COSMIC SHORELINE E A RETENÇÃO ATMOSFÉRICA EM EXOPLANETAS

Daniela Ciocchi Moreira (IC) e Adriana Benetti Marques Valio (Orientadora)

Apoio:PIVIC Mackenzie

RESUMO

A presença de uma atmosfera constitui um fator relevante para a investigação da habitabilidade de exoplanetas, mas sua caracterização direta ainda é limitada. Este estudo aplica a relação empírica da *cosmic shoreline* a uma amostra de 974 exoplanetas selecionados no *NASA Exoplanet Archive*, buscando analisar a relação entre a irradiação recebida com a gravidade do exoplaneta como fator associado à sua capacidade de retenção atmosférica. Para avaliar a distribuição dos exoplanetas da amostra em relação ao limite empírico, os objetos foram classificados de acordo com seus raios e analisados por meio de diagramas automatizados em Python, considerando sua velocidade de escape com insolação relativa assim como de alta energia (XUV). A releitura da *cosmic shoreline*, denominada EECS também foi utilizada para a comparação das duas métricas. A análise mostrou que a utilização da insolação XUV produz uma avaliação mais conservadora da retenção atmosférica em relação à insolação relativa, deslocando diversos objetos para regiões acima da *cosmic shoreline*. Sete potenciais planetas rochosos permaneceram abaixo da linha mesmo considerando a insolação XUV, destacando-se como objetos de interesse para estudos futuros. Também foram identificados gigantes gasosos posicionados acima do limite empírico, evidenciando limitações de sua aplicação isolada. Os resultados indicam que a *cosmic shoreline* pode ser utilizada como uma primeira aproximação para análises comparativas da retenção atmosférica, mas sua interpretação deve considerar outros mecanismos de escape atmosférico. A diferença entre a *cosmic shoreline* clássica e a EECS também sugere a possibilidade de investigar uma região de transição entre seus limites.

Palavras-chave: Exoplanetas. Retenção atmosférica. Cosmic shoreline.

ABSTRACT

The presence of an atmosphere is a relevant factor in the investigation of exoplanet habitability, but its direct characterization remains limited. This study applies the empirical cosmic shoreline relation to a sample of 974 exoplanets selected from the NASA Exoplanet Archive, aiming to investigate the relationship between received irradiation and planetary gravity as factors associated with atmospheric retention. To assess the distribution of the exoplanets in the sample relative to the empirical limit, the objects were classified according to their radii and analyzed using automated Python diagrams, considering escape velocity as a function of both relative insolation and high-energy (XUV) insolation. The reinterpretation of

the cosmic shoreline, referred to as the EECS, was also used to compare the two metrics. The analysis showed that the use of XUV insolation provides a more conservative assessment of atmospheric retention than relative insolation, shifting several objects to regions above the cosmic shoreline. Seven potential rocky planets remained below the line even when considering XUV insolation, standing out as objects of interest for future studies. Gas giants positioned above the empirical limit were also identified, highlighting limitations in its isolated application. The results indicate that the cosmic shoreline can be used as a first approximation for comparative analyses of atmospheric retention, but its interpretation should account for other atmospheric escape mechanisms. The difference between the classical cosmic shoreline and the EECS also suggests the possibility of investigating a transition region between their limits.

Keywords: Exoplanets. Atmospheric retention. Cosmic shoreline.

1. INTRODUÇÃO

Uma das mais notáveis curiosidades da humanidade consiste em desvendar se estamos sozinhos no Universo; por isso, dentro e fora da comunidade científica, é notório o vasto interesse gerado pela descoberta e caracterização de exoplanetas, planetas que orbitam estrelas distintas do Sol. O crescente número de exoplanetas identificados, associado ao desenvolvimento de métodos de detecção e caracterização cada vez mais precisos, tem ampliado significativamente as possibilidades de investigação sobre a ocorrência de ambientes potencialmente habitáveis no Universo.

Considerando que a emergência e a manutenção da vida na Terra resultaram da interação de múltiplos fatores físicos, químicos e ambientais (Camprubí et al., 2019), uma das buscas da astrobiologia (uma área interdisciplinar dedicada à investigação da origem, evolução e distribuição da vida na Terra e potencialmente no Universo) é encontrar ambientes planetários alternativos que detenham condições nas quais uma interação semelhante poderia ocorrer (Chyba e Hand, 2005). Dentre essas condições, a presença de uma atmosfera assume grande relevância, uma vez que a atmosfera terrestre desempenha funções fundamentais na manutenção das condições ambientais da superfície, contribuindo para a regulação da temperatura e do clima e para a composição química do ambiente, incluindo a presença de gases fundamentais para processos biológicos (Arndt e Nisbet, 2012). Assim, determinar se um planeta é capaz de manter um envelope atmosférico constitui um aspecto significativo para a investigação de sua potencial habitabilidade.

No entanto, a detecção de atmosferas em exoplanetas é uma tarefa desafiadora, uma vez que os sinais produzidos por suas atmosferas são muito pequenos em comparação à radiação proveniente de suas estrelas hospedeiras, e a atividade estelar assim como outras fontes de contaminação nas observações podem mascarar ou dificultar a interpretação dessas assinaturas (Deming e Seager, 2017). Diante dessas limitações, surge a necessidade de utilizar métodos complementares usando aproximações fundamentadas em propriedades físicas planetárias e estelares para estimar a capacidade de retenção atmosférica de exoplanetas.

A partir da análise de tendências observadas e mecanismos associados à perda e retenção atmosférica do Sistema Solar, Zahnle e Catling (2017) propuseram o conceito de *cosmic shoreline*, uma relação empírica que associa a radiação recebida por um corpo planetário à sua velocidade de escape para estimar sua capacidade de retenção atmosférica. Essa linha empírica permite avaliar, de maneira aproximada, a capacidade gravitacional do planeta para reter um envelope atmosférico diante da insolação recebida de sua estrela.

O presente estudo tem como objetivo aplicar a relação empírica da *cosmic shoreline* a uma amostra de exoplanetas que possuem os dados necessários disponíveis para calcular sua velocidade de escape e insolação, e assim posicioná-los abaixo ou acima do limite pressuposto para retenção atmosférica, fornecendo uma estimativa preliminar para posterior investigação no contexto da habitabilidade planetária.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A atmosfera de um planeta está sujeita a diferentes processos que alteram sua composição e abundância gasosa ao longo do tempo, incluindo mecanismos de escape atmosférico, que causam a perda desses gases (Gronoff et al., 2020). Assim, a presença de uma atmosfera em determinado momento não depende apenas de sua formação inicial, mas também das condições às quais o planeta foi submetido e da sua capacidade de mantê-la ao longo de sua evolução.

A capacidade de retenção atmosférica está relacionada às propriedades gravitacionais do planeta, uma vez que uma maior atração gravitacional dificulta a saída de partículas para o espaço (Raymond, 2023). A velocidade de escape, definida como a velocidade mínima necessária para que uma partícula escape do campo gravitacional de um corpo (Raymond, 2023) é utilizada para representar essa propriedade.

A exposição a diferentes níveis de irradiação também tem grande influência na evolução de uma atmosfera, uma vez que a energia proveniente da estrela está associada a processos capazes de remover partículas atmosféricas para o espaço (Gronoff et al., 2020). Essa irradiação pode ser expressa em termos de insolação relativa à recebida pela Terra, permitindo comparar os níveis de energia aos quais os planetas estão submetidos.

Entre as diferentes formas de radiação emitidas pelas estrelas, os raios X e o ultravioleta extremo, denominados conjuntamente como XUV, são particularmente relevantes para a perda atmosférica (Atri e Mogan, 2020). A emissão dessa radiação de alta energia é mais intensa nas fases iniciais da evolução estelar, quando a atividade da estrela é maior (Ribas et al., 2004). Assim, principalmente durante esse período, a perda atmosférica pode ser favorecida pela maior exposição à radiação XUV e atividade estelar. Nesse processo, destacam-se os mecanismos de fotoevaporação, na qual a absorção de radiação de alta energia aquece as camadas superiores da atmosfera e favorece o escape de partículas (Owen e Lai, 2018), e da ação dos ventos estelares, que correspondem a fluxos de partículas carregadas provenientes da estrela e podem contribuir para a remoção de partículas atmosféricas por meio de sua interação com a atmosfera planetária (Moore e Horwitz, 2007).

Buscando explorar a relevância da relação entre capacidade gravitacional de um planeta e sua irradiação estelar para a retenção atmosférica, o conceito de *cosmic shoreline*, introduzido por Zahnle e Catling (2017), propõe uma linha empírica a partir da observação dos objetos do Sistema Solar, que divide os objetos que possuem atmosferas dos que não possuem. Essa relação assume a lei de potência de $\boldsymbol{I} \propto \boldsymbol{v_{esc}^4}$, onde I é a insolação relativa do planeta e vesc é a sua velocidade de escape. A sua formulação não busca considerar individualmente todos os mecanismos envolvidos na manutenção de uma atmosfera, mas propor uma estimativa primária a partir da relação entre essas duas grandezas.

Uma abordagem mais recente desse conceito foi proposta por Meni-Gallardo e Pallé (2026), utilizando exoplanetas com dados de caracterização atmosférica para desenvolver uma nova linha empírica, denominada *Empirical Exoplanet Cosmic Shoreline* (EECS) que resulta em uma inclinação mais acentuada do limite em comparação à relação original. A aplicação de ambas as relações permite expandir a análise da capacidade de retenção atmosférica em exoplanetas.

3. METODOLOGIA

O estudo apresenta abordagem quantitativa, baseada no processamento e na análise de parâmetros físicos e orbitais de uma amostra de exoplanetas. Nesta seção, são apresentados os critérios de seleção da amostra e os procedimentos utilizados para o cálculo da velocidade de escape, luminosidade estelar, insolação relativa, insolação XUV e densidade. Posteriormente, são apresentadas as relações da *cosmic shoreline* clássica e da EECS, utilizadas para avaliar a posição dos exoplanetas em relação aos respectivos limites empíricos de retenção atmosférica. Por fim, são descritos os critérios adotados para a classificação dos exoplanetas de acordo com seus raios. Todos os procedimentos de processamento e cálculo dos dados, bem como a elaboração dos diagramas apresentados nos resultados, foram automatizados por meio da linguagem de programação Python.

3.1. Seleção de dados

Foram selecionados, a partir da base de dados *NASA Exoplanet Archive*, exoplanetas cuja detecção tenha sido realizada pelo método de trânsito que apresentassem dados disponíveis de massa, raio, semi-eixo maior, temperatura efetiva da estrela hospedeira e raio estelar, utilizando os filtros disponíveis na plataforma para a seleção desses parâmetros. A seleção considerou os dados disponíveis em 21 de julho de 2026. Após a obtenção da amostra, foram excluídos exoplanetas que apresentassem dados incompletos ou incertezas

excessivas, bem como aqueles com massa superior a 10 massas de Júpiter ou densidade igual ou superior a 10 g/cm³ (esta última calculada posteriormente a partir dos parâmetros de massa e volume), a fim de restringir a amostra a objetos com parâmetros adequados à análise. Com a aplicação de todos os critérios de seleção, a amostra final foi composta por 974 exoplanetas.

3.2. Velocidade de escape

A velocidade de escape de cada exoplaneta foi calculada a partir da equação:

$$v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Eq. 1

em que $G = 6,67430 \times 10^{-11}\ m^3\ kg^{-1}\ s^{-2}$, correspondente à constante gravitacional, M à massa do exoplaneta e R ao seu raio. O resultado obtido em m/s foi posteriormente convertido para km/s.

3.3. Luminosidade estelar

A luminosidade da estrela hospedeira foi determinada a partir de seu raio e de sua temperatura efetiva, utilizando a equação:

$$L_* = 4\pi R_*^2 \sigma T_*^4$$

Eq. 2

em que L_* corresponde à luminosidade da estrela, R_* ao seu raio e T_* à sua temperatura efetiva, enquanto $\sigma = 5.67\ x\ 10^{-8}\ W\ m^{-2}\ K^{-4}$ correspondente à constante de Stefan-Boltzman.

3.4. Insolação relativa

A insolação relativa de cada exoplaneta foi determinada a partir da luminosidade de sua estrela hospedeira e de seu semi-eixo maior, em relação à insolação recebida pela Terra. Para isso, foi utilizada a equação:

$$I = \frac{L_*}{L_\odot} \cdot \left(\frac{a_\oplus}{a}\right)^2$$

Eq. 3

onde $\boldsymbol{L_*}$ corresponde à luminosidade da estrela hospedeira (Eq. 2), $\boldsymbol{L_\odot}$ à luminosidade do Sol, $\boldsymbol{a_\oplus}$ ao semi-eixo maior da Terra, correspondente a 1 UA, e $\boldsymbol{a}$ ao semi-eixo maior do exoplaneta, em UA.

3.5. Insolação XUV

A insolação XUV recebida por cada exoplaneta foi estimada a partir da luminosidade de sua estrela hospedeira e da distância orbital, utilizando a relação com a Terra, dada pela equação (Zahnle e Catling, 2017):

$$I_{xuv} = \left(\frac{a_\oplus}{a}\right)^2 \left(\frac{L_*}{L_\odot}\right)^{0.4}$$

Eq. 4

3.6. Densidade

A densidade dos exoplanetas foi determinada a partir de suas massas e volumes. O volume de cada exoplaneta foi calculado conforme a equação:

$$\boldsymbol{V = \frac{4}{3}\,\pi r^3}$$

Eq. 5

em que r corresponde ao raio do planeta. A partir do volume obtido, a densidade planetária foi obtida pela relação entre massa e volume:

$$\rho = \frac{M}{V}$$

Eq. 6

3.7. Relação de cosmic shoreline

A relação da *cosmic shoreline* é expressa pela seguinte lei de potência:

$$I \propto v_{esc}^{4}$$

Eq. 7

Para a construção da linha empírica clássica utilizada neste estudo, foi adotada uma inclinação = 4, no gráfico log x log. Marte foi utilizado como ponto de referência para a ancoragem da linha, a partir de seus valores de insolação e velocidade de escape (Meni-Gallardo e Pallé, 2026).

3.8. Empirical Exoplanet Cosmic Shoreline (EECS)

A releitura da *cosmic shoreline* proposta por Meni-Gallardo e Pallé (2026) estabelece uma relação denominada de EECS, expressa por:

$$log_{10} I_{xuv} \approx 5.77\, log_{10} v_{esc} - 4.35$$

Eq. 8

Onde a linha apresenta uma inclinação de aproximadamente 5,77 e utiliza o exoplaneta 55 Cnc e como ponto de ancoragem. Neste estudo, a EECS foi aplicada à amostra de exoplanetas em conjunto com a *cosmic shoreline* clássica, com o objetivo de comparar a posição dos planetas segundo as duas relações empíricas e investigar possíveis diferenças em relação aos respectivos limites de retenção atmosférica.

3.9. Classificação planetária

Para a classificação dos exoplanetas de acordo com seu raio, foi adotada como referência a distribuição de raios de pequenos planetas descrita por Fulton et al. (2017), que identificaram uma lacuna na distribuição de raios planetários, denominada *Fulton gap*, aproximadamente entre 1,5 e 2,0 R⊕, com concentração de planetas em torno de 1,3 R⊕ e

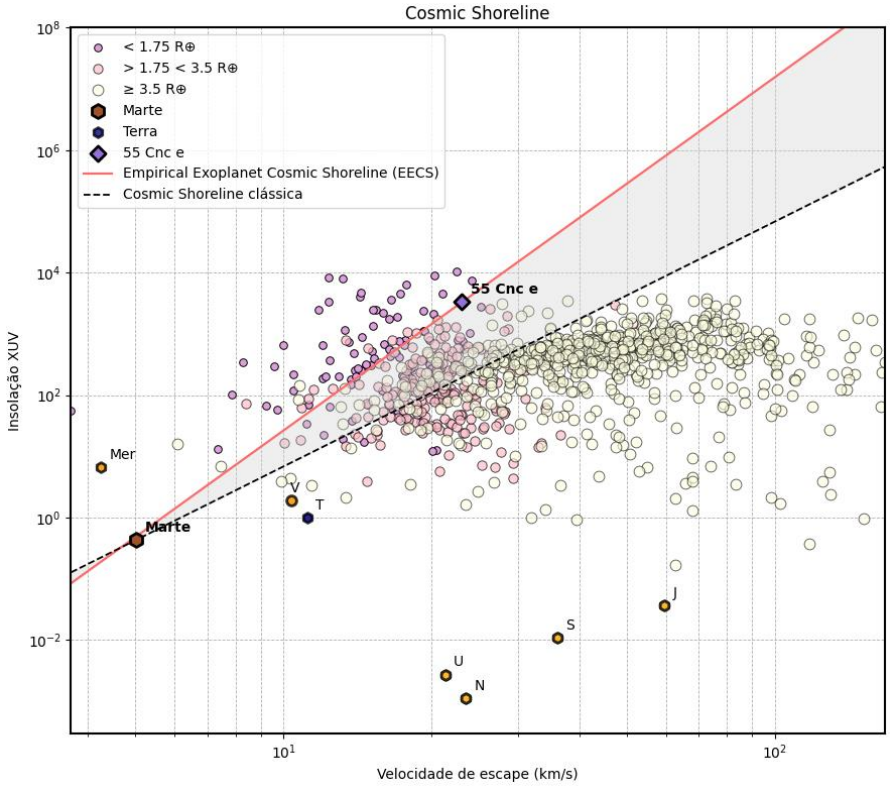
2,4 R⊕. Com base nessa distribuição, os exoplanetas com raios entre 1 a 1,75 R⊕ foram classificados como Super-Terras, enquanto aqueles com raios entre 1,75 e 3,5 R⊕ foram classificados como Sub-Netunos. Para os exoplanetas da base de dados com raios iguais ou superiores a 3,5 R⊕, foi adotada a classificação de gigantes gasosos, exclusivamente para fins de organização e análise da amostra.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Os resultados foram analisados por meio de diagramas que relacionam a velocidade de escape dos exoplanetas à insolação recebida, permitindo avaliar sua distribuição em relação à *cosmic shoreline* e investigar tendências associadas à retenção atmosférica.

A Figura 1 apresenta a distribuição da amostra completa em função da velocidade de escape e da insolação XUV. A linha tracejada preta representa a *cosmic shoreline* clássica (Zahnle e Catling, 2017), enquanto a linha vermelha representa a EECS (Meni-Gallardo e Pallé, 2026). Os planetas do Sistema Solar são identificados por suas iniciais e utilizados como referência comparativa. A comparação entre a *cosmic shoreline* clássica e a EECS evidencia diferenças nos respectivos limites empíricos, resultando em uma região na qual determinados exoplanetas apresentam classificações diferentes de acordo com a relação considerada. Neste estudo, essa região foi destacada como uma possível zona de transição entre regimes de retenção e perda atmosférica. Essa delimitação é proposta como uma abordagem exploratória e não constitui um novo limite empírico ou uma fronteira física estabelecida.

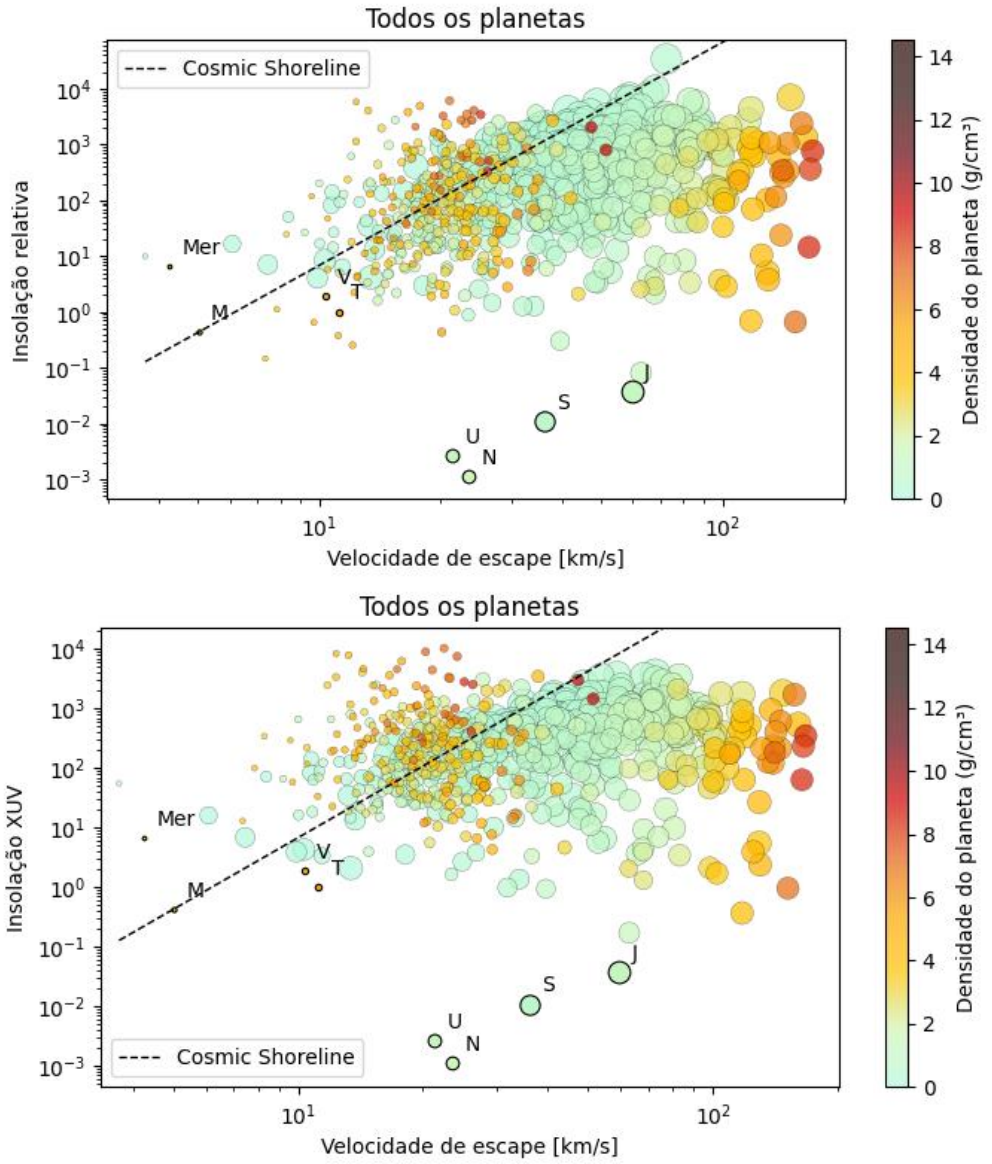
Figura 1: Insolação XUV em função da velocidade de escape para todos os exoplanetas. A linha vermelha representa a EECS enquanto a *cosmic shoreline* clássica está plotada como a linha preta tracejada. A região intermediária é destacada como uma possível zona transitória.



Fonte: Daniela Ciocchi

Para o próximo conjunto de diagramas, também foi considerada a amostra completa de exoplanetas, juntamente com os planetas do Sistema Solar como referência comparativa. A velocidade de escape foi relacionada à insolação relativa e à insolação XUV, respectivamente, para a análise dos planetas apenas em relação à *cosmic shoreline* clássica (Figura 2). O tamanho dos marcadores é proporcional ao raio planetário, enquanto sua coloração representa a densidade planetária, conforme a escala indicada, permitindo visualizar possíveis gradientes e tendências na distribuição dessa propriedade ao longo dos diagramas.

Figura 2: Insolação relativa à da Terra (painel superior) e insolação XUV (painel inferior) em função da velocidade de escape para todos os planetas, representados de acordo com seu raio pelo tamanho e densidade pela cor.



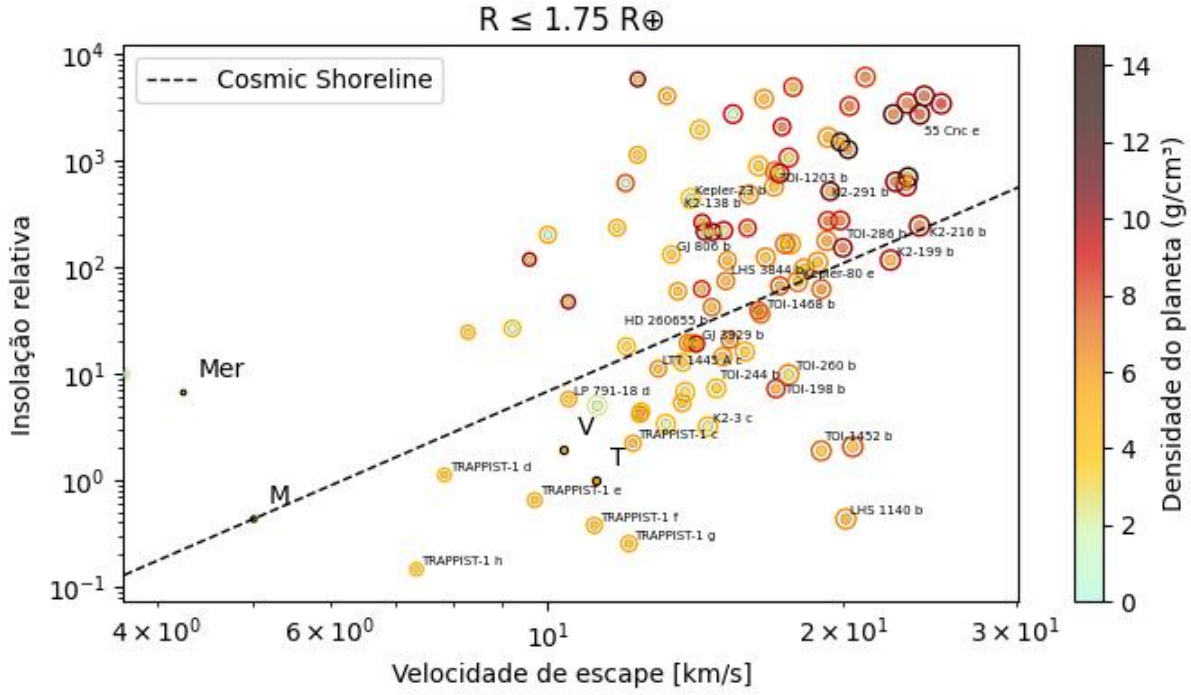
Fonte: Daniela Ciocchi

Para aprofundar a análise das tendências observadas na amostra completa, os exoplanetas foram isolados de acordo com as classes estimadas a partir de seus raios, permitindo avaliar separadamente a distribuição de potenciais planetas terrestres, Sub-Netunos e gigantes gasosos. Essa divisão possibilita investigar se a relação entre velocidade de escape, insolação e densidade apresenta comportamentos distintos entre as diferentes populações planetárias.

Para esta etapa da análise, além da coloração dos marcadores segundo a densidade planetária, foi incorporada uma representação das incertezas associadas a essa propriedade. O núcleo interno de cada marcador corresponde ao limite inferior da densidade calculada, enquanto o halo externo representa seu limite superior, ambos determinados a partir das incertezas associadas à massa planetária. Essa representação permite visualizar a amplitude das incertezas de densidade diretamente nos diagramas, de modo que uma maior diferença entre as cores do núcleo e do halo indica um intervalo de incerteza mais amplo, enquanto cores semelhantes indicam uma menor variação estimada da densidade.

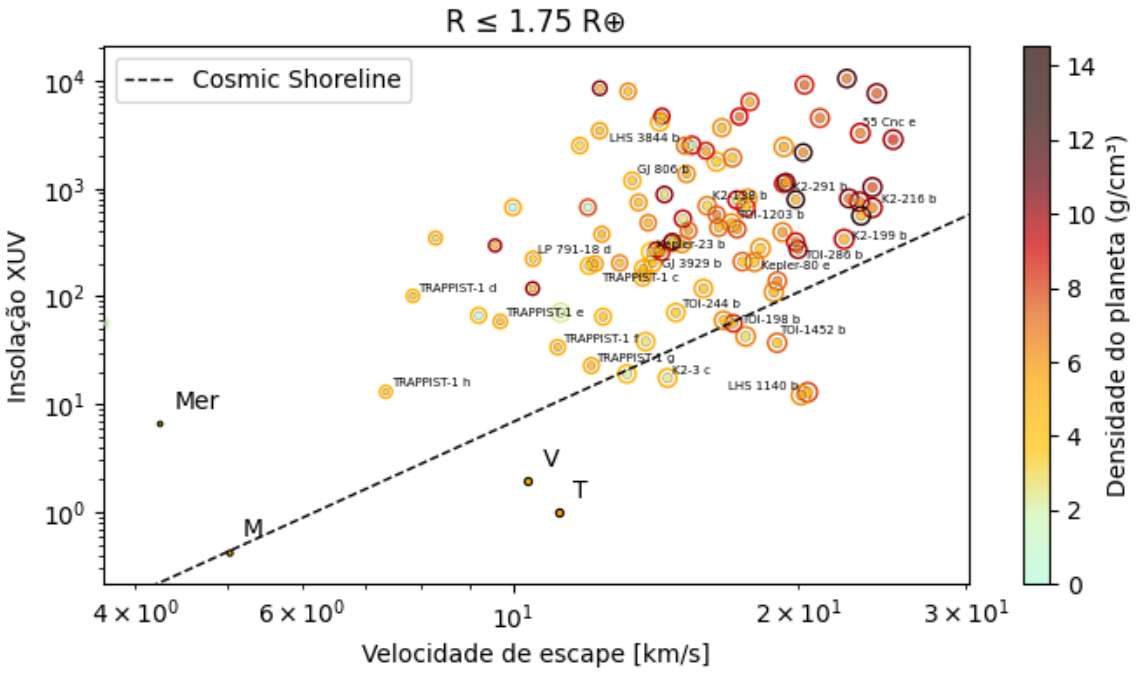
Os primeiros a serem analisados foram os exoplanetas classificados como potenciais rochosos (Figuras 3 e 4). Alguns objetos foram identificados apenas para facilitar a visualização de suas posições em relação à *cosmic shoreline*, sem seguir um critério específico para essa seleção.

Figura 3: Insolação relativa à Terra versus velocidade de escape para planetas rochosos.



Fonte: Daniela Ciocchi

Figura 4: Insolação XUV versus velocidade de escape para planetas rochosos.



Fonte: Daniela Ciocchi

A distribuição desses objetos permite observar diferenças na posição relativa à linha conforme o parâmetro de insolação considerado. Ao utilizar a insolação relativa, uma parcela maior dos exoplanetas se encontra abaixo da linha, configurando uma análise mais otimista desses objetos em comparação àquela obtida utilizando a insolação de alta energia, que desloca a análise para uma condição mais conservadora quanto à capacidade de retenção de atmosferas.

Entre os potenciais planetas rochosos analisados, sete exoplanetas permanecem abaixo da *cosmic shoreline* clássica mesmo quando considerada a insolação XUV, utilizada neste estudo como uma abordagem mais conservadora para a avaliação da retenção atmosférica. Isso os torna particularmente relevantes para investigações posteriores sobre a presença e retenção de atmosferas. Os dados desses objetos são apresentados na Tabela *1*.

Tabela 1

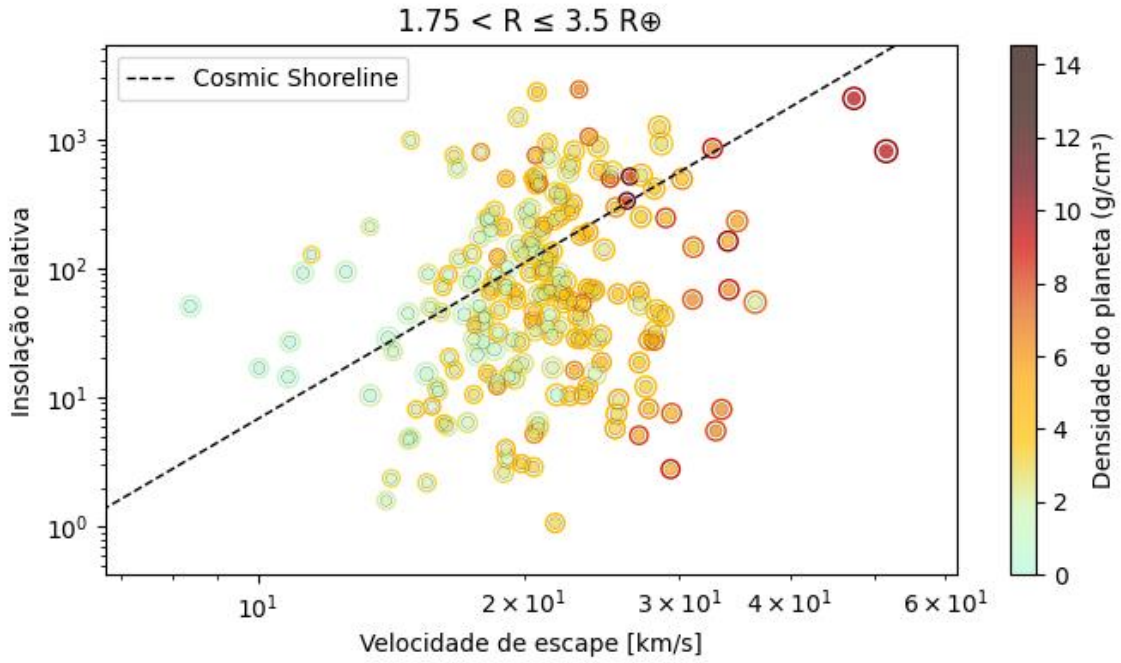
Exoplaneta	Raio (R⊕)	Massa (M⊕)	Semi-eixo maior (UA)
LHS 1903 e	1,732	5,79	0,151
LHS 1140 b	1,730	5,60	0,095
TOI-260 b	1,710	4,23	0,094
TOI-1452 b	1,672	4,82	0,061
K2-3 c	1,582	2,68	0,136
Kepler-138 d	1,510	2,10	0,129
TOI-198 b	1,360	3,17	0,067

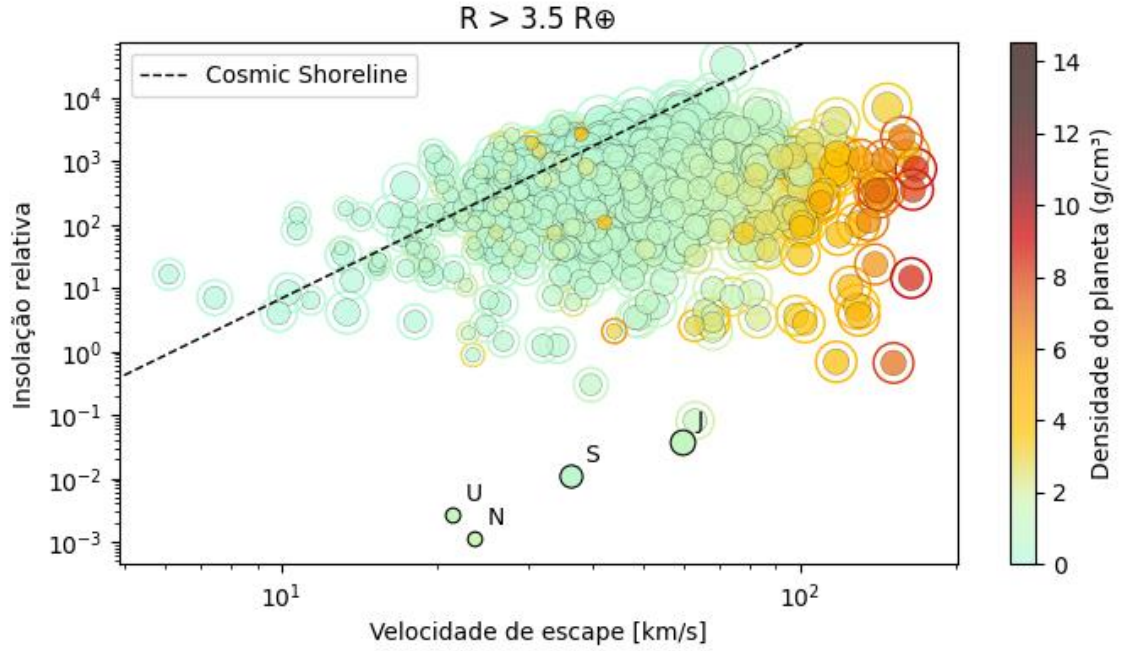
Fonte: Daniela Ciocchi

A mesma abordagem foi aplicada na criação dos diagramas dos exoplanetas classificados como Sub-Netunos e gasosos. Como pode ser observado nas Figura *5* e *Figura* **6**, algumas características são inesperadas, principalmente entre os planetas com raios superiores a 3,5 R⊕. Notam-se diversos planetas com características compatíveis com a composição esperada para planetas gasosos, como grandes raios e baixas densidades, que se encontram acima da linha de retenção atmosférica. Ao analisá-los isoladamente, foi possível concluir que todos esses objetos apresentam pequenas distâncias orbitais, com semi-eixo maior em geral consideravelmente inferior a 0,3 UA, estando submetidos a níveis muito elevados de insolação. Isso sugere a necessidade de considerar outros fatores e mecanismos de escape atmosférico para uma interpretação melhor.

Além desses objetos, os resultados revelam diversos gigantes gasosos com densidades excepcionalmente elevadas, significativamente diferentes do esperado para um planeta dessa classe. Esses resultados atípicos motivaram a análise dos trabalhos de descoberta desses planetas, os quais indicam que suas propriedades físicas e mecanismos de formação ainda apresentam questões em aberto, tornando-os objetos que se distinguem do comportamento predominante esperado para a classe.

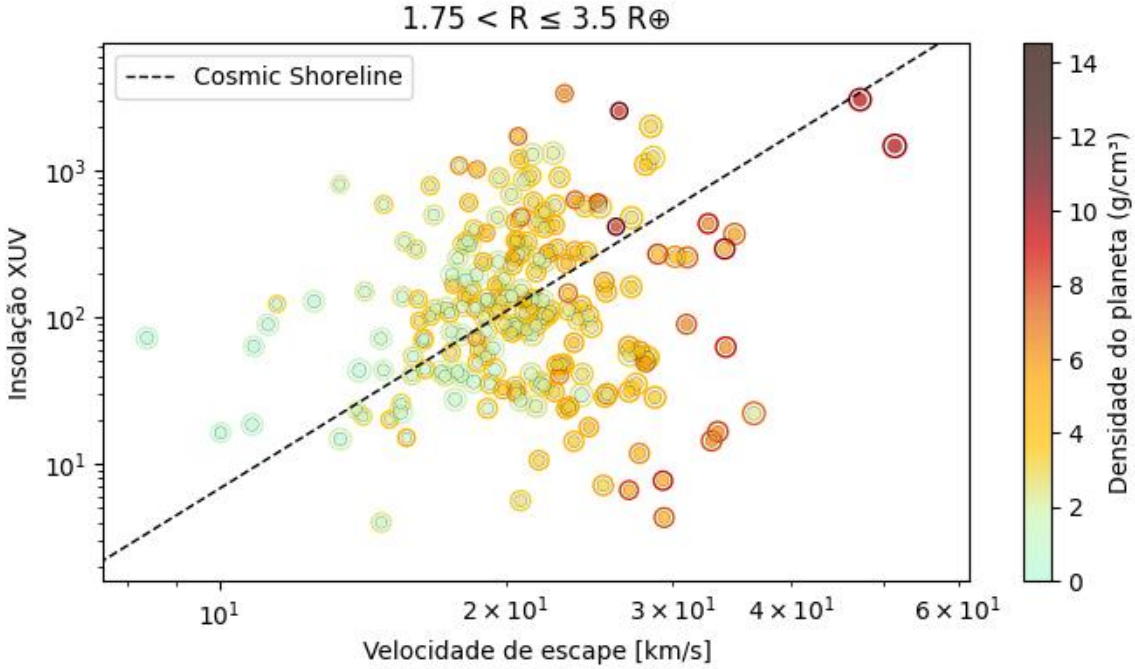
Figura 5: Insolação relativa à Terra versus velocidade de escape para Sub-Netunos (painel superior e gigantes gasosos (painel inferior).

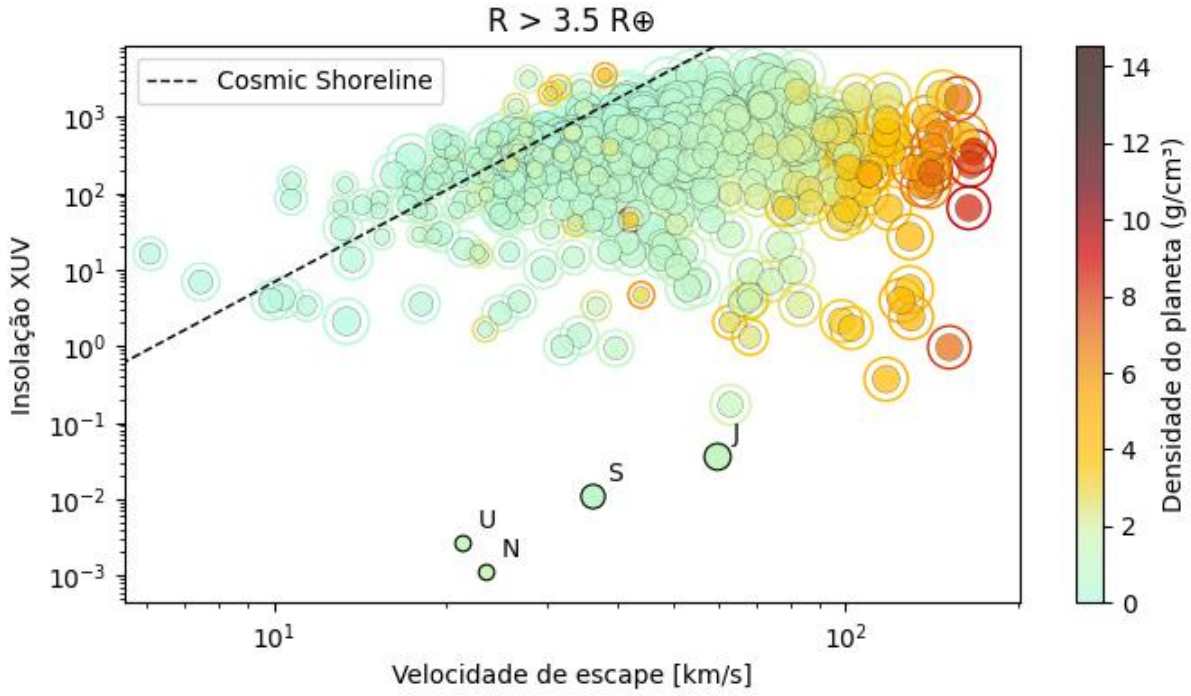




Fonte: Daniela Ciocchi

Figura 6*:* Insolação XUV versus velocidade de escape para Sub-Netunos (painel superior) e gigantes gasosos (painel inferior).





Fonte: Daniela Ciocchi

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A relação empírica da *cosmic shoreline* foi aplicada a uma amostra de 974 exoplanetas, permitindo analisar sua distribuição e investigar tendências relacionadas à retenção atmosférica. A divisão da amostra de acordo com o raio planetário possibilitou comparar diferentes populações e identificar características particulares entre potenciais planetas rochosos, Sub-Netunos e gasosos. A representação da densidade e de suas incertezas permitiu avaliar como essa propriedade se relaciona com os parâmetros de velocidade de escape, evidenciando ainda objetos que se distinguem das tendências esperadas da amostra.

A comparação entre a insolação relativa e a insolação XUV ressaltou que a escolha do parâmetro de irradiação influencia significativamente na posição dos exoplanetas em relação à *cosmic shoreline*. A consideração da radiação XUV, por representar uma parcela de alta energia da radiação estelar associada a processos de escape atmosférico, resultou em uma avaliação mais conservadora da capacidade de retenção atmosférica, deslocando diversos objetos para regiões acima do limite empírico. Entre os potenciais planetas rochosos, foram identificados sete exoplanetas que permaneceram abaixo da *cosmic shoreline* mesmo quando considerada a insolação XUV, constituindo objetos de particular interesse para investigações posteriores sobre retenção atmosférica.

A análise também revelou comportamentos que evidenciam as limitações de uma aplicação simples da relação empírica. Foram identificados gigantes gasosos posicionados acima da *cosmic shoreline* apesar de apresentarem características físicas compatíveis com planetas predominantemente gasosos, resultados que reforçam que a posição de um exoplaneta em relação à *cosmic shoreline* não deve ser interpretada isoladamente como uma confirmação da presença ou ausência de atmosfera, uma vez que diferentes propriedades planetárias e estelares e mecanismos de escape podem influenciar a retenção atmosférica.

A aplicação conjunta da *cosmic shoreline* clássica e da EECS destacou diferenças entre os limites obtidos pelas duas relações e permitiu identificar uma região na qual a classificação dos exoplanetas depende da relação adotada. A partir dessa diferença, propõe-se de forma exploratória a consideração de uma região de transição entre os dois limites em trabalhos futuros, em lugar da interpretação de uma única linha como fronteira rígida entre retenção e perda atmosférica. Essa região poderia abranger objetos em diferentes estágios de evolução atmosférica ou submetidos a condições não contempladas pela lei de potência, constituindo uma possibilidade para estudos posteriores que incorporem de maneira mais abrangente os múltiplos fatores envolvidos na retenção e no escape atmosférico.

Dessa forma, os resultados obtidos indicam que a *cosmic shoreline* constitui uma ferramenta útil como primeira aproximação para a análise comparativa de grandes amostras de exoplanetas, especialmente quando a caracterização atmosférica direta é limitada. Entretanto, sua interpretação deve considerar as limitações inerentes a uma estimativa baseada em parâmetros planetários e de irradiação. A comparação entre modelos de escape atmosférico pode contribuir para refinar essa abordagem e estabelecer critérios mais refinados para a investigação da retenção atmosférica e, consequentemente, para a caracterização de exoplanetas no contexto da habitabilidade planetária.

6. REFERÊNCIAS

ARNDT, N. e NISBET, E. **Processes on the Young Earth and the Habitats of Early Life**. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, v. 40, 521-549, 2012. https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105316

ATRI, D. e MOGAN, S. **Stellar Flares Versus Luminosity: XUV-Induced Atmospheric Escape and Planetary Habitability**. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 500, L1-L5, 2021. https://doi.org/10.1093/mnrasl/slaa166

CAMPRUBÍ, E. et al. **The Emergence of Life**. Space Science Reviews, v. 215, 49, 2019. https://link.springer.com/article/10.1007/s11214-019-0624-8

CHYBA, C. e HAND, K. **Astrobiology: The Study of the Living Universe**. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, v. 43, 31-74, 2005. https://doi.org/10.1146/annurev.astro.43.051804.102202

DEMING, L. e SEAGER, S. **Illusion and reality in the atmospheres of exoplanets**. Journal of Geophysical Research: Planets, v. 122, 53-75, 2016. https://doi.org/10.1002/2016JE005155

FULTON, B. et al. **The California-Kepler Survey. III. A Gap in the Radius Distribution of Small Planets**. The Astronomical Journal, v. 154, 109, 2017. https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa80eb

GRONOFF, G. et al. **Atmospheric Escape Processes and Planetary Atmospheric Evolution**. Journal of Geophysical Research: Space Physics, v. 125, 2020. https://doi.org/10.1029/2019JA027639

MENI-GALLARDO, P. e PALLÉ, E. **An empirical determination of the Cosmic Shoreline**. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 550, 12, 2026. https://arxiv.org/abs/2508.12865

MOORE, T. e HORWITZ, J. **Stellar ablation of planetary atmospheres**. Reviews of Geophysics, v. 45, 2007. https://doi.org/10.1029/2005RG000194

OWEN, J. e LAI, D. **Photoevaporation and high-eccentricity migration created the sub-Jovian desert**. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 479, 5012-5021, 2018. https://doi.org/10.1093/mnras/sty1760

RAYMOND, S. **Escape Velocity**. Encyclopedia of Astrobiology, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-662-65093-6_532

RIBAS, I et al. **Evolution of the Solar Activity Over Time and Effects on Planetary Atmospheres: I. High-Energy Irradiances (1-1700 A)**. The Astrophysical Journal, v. 622, 680-694, 2005. https://doi.org/10.1086/427977

ZAHNLE, K. e CATLING, D. **The Cosmic Shoreline: The Evidence that Escape Determines which Planets Have Atmospheres, and what this May Mean for Proxima Centauri B**. The Astrophysical Journal, v. 843, 122, 2017. https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/aa7846/meta

Contatos: dani_ciocchi@hotmail.com e adriana.valio@mackenzie.br