

SIMULANDO O IMPACTO DE SATÉLITES EM OBSERVAÇÕES ASTRONÔMICAS

Instituto Federal Fluminense *campus Bom Jesus do Itabapoana*

RESUMO: Uma nova era se inicia na Astronomia, com o lançamento nos próximos anos de diversos telescópios (terrestres e espaciais) que aumentarão em milhares de vezes a quantidade de dados que temos à disposição para entender o céu. Junto ao desafio de analisar esse volume de informação sem precedente, soma-se uma dificuldade não tão bem compreendida até o momento: como tratar estas imagens a fim de diminuir o impacto causado pela poluição luminosa prevista com o advento do aumento do número de telescópios artificiais em órbita? Prevendo o problema, astrônomos, engenheiros e militantes do céu escuro têm se reunido para propor soluções. Do ponto de vista científico, uma das propostas é criar algoritmos open source num esforço coletivo que permitam o tratamento fácil das imagens. Para nos juntarmos a esses esforços, propomos nesse trabalho a criação de um objeto astronômico simulado cuja imagem será contaminada por satélites e em seguida tratada, criando-se assim uma rotina de melhoramento de imagem.

Palavras-chave: Astronomia observacional; satélites artificiais; poluição luminosa.

INTRODUÇÃO

Durante milênios, o único instrumento disponível para o estudo do espaço sideral eram nossos olhos, o que limitava o conhecimento humano a objetos próximos e/ou brilhantes. Tecnicamente, nos limitamos a aproximadamente seis mil estrelas incluindo nosso Sol (todas pertencentes à nossa galáxia), uma Lua, cinco planetas (Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno) e três objetos extragaláticos (a Galáxia de Andrômeda e as Nuvens de Magalhães - estas visíveis apenas do Hemisfério Sul).

Esse cenário só sofreu mudanças há quatro séculos, quando em 1609 Galileu apontou sua luneta para o céu e observou objetos que até então não sabíamos existir. Desde então, cada novo telescópio permite que aprendamos um pouco mais sobre o Universo que nos cerca e grandes revoluções observacionais moldam a história da Astronomia.

A década que se inicia (2020-2030) tem trazido muitas mudanças ao conhecimento de Astronomia, com o lançamento de telescópios de nova geração, que ampliarão em mais de mil vezes a quantidade e a qualidade dos dados que temos disponíveis. São exemplos os telescópios terrestres Vera Rubin e GMT (Giant Magellan Telescope), ambos em construção no Chile, e o telescópio espacial James Webb, que já teve as primeiras imagens liberadas em 2023. Tais empreendimentos

motivaram (e motivam) astrônomos do mundo todo a se prepararem para os desafios de analisar todo esse volume de dados, o que será uma empreitada sem precedentes, tornando-se um desafio processá-los com boa eficiência e eficácia.

Ao mesmo tempo, as novidades da Astronomia não se limitam a boas notícias. Durante milênios, para que observações acontecessem somente duas barreiras se impunham: as condições climáticas e as limitações instrumentais. Ambas foram sendo contornadas ao longo do tempo, com a alocação de telescópios em lugares cada vez maiores e mais adequados do ponto de vista climático (secos e altos). No entanto, a popularização de satélites, que promete povoar a órbita terrestre de pequenos objetos brilhantes, traz um desafio ainda não completamente mensurado, pois esses objetos se interpõem entre os telescópios e a luz das estrelas (e demais objetos).

Assim, junto ao desafio da quantidade de dados produzida, soma-se o problema de lidar com a contaminação produzida por numerosos objetos artificiais a serem colocados em órbita também nos próximos anos, o que demandará grande preparação da comunidade. Neste trabalho, investigamos as soluções propostas para o problema a fim de entender como podemos somar esforços aos grupos que buscam preservar o céu para novas descobertas astronômicas.

METODOLOGIA

A pesquisa se divide em duas etapas. Primeiramente, o foco é investigar as possíveis soluções ao problema apresentado. Como as discussões sobre o impacto de satélites em observações astronômicas são relativamente recentes, há muito a ser explorado nas soluções propostas, entendendo a fundo seus pontos positivos e negativos.

A partir dos resultados da primeira fase, o próximo passo é determinar qual das soluções melhor se adequa à nossa realidade, com o intuito de entendê-la mais profundamente. Assim, a partir das estratégias escolhidas, a última etapa do trabalho consiste em juntar esforços do conhecimento em programação e tecnologia e trabalhar na proposta em prol da comunidade científica.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Até o momento, a primeira etapa da pesquisa está concluída, no caso, a avaliação de propostas que poderiam solucionar, ou ao menos mitigar, os efeitos negativos da poluição causada por satélites em observações astronômicas. Dentre as inúmeras soluções apresentadas, três se destacaram como mais interessantes, considerando critérios como viabilidade, popularidade e resultados. A primeira consiste em limitar o envio de satélites, a exemplo da limitação que acontece da construção de novos telescópios em sítios sagrados. Em seguida, pensa-se em mapear os objetos de forma que sejam evitados pelos principais satélites. Por fim, há a opção de buscar soluções para o tratamento de imagens.

1. Limitação de satélites

A poluição luminosa do céu noturno causada por satélites artificiais é um problema crescente que afeta significativamente pesquisadores e astrônomos. Uma solução radical, porém a mais eficiente para resolver esse problema, seria limitar o lançamento de novos satélites e remover aqueles já em órbita. Isso ajudaria a preservar a qualidade do céu noturno e reduziria a contaminação luminosa que prejudica as observações astronômicas.

Além dos benefícios para a astronomia, a redução gradual do número de satélites, chegando a sua remoção total, evitaria uma possível colisão de detritos e satélites em massa ou a conhecida Síndrome de Kessler. De acordo com Kessler e Cour-Palais (1978) quanto mais objetos estiverem na órbita da Terra, maior é a probabilidade de que uma colisão desencadeie outra, gerando assim uma quantidade de colisões exponencialmente crescente. Portanto, a implementação de medidas rigorosas para controlar a população de satélites é crucial para prevenir a degradação do ambiente espacial, garantindo a segurança e a sustentabilidade das futuras operações espaciais.

No entanto, essa solução apresenta desafios significativos, pois reduzir a quantidade de satélites ou impedir novos lançamentos impactaria negativamente em

tecnologias cruciais, como a internet via satélite, GPS, monitoramento ambiental e meteorológico (“Satellite services and applications: A vital cornerstone of modern society”, [s.d.];National Research Council, 2012). Esses serviços são essenciais para a sociedade moderna, e sua limitação traria prejuízos consideráveis. A questão geopolítica também dificulta a implementação dessa solução. Satélites são usados para segurança nacional por muitos países, e alcançar um acordo internacional sobre a redução ou limitação dos satélites seria um processo complexo e politicamente sensível.

Além disso, outro ponto que tornaria essa opção inviável seria o custo para remover todos os satélites que já estão em órbita. Se fosse considerado apenas o valor dessa operação, o custo para a remoção de um único objeto, de acordo com Vance e Mense (2013), seria superior a 300 mil dólares, caso fosse bem-sucedida, podendo chegar a mais de 1 bilhão de dólares se algo desse errado. Levando em consideração que há cerca de 11.500 satélites em órbita até o momento, segundo dados fornecidos pela Agência Espacial Europeia (ESA) no seu relatório sobre detritos espaciais, o “ESA’s Annual Space Environment Report”, o custo dessa operação, sem considerar os custos de desenvolvimento e planejamento dessas missões de forma segura e financeiramente eficiente, seria extremamente elevado.

Em suma, a questão da poluição luminosa do céu noturno, desencadeada pelo crescente número de satélites artificiais, demanda medidas urgentes e ponderadas. Embora a redução da população de satélites seja crucial para preservar a qualidade do ambiente espacial, a dependência da sociedade moderna em tecnologias satelitais essenciais, aliada às questões geopolíticas e aos altos custos associados à sua remoção, tornam essa solução inviável.

2. Mapeamento

Visando evitar interferências nas observações astronômicas, a movimentação das lentes telescópicas para áreas em que não há previsão de rastros de satélites pode garantir qualidade científica aos dados obtidos. Ao utilizar equipamentos já existentes para direcionar o foco para regiões do céu momentaneamente livres de

interferência, as imagens obtidas terão a clareza de detalhes buscada pelos observadores.

No entanto, o custo operacional dessa movimentação é alto. A precisão exigida para evitar trepidações e garantir a estabilidade durante as observações demanda hardware especializado, como motores e sensores de alta precisão, além de software avançado capaz de prever movimentos de satélites e ajustar o posicionamento em tempo real. Manter a qualidade do equipamento envolve uma manutenção regular e calibração frequente, o que exige uma equipe técnica altamente qualificada. Além disso, o planejamento meticuloso necessário para identificar "janelas" de observação adequadas aumenta ainda mais a complexidade do processo.

Outro fator que contribui para os altos custos operacionais é o consumo significativo de energia. A coordenação com outros observatórios para maximizar a eficiência das observações também se torna essencial. Esses elementos são críticos para garantir a clareza e a qualidade científica dos dados obtidos.

A eficiência dos projetos de pesquisa também é afetada pelo tempo necessário para o reposicionamento e ajustes das lentes. Com o aumento do número de satélites em órbita, encontrar áreas completamente livres de interferências torna-se cada vez mais difícil. Isso aumenta a complexidade da identificação de "janelas" adequadas para observação, exigindo um planejamento meticuloso e preciso. A dificuldade em encontrar essas "janelas" adequadas pode tornar impossível a observação de eventos astronômicos raros e imprevisíveis, como a explosão de uma supernova.

Esses eventos, frequentemente observáveis apenas uma vez em várias décadas ou até séculos, representam oportunidades únicas de estudo. A interferência causada pela passagem de satélites pode inviabilizar essas observações, caso haja um conflito. Portanto, a busca por áreas livres de interferências não é apenas uma questão de manter a qualidade das imagens, mas também de garantir que fenômenos astronômicos raros possam ser documentados e estudados.

Assim, o desafio não é apenas tecnológico, mas também logístico e econômico. A implementação de sistemas capazes de mover e ajustar as lentes dos

telescópios de maneira precisa e eficiente é crucial para o sucesso das observações astronômicas. No entanto, o investimento financeiro e a necessidade de coordenação entre diversas entidades tornam esse processo complexo e custoso. A manutenção contínua e a atualização de tecnologias para acompanhar o aumento de satélites são imperativos para preservar a capacidade de observação dos telescópios.

Em resumo, a movimentação das lentes telescópicas para áreas livres de rastros de satélites é essencial para manter a qualidade científica das observações astronômicas. No entanto, os altos custos operacionais, a complexidade do planejamento e a necessidade de coordenação eficiente são desafios significativos. A busca por soluções que mitiguem essas interferências sem comprometer a eficiência e a precisão das observações é um esforço contínuo e vital para o avanço da astronomia.

3. Tratamento de imagens

Dentre as diversas estratégias propostas para mitigar o impacto dos rastros causados pelos satélites artificiais durante as observações astronômicas, a última estratégia, mascarar as imagens, apresenta, assim como as outras estratégias, pontos positivos e negativos. No entanto, esta abordagem destaca-se como a opção mais viável e realista para o cenário atual.

Considerando a metodologia, o processo consiste em três etapas principais:

- Detecção dos rastros dos satélites nas imagens brutas, utilizando algoritmos de visão computacional e aprendizado de máquina. Esta etapa é crucial para identificar precisamente onde os rastros dos satélites estão localizados nas imagens. Algoritmos avançados de detecção são treinados para reconhecer os padrões específicos que os rastros dos satélites criam, diferenciando-os de outros elementos nas imagens astronômicas (Walker et al., 2020)
- Modelagem dos rastros detectados, utilizando parâmetros como brilho, largura e orientação. Uma vez detectados, os rastros dos satélites

precisam ser modelados para entender suas características físicas. Parâmetros como brilho, largura e orientação são essenciais para esta modelagem, permitindo uma compreensão detalhada de como os rastros interferem com as observações astronômicas (Hainaut & Williams, 2020). Um exemplo de rastros pode ser visto na Figura 1.

- Remoção dos rastros modelados das imagens, utilizando técnicas para preencher as áreas afetadas. Esta é a etapa mais desafiadora, onde técnicas sofisticadas são aplicadas para remover os rastros dos satélites das imagens astronômicas. Métodos como interpolação e preenchimento inpainting são frequentemente utilizados para substituir os pixels contaminados por valores estimados com base nos pixels vizinhos (Tyson et al., 2022).

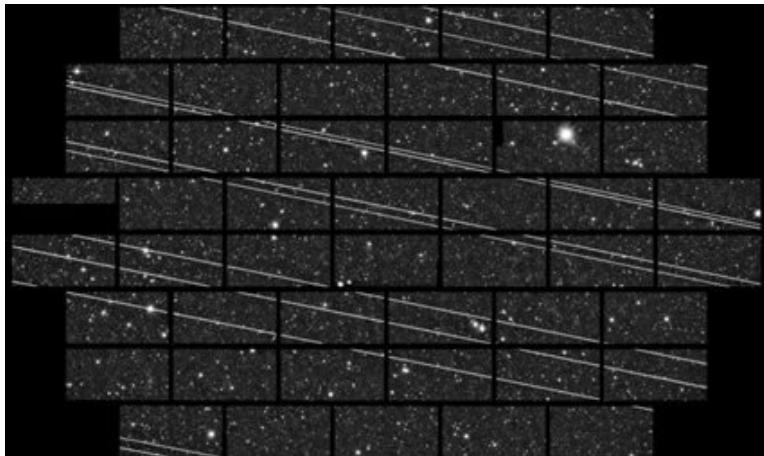


Figura 1. Traços brilhantes deixados pelos satélites da Starlink visíveis no wide-field, capturada por Cerro Tolo. Fonte: <https://phys.org/news/2022-02-dark-quiet-satellite-constellation.html>

Esta abordagem pode ser aplicada tanto em imagens individuais quanto em sequências de imagens, explorando a consistência temporal dos rastros para melhorar a detecção e remoção (Bassa et al., 2022). A aplicação em sequências de imagens permite utilizar informações temporais adicionais, aumentando a precisão e a eficácia dos algoritmos de detecção e remoção, como mostrado na Figura 2.

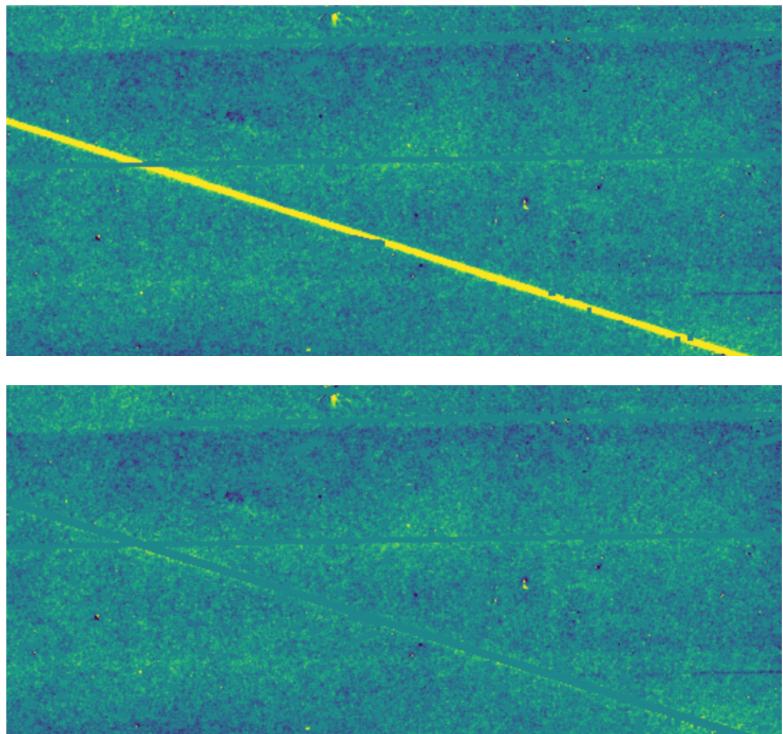


Figura 2: Acima: Rastro de brilho deixado por satélite. Abaixo: Produto final, depois de mascarar.

Fonte: J.A. Tyson (2022).

Um dos principais pontos positivos desta abordagem é sua aplicabilidade imediata, que consiste em iniciar os trabalhos o mais rápido possível. As técnicas podem ser implementadas rapidamente, minimizando as perdas nas observações astronômicas e permitindo que os trabalhos continuem sem interrupções significativas. Em relação às outras propostas, essa se torna mais fácil que mapear e desviar, visto que essa técnica demanda uma precisão imensa de informações e engenharia complexa, e mais simples que a regulamentação do céu, uma vez que não envolve a nação como um todo, e os interesses são diversos.

Além desses, outro ponto positivo é a continuidade das pesquisas; Dado o alto custo da hora de observação astronômica nos principais observatórios da Terra, é extremamente importante uma técnica que permita a continuação dos projetos e trabalhos sem a necessidade de parar para reorganizar o sistema todo. A interrupção das observações pode levar a perdas de dados valiosos e atrasos significativos em projetos de pesquisa.

Apesar das vantagens, a estratégia também possui pontos negativos. O principal deles é que não é 100% eficaz, ou seja, há perda de dados. Considerando que para objetos de alta magnitude, a correção das imagens se torna muito

complexa. Nem sempre é possível recuperar completamente todas as informações das áreas afetadas, resultando em perda inevitável de dados (Hainaut & Williams, 2020). Além disso, como envolve reprocessamento de imagem, a qualidade original das fotos tiradas pelo telescópio pode ser comprometida, não sendo possível reter a mesma qualidade inicial

No entanto, o desafio de processar a base de dados em tempo real leva ao alto poder computacional exigido para o processamento que é difícil de se conseguir, já que envolve questões políticas e financeiras (Bassa et al., 2022). Além disso, é importante ressaltar que o atual cenário de grande volume de dados exacerba esta questão, pois há uma exigência muito grande para que todos os dados sejam processados sem haver perdas.

Por fim, a estratégia de mascaramento de imagens mostrou-se a mais viável de ser executada, especialmente a curto e médio prazo. Seu desenvolvimento e aprimoramento são essenciais para a preservação do céu noturno e a qualidade das observações astronômicas, no quadro da crescente poluição luminosa causada por satélites. Embora existam desafios e limitações, a aplicabilidade imediata e a possibilidade de continuidade das pesquisas sem interrupções significativas fazem desta a abordagem mais prática e eficiente disponível atualmente. (Tyson et al., 2020).

4. STAR-Clean

Para mitigar o impacto desses rastros nas imagens astronômicas, a solução STAR-Clean propõe um método de análise quadridimensional e remoção adaptativa dos rastros de satélites durante a exposição fotográfica. Diferente das estratégias de mapeamento ou da limitação do lançamento de satélites, o STAR-Clean atua diretamente no processamento de imagens, oferecendo uma solução prática, de baixo custo relativo e sem necessidade de alterações no ambiente espacial.

Para testar essa ideia de forma acessível, optou-se por uma simulação usando o software livre Stellarium. Foi escolhida uma região aleatória do céu com o único critério de que um satélite passasse pelo campo de visão durante o tempo de captura. Um script bastante simples foi implementado no próprio Stellarium, configurado para salvar uma imagem a cada segundo, num total de vinte capturas consecutivas.



Figura 3: Acima: Captura do 1º segundo de exposição. Abaixo: Captura do 20º segundo de exposição. Fonte: Captura de tela do programa Stellarium

Com essas imagens em mãos, aplicou-se o método STAR-Clean. Ele pode ser descrito em três momentos.

4.1. Criação da Imagem Poluída com Rastro de Satélite

O primeiro consiste em criar uma imagem composta que evidencie o rastro do satélite. Para isso, as capturas são mescladas por um processo de “máximo” (o que faz com que o traço em movimento apareça realçado em relação ao fundo estelar).



Figura 4: Traçado completo do satélite. Fonte: Captura de tela do Stellarium

4.2. Identificação e Remoção da Trilha

Na segunda etapa, a trilha do satélite é identificada e isolada com base em algoritmos de detecção de cor (como a cor verde em HSV, representativa do rastro). Uma máscara é criada para isolar a trilha, e em seguida, técnicas de dilatação e substituição de pixels são aplicadas, tornando essa área transparente ou substituindo-a por pixels neutros.

4.3. Mesclagem para Recuperação das Estrelas

Por fim, as imagens processadas são mescladas novamente utilizando funções como mediana ou máximo, descartando as áreas afetadas pela trilha e aproveitando os pixels “limpos” ao longo do tempo de exposição. O ponto central é que, ao fazer isso, as regiões afetadas pelo satélite já não comprometem o resultado, restando apenas os pixels limpos, preservando as estrelas e demais objetos do campo.



Figura 5: Imagem Exportada do Algoritmo STAR-Clean. Fonte: STAR-Clean

Na Figura 5 percebe-se a remoção total do rastro deixado pelo satélite, em comparação com a figura 4. Isso é relevante porque, em métodos convencionais, o traço costuma permanecer e degradar a composição final. No STAR-Clean, o problema é eliminado antes mesmo da etapa de mesclagem final, o que recupera informação que de outro modo se perderia.

A simulação mostra que o método STAR-Clean representa a alternativa mais viável e eficiente para o cenário atual. Ele permite que as observações astronômicas prossigam sem comprometer dados valiosos, ao contrário das outras soluções que enfrentam barreiras políticas, financeiras e tecnológicas quase intransponíveis.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A poluição luminosa causada pelos satélites artificiais é um problema crescente que ameaça a qualidade das observações astronômicas. Diversas estratégias foram avaliadas para mitigar esse impacto, desde impedir novos lançamentos de satélites até mapear e desviar os telescópios das áreas afetadas.

O método STAR-Clean destaca-se como a solução mais prática e viável para lidar com o impacto dos rastros de satélites na astronomia contemporânea. Sua implementação imediata, aliada à capacidade de mitigar significativamente a

poluição luminosa, assegura a continuidade das pesquisas e a preservação da qualidade científica das imagens obtidas.

A implementação e o aprimoramento contínuo dessas ferramentas são cruciais para a preservação do céu noturno como patrimônio cultural da humanidade e para garantir que a crescente poluição luminosa causada por satélites não comprometa as futuras descobertas e avanços na astronomia. Assim, este projeto representa um passo importante na busca por soluções práticas e eficientes para um problema que afeta a comunidade científica global.

REFERÊNCIAS

BASSA, C. G., HAINAUT, O. R., & GALADÍ-ENRIQUEZ, D. (2022). Analytical simulations of the effect of satellite constellations on optical and near-infrared observations. *Astronomy & Astrophysics*, 657, A75. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142101>

HAINAUT, O. R., & WILLIAMS, A. P. (2020). Impact of satellite constellations on astronomical observations with ESO telescopes in the visible and infrared domains. *Astronomy & Astrophysics*, 636, A121. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037501>

KESSLER, D. J.; COUR-PALAIS, B. G. Collision frequency of artificial satellites: The creation of a debris belt. *Journal of Geophysical Research*, v. 83, n. A6, p. 2637-2646, 1978.

MILAZZO, M. P, RICHEY, C., PIATEK, J., VAUGHAN, A. & VENKATESAN, A. (2021) The Growing Digital Divide and its Negative Impacts on NASA's Future Workforce, Bull. Am. Astron. Soc. 53, 436.

National Research Council. (2012). *The Role of Satellites in Climate Change Research*. Washington, DC: The National Academies Press.

RAWLS, M. L. et al. (2020) Satellite Constellation Internet Affordability and Need, Res. Notes AAS 4, 189.

Satellite services and applications: A vital cornerstone of modern society. Disponível em:
<<https://connectivity.esa.int/news/satellite-services-and-applications-vital-cornerstone-modern-society>>. Acesso em: 04 jun. 2024

TYSON, J. A., et al. (2020). Mitigation of LEO satellite brightness and trail effects on the Rubin Observatory LSST. *The Astronomical Journal*, 160, 226.
<https://doi.org/10.3847/1538-3881/abba3e>

TYSON, J. A., et al. (2022). Mitigating satellite trails: a study of residual light after masking. *Astronomy and Computing*, 39.
<https://doi.org/10.1016/j.ascom.2022.100584>

VANCE, L.; MENSE, A. Value analysis for orbital debris removal. *Advances in Space Research*, v. 52, n. 4, p. 685-695, 2013.

WALKER, C., HALL, J., ALLEN, L., GREEN, R., SEITZER, P., TYSON, T., YOACHIM, P. (2020). Impact of Satellite Constellations on Optical Astronomy and Recommendations Toward Mitigations. *Bulletin of the AAS*, 52(2).
<https://doi.org/10.3847/25c2cfab.346793b8>

Regras

Referências são o conjunto de elementos que identificam as obras consultadas e citadas no texto. As referências devem ser apresentadas em uma única ordem alfabética, independentemente do suporte físico (livros, periódicos, publicações eletrônicas ou materiais audiovisuais) alinhadas à esquerda, em espaço simples, e espaço duplo entre elas.

Exemplos:

BARROS, Antônio de; Transformando verde em energia. 6^a Ed. São Paulo; p. 23-35. 2008.

BRASIL. Lei nº 9.394, Constituição Federal. Atividades agropecuárias, art. 187, § 1º. Brasília, 1988.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Rio de Janeiro: IBGE. 1990. Mapa físico do Brasil. Escala 1:50.000.

LIMA, Y. K.; FRONZA, M.; ALENCAR, P. T. Verificação da presença de amido em hortaliças produzidas em sistema hidropônico. Ciência e Tecnologia, vol. 88, n. 3. Campinas, SP, 2000.