

Framework Parametrizado no Blender para visualizações Didáticas do Espalhamento em Atmosferas Planetárias e Exoplanetárias

Parameterized Blender Framework for Didactic Visualizations of Scattering in Planetary and Exoplanetary Atmospheres

Raylan Ari Prestes^{*1}, Marcelo Emilio¹

¹Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brasil.

Recebido em 04 de março de 2026. Revisado em 27 de maio de 2026. Aceito em 29 de junho de 2026.

A diversidade de exoplanetas desafia o ensino de física e astronomia, pois exige transformar parâmetros observacionais e inferências físicas em representações visuais compreensíveis. Este trabalho tem como objetivo desenvolver, descrever e avaliar qualitativamente um *framework* parametrizado no Blender 5.0 para visualizar espalhamento em atmosferas planetárias e exoplanetárias. O método usa o *Cycles*, o modelo *Nishita Sky Texture*, volumes atmosféricos e nós procedurais. Os parâmetros controlam o tipo espectral da estrela, coeficientes RGB de espalhamento, densidade, altura de escala, aerossóis e fator de assimetria de Mie. Foram comparados cenários com estrelas dos tipos M, G e B, atmosferas de diferentes espessuras ópticas e composições inspiradas em Marte, Terra e Vênus. Os resultados mostram que o espectro estelar altera a iluminação global e a cor aparente do céu. Também mostram que a densidade e a altura de escala modificam o limbo, o terminador e a opacidade atmosférica. As simulações de pôr do Sol reproduzem qualitativamente as diferenças esperadas entre atmosferas dominadas por poeira, espalhamento molecular ou nuvens densas. Concluímos que o *framework* funciona como laboratório virtual acessível para explorar, qualitativamente, relações entre parâmetros físicos e fenômenos ópticos.

Palavras-chave: Exoplanetas, atmosferas planetárias, espalhamento atmosférico, ensino de óptica, laboratório virtual, Blender.

The diversity of exoplanets challenges physics and astronomy education because it requires transforming observational parameters and physical inferences into understandable visual representations. This work aims to develop, describe, and qualitatively evaluate a parameterized framework in Blender 5.0 for visualizing scattering in planetary and exoplanetary atmospheres. The method uses *Cycles*, the *Nishita Sky Texture* model, atmospheric volumes, and procedural nodes. Its parameters control stellar spectral type, RGB scattering coefficients, density, scale height, aerosols, and the Mie asymmetry factor. We compared scenarios illuminated by M-, G-, and B-type stars, atmospheres with different optical thicknesses, and compositions inspired by Mars, Earth, and Venus. The results show that the stellar spectrum changes the global illumination and the apparent sky color. They also show that density and scale height modify the limb, terminator, and atmospheric opacity. The sunset simulations qualitatively reproduce expected differences among dust-rich, molecular-scattering, and dense-cloud atmospheres. We conclude that the framework can serve as an accessible virtual laboratory for qualitatively exploring links between physical parameters and atmospheric optical phenomena.

Keywords: Exoplanets, planetary atmospheres, atmospheric scattering, optics education, virtual laboratory, Blender.

1. Introdução

Desde o final do século XX, com a descoberta do primeiro exoplaneta ao redor de uma estrela de tipo solar, o 51 Pegasi b [1], nossa capacidade de detecção, confirmação e caracterização de exoplanetas aumentou drasticamente, estabelecendo a exoplanetologia como parte significativa da astrofísica moderna. Com o surgimento de instrumentos como o Telescópio Espacial James Webb, grandes telescópios terrestres como Gemini e *Very Large Telescope*

(VLT), além de técnicas avançadas de processamento e análise de dados, somos capazes de caracterizar com crescente precisão propriedades físicas e, em um subconjunto selecionado de sistemas, investigar as composições e estruturas atmosféricas [2]. Dentre esses mundos, observamos um grau de diversidade significativamente maior do que o observado no Sistema Solar (p. ex., Super-Terras, Mini-Netunos, Júpiteres-Quentes).

A velocidade e a singularidade dessas descobertas reforçam a necessidade de divulgação e de educação científica (D&E) eficazes sobre exoplanetologia. O impacto da área na sociedade é inegável, como demonstram o crescimento do número de publicações, o engajamento com

*Endereço de correspondência: raytrix29@gmail.com

Editor-Chefe: Marcello Ferreira

projetos de ciência cidadã e o apoio à infraestrutura de pesquisa [3]. No entanto, a forma como os resultados das descobertas são comunicados ao público em geral é tão importante quanto a própria descoberta. Nesse contexto, um dos principais desafios da educação científica consiste em traduzir dados observacionais abstratos (espectros de transmissão, trânsitos planetários, curvas de fase, entre outros) em visualizações intuitivas e fisicamente motivadas, apoiadas nos princípios da transferência radiativa e do espalhamento atmosférico que influenciam a aparência desses objetos. Este trabalho aborda esse desafio por meio de um *framework* parametrizado no Blender, voltado a explorar, de forma didática e qualitativa, como parâmetros físicos de atmosferas planetárias e exoplanetárias se traduzem em efeitos visuais associados ao espalhamento da luz.

Apesar desse avanço científico, a forma como tais resultados são traduzidos visualmente ainda apresenta limitações significativas. A busca por representações fiéis esbarra em duas dificuldades principais: o grau variável de fundamentação física na construção de modelos e a limitação de recursos. Atualmente, a criação de representações de exoplanetas é feita de modo relativamente arbitrário, geralmente sem considerações detalhadas quanto a propriedades como a presença de atmosferas, nuvens, oceanos, variações de cor e do tipo da estrela hospedeira. Um exemplo de alta qualidade, mas que ainda assim apresenta algumas das limitações aqui discutidas, é o portal *Eyes on Exoplanets* (NASA/JPL [4]). Embora este recurso permita a exploração de sistemas planetários via navegador *web*, a necessidade de baixo custo computacional impõe simplificações que limitam o nível de detalhe das representações, resultando, por exemplo, na ausência de atmosferas volumétricas, de espalhamento atmosférico, de dinâmica orbital, de nuvens e de topografia.

Diante dessas limitações, torna-se necessário um ambiente que combine fundamentação física, flexibilidade computacional e acessibilidade. Nossa abordagem baseia-se no uso do Blender como ferramenta acessível para a construção de modelos didáticos e visualizações fisicamente motivadas, utilizando recursos de renderização fotorrealista como alternativa às representações puramente estilizadas frequentemente empregadas na divulgação científica. O Blender, sendo um *software* de código aberto e com vasta capacidade de renderização fotorrealista, é capaz de implementar modelos físicos necessários para representar de forma fisicamente plausível o comportamento da luz. Mais especificamente, este trabalho explora e reparametriza as funcionalidades *Nishita Sky Texture* e *Volumes* do Blender, baseadas em modelos cientificamente estabelecidos de espalhamento de Rayleigh e de Mie [5]. Essa implementação permite a criação de um *framework* acessível para representar, de forma fisicamente motivada, atmosferas volumétricas, variações de densidade e a cor do céu em diferentes cenários planetários e exoplanetários, reduzindo algumas das

simplificações presentes em ferramentas de visualização mais voltadas à exploração interativa.

A questão que orienta este estudo pode ser formulada da seguinte maneira: como traduzir parâmetros físicos associados a atmosferas planetárias e exoplanetárias em visualizações didáticas, parametrizadas e fisicamente motivadas no Blender? Para responder a essa questão, consideramos como parâmetros de entrada o tipo espectral e a temperatura efetiva da estrela hospedeira, a densidade atmosférica, a altura de escala, os coeficientes RGB de espalhamento, a presença de aerossóis e o fator de assimetria de Mie. Como efeitos visuais analisados, destacamos a cor aparente do céu, a opacidade atmosférica, a aparência do limbo e do terminador planetário e as diferenças qualitativas entre pôres do Sol em atmosferas distintas.

Visualizações não são apenas recursos ilustrativos, mas também instrumentos cognitivos que estruturam a interpretação de dados e a construção de significado científico. O uso do Blender em contextos científicos e educacionais não é isolado. Conforme exemplificado por Galindo [6], a ferramenta já demonstrou seu potencial como ambiente eficaz de visualização tridimensional e de renderização volumétrica aplicada à ciência, possibilitando a transformação de dados e de referências técnicas em experiências digitais imersivas com valor analítico e pedagógico. Embora o Blender tenha sido escolhido como ambiente principal deste trabalho, existem outros *softwares* e motores de renderização capazes de produzir imagens fisicamente baseadas, como LuxCoreRender, Mitsuba, pbrt e appleseed. Essas ferramentas oferecem recursos avançados de renderização e, em alguns casos, maior proximidade com códigos de pesquisa em transporte de luz. No entanto, o Blender foi adotado por combinar, em um único ambiente gratuito e de código aberto, modelagem tridimensional, materiais volumétricos, nós procedurais, iluminação, renderização por *path tracing*, interface gráfica acessível e ampla documentação. Essa integração torna a ferramenta particularmente adequada aos objetivos didáticos e de divulgação científica deste trabalho. Nesse mesmo sentido, a proposta de visualizar atmosferas de exoplanetas em ambientes tridimensionais dialoga com a concepção de divulgação científica apresentada por Bueno [7], ao recodificar conteúdos originalmente destinados à comunicação entre pares em representações acessíveis e contextualizadas para o público não especialista, ampliando sua participação no debate científico contemporâneo. Essa abordagem é particularmente relevante em contextos de ensino superior e de formação de professores, nos quais a visualização desempenha papel central na compreensão de fenômenos ópticos e radiativos.

À luz dessas contribuições, o objetivo principal deste artigo é desenvolver, descrever e avaliar qualitativamente um fluxo de trabalho no Blender para a geração de visualizações parametrizadas de atmosferas planetárias e exoplanetárias, voltadas principalmente ao Ensino

Superior e à divulgação científica. Como objetivos complementares, busca-se explicitar a relação entre parâmetros físicos e resultados visuais, discutir as limitações de um motor de renderização RGB e apresentar exemplos de uso didático do *framework*. O restante do artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 revisa os fundamentos teóricos do espalhamento de luz em atmosferas planetárias; a Seção 3 detalha a implementação do modelo de Nishita *et al.* [8] e o *framework* de parametrização no Blender; a Seção 4 apresenta exemplos de visualizações geradas para diferentes tipos de atmosferas e discute sua aplicação didática; e, por fim, a Seção 5 aborda nossas considerações finais do trabalho e aponta direções futuras. Ressalta-se que o presente estudo tem caráter teórico-metodológico e não inclui, nesta etapa, aplicação empírica com estudantes, professores ou em cursos de formação continuada.

2. Fundamentos Teóricos do Espalhamento Atmosférico

A aparência de um planeta, visto por um observador externo ou a partir de sua superfície, resulta diretamente da interação entre a radiação da estrela hospedeira e os constituintes do meio atmosférico. Esse processo é classicamente descrito pela teoria da transferência radiativa, que modela o transporte de energia em um meio capaz de absorver, emitir e espalhar radiação [9]. Nesse contexto, o espalhamento da luz desempenha papel central na construção de representações realistas, pois governa a redistribuição angular e espectral da radiação incidente, determinando o brilho aparente, o contraste e a coloração do céu e das nuvens.

A relevância física desse mecanismo é amplamente reconhecida. Como destacado por Rosa Junior *et al.* [10], o estudo do espalhamento por aerossóis constitui uma ferramenta conceitual fundamental para compreender a interação entre radiação e partículas atmosféricas. Ao mesmo tempo, a tradução desses formalismos em representações visuais intuitivas constitui um desafio didático e computacional. O espalhamento Rayleigh, cuja intensidade cresce com a quarta potência da frequência, fornece a base física para a coloração azul do céu terrestre [11]. Experimentos didáticos recentes demonstram que essa dependência espectral pode ser reproduzida e quantificada em laboratório com instrumentação acessível [12], reforçando a possibilidade de estender tais princípios a ambientes virtuais e simulações computacionais de atmosferas planetárias.

É justamente a partir dessa fundamentação física que estruturamos o modelo adotado neste trabalho. Consideramos o espalhamento atmosférico como a combinação de dois regimes principais, cuja distinção depende da relação entre o tamanho da partícula espalhadora (d) e o comprimento de onda incidente (λ). Quando $d \ll \lambda$, prevalece o regime de espalhamento de Rayleigh, tipicamente associado às moléculas de gás atmosférico.

Por outro lado, quando $d \approx \lambda$ ou $d > \lambda$, predomina o espalhamento de Mie, característico de aerossóis e de partículas de maior dimensão. Essa distinção física orienta tanto a parametrização do modelo quanto a implementação computacional das visualizações atmosféricas apresentadas neste estudo.

O modelo de céu e nuvem adotado neste trabalho baseia-se nas formulações apresentadas por Nishita *et al.* [8], que combinam os regimes de Rayleigh e de Mie. Essa formulação encontra-se implementada no Blender por meio da função-base *Nishita Sky Texture* e de funções semelhantes, quando o observador está na superfície do planeta. No entanto, neste trabalho, também reparametrizamos as seguintes funções para representar a atmosfera volumétrica vista por um observador externo, permitindo a exploração de cenários exoplanetários diversos.

Assim, o papel desta seção é estabelecer a ponte conceitual entre o problema investigado e a implementação computacional apresentada na seção seguinte. A transferência radiativa fornece o quadro físico geral para descrever a interação entre luz e atmosfera, enquanto os regimes de Rayleigh e de Mie definem os parâmetros que serão posteriormente traduzidos para o ambiente do Blender. Em particular, a dependência espectral do espalhamento, a variação radial da densidade atmosférica e a direcionalidade da função de fase constituem os elementos físicos centrais utilizados na parametrização visual do *framework*.

2.1. Espalhamento de Rayleigh

A intensidade da luz observada (I) devido ao espalhamento é drasticamente dependente do comprimento de onda da luz incidente, e é geralmente formulada da seguinte maneira [8]:

$$I(\lambda, \theta) = I_0(\lambda) K \rho F_r(\theta) \frac{1}{\lambda^4}, \quad (1)$$

em que $I_0(\lambda)$ é a intensidade da luz incidente, K é a constante de espalhamento molecular, que engloba a densidade molecular no nível do mar e o fator de despolarização, ρ é a densidade da atmosfera no ponto de espalhamento, $F_r(\theta)$ é a função de fase de Rayleigh, que indica a distribuição angular da luz espalhada, com θ sendo o ângulo de espalhamento (tipicamente $F_r(\theta) = \frac{3}{4}(1 + \cos^2 \theta)$). Fisicamente, para a luz não polarizada incidente, a proporcionalidade geométrica com $\cos^2 \theta$ decorre da radiação emitida por um dipolo elétrico induzido. Como um dipolo não irradia energia ao longo de seu próprio eixo de oscilação, o espalhamento atinge valores máximos nas direções frontal e de retroespalhamento (0° e 180°) e um mínimo nas direções perpendiculares (90°).

A densidade (ρ) é uma função da altitude, e em nossa formulação para um observador externo, ela é modelada utilizando um decaimento exponencial, levando em conta parâmetros como o raio do planeta (R_p) e a altura de

escala da atmosfera (H_0):

$$\rho = \rho_0 \exp\left(\frac{-(r - R_p)}{H_0}\right), \quad (2)$$

em que r é a distância radial até o centro do objeto esférico no Blender ($r = R_p + h$, em que h é a altitude) e ρ_0 é a densidade de referência no nível do mar. A altura de escala (H_0) representa a variação característica da densidade atmosférica, definida como a altitude em que a densidade decai em um fator e .

A dependência de I com $1/\lambda^4$ é o aspecto que colore o céu terrestre de azul durante o dia e de tons de alaranjado durante o pôr do Sol. Essa formulação permite que estudantes visualizem, de forma quantitativa, como a dependência espectral do espalhamento se traduz diretamente em variações de cor observáveis.

2.2. Espalhamento de Mie

O espalhamento de Mie é crucial na modelagem de aerossóis, poeira e, principalmente, as gotículas de água e cristais de gelo que formam as nuvens. Ao contrário do espalhamento de Rayleigh, a intensidade da luz espalhada no regime de Mie apresenta uma dependência fraca ou nula em relação ao comprimento de onda.

Em modelos computacionais, a intensidade da luz espalhada de Mie é semelhante a equação 1, no entanto, a função de fase neste regime é mais apropriadamente descrita pela função de Henyey-Greenstein F_{HG} [13]:

$$F_{HG}(\theta, g) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}}. \quad (3)$$

O parâmetro g varia de -1 (espalhamento totalmente para trás) a $+1$ (espalhamento totalmente para frente). Para nuvens e aerossóis terrestres, g geralmente assume valores positivos e elevados (p. ex., $g \approx 0.8$) [14], indicando um forte espalhamento para frente. Nesta formulação, o termo $(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}$ no denominador modela a acentuada anisotropia frontal causada por partículas grandes. Quando $g > 0$ e o ângulo θ se aproxima de zero, o denominador atinge seu valor mínimo, produzindo um pico agudo de intensidade direcional (frequentemente observado na natureza como a forte aura branca ao redor do Sol em dias de intensa névoa).

A parametrização deste fator no nosso *framework* permite simular o efeito visual de diferentes composições de nuvens e de aerossóis em exoplanetas. A distribuição de densidade dos aerossóis também decresce exponencialmente com a altitude, mas a taxa de decréscimo é diferente daquela das moléculas de ar. No regime de partículas maiores do que o comprimento de onda da luz incidente, a dependência do comprimento de onda presente na equação 1 se torna desprezível, e as cores do espalhamento adquirem um aspecto uniforme, voltado para o branco.

A Figura 1 mostra a distribuição angular do espalhamento, utilizando as funções de fase de Rayleigh e de

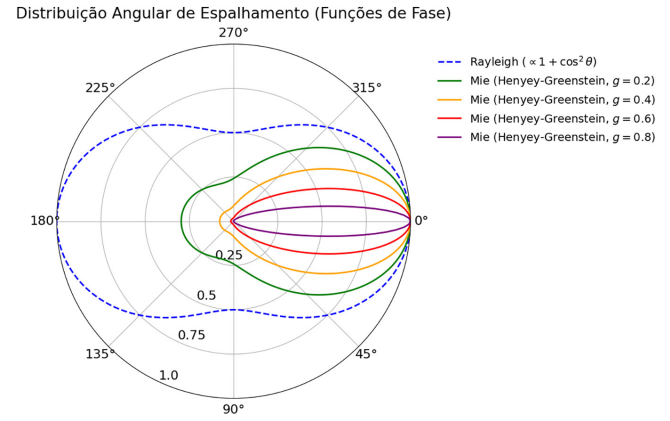


Figura 1: Comparação das funções de fase de espalhamento em coordenadas polares, assumindo a direção da luz incidente em $\theta = 0^\circ$. A curva tracejada azul representa a função de fase de Rayleigh (F_r), característica do espalhamento por moléculas muito menores que o comprimento de onda, com distribuição angular simétrica entre as direções frontal ($\theta = 0^\circ$) e de retroespalhamento ($\theta = 180^\circ$), e menor intensidade em torno de $\theta = 90^\circ$. As curvas sólidas representam a função de fase de Henyey-Greenstein, utilizada como aproximação para o espalhamento por aerossóis e partículas maiores, para diferentes valores do fator de assimetria g . O aumento de g de 0,0 para 0,8 evidencia a concentração progressiva da luz espalhada na direção frontal.

Henyey-Greenstein (no regime de espalhamento de Mie), para diferentes valores de g . A função de fase de Rayleigh apresenta uma simetria clara em torno de 90° , refletindo a mesma proporção de espalhamento para frente e para trás, enquanto a função de Henyey-Greenstein tende ao espalhamento para frente com o aumento do fator de assimetria g . Nessa figura, assumimos que a direção da luz incidente é 0° .

2.3. Path Tracing e a Implementação da Transferência Radiativa

Enquanto a Transferência Radiativa define as leis físicas que regem o transporte da luz em uma atmosfera, o *Path Tracing* (ou Traçado de Raios/Caminhos) é um algoritmo de renderização que aproxima numericamente o transporte de luz em ambientes tridimensionais, como no Blender, por meio do motor de renderização *Cycles*. No contexto deste trabalho, essa aproximação não deve ser interpretada como uma solução explícita da equação de transferência radiativa em sua forma espectral completa.

O *Path Tracing*, em essência, simula o caminho da luz como um processo estocástico ao rastrear múltiplos raios de luz desde o observador até as fontes. No contexto de superfícies, um feixe pode colidir e ser espalhado conforme as propriedades de reflexão, transmissão e absorção da superfície.

No contexto de volumes, o método *Volume Ray Marching* (ou Traçado de Raios Volumétrico) modifica

o *Path Tracing* tradicional para uma abordagem de amostragem sequencial do volume, baseada no caminho percorrido pelo raio. Uma revisão detalhada desses conceitos e da aplicação em motores gráficos pode ser encontrada em Pharr *et al.* [15].

A escolha do motor *Cycles* justifica-se por sua implementação baseada em *path tracing*, que permite estimar numericamente a atenuação óptica e as interações da luz ao longo de meios volumétricos por amostragem estocástica. Essa abordagem é mais adequada aos objetivos deste trabalho do que o motor *Eevee*, voltado à renderização em tempo real e baseado em aproximações de rasterização, que priorizam desempenho e interatividade, mas não oferecem o mesmo grau de consistência física na representação do espalhamento, da absorção e de múltiplas interações da luz em meios participantes.

3. Metodologia: Implementação do *Framework* Parametrizado no Blender

O desenvolvimento dos modelos de visualização de exoplanetas baseia-se na metodologia de geração procedural (criação algorítmica de texturas e geometrias), que permite a parametrização rápida e modular de cenários. Todos os modelos são criados utilizando uma escala geométrica reduzida (1 unidade Blender = 10.000 km físicos), garantindo estabilidade numérica e praticidade na manipulação; esse valor preserva a praticidade na manipulação de grandezas na interface do Blender e, ao mesmo tempo, apresenta um comportamento consistente na formação de imagens na câmera simulada. A metodologia apresentada aqui foi implementada utilizando a versão 5.0 do Blender.

Alguns elementos utilizados neste trabalho pertencem à estrutura nativa do Blender, enquanto outros correspondem à integração e à parametrização construídas pelos autores. O motor *Cycles*, os materiais volumétricos, os nós procedurais de ruído, a textura de céu baseada no modelo de Nishita e o nó *Blackbody* já fazem parte do ambiente do Blender. Esses recursos fornecem, respectivamente, a estimativa numérica do transporte da luz, a definição de meios volumétricos capazes de interagir com a radiação, a geração procedural de estruturas espaciais, a representação otimizada do céu atmosférico e a conversão aproximada de uma temperatura de corpo negro em valores RGB. A contribuição metodológica deste trabalho consistiu em integrar e reparametrizar esses recursos de modo a associá-los a grandezas físicas relevantes para atmosferas planetárias, tais como o raio do planeta, a altura de escala atmosférica, a densidade de referência, os coeficientes de espalhamento nos canais RGB, o fator de assimetria de Mie e a temperatura efetiva da estrela hospedeira.

3.1. Da informação observacional à parametrização visual

No contexto dos exoplanetas, a construção de uma visualização fisicamente motivada não deve ser entendida como uma reconstrução direta e única da aparência real do planeta. Na maior parte dos casos, os dados observacionais disponíveis fornecem parâmetros globais do sistema, tais como raio planetário, massa ou limite de massa, densidade média, período orbital, separação orbital, temperatura de equilíbrio e temperatura efetiva da estrela hospedeira. Esses parâmetros servem como ponto de partida para definir a escala geométrica do planeta, o tipo de iluminação estelar e a intensidade aproximada da radiação incidente no ambiente de renderização.

As propriedades atmosféricas, por sua vez, são geralmente mais incertas. Em alguns sistemas, observações espectroscópicas de trânsitos, eclipses secundários, emissão térmica ou curvas de fase permitem inferir a presença de determinadas moléculas, gradientes térmicos, nuvens, hazes ou aerossóis. No entanto, essas inferências dependem de modelos atmosféricos e podem apresentar degenerescências entre composição química, temperatura, cobertura de nuvens e propriedades de espalhamento. Por esse motivo, o *framework* proposto neste trabalho não pretende gerar imagens observacionalmente únicas de exoplanetas específicos, mas traduzir parâmetros físicos observáveis ou plausíveis em variáveis controláveis no Blender, permitindo explorar como mudanças no tipo espectral da estrela, na espessura óptica, na altura de escala, na densidade atmosférica e nos coeficientes de espalhamento alteram a aparência visual de uma atmosfera planetária.

3.2. Superfícies e Nuvens

O desenvolvimento de modelos tridimensionais de exoplanetas no Blender é feito por meio de métodos modulares, como, por exemplo, combinações de ruídos Perlin fractais [16]. Na Figura 2 apresentamos os principais passos na construção de um modelo 3D: começando pela definição da geometria (raio $[R_p]$, esfericidade, etc.), passando à combinação de padrões procedurais para criar continentes, oceanos, rios e calotas polares e, por fim, aplicando esses mesmos padrões como modulação de topografia.

As nuvens são modeladas pelos mesmos métodos procedurais. As texturas são aplicadas a um volume esférico sobreposto à superfície, que combina as funções de fase descritas na Seção 2, com maior foco na presença de aerossóis. Neste modelo, o padrão procedural é mapeado para controlar a densidade do volume, simulando a distribuição de nuvens. Adicionalmente, o Fator de Assimetria de Mie (g) (Seção 2.3) é ajustado para controlar a direcionalidade do espalhamento, definindo a aparência da nuvem (p. ex., nuvens mais claras e espalhadoras para frente com g alto). Na Figura 3 apresentamos a construção do modelo de nuvens volumétricas.

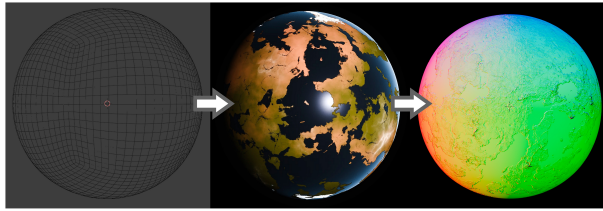


Figura 2: Da esquerda para a direita, temos a definição da geometria do planeta, a aplicação de texturas de ruído procedimentais para criar padrões e, por fim, a aplicação dessas texturas como modulação da topografia.

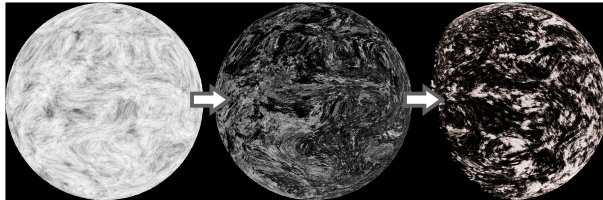


Figura 3: Da esquerda para a direita, temos a construção de um padrão base, a modulação desse padrão através da aplicação de ruídos de diferentes escalas e a utilização das texturas como controle da densidade do volume. Nesta visualização utilizamos uma superfície preta para facilitar a separação entre detalhes superficiais e nuvens.

3.3. Atmosfera

A atmosfera é construída por meio de uma segunda esfera sobreposta à superfície, à qual se associa um volume por meio do nó *Volume Scatter*. A densidade do volume foi parametrizada por uma distribuição radial do tipo exponencial, conforme a Equação 2, utilizando a Altura de Escala Molecular (H_0) para a componente Rayleigh e a Altura de Escala de Aerossóis (H_M) para a componente associada a aerossóis e partículas maiores. Já a direcionalidade do espalhamento de Mie foi controlada pelo fator de assimetria g , relacionado à função de fase de Henyey-Greenstein apresentada na Equação 3. Esses parâmetros foram explicitamente definidos por meio de *Math Nodes*. Além disso, uma textura Worley [17] é aplicada ao volume para simular as tênues descontinuidades de densidade que observamos como camadas na Terra. Na Figura 4 podemos observar a atmosfera sobre uma superfície preta, bem como uma visão rasante da atmosfera, que separa os regimes de espalhamento Rayleigh e Mie.

As equações apresentadas na Seção 2 não foram implementadas por meio de modificações no código-fonte do Blender. Elas foram utilizadas como modelo físico para orientar a construção dos materiais e a seleção dos parâmetros de entrada no editor de nós. Em particular, o decaimento exponencial da densidade atmosférica, expresso pela Equação 2, foi representado pela variação radial da densidade volumétrica do ar, controlada pela altura de escala adotada em cada experimento. De modo

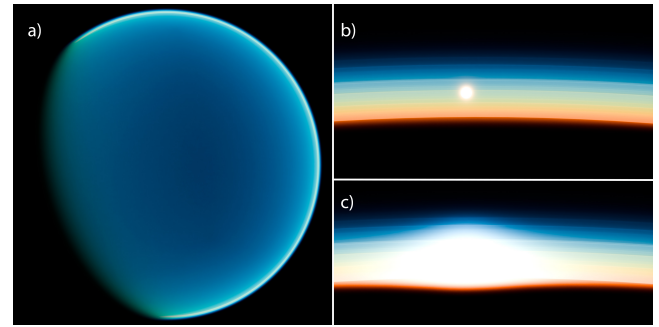


Figura 4: Atmosfera terrestre sobre uma superfície preta. Paineis: a) Visão externa da atmosfera, em que é possível observar os efeitos do espalhamento de Rayleigh e Mie, especialmente ao redor da linha do terminador e do limbo. Paineis b) e c): Visão rasante da atmosfera em direção a estrela com somente a componente de espalhamento Rayleigh ativada (b) e com a combinação total do espalhamento Rayleigh e Mie (c). O ponto de vista rasante foi obtido posicionando a câmera simulada dentro da atmosfera tangencialmente a superfície.

análogo, o fator de assimetria g , associado à função de fase de Henyey-Greenstein na Equação 3, foi utilizado para parametrizar a direcionalidade do espalhamento em volumes dominados por aerossóis e nuvens. Assim, o Blender não é empregado como um código espectral completo de transferência radiativa, mas como um ambiente de renderização fisicamente motivado, no qual as relações físicas relevantes são traduzidas em parâmetros de materiais, volumes e iluminação.

Uma consideração técnica importante na implementação deste *framework* diz respeito à natureza do motor de renderização. O Blender Cycles opera como um renderizador *tristímulus* (RGB) e não espectral, o que significa que os cálculos de transporte de luz são realizados em três faixas discretas de cor e não sobre um espectro contínuo. Consequentemente, a dependência λ^{-4} do espalhamento de Rayleigh não emerge automaticamente no Cycles a partir de uma descrição espectral contínua. Por isso, ela foi aproximada explicitamente por meio da definição dos coeficientes de espalhamento nos canais R, G e B. Essa limitação decorre do fato de que o modelo de dispersão espectral completo exigiria integração contínua ao longo do espectro, o que atualmente não é possível no Cycles padrão. Para reproduzir o espalhamento físico correto, é necessário definir explicitamente os coeficientes de espalhamento para os canais R, G e B, resultando em uma cor intrinsecamente azulada no caso terrestre. Neste trabalho, para fins de parametrização visual, associamos os canais R, G e B a comprimentos de onda representativos de aproximadamente 630 nm, 532 nm e 467 nm, respectivamente. A partir da dependência λ^{-4} , os coeficientes de espalhamento foram normalizados em relação ao canal azul, resultando em $R = 0,30$, $G = 0,59$ e $B = 1,0$. Essa característica também oferece flexibilidade para a exoplanetologia: para simular atmosferas com composições diferentes

daquela da Terra e que possivelmente espalham a luz com maior eficiência em cores que não o azul, podemos simplesmente redefinir diretamente a cor da atmosfera (os coeficientes de espalhamento, especialmente no caso do espalhamento por aerossóis e absorção) no editor de materiais, permitindo a representação visual imediata de composições atmosféricas teóricas.

3.4. Visualização na Superfície e Otimização

Para os experimentos que situam o ponto de vista do observador na superfície do planeta, o nosso *framework* adota uma abordagem complementar à modelagem esférica volumétrica descrita na Seção 3.3. Embora a abordagem volumétrica seja universal (funcionando tanto no espaço quanto na superfície), o custo computacional de resolver a equação de transporte de luz por toda a atmosfera esférica é elevado. Além disso, o nível de detalhe superficial, fino, quando consideramos uma modelagem do planeta como um todo, é limitado.

Para visualizações estritamente superficiais, podemos obter um nível de detalhe consideravelmente maior utilizando a implementação do modelo de Nishita aplicada como “Textura de Céu” (*Background*), que resolve as mesmas equações de espalhamento de Rayleigh e Mie de forma otimizada para um observador local. Neste contexto, utilizamos por praticidade a extensão *Physical Starlight and Atmosphere* (PSA) [18], que oferece uma interface avançada para reparametrizar o modelo de Nishita. Isso nos permite manter a consistência física dos experimentos (alterando as densidades de aerossóis, as cores da estrela e as alturas de escala) enquanto reduz drasticamente o tempo de renderização. O modelo PSA implementa numericamente as mesmas dependências físicas discutidas na Seção 2, porém com uma solução analítica otimizada para um observador local. Na Figura 5, demonstramos essa aplicação em um cenário de superfície, em que a interação da luz com a atmosfera e a superfície oceânica (procedural, feita com a extensão *Physical Open Water*) é preservada. Ressalta-se, contudo, que visando a acessibilidade universal deste laboratório virtual, todos os experimentos aqui apresentados

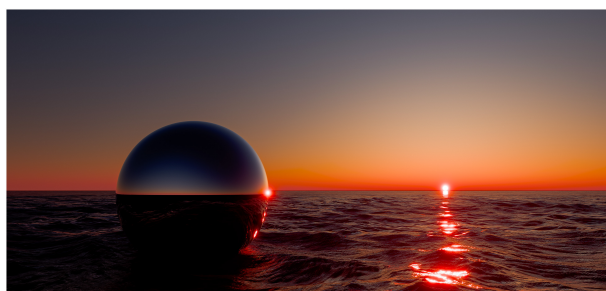


Figura 5: Paisagem oceânica utilizando o modelo atmosférico *Physical Starlight and Atmosphere*. Incluímos, à esquerda, uma esfera metálica na qual é possível observar o céu na direção oposta ao Sol, refletido na sua superfície.

podem ser reproduzidos utilizando apenas os métodos nativos do Blender, sem a dependência de extensões adicionais. Um arquivo de demonstração simplificado, contendo exclusivamente ferramentas nativas, é fornecido no repositório do projeto. Os resultados centrais associados ao espalhamento atmosférico, à variação da altura de escala, à densidade volumétrica, aos coeficientes RGB de espalhamento e ao tipo espectral da estrela podem ser reproduzidos com recursos nativos do Blender; as extensões PSA e *Physical Open Water* foram empregadas apenas como ferramentas auxiliares para otimizar ou refinar visualizações específicas de superfície.

4. Possíveis Experimentos

Esta seção apresenta propostas de experimentos didáticos e de divulgação científica que podem ser explorados com o *framework* desenvolvido. O objetivo é demonstrar como parâmetros físicos fundamentais alteram drasticamente a percepção visual de um ambiente planetário. Os valores numéricos indicados nos experimentos correspondem aos parâmetros utilizados nas cenas renderizadas e têm a função de tornar os cenários descritos mais reproduzíveis no *framework*. Em contextos educacionais, esses experimentos podem ser utilizados como atividades investigativas em disciplinas de Óptica, Física Moderna, Astronomia ou Astrofísica, permitindo discutir a diferença entre propriedades intrínsecas da matéria e propriedades emergentes da interação radiação-matéria. Exemplos de questões orientadoras incluem: por que o céu terrestre é azul, mas o pôr do Sol em Marte pode apresentar um halo azulado? Como a espessura óptica altera a aparência de um planeta visto do espaço? Como o tipo espectral da estrela hospedeira modifica a cor aparente do céu? Essas propostas não constituem, nesta etapa, uma sequência didática validada empiricamente, mas indicam possibilidades de uso educacional do *framework*.

4.1. O Impacto do Tipo Estelar

Um dos aspectos determinantes na aparência de um exoplaneta é o tipo espectral (e, consequentemente, a temperatura efetiva, T_{eff}) da estrela hospedeira. A cor que percebemos não é uma propriedade intrínseca da atmosfera, mas sim o resultado da convolução entre o espectro da luz incidente e as propriedades de espalhamento do meio.

Em nosso *framework*, a irradiância estelar é modelada por meio do nó *Blackbody* do Blender. Esta função converte uma temperatura de corpo negro em valores de cor RGB linear baseados na Lei de Planck, permitindo simular como diferentes classes estelares iluminam um mesmo planeta.

Nas Figuras 6 e 7, apresentamos os resultados dessa simulação para um planeta com atmosfera tipo-Terra orbitando três classes de estrelas distintas: uma anã vermelha (Tipo M, $T_{eff} \approx 2.500$ K), uma anã amarela



Figura 6: Planeta com atmosfera terrestre visto por um observador externo sob a luz de estrelas de três tipos espectrais distintos. Da esquerda para a direita: iluminação por estrela de tipo M ($T_{eff} \approx 2.500\text{ K}$), tipo G ($T_{eff} \approx 5.778\text{ K}$) e tipo B ($T_{eff} \approx 10.000\text{ K}$). Podemos notar que a cor aparente da superfície do planeta e a visibilidade da atmosfera variam conforme a disponibilidade de luz azul para o espalhamento.

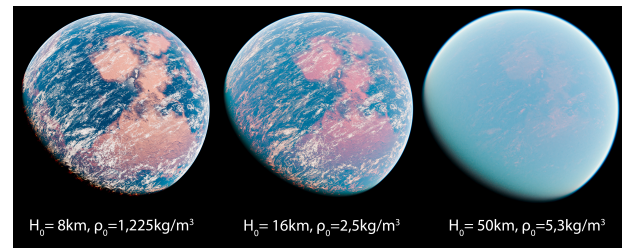


Figura 8: Comparação da aparência de um mesmo planeta para diferentes valores de altura de escala atmosférica H_0 e densidade de referência ρ_0 . Da esquerda para a direita, são mostradas uma atmosfera fina, com $H_0 = 8\text{ km}$ e $\rho_0 = 1,225\text{ kg/m}^3$; uma atmosfera intermediária, com $H_0 = 16\text{ km}$ e $\rho_0 = 2,5\text{ kg/m}^3$; e uma atmosfera espessa, com $H_0 = 50\text{ km}$ e $\rho_0 = 5,3\text{ kg/m}^3$.



Figura 7: Cenário oceânico (configuração da Figura 5) à luz de estrelas de três tipos espectrais distintos. Da esquerda para a direita: Tipo M ($T_{eff} \approx 2.500\text{ K}$), Tipo G ($T_{eff} \approx 5.778\text{ K}$) e Tipo B ($T_{eff} \approx 10.000\text{ K}$). A simulação demonstra como o “pôr do Sol” é drasticamente alterado pelo espectro estelar.

análoga ao Sol (Tipo G, $T_{eff} \approx 5.778\text{ K}$) e uma gigante azul Tipo B, $T_{eff} \approx 10.000\text{ K}$. Apresentamos as simulações tanto para um observador externo à atmosfera quanto para um localizado na superfície do planeta de acordo com as descrições da Seção 3.

Podemos perceber diretamente, nessas simulações, que a familiaridade do “céu azul” é quebrada ao alterarmos a fonte de luz. No caso da estrela do tipo M (painéis à esquerda), a baixa emissão de fótons em comprimentos de onda curtos (azuis) reduz a intensidade do espalhamento de Rayleigh. Mesmo que a atmosfera seja composta pelos mesmos gases da Terra, a ausência de luz azul incidente resulta em um céu mais escuro e em uma iluminação global avermelhada. Em contrapartida, sob a estrela do Tipo B (painéis à direita), a abundância de radiação ultravioleta e azul satura o espalhamento atmosférico, resultando em uma atmosfera brilhante e em uma coloração de superfície fria e intensa.

4.2. O Efeito da Espessura Óptica e da Extensão Atmosférica

A aparência de um planeta visto do espaço, particularmente na região do limbo e na linha do terminador, é crucialmente afetada pela espessura óptica total da

atmosfera. Essa propriedade é controlada pelos parâmetros de densidade de referência (ρ_0) e pelas alturas de escala, que determinam quão rapidamente a atmosfera se torna transparente à medida que a altitude aumenta (Equação 2).

Neste experimento, utilizamos nosso modelo volumétrico (Seção 3.3) para simular um planeta com uma atmosfera “fina” (altura de escala e densidade semelhantes às da Terra, aproximadamente $H_0 = 8\text{ km}$ e $\rho_0 = 1,225\text{ kg/m}^3$, respectivamente), uma atmosfera intermediária (altura de escala e densidade iguais a $H_0 = 16\text{ km}$ e $\rho_0 = 2,5\text{ kg/m}^3$) e uma atmosfera “espessa” (com parâmetros semelhantes a valores extremos observados em Titã: altura de escala e densidade iguais a $H_0 = 50\text{ km}$ e $\rho_0 = 5,3\text{ kg/m}^3$ [19, 20]). A Figura 8 apresenta os resultados destas simulações lado a lado.

A atmosfera “fina” apresenta um limbo mais nítido e uma linha do terminador mais bem definida, pois a luz é rapidamente extinta. Já a atmosfera “espessa” resulta em um limbo difuso e opaco, com uma camada mais ampla de espalhamento visível no terminador, demonstrando como a composição e a gravidade do planeta (que influenciam H_0 e H_M) moldam sua aparência. Este experimento é vital para educadores, pois ilustra o processo de atenuação da luz estelar, o qual é fundamental para a interpretação de espectros de transmissão.

4.3. Pôr do Sol em Diferentes Planetas

A cor do pôr do Sol é uma assinatura visual direta da composição atmosférica e da densidade do meio. Utilizando a flexibilidade de redefinição dos coeficientes de espalhamento RGB e da densidade no nosso *framework* (via extensão PSA), simulamos três cenários distintos para demonstrar como a química atmosférica altera a propagação da luz no horizonte, situação de maior caminho óptico. A Figura 9 apresenta o resultado comparativo baseado em [21]:

Marte (Painel Esquerdo): Simulamos uma atmosfera tênue, porém carregada de poeira (aerossóis de óxido

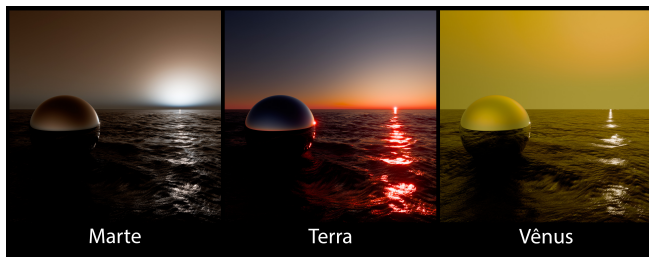


Figura 9: Simulação do pôr do Sol sob três condições atmosféricas distintas. Da esquerda para a direita: Marte, caracterizado por poeira em suspensão que gera um céu salmão com um halo azulado próximo ao Sol (espalhamento Mie frontal); Terra, caracterizada pelo avermelhamento do horizonte devido à extinção do azul (espalhamento Rayleigh); e Vênus, caracterizada por uma atmosfera densa e amarelada com luz altamente difusa.

de ferro). Definimos o espalhamento Mie com uma cor avermelhada/marrom. Um fenômeno notável reproduzido aqui é o “pôr do Sol Azul” marciano: devido ao forte espalhamento frontal (fator de assimetria g elevado) das partículas de poeira, a luz azul é concentrada num halo ao redor do disco solar, enquanto o restante do céu permanece em tons de salmão/marrom.

Terra (Painel Central): O cenário de controle, dominado pelo Espalhamento de Rayleigh. O longo caminho óptico da luz solar no horizonte extingue quase completamente os comprimentos de onda azuis e verdes, permitindo que apenas os tons vermelhos e laranjas iluminem a superfície e o oceano.

Vênus (Painel Direito): Simulamos uma atmosfera extremamente densa e espessa (H_M elevado), recoberta por nuvens de ácido sulfúrico. A alta densidade resulta em uma dispersão intensa que difunde a luz solar e a composição química filtra os azuis, resultando em uma iluminação global amarelada e uniforme, sem a distinção clara de cores no horizonte, como observada na Terra.

Como referência observacional qualitativa, a Figura 10 apresenta um pôr do Sol registrado em Marte pelo rover *Spirit*. A presença de uma região azulada nas proximidades do Sol fornece um exemplo observacional do tipo de efeito que o modelo busca reproduzir qualitativamente no painel marciano da Figura 9 [22].

Este experimento visual evidencia que, ao ajustar os parâmetros físicos no Blender, é possível reproduzir qualitativamente tendências observacionais conhecidas. O painel de Marte apresenta um halo azulado próximo ao Sol, compatível com o registro do rover *Spirit* mostrado na Figura 10 [22] e com simulações divulgadas pela NASA [21]. O painel da Terra reproduz o avermelhamento típico do horizonte, associado ao maior caminho óptico e à atenuação dos comprimentos de onda mais curtos. Já o painel de Vênus representa uma atmosfera densa e altamente difusiva, com iluminação global amarelada. Assim, a aparência simulada de um planeta não decorre de escolhas artísticas arbitrárias,



Figura 10: pôr do Sol em Marte observado pelo rover *Spirit* em 19 de maio de 2005, durante o sol 489 da missão, quando o Sol se punha sobre a borda da cratera Gusev. Crédito: NASA/JPL/Texas A&M/Cornell. Fonte: NASA [22].

mas de uma parametrização visual fisicamente motivada das interações entre luz e matéria atmosférica. Essa comparação deve ser entendida como uma verificação qualitativa de plausibilidade física, e não como uma validação fotométrica ou espectral completa.

5. Considerações Finais

Retomando a questão central deste estudo, a era da exoplanetologia trouxe consigo uma demanda crescente por ferramentas capazes de traduzir parâmetros observacionais e inferências físicas em experiências visuais compreensíveis. Neste trabalho, apresentamos um *framework* computacional baseado no *software* de código aberto Blender para a visualização qualitativa de atmosferas planetárias e exoplanetárias. A proposta atua como um laboratório virtual acessível a educadores e comunicadores científicos, permitindo explorar as relações entre parâmetros físicos e a aparência planetária, sem pretender substituir modelos atmosféricos espectrais completos.

Por meio da reparametrização dos modelos de *Nishita Sky Texture* e da aplicação de princípios de transferência radiativa e de espalhamento de luz nos regimes Rayleigh e Mie, mostramos que é possível construir visualizações que aproximam a representação artística de uma descrição fisicamente motivada, sem pretender substituir simulações atmosféricas espectrais completas. Os experimentos realizados ilustram a capacidade do método de reproduzir qualitativamente tendências ópticas esperadas, como a dependência da cor aparente do céu em relação ao tipo espectral da estrela hospedeira, as variações de opacidade em atmosferas de diferentes espessuras ópticas e as assinaturas visuais associadas a diferentes composições atmosféricas, exemplificadas pelos pores do Sol em Marte, na Terra e em Vênus.

Uma das principais contribuições deste estudo consiste em discutir o uso de um motor de renderização RGB, como o Blender Cycles, para fins didáticos e de visualização científica. Mostramos que, apesar de suas limitações inerentes por não operar em regime espectral contínuo, a parametrização cuidadosa dos coeficientes de espalhamento e absorção permite representar qualitativamente, de forma fisicamente motivada, aspectos do comportamento da luz em meios materiais com absorção e espalhamento. Tal abordagem favorece o acesso a visualizações fisicamente motivadas ao permitir a produção de imagens didáticas por meio de uma ferramenta de código aberto. Nesse sentido, o *framework* oferece uma alternativa prática para atividades de ensino e divulgação científica, sem substituir códigos especializados de simulação atmosférica, que em geral exigem maior custo computacional e conhecimento técnico específico. Entre as principais limitações do estudo, destacam-se o uso de uma aproximação RGB, a ausência de validação fotométrica ou espectral completa e a não realização, nesta etapa, de aplicação empírica com estudantes ou professores.

Como perspectiva futura, propõe-se a automatização da alimentação de dados no *framework*, possibilitando a incorporação direta de parâmetros orbitais e atmosféricos reais extraídos de bases públicas, como o *NASA Exoplanet Archive*, às variáveis do Blender. Essa integração permitiria a geração automatizada de cenários fisicamente consistentes para exoplanetas específicos, aproximando o ambiente de visualização da pesquisa observacional contemporânea. Além disso, a ampliação do método para a produção de animações de trânsitos planetários, curvas de fase e variações temporais atmosféricas, bem como sua integração com ambientes de Realidade Virtual (VR), apresenta potencial significativo para aprofundar a imersão e enriquecer as estratégias de ensino e de divulgação em astronomia.

Do ponto de vista educacional, o *framework* pode ser incorporado às disciplinas de Física Moderna, Óptica e Astrofísica, permitindo que os estudantes explorem, em um ambiente virtual controlado, os efeitos de parâmetros físicos sobre a aparência planetária. Ao articular o rigor conceitual da física com a flexibilidade da computação gráfica contemporânea, este trabalho reafirma a visualização científica não apenas como recurso ilustrativo, mas também como um instrumento ativo de ensino, investigação e modelagem.

Agradecimentos

Este trabalho contou com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), Código Financeiro 001, e da Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Paraná, por meio do Convênio PD&I nº 744/2025.

Disponibilidade de Dados

Todo o conjunto de dados que dá suporte aos resultados deste estudo foi disponibilizado em um Repositório de Dados:

- Nome do repositório: GitHub
- URL: <https://github.com/RaylanPrestes/BlenderEspalhamentoAtmosferico>
- Data do depósito: 3 de março de 2026

O repositório inclui os arquivos de cena do Blender, configurações de materiais, volumes atmosféricos, árvores de nós e parâmetros utilizados nas visualizações apresentadas, permitindo ao leitor inspecionar diretamente a implementação no ambiente do próprio *software*. Também são disponibilizadas instruções básicas para a reprodução das cenas e a adaptação dos parâmetros principais. Essa forma de disponibilização foi adotada porque a implementação do *framework* se baseia predominantemente em configurações visuais, materiais e nós do Blender, e não em códigos textuais extensos que pudessem ser reproduzidos adequadamente em um anexo impresso.

Para fins de referência, as imagens geradas para este artigo exigiram um tempo máximo de renderização de aproximadamente 20 minutos por cena, utilizando uma placa de vídeo dedicada NVIDIA RTX 2060. Esse valor deve ser entendido apenas como uma referência prática, pois o tempo de renderização depende da resolução da imagem, do número de amostras, da complexidade dos volumes atmosféricos e da capacidade do hardware utilizado. Em contextos de sala de aula, recomenda-se o uso de arquivos previamente preparados, resoluções reduzidas ou imagens já renderizadas, reservando a renderização completa para atividades demonstrativas ou para computadores com placa gráfica dedicada.

Referências

- [1] M. Mayor e D. Queloz, *Nature* **378**, 355 (1995).
- [2] E.M.R. Kempton e H.A. Knutson, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* **90**, 411 (2024).
- [3] H.J. Deeg, em: *Handbook of Exoplanets*, editado por H.J. Deeg e J.A. Belmonte (Springer, Cham, 2018).
- [4] NASA/Jet Propulsion Laboratory (JPL), *Eyes on Exoplanets*, disponível em: <https://eyes.nasa.gov/ap ps/exo/>, acessado em: 18/11/2025.
- [5] H.C. Van de Hulst e V. Twersky, *Physics Today* **10**, 28 (1957).
- [6] J.R.C. Galindo, *Passeio virtual ao primeiro observatório das Américas: uma proposta de divulgação científica utilizando computação gráfica*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Cabo de Santo Agostinho (2022), disponível em: <http://www.academicosdaanimacao.blog.br/2023/10/passeio-virtual-ao-primeiro.html?m=0>, acessado em: 02/03/2026.

- [7] W.C. Bueno, *Informação & Informação* **15**, 1 (2010).
- [8] T. Nishita, T. Sirai, K. Tadamura e E. Nakamae, em: *Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* (New York, 1993).
- [9] S. Chandrasekhar, *Radiative Transfer* (Courier Corporation, North Chelmsford, 2013).
- [10] A.C.P. Rosa Junior, J.J. Silva e A.S. Souza, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **47**, e20250243 (2025).
- [11] M.N. Rocha, T.G. Fujimoto, R.S. Azevedo e M. Muramatsu, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **32**, 3501 (2010).
- [12] I.J.O. Silva, A.L.P. Loss, A.L.P. Mendes, J.V. da Silva Izidorio, D.B. Martins, M.E.P.S. Silva, D.J.A. Pereira, M.T.L. Rodrigues, Y.B. Shimizu e D.S. Onório et al., *Revista Brasileira de Ensino de Física* **48**, e20250171 (2026).
- [13] L.G. Henyey e J.L. Greenstein, *Astrophysical Journal* **93**, 70 (1941).
- [14] J. Jendersie e E. d'Eon, Approximate Mie Scattering, disponível em: <https://research.nvidia.com/labs/rtr/approximate-mie/publications/approximate-mie-supplemental.pdf> (2023), acessado em: 25/11/2025.
- [15] M. Pharr, W. Jakob e G. Humphreys, *Physically Based Rendering: From Theory to Implementation* (Morgan Kaufmann, San Francisco, 2016), 3ed.
- [16] K. Perlin, em: *Proceedings of the 29th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* (New York, 2002).
- [17] S. Worley, em: *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* (New York, 1996).
- [18] M. Upitis e Physical Addons, *Physical Starlight and Atmosphere (Blender Add-on)*, disponível em: <https://www.physicaladdons.com/psa/>, acessado em: 27/11/2025.
- [19] S.M. Hörst, *Journal of Geophysical Research: Planets* **122**, 432 (2017).
- [20] S. Oleson, G. Landis e R. Lorenz, em: *2021 NASA Innovative Advanced Concepts Fall Symposium* (NASA, Washington, 2021), disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210021697>, acessado em: 03/03/2026.
- [21] NASA, *NASA Scientist Simulates Sunsets on Other Worlds*, disponível em: <https://www.nasa.gov/solar-system/nasa-scientist-simulates-sunsets-on-other-worlds/>, acessado em: 01/12/2025.
- [22] NASA/Jet Propulsion Laboratory, *Sunset on Mars*, disponível em: <https://www.nasa.gov/image-article/sunset-mars/>, acessado em: 26/05/2026.