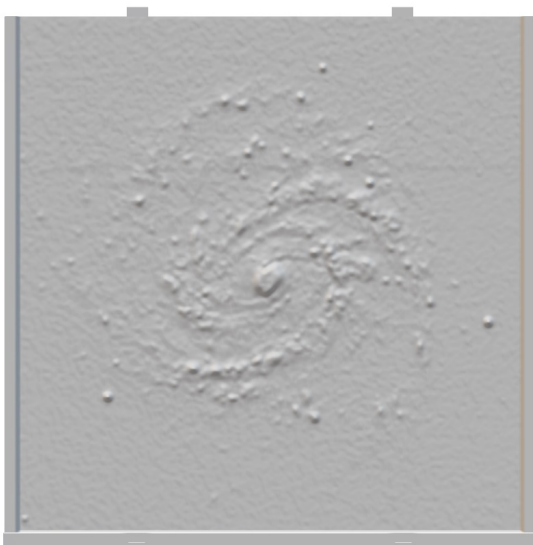
Figura 15 – Galáxia M100.



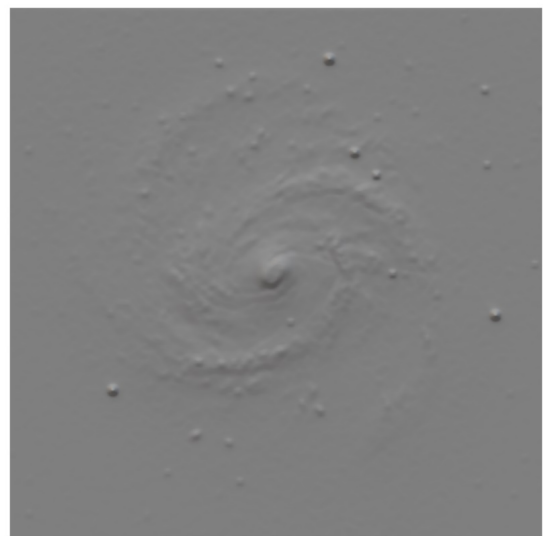
Fonte – *Tactile Universe*

Figura 16 – Comparação entre modelo do *Tactile Universe* e gerado pelo SFS para a galáxia M100 (Figura 15).

(a) Modelo produzido pelo *Tactile Universe*.

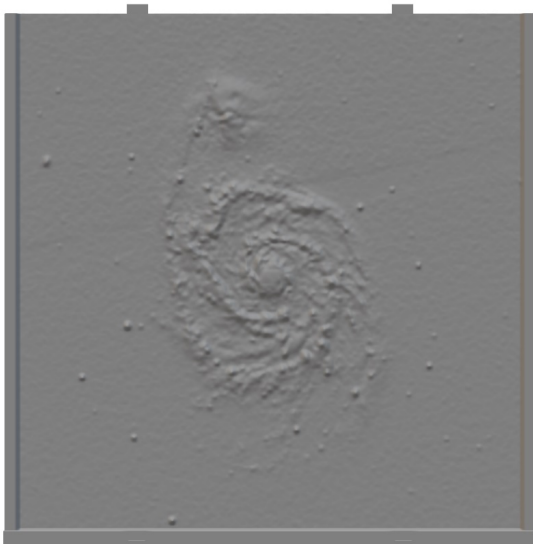


(b) Modelo produzido pelo SFS com modelo de iluminação de Phong.

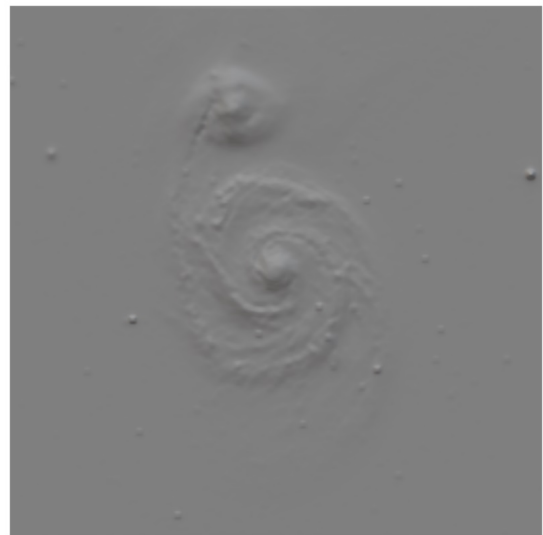


Fonte – Elaborado pela autora

Figura 17 – Galáxia M51.

Fonte – *Tactile Universe*Figura 18 – Comparação entre modelo do *Tactile Universe* e gerado pelo SFS para a galáxia M51 (Figura 17).(a) Modelo produzido pelo *Tactile Universe*.

(b) Modelo produzido pelo SFS com modelo de iluminação de Phong.



Fonte – Elaborado pela autora

Observando as Figuras 16 e 18, nota-se que o método de Tsai e Shah (1994) produz um relevo mais suave do que o presente nos modelos do *Tactile Universe*, adotados pelo AstroBVI, o que pode dificultar a identificação do objeto por parte do público com deficiência visual. Além disso, os modelos do *Tactile Universe* possuem bordas, característica que não é compartilhada com os modelos provenientes do presente trabalho.

5.3.1 Avaliação por Pessoas com Deficiência Visual

Os testes junto ao público com deficiência visual foram conduzidos no Centro de Referência em Educação Inclusiva Ativa (CREIA), em Timóteo, MG, no dia 25 de novembro de 2019. O experimento foi supervisionado pela professora de Braille da instituição. Participaram da pesquisa seis alunos com deficiência visual: dois cegos, e o demais com baixa visão, que utilizaram vendas durante o experimento. Foi ministrada uma breve introdução sobre o conceito de galáxia e sobre o conteúdo dos mapas táteis. Após esse momento, teve início a exploração tátil das galáxias M100 e M51. Para cada galáxia foi apresentado um par de mapas táteis, onde um deles foi impresso a partir do modelo produzido durante a execução desse trabalho e o outro, a partir do modelo disponibilizado pelo *Tactile Universe*, ambos sob as mesmas condições. Os alunos deveriam tateá-los e escolher em cada par, qual representa melhor os conceitos explicados.

Para ambas as galáxias (M100 e M51), a placa do *Tactile Universe* foi eleita pela maioria dos participantes como mais apropriada para observação (cinco entre seis). Entre as justificativas, destaca-se a melhor definição do relevo. Um dos alunos relatou que o relevo mais definido ajudou na percepção da galáxia como um ambiente dinâmico. Segundo ele, “parece que tem mais coisa acontecendo”, quando comparada às placas produzidas pela autora, onde o relevo mais suave transmite a sensação de que a galáxia é “vazia”. No caso da galáxia M51, um aluno apontou a suavidade do relevo como positiva, pois com menos informação foi mais fácil perceber o formato característico das galáxias espirais e o movimento de colisão das entre as galáxias.

As bordas, presentes nas placas do *Tactile Universe*, foram apontadas pela pedagoga e pela professora de Braille do CREIA como elemento importante em artefatos táteis, pois marcam seus limites. O chanfro em uma das quinas do objeto indicando sua orientação também foi destacado como importante. Entretanto, dado que as placas não têm uma orientação preferencial, a falta da quina chanfrada não foi considerada problemática pelos alunos. A ausência de bordas nos mapas produzidos neste trabalho também foi considerada irrelevante.

As técnicas de impressão também são um importante ponto a se observar, pois imperfeições entre as camadas geraram incômodo a alguns usuários da observação.

De modo geral, na opinião dos participantes seria possível conduzir uma observação com os mapas táteis produzidos pela autora, entretanto constata-se a necessidade de aprimoramentos quanto ao relevo, para torná-lo mais definido. Um dos possíveis caminhos para esse aprimoramento, seria a utilização do modelo de iluminação especular, que descreve melhor a aparência de um objeto como uma galáxia.

6 Conclusão

O *AstroBVI*, projeto de astronomia inclusiva da Universidade de Antofagasta, no Chile, produz e distribui *kits* didáticos para ensino de astronomia acessíveis a deficientes visuais. Esses *kits* são constituídos de mapas táteis com gravuras em alto relevo de galáxias, entre outros conteúdos multimídia. A preocupação com a acessibilidade nos eventos de observação astronômica promovidos no CEFET-MG, campus Timóteo, levou à aquisição desse *kit*. Este trabalho teve o objetivo de especificar um algoritmo capaz de converter uma imagem digital única em um modelo apropriado para impressão 3D, como um passo inicial para aumentar a diversidade de objetos celestes disponíveis para exploração tátil. O *Shape from Shading* (SFS) foi identificado como um algoritmo capaz de tal conversão.

Para reconstruir a superfície de interesse, o SFS emprega a relação entre a variação do relevo e a taxa de reflexão de luz, ou refletância da superfície em cada um de seus pontos. A função de refletância de uma superfície é obtida levando em consideração um modelo de iluminação. O mais simples, e por isso mais comum, é o modelo de *Phong*, que assume uma taxa constante de reflexão ao longo de toda a superfície. Com algumas adaptações, foi possível empregá-lo na reconstrução de objetos celestes.

Os modelos produzidos foram impressos em uma impressora 3D e avaliados por meio da comparação com os modelos disponibilizados pelo *Tactile Universe*, impressos sob as mesmas condições. Os testes foram conduzidos com alunos com cegueira ou baixa visão do Centro de Referência em Educação Inclusiva Ativa (CREIA), em Timóteo, Minas Gerais.

Os resultados apontam para limitações no uso do SFS com o modelo de iluminação de *Phong*. Os mapas táteis produzidos apresentaram relevo muito suave, o que dificultou a observação, segundo os participantes da pesquisa.

Trabalhos futuros envolvem explorar a possibilidade da adoção do modelo de iluminação especular, que assume uma taxa de reflexão variável ao longo da superfície. Outro possível caminho seria a diferenciação de regiões da imagem para aplicação de suavização e normalização distintas em áreas de mais ou menos brilho, avaliando os resultados para fotografias de outras classes de objetos celestes, como planetas, aglomerados e nebulosas. Também é necessária a elaboração de materiais didáticos¹ de apoio para o uso das placas. Essa medida deve ser adotada para proporcionar autonomia aos usuários dos mapas táteis. Além disso, o desenvolvimento de uma ferramenta com interface gráfica simples e intuitiva possibilitaria que o algoritmo de conversão fosse utilizado por pessoas com qualquer nível de familiaridade com *softwares* de modelagem ou manipulação de imagens. Sugere-se ainda, melhorias quanto às técnicas de avaliação dos mapas, adotando um grupo maior de usuários cegos com o uso de questionários estruturados segundo métodos formais de avaliação.

¹ Consultar o *Manual de Acessibilidade em Documentos Digitais*, do Centro Tecnológico de Acessibilidade para orientações na elaboração de documentos digitais acessíveis. Disponível em: <https://cta.ifrs.edu.br/livro-manual-de-acessibilidade-em-documentos-digitais/>. Acesso em 19 de dezembro de 2019.

Referências

- ALEXANDROV, O.; BEYER, R. A. Multiview shape-from-shading for planetary images. *Earth and Space Science*, Elsevier, p. 652–666, Out 2018. Citado nas páginas 8, 13 e 19.
- BACKMAN, D.; HOETTE, V. Astronomy for students with sensory impairments. *The Science Teacher.*, v. 76, n. 3, p. 64, Mar 2009. Disponível em: <<http://link.galegroup.com/apps/doc/A197489025/AONE?u=capes&sid=AONE&xid=d37bef78>>. Acesso em: 17 abr. 2019. Citado na página 9.
- CHANDRA X-RAY CENTER. *Astrolympics*. 2019. Disponível em: <<http://chandra.si.edu/olympics/summer/distance.html>>. Acesso em: 24 abr. 2019. Citado na página 8.
- CHHATKULI, S.; SATOH, T.; TACHIBANA, K. Multi sensor data integration for an accurate 3d model generation. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-4/W5, p. 103–106, Mai 2015. Citado nas páginas 8 e 13.
- CLAUS, D. et al. Generation of 3d digital models of the dental arches using optical scanning techniques. *Seminars in Orthodontics*, Elsevier, v. 24, n. 4, p. 416–429, 2018. Citado nas páginas 8 e 13.
- CONCI, A.; AZEVEDO, E.; LETA, F. R. *Computação Gráfica: Teoria e prática*. [S.l.]: Elsevier, 2008. v. 2. ISSN 978-85-352-2329-3. Citado na página 18.
- DOMINICI, T. P. et al. Atividades de observação e identificação do céu adaptadas às pessoas com deficiência visual. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, scielo, v. 30, p. 4501.1–4501.8, Dez 2008. ISSN 1806-1117. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172008000400010&nrm=iso>. Citado nas páginas 8 e 14.
- ELHABIAN, S. Y. *Hands on Shape from Shading*. [S.l.], 2008. Citado nas páginas 5, 19, 20, 21, 23, 27 e 29.
- FIGUEIREDO, R. M. E.; KATO, O. M. Estudos nacionais sobre o ensino para cegos: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Educação Especial*, Associação Brasileira de Pesquisadores em Educação Especial - ABPEE, v. 21, n. 4, p. 477–488, Nov-Dez 2015. Citado nas páginas 9 e 14.
- FREITAS-REIS, I. et al. Adaptações táteis de modelos atômicos para um ensino de química acessível a cegos. *X Congresso Internacional Sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias*, p. 4015–4020, set. 2017. Citado na página 14.
- GONZALES, R. C.; WOODS, R. E. *Processamento de Imagens Digitais*. 1. ed. [S.l.]: Editora Edgard Blücher Ltda., 2000. 528 p. ISBN 9788521202646. Citado nas páginas 16 e 18.
- GONZALES, R. C.; WOODS, R. E.; EDDINS, S. L. *Digital Image Processing Using MATLAB*. 2. ed. [S.l.]: Gatesmark Publishing, 2009. ISBN 9780982085400. Citado na página 16.
- GRICE, N. et al. 3d printing technology: A unique way of making hubble space telescope images accessible to non-visual learners. *JBIR: The Journal of Blindness Innovation and Research*, v. 5, 2015. Citado nas páginas 8, 14 e 15.

- HANIPAH, A. F. F. A.; TAHAR, K. N. Development of the 3d dome model based on a terrestrial laser scanner. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, Emerald Insight, v. 36, n. 2, p. 122–136, 2018. Citado nas páginas 8 e 13.
- JACKSON, A. S. et al. Large pose 3d face reconstruction from a single image via direct volumetric cnn regression. Set 2017. Disponível em: <arXiv:1703.07834v2[cs.CV]>. Citado na página 13.
- KHAN, U. et al. A methodological review of 3d reconstruction techniques in tomographic imaging. *Journal of Medical Systems*, v. 42, n. 10, p. 190, Set 2018. ISSN 1573-689X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10916-018-1042-2>>. Citado nas páginas 8 e 13.
- KIM, S. 3d model data generation and conversion for 3d printers. *Journal of Electronic Materials*, The Minerals, Metals & Materials Society, v. 44, n. 3, p. 64, Mar 2015. Citado nas páginas 8 e 9.
- LANGHI, R.; MARTINS, B. A. Um estudo exploratório sobre os aspectos motivacionais de uma atividade não escolar para o ensino da astronomia. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Universidade Federal de Santa Catarina, v. 35, n. 1, p. 64–80, Abr 2018. Citado na página 10.
- MAGNOR, M.; KINDLMANN, G.; HANSEN, C. Constrained inverse volume rendering for planetary nebulae. *IEEE Visualization*, IEEE, p. 83–90, 2004. Citado na página 8.
- NASA. *How long is a light year*. 2019. Disponível em: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/Numbers/Math/Mathematical_Thinking/how_long_is_a_light_year.htm>. Acesso em: 24 abr. 2019. Citado na página 8.
- PEDRINI, H.; SCHWARTZ, W. R. *Análise de Imagens Digitais: Princípios, algoritmos e aplicações*. [S.l.]: Thomson Learning, 2008. ISSN 978-85-221-0595-3. Citado na página 18.
- PENTLAND, A. Shape information from shading: A theory about human perception. In: IEEE. [S.l.], 1988. p. 404–413. Citado nas páginas 5, 20 e 27.
- RICHARDSON, E. et al. Learning detailed face reconstruction from a single image. Abr 2017. Disponível em: <arXiv:1611.05053v2[cs.CV]>. Citado na página 13.
- SCHÖPS, T. et al. Large-scale outdoor 3d reconstruction on a mobile device. *Computer Vision and Image Understanding*, Elsevier, v. 157, p. 151–166, 2017. Citado na página 8.
- SOARES, K. D. A.; CASTRO, H. C.; DELOU, C. M. C. Astronomia para deficientes visuais: Inovando em materiais didáticos acessíveis. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, v. 14, n. 3, p. 377–391, 2015. Citado nas páginas 8 e 14.
- SOLOMON, C.; BRECKON, T. *Fundamentos de Processamento Digital de Imagens: uma abordagem prática com exemplos em MATLAB*. 1. ed. [S.l.]: LTC, 2013. ISBN 978-85-216-2347-2. Citado nas páginas 16 e 18.
- TSAI, P.-S.; SHAH, M. Shape from shading using linear approximation. *Image and Vision computing*, v. 12, n. 8, p. 487–498, 1994. Citado nas páginas 5, 20, 21, 22, 27, 28, 29, 30 e 32.
- YANG, L. et al. A welding quality detection method for arc welding robot based on 3d reconstruction with sfs algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 94, n. 1, p. 1209–1220, Jan 2018. ISSN 1433-3015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-017-0991-9>>. Citado nas páginas 8 e 13.