

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**  
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

**MILLENA CASTRO GUIMARÃES**

**Estudo da dinâmica orbital no Processo de Envelhecimento do Asteroide (162173) Ryugu**

Guaratinguetá  
2023

**Millena Castro Guimarães**

**Estudo da dinâmica orbital no Processo de Envelhecimento do Asteroide (162173) Ryugu**

Trabalho de Pós-Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Pós-Graduação em Física e Astronomia da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Mestre em Física e Astronomia .

Orientador: Profa. Dra. Rosana Aparecida Nogueira de Araújo

Coorientador: Prof. Dr. Othon Cabo Winter

Guaratinguetá

2023

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| G963e | <p>Guimarães, Millena Castro</p> <p>Estudo da dinâmica orbital no processo de envelhecimento do Asteróide (162173) Ryugu / Millena Castro Guimarães – Guaratinguetá, 2023.</p> <p>54 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 43-47</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023.</p> <p>Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Rosana Aparecida Nogueira de Araújo</p> <p>Coorientador: Prof. Dr. Othon Cabo Winter</p> <p>1. Asteróides - Órbitas. 2. Sistema solar. 3. Planetas - Órbitas. I. Título.</p> <p>CDU 523.44(043)</p> |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**MILLENA CASTRO GUIMARÃES**

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“MESTRE EM FÍSICA”**

**PROGRAMA: FÍSICA  
CURSO: MESTRADO**

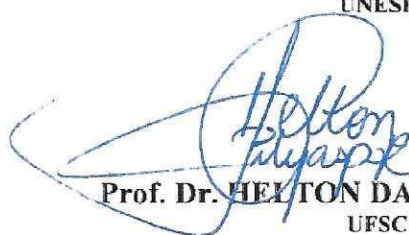
**APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

  
**Prof. Dr. Ernesto Vieira Neto**  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
**Profa. Dra. ROSANA APARECIDA NOGUEIRA DE ARAUJO**  
Orientador - UNESP

  
**Profa. Dra. DANIELA CARDOZO MOURÃO**  
UNESP

  
**Prof. Dr. HELTON DA SILVA GASPAR**  
UFSC

*ABRIL de 2023*

## **DADOS CURRICULARES**

### **MILLENA CASTRO GUIMARÃES**

**NASCIMENTO** 23/05/1998 - São Roque / SP

**FILIAÇÃO** Luís Carlos Guimarães  
Eliana de Castro Guimarães

**2021 / 2022** Mestre em Física e Astronomia  
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP

**2018 / 2021** Graduação em Bacharel em Física  
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos aos meus orientadores Rosana e Othon, pelo aprendizado adquirido, ensinamentos, pela orientação e incentivo em todo o processo de pesquisa. Gostaria de agradecer à minha família pelo apoio nesses dois anos, em especial aos meus pais. Aos meus amigos que fiz durante esses anos de graduação e de mestrado, em especial ao André, o Júlio e o Kelvin, que estiveram ao meu lado nos momentos difíceis e também os mais especiais. Sem a ajuda de todas essas pessoas e organizações, este trabalho não teria sido possível.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. E esta pesquisa tornou-se possível graças aos recursos computacionais disponibilizados pelo Núcleo de Computação Científica (NCC/GridUNESP) da Universidade Estadual Paulista (UNESP).

Este trabalho contou com o apoio da(s) seguinte(s) entidade(s):

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior

## RESUMO

A investigação das propriedades físicas e químicas de pequenos corpos celestes, como os asteroides, é essencial para entender a história do Sistema Solar. Estes corpos podem ter experienciado altas temperaturas ao longo de sua evolução orbital, bem como, o efeito do envelhecimento espacial, modificando assim sua composição superficial. Essas alterações podem ter sido causadas por fatores termais, tais como, o aquecimento radiativo e/ou radiação solar durante encontros próximos com o Sol. O atual trabalho tem como objetivo estudar a evolução orbital e termal passada do asteroide Ryugu, o qual foi alvo da missão de retorno de amostra Hayabusa2 da JAXA, relacionando também com o tempo de exposição de sua superfície ao ambiente espacial. Para a análise da evolução orbital de Ryugu foram realizadas integrações numéricas do problema gravitacional de N-corpos. Como sua provável origem é o cinturão principal, na região sujeita à ação da ressonância secular  $\nu_6$ , foram geradas 29.000 partículas-teste partindo da vizinhança desta região. Houve a verificação de quais partículas chegaram nos arredores da órbita atual de Ryugu, as quais foram chamadas de clones de Ryugu. Foi então realizada uma análise estatística dos possíveis encontros próximos de Ryugu com o Sol, a qual indicou que esses eventos são improváveis. Na investigação das temperaturas que o corpo atingiu ao longo de sua vida, em decorrência da dinâmica orbital, os dados apontaram o baixo índice de temperaturas elevadas, tendo uma média estimada de temperatura máxima superficial de 263,51°C. Por fim, a verificação do grau de envelhecimento revelou-se elevada, indicando que é altamente provável que Ryugu tenha sido afetado pelo envelhecimento espacial, tendo, assim, sua superfície alterada em decorrência desse processo.

**PALAVRAS-CHAVE:** 162173 Ryugu; Envelhecimento espacial; Termofísica; Dinâmica orbital.

## ABSTRACT

The investigation of the physical and chemical properties of small bodies, such as asteroids, is essential to the understanding of the history of the Solar System. These bodies may have experienced high temperatures along their orbital evolution, as well as, the space weathering action, which can modify their superficial composition. These alterations may have been caused by thermal factors, such as radioactive heating and/or solar radiation during close encounters with the Sun. The present work aims to study the past orbital and thermal evolution of the asteroid Ryugu, which was the target of the Hayabusa2 sample return mission by JAXA, related to the exposure time of its surface to the space environment. Numerical integrations of the N-body gravitational problem were performed in order to analyze the orbital evolution of Ryugu. As the most likely origin of Ryugu is the main asteroid belt, subject to the action of the secular resonance  $\nu_6$ , they were generated 29,000 test particles starting in the vicinity of this region. The verification was then made to see which particles arrived in the vicinity of the current orbit of Ryugu, which were called Ryugu's clones. A statistical analysis was carried out on the possible close encounters of the asteroid with the Sun, resulting in the observation of only a few such events. The investigation of the temperatures that the body reached during its lifetime, as a result of its orbital dynamics, indicated a low index of high temperatures, with a median of  $263.51^{\circ}C$ . Finally, the time of exposure to the space weathering action on Ryugu's surface was found to be high. This indicates that it is quite probable that Ryugu was affected by space weathering, resulting in alterations to its surface due to this process.

**KEYWORDS:** 162173 Ryugu; Space weathering; Thermophysics; Orbital Dynamics.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|           |                                                                                                                                                                         |    |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1  | Representação das órbitas dos NEAs                                                                                                                                      | 15 |
| Figura 2  | Processos que envolvem o envelhecimento espacial                                                                                                                        | 17 |
| Figura 3  | Ilustração esquemática da evolução da superfície de Ryugu                                                                                                               | 23 |
| Figura 4  | Condições iniciais das partículas-teste na vizinhança da ressonância $\nu_6$                                                                                            | 27 |
| Figura 5  | Evolução Orbital em relação à distância ao longo do tempo                                                                                                               | 31 |
| Figura 6  | Histograma da distância mínima                                                                                                                                          | 32 |
| Figura 7  | Temperatura superficial em função da distância heliocêntrica                                                                                                            | 34 |
| Figura 8  | Temperatura superficial em função da distância heliocêntrica                                                                                                            | 35 |
| Figura 9  | Temperatura máxima do clone 3917 - Região 3 - $\delta_1$                                                                                                                | 35 |
| Figura 10 | Temperatura Máxima dos clones                                                                                                                                           | 37 |
| Figura 11 | Tempo equivalente a uma distância de 1 UA para os clones                                                                                                                | 40 |
| Figura 12 | Elementos Orbitais de Ryugu. Integrador: <i>Hybrid</i> . Tempo de integração: 1000 anos, passo de integração: 10 dias, <i>integrator changeover</i> : 3 raios de Hill   | 49 |
| Figura 13 | Elementos Orbitais de Ryugu. Integrador: <i>Hybrid</i> . Tempo de integração: -1000 anos, passo de integração: 10 dias, <i>integrator changeover</i> : 3 raios de Hill  | 50 |
| Figura 14 | Semieixo maior de Ryugu. Integrador: <i>Hybrid</i> . Tempo de integração: -1000 anos, passo de integração: 10 dias, <i>integrator changeover</i> : 3 raios de Hill      | 50 |
| Figura 15 | Elementos Orbitais de Ryugu. Integrador: Bulirsch-Stoer (BS). Tempo de integração: -200 anos, passo de integração: 10 dias                                              | 51 |
| Figura 16 | Elementos Orbitais de Ryugu. Integrador: <i>Hybrid</i> . Tempo de integração: -200 anos, passo de integração: 0,5 dia, <i>integrator changeover</i> : 3 raios de Hill   | 51 |
| Figura 17 | Semieixo maior de Ryugu. Integrador: <i>Hybrid</i> . Tempo de integração: -1000 anos, passo de integração: 0,5 dia, <i>integrator changeover</i> : 0,5 raio de Hill     | 51 |
| Figura 18 | Elementos Orbitais de Ryugu. Integrador: <i>Hybrid</i> . Tempo de integração: -1000 anos, passo de integração: 0,5 dia, <i>integrator changeover</i> : 0,5 raio de Hill | 52 |
| Figura 19 | Elementos Orbitais de Ryugu. Integrador: <i>Hybrid</i> . Tempo de integração: -1000 anos, passo de integração: 1 dia, <i>integrator changeover</i> : 0,5 raio de Hill   | 52 |
| Figura 20 | Elementos Orbitais de Ryugu. Integrador: <i>Hybrid</i> . Tempo de integração: -1000 anos, passo de integração: 2 dias, <i>integrator changeover</i> : 0,5 raio de Hill  | 53 |
| Figura 21 | Elementos Orbitais de Ryugu. Integrador: <i>Hybrid</i> . Tempo de integração: -1000 anos, passo de integração: 5 dias, <i>integrator changeover</i> : 0,5 raio de Hill  | 53 |
| Figura 22 | Semieixo maior de Ryugu. Integrador: <i>Hybrid</i> . timestep - 2 dias, changeover - 0,5 raio de Hill, 2000 anos                                                        | 54 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Dados orbitais e físicos de Ryugu - Época: 21/01/2022                                                           | 22 |
| Tabela 2 – Intervalos de semieixo maior e inclinação orbital que caracterizam as regiões da<br>ressonância secular $\nu_6$ | 27 |
| Tabela 3 – Número de Clones                                                                                                | 30 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|        |                                             |
|--------|---------------------------------------------|
| BS     | Bulirsch-Stoer                              |
| CCs    | Condritos carbonáceos                       |
| Fe     | Ferro                                       |
| JAXA   | Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial |
| Ma     | Milhões de anos                             |
| MAB    | Main Asteroid Belt                          |
| MARA   | MASCOT radiometer                           |
| MASCOT | Mobile Asteroid Surface Scout               |
| MOID   | Minimum orbital intersection distance       |
| NEAs   | Near-Earth Asteroids                        |
| NECs   | Near-Earth Comets                           |
| NEOs   | Near-Earth Objects                          |
| NIRS3  | Espectrômetro de infravermelho próximo      |
| OC     | Ordinary chondrites                         |
| PHA    | Potentially Hazardous Asteroid              |
| PHOs   | Potentially Hazardous Objects               |
| UA     | Unidade astronômica                         |
| UNESP  | Universidade Estadual Paulista              |
| YORP   | Yarkovsky–O’Keefe–Radzievskii–Paddack       |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|         |                             |
|---------|-----------------------------|
| $a$     | Semieixo maior              |
| $e$     | Excentricidade              |
| $i$     | Inclinação orbital          |
| $q$     | Periélio                    |
| $Q$     | Afélio                      |
| $\nu$   | Letra grega Ni              |
| $\nu_6$ | Ressonância secular Ni seis |
| $H$     | Magnitude absoluta          |
| $r$     | Distância heliocêntrica     |

## SUMÁRIO

|          |                                                                 |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>                                               | <b>12</b> |
| <b>2</b> | <b>NEAS - NEAR-EARTH ASTEROIDS</b>                              | <b>14</b> |
| <b>3</b> | <b>ENVELHECIMENTO ESPACIAL</b>                                  | <b>17</b> |
| <b>4</b> | <b>RYUGU</b>                                                    | <b>21</b> |
| <b>5</b> | <b>METODOLOGIA</b>                                              | <b>26</b> |
| 5.1      | Condições Iniciais                                              | 26        |
| 5.2      | Integrações Numéricas                                           | 28        |
| 5.3      | Análise de dados                                                | 29        |
| <b>6</b> | <b>EVOLUÇÃO ORBITAL</b>                                         | <b>30</b> |
| 6.1      | Encontros com o Sol                                             | 31        |
| <b>7</b> | <b>TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE</b>                                | <b>33</b> |
| <b>8</b> | <b>GRAU DE ENVELHECIMENTO ESPACIAL</b>                          | <b>38</b> |
| <b>9</b> | <b>COMENTÁRIOS FINAIS</b>                                       | <b>41</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS</b>                                              | <b>43</b> |
|          | <b>APÊNDICE A – SIMULAÇÕES INICIAIS - AJUSTES DE PARÂMETROS</b> | <b>48</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

Asteroides são exemplares de corpos menores presentes no Sistema Solar. Eles orbitam o Sol, mas não reúnem os atributos necessários para serem classificados como planetas ou planetas anões (IAU, 2023). Os asteroides são considerados exemplares de objetos primordiais e podem contribuir para a compreensão do processo de formação do Sistema Solar. Desta forma, há um grande interesse no estudo desses entes.

Grande parte do nosso entendimento sobre asteroides vem de meteoroides que atingem a superfície da Terra. No entanto, as superfícies desses pequenos corpos são modificadas pela interação com a atmosfera terrestre durante o processo de entrada. Assim sendo, muitas missões espaciais visam recolher amostras inalteradas das superfícies dos asteroides. Nesse contexto, há um grande foco nos NEAs (*Near-Earth Asteroids*), os quais, como o próprio nome sugere, são objetos que, em sua evolução orbital, se aproximam da órbita da Terra. Consequentemente, sondas espaciais podem ser enviadas a esses objetos devido à sua maior acessibilidade.

Uma das mais recentes missões de retorno de amostra foi realizada pela Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial (JAXA) com a sonda Hayabusa2, cujo alvo foi o asteroide 1999 JU3, também designado como 162173 Ryugu (YOSHIKAWA et al., 2015). A missão foi lançada em 3 de dezembro de 2014 e, em 2019, realizou duas aterrissagens em Ryugu para coleta de materiais. Em 6 de dezembro de 2020, as amostras foram entregues à Terra (MOROTA et al., 2020). Os dados obtidos por essa missão visam melhorar nossa compreensão dos processos que afetam a formação e evolução dos corpos dentro do Sistema Solar, bem como do possível conteúdo de matéria orgânica e de outros elementos químicos presentes nas superfícies desses corpos.

Nos últimos anos, realizou-se o processamento dos dados da missão Hayabusa2 e das amostras coletadas da superfície de Ryugu. Foi constatado que houve alterações em sua superfície, provocadas pelos fenômenos do envelhecimento espacial (em inglês, *space weathering*), *resurfacing*, *radiative heating* e microbombardeamento (SUGITA et al., 2019; MOROTA et al., 2020; KITAZATO et al., 2021).

O presente trabalho está inserido nesse contexto, visando analisar a evolução orbital passada do asteroide Ryugu, considerado aqui um ponto de massa, a fim de verificar se houve alguma aproximação desse asteroide com o Sol. Esse evento poderia ter levado a uma grande exposição do asteroide à radiação solar, sendo esta acumulada em sua superfície em um único momento, modificando-a abruptamente. Além desse estudo, há a investigação das temperaturas que a superfície de Ryugu pode ter atingido ao longo do tempo. Esses dados foram comparados com estudos baseados em análises de dados experimentais das amostras recebidas do asteroide. Também foi estimado o acúmulo de radiação em sua superfície, que ocorreu não apenas devido a um encontro próximo com o Sol, mas sim, pela constante exposição da sua superfície ao ambiente espacial. Essa análise permite estimar a saturação da superfície de Ryugu em virtude do envelhecimento espacial.

O trabalho está dividido da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta uma introdução sobre os NEAs, abordando os principais tópicos sobre suas características físicas e orbitais. O Capítulo 3 trata do

fenômeno de envelhecimento espacial. O Capítulo [4](#), diz respeito ao asteroide Ryugu, como sua origem, características orbitais e físicas e dados sobre sua superfície, especialmente os resultados obtidos após a missão Hayabusa2. Em seguida, o Capítulo [5](#), apresenta o método utilizado, as condições iniciais adotadas e como foram separados os dados para as análises. O Capítulo [6](#), é destinado ao estudo da evolução orbital de Ryugu em si, desde o momento em que ele deixa o cinturão principal de asteroides até atingir sua órbita atual. Neste capítulo, também é analisado o problema dos encontros próximos de Ryugu com o Sol. O Capítulo [7](#) é designado ao estudo e discussão das temperaturas que a superfície de Ryugu pode ter atingido e suas consequências. No Capítulo [8](#), são apresentados os resultados da análise da saturação da superfície do asteroide devido à longa exposição ao ambiente espacial e consequente efeito do envelhecimento espacial. Por fim, no Capítulo [9](#) estão as considerações finais do trabalho.

## 2 NEAS - NEAR-EARTH ASTEROIDS

Os NEOs (*Near-Earth Objects*) são corpos celestes, incluindo asteroides, cometas e outros corpos similares, que orbitam o Sol em uma trajetória que se aproxima ou cruza a órbita da Terra. Em termos orbitais, classifica-se como NEO aqueles corpos que possuem órbita heliocêntrica e que atingem uma distância do periélio de  $q < 1,3$  UA (SHOEMAKER; HELIN, 1978).

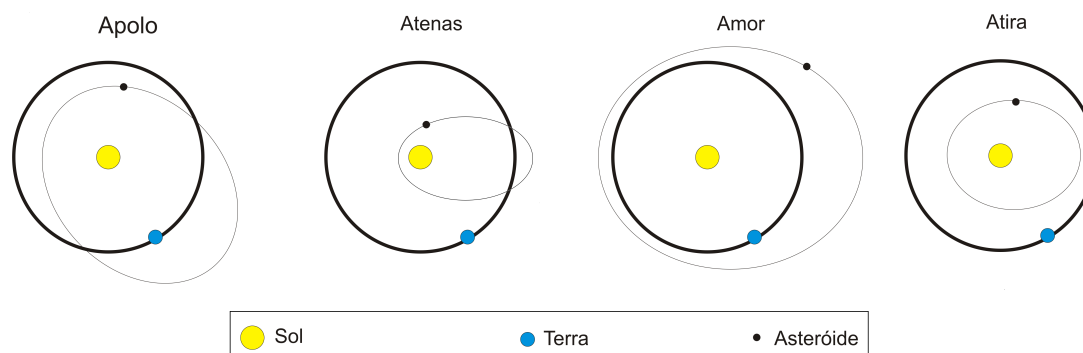
Os NEOs são divididos em grupos, sendo os principais os NECs (*Near-Earth Comets*), os NEAs (*Near-Earth Asteroids*) e os PHOs (*Potentially Hazardous Objects*) (GLADMAN; MICHEL; FROES-CHLÉ, 2000; BOTTKÉ et al., 2002; BINZEL et al., 2002; GRANVIK et al., 2018).

- NECs - são objetos compostos predominantemente por gelo, apresentando um núcleo rodeado por uma atmosfera tênue (coma). Eles orbitam o Sol e podem se aproximar ou cruzar a órbita da Terra (DEMEO; BINZEL, 2008);
- NEAs - são asteroides que podem cruzar ou se aproximar da órbita da Terra. Eles são divididos em classes de acordo com suas características orbitais, especificamente o periélio ( $q$ ), o afélio ( $Q$ ) e o semieixo maior ( $a$ ), conforme apresentado a seguir:
  - Apolo:  $a \geq 1$  UA e  $q \leq 1,0167$  UA - Cruzam a órbita da Terra;
  - Atenas:  $a < 1$  UA e  $Q \geq 0,983$  UA - Cruzam a órbita da Terra;
  - Amor:  $1,0167 < q \leq 1,3$  UA,  $a > 1,0$  UA - Se aproximam da órbita da Terra, podendo evoluir para um cruzador;
  - Atiras:  $a < 1$  UA e  $Q < 0,983$  UA - A órbita está inteiramente dentro da órbita da Terra, sem cruzá-la.

Os valores 1,0167 UA e 0,983 UA correspondentes ao afélio e periélio da órbita da Terra, respectivamente. A Figura 1, apresenta uma representação da órbita dos NEAs pertencentes a cada uma dessas classes.

- PHOs - são os objetos considerados potencialmente perigosos quando sua distância de intersecção mínima orbital (MOID) com a Terra é menor do que 0,05 UA, e sua magnitude absoluta é  $H \leq 22$  (PERNA et al., 2015). MOID é a sigla em inglês para *minimum orbital intersection distance*, representa a mínima distância entre as órbitas de dois corpos ou a distância entre os pontos de maior aproximação entre essas órbitas. Essa distância é bastante utilizada para avaliar o risco de colisões entre corpos celestes, e existem diversos métodos para calculá-la, como podem ser visto em Sitarski (1968), Bonanno (2000), Wisniowski e Rickman (2013), Hedo, Ruíz e Peláez (2018), por exemplo. A magnitude absoluta  $H$  de um asteroide é a medida do seu brilho quando completamente iluminado a uma distância de 1 UA de ambos, Sol e Terra. O diâmetro de um asteroide pode ser calculado a partir do valor de  $H$ , uma vez que o albedo seja conhecido ou estimado (DYMOCK, 2007).

Figura 1 – Representação das órbitas dos NEAs



Fonte: Adaptado de Araujo (2011)

Como os NEOs englobam os objetos que são potencialmente perigosos, devido sua órbita próxima a da Terra, é de extrema importância estudá-los. Deste modo, é interessante conhecer a quantidade desses objetos, bem como entender sua origem, composição, e como eles evoluem dinamicamente.

Os NEAs apresentam uma variedade em termos de tamanhos, formas, características orbitais, e de rotação (SPACE STUDIES BOARD, 1998; LEVASSEUR-REGOURD et al., 2005; MCNEILL et al., 2019). Atualmente, estima-se que existam cerca de 32.000 NEAs conhecidos, sendo que por volta de 850 são maiores que um quilômetro e 10.000 têm mais de 140 metros (NEOs-NASA, 2023).

Diversos fenômenos contribuem para a variação orbital e de rotação de um NEA. Dentre eles, as perturbações gravitacionais são as mais proeminentes. Os encontros próximos com planetas rochosos perturbam a órbita dos NEAs, resultando em uma evolução orbital caótica (TANCREDI, 1998; GLADMAN; MICHEL; FROESCHLÉ, 2000), bem como, a alteração de seu estado de spin e, consequentemente, em um novo estado de rotação (SCHEERES et al., 2000; SCHEERES; MARZARI; ROSSI, 2004; BOLDRIN; ARAUJO; WINTER, 2020). Outros fatores que podem afetar a órbita e o spin dos asteroides incluem ressonâncias de movimento médio e ressonâncias seculares (MARCOS; MARCOS, 2019; FENUCCI; GRONCHI; NOVAKOVIC, 2023), os efeitos Yarkovsky e YORP<sup>2</sup> (BOTTKÉ et al., 2006; FARNOCCHIA et al., 2013), impactos com outros corpos celestes (BOTTKÉ et al., 1994), e o efeito de maré (RICHARDSON; JR; LOVE, 1998).

De acordo com Gladman, Michel e Froeschlé (2000), a vida média de um NEA é de 10 milhões de anos. Devido à instabilidade e caoticidade de suas órbitas, eventualmente, os NEAs colidam com planetas, ou com o Sol, ou são ejetados do Sistema Solar. De acordo com estes autores, esses eventos foram calculados em uma amostra inicial de 117 NEAs, com uma probabilidade de 18% para colisões com os planetas, 56% de destruição pelo Sol e 10% de ejeção do Sistema Solar, restando apenas 16% de sobreviventes, isto é, os objetos que não colidiram e nem foram ejetados.

Dado que a idade do Sistema Solar é da ordem de bilhões de anos, conclui-se que a população dos NEAs deve ser frequentemente realimentada por corpos provenientes de outras regiões (BINZEL et al.,

<sup>1</sup> A refletividade de um objeto, i.e., a fração de luz que é refletida por sua superfície (COAKLEY, 2003)

<sup>2</sup> O efeito Yarkovsky descreve a alteração do semieixo maior de uma órbita devido a uma pequena, porém significativa, força causada pelo aquecimento do corpo pelo Sol. Esse efeito ocorre quando a inércia térmica de um asteroide é diferente de zero e quando a distribuição de temperatura não é mais simétrica em relação à direção do Sol. Por sua vez, o efeito YORP descreve a variação nas taxas de rotação e obliquidade de um asteroide causada pela incidência da luz solar. (VOKROUHLICKY et al., 2015).

[2002]). Devido ao grande número de corpos e à proximidade com as órbitas dos planetas terrestres, é natural supor que a região provável de origem dos NEAs seja o cinturão principal de asteroides (em inglês *main asteroid belt*, ou MAB), situado entre as órbitas de Marte e de Júpiter. No entanto, para isto, é necessária alguma perturbação para que um asteroide migre do cinturão para uma órbita próxima à órbita da Terra.

Estudos realizados sobre o tema mostraram que as ações de ressonância podem levar esses objetos do MAB a terem órbitas que cruzam a de planetas terrestres, através do aumento de suas excentricidades orbitais e consequente cruzamento da órbita de Marte. As duas ressonâncias mais conhecidas que promovem essa migração são a ressonância de movimento médio 3:1 com Júpiter (ocorre quando o período do objeto é um terço do período de Júpiter) e a ressonância secular  $\nu_6$  com Saturno (a frequência associada com o período de revolução do pericentro dos asteroides é igual à frequência de precessão do pericentro do planeta) (BOTTKE et al., 2002).

Morbidelli et al. (2002) pressupôs que ações colisionais no cinturão principal podem fragmentar grandes asteroides, fazendo com que estes, mediante a ação das ressonâncias combinada à força termal, sejam introduzidos na região dos NEAs. De acordo com seus estudos, apenas 6% dos NEOs têm origem cometária. Ademais, o mesmo trabalho reforçou a conclusão de que as três principais fontes de NEAs são a ressonância secular  $\nu_6$  com Saturno, a ressonância de movimento médio 3:1 com Júpiter e as regiões de cruzamento de órbitas com Marte.

Os NEAs podem ter origem em corpos parentais do cinturão principal, onde um corpo maior pode ter fragmentado devido a colisões, gerando uma família de asteroides que compartilham características orbitais semelhantes. Estes novos objetos também podem ser afetados por ressonâncias e migrar para locais próximos à Terra.

Além disso, outra característica importante dos NEAs é sua composição, uma vez que muitos corpos preservam características primordiais, como, por exemplo, os asteroides do tipo-C, os quais são conhecidos por serem os corpos matrizes dos condritos carbonáceos, que possuem composição inalterada e maior quantidade matéria orgânica do que outros meteoritos (HASEGAWA et al., 2008).

Assim, para compreender a composição e estrutura de um asteroide requer o estudo de seu albedo, reflectância espectral<sup>3</sup> e sua densidade. Os asteroides podem ser divididos de acordo com seu espectro, sendo os mais conhecidos os do tipo-C (carbonáceos, são asteroides escuros e ricos em carbono, geralmente têm uma superfície coberta de material orgânico e de minerais hidratados), os do tipo-S (silicatos, são asteroides brilhantes e rochosos, compostos principalmente por silicato como olivina e piroxênio), e os do tipo-M (metálicos, são asteroides compostos principalmente por metais como ferro e níquel, geralmente têm superfícies brilhantes) (BINZEL et al., 2002).

Entretanto, análises mais aprofundadas da superfície de um asteroide mostraram que possa ocorrer alterações ao longo de sua vida, no qual se modificam suas propriedades espectrais, camuflando as verdadeiras composições. Assim, é importante compreender a dinâmica orbital dos asteroides para investigar os processos que possa ocorrer na superfície do objeto.

---

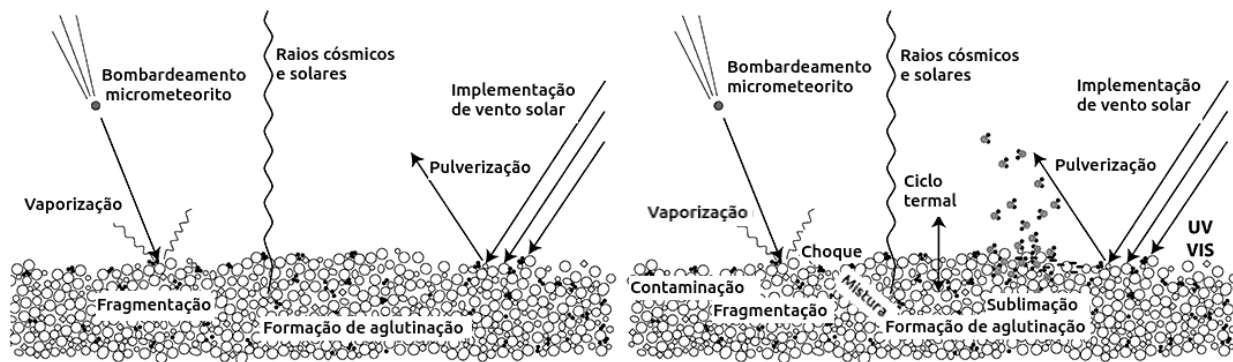
<sup>3</sup> Fração da energia incidente refletida por uma superfície, dada em função do comprimento de onda (BARNES; PARR; EARLY, 1998)

### 3 ENVELHECIMENTO ESPACIAL

As superfícies de objetos sem atmosfera presentes no Sistema Solar são expostas a diversos fatores exógenos, os quais modificam suas estruturas físicas e químicas. Essa degradação pode ocorrer em decorrência de diversos fatores, tais como impactos, danos causados pela radiação solar, bem como bombardeamento por ventos solares e raios cósmicos galácticos e extragalácticos (CHAPMAN, 2004; SHESTOPALOV; GOLUBEVA; CLOUTIS, 2013; LANTZ et al., 2017; PIETERS; NOBLE, 2016). A Figura 2 ilustra de forma didática alguns exemplos dos processos que podem ocorrer na superfície de um corpo sem atmosfera.

Os processos de degradação citados anteriormente dão origem ao fenômeno conhecido como envelhecimento espacial (*space weathering*). Este fenômeno afeta as propriedades espectrofotométricas dos asteroides, impedindo a identificação de materiais primitivos da subsuperfície, preservados desde a formação do Sistema Solar (LANTZ et al., 2017).

Figura 2 – Processos que envolvem o envelhecimento espacial



Conjunto de processos que envolve o envelhecimento espacial de corpos sem atmosfera. (Esquerda) Processos que afetam a superfície da Lua próximo a 1 UA. (Direita) Vários processos ativos na superfície de corpos de todo Sistema Solar.

Fonte: Adaptado de Pieters e Noble (2016)

Para a análise do envelhecimento espacial, considera-se uma série de características físicas e dinâmicas dos NEOs, tais como suas evoluções orbitais, as perturbações gravitacionais exercidas pelos planetas, seus espectros eletromagnéticos, componentes químicos, entre outros fenômenos. (POPESCU et al., 2019). As características do espectro de um asteroide são influenciadas pela abundância de absorção, o tamanho dos grãos de regolitos e o processo de envelhecimento espacial (CLARK; RENCZ, 1999).

Os processos mais estudados acerca do envelhecimento espacial envolvem análises em laboratório dos efeitos em superfícies ocasionados pelo vento solar, bombardeamento por radiação e impactos por micrometeoritos (MADEY; JOHNSON; ORLANDO, 2002; SASAKI et al., 2002; GILLIS-DAVIS et al., 2017; LANTZ et al., 2017). Comumente, para simular a ação do vento solar e da radiação, utiliza-se irradiação de íons, enquanto que para simular os impactos de micrometeoritos, emprega-se a emissão de laser, em amostras de meteoritos (LANTZ et al., 2017).

As características espectrais, tais como inclinação espectral e aspectos de absorção, são ferramentas que permitem avaliar remotamente a composição da superfície de um asteroide (KALUNA; MASIERO; MEECH, 2016), o qual pode ser observado utilizando telescópios terrestres, espaciais e sondas. A inclinação espectral é definida como a variação na reflectância do asteroide, em função do comprimento de onda da luz (MARSSET et al., 2020).

Entretanto, ainda não há um modelo único que mostre como os espectros dos asteroides podem mudar ao longo do tempo devido ao envelhecimento espacial, seja aumentando ou diminuindo a inclinação espectral, ou alterando a estrutura física do asteroide (GILLIS-DAVIS et al., 2017). Além disso, a questão de uma conexão clara entre o espectro de condritos ordinários e os espectros dos asteroides ainda é um problema pouco abordado na literatura.

Todavia, todos os experimentos realizados, quer sejam remotamente ou por meio de amostras de meteoritos, fornecem novas pistas sobre modificações de características espectroscópicas que podem ser detectadas por futuras missões de retorno de amostras, como a Hayabusa2/JAXA (YOSHIKAWA et al., 2015) e a OSIRIS-REx/NASA (LAURETTA et al., 2017), ajudando na análise do efeito de envelhecimento espacial (LANTZ et al., 2017).

Os primeiros estudos acerca do efeito do envelhecimento espacial em superfícies de corpos celestes provém principalmente de análises e comparações de amostras lunares e seus espectros (DRAN et al., 1977). Porém, os modelos lunares que visam prever as respostas espectrais e os efeitos de envelhecimento espacial em asteroides do tipo-C não são precisos, uma vez que existem diferenças significativas entre a composição e o ambiente espacial experimentado por esses asteroides, em comparação aos materiais lunares (GILLIS-DAVIS et al., 2017). Os asteroides do tipo-C são conhecidos como primitivos (BUS; BINZEL, 2002; DEMEO et al., 2009), por acreditar-se que eles contenham compostos orgânicos e água, os quais são elementos-chave para a vida na Terra (LANTZ et al., 2017).

O estudo conduzido por Gillis-Davis et al. (2017) consistiu em uma série de experimentos buscando caracterizar os efeitos do envelhecimento espacial em asteroides do tipo-C. Um desses experimentos consistiu na implementação da componente de carbono em um modelo de envelhecimento espacial lunar, a fim de simular esse efeito nos asteroides do tipo-C. No entanto, verificaram que essa abordagem não é adequada para compreender a física, química e respostas espectrais desses asteroides portadores de carbono em relação ao envelhecimento espacial. Assim, permanece a necessidade de se desenvolver um modelo de envelhecimento espacial específico para os asteroides do complexo-C<sup>1</sup>. Mesmo com diversos experimentos, ainda não há nenhuma conclusão geral sobre a tendência espectral, quando expostos ao envelhecimento espacial, desses tipos de asteroide (LANTZ et al., 2017).

As pesquisas de Nesvorny et al. (2005) e Lazzarin et al. (2006) apontam para evidências significativas de tendências de envelhecimento espacial entre asteroides do complexo-C, mas os efeitos da variação da composição sobre essas tendências ainda não estão claros. Nesvorny et al. (2005) mostram que as inclinações espectrais médias das famílias de asteroides de complexo-C apresentam uma diminuição das inclinações e tornam-se espectralmente mais azuladas com o tempo no comprimento de onda visível. Em oposição, Lazzarin et al. (2006) mostraram que as inclinações espectrais da população

<sup>1</sup> Complexo-C é aquele que engloba todos os asteroides do tipo-C

de asteroides do complexo-C aumentam, tornando-se mais avermelhadas com o tempo. No entanto, quando Lazzarin et al. (2006) limitam suas análises às famílias de asteroide do complexo-C, conseguem reproduzir as tendências de declive obtida por Nesvorný et al. (2005). Desta forma, Lazzarin et al. (2006) sugerem que as discrepâncias entre as duas tendências de declive resultam de um efeito de amostragem, no qual as composições médias dos asteroides do complexo-C não estão totalmente representadas nas amostras das famílias desse complexo.

Kaluna, Masiero e Meech (2016) mostraram que os asteroides pertencentes ao complexo-C tornam-se mais avermelhados e escuros em resposta ao envelhecimento espacial. Por sua vez, Lantz et al. (2017), em seus experimentos, apresentaram que alguns condritos carbonáceos (CCs), de baixo albedo, tendem a se tornar mais avermelhados e escuros, assemelhando-se aos condritos ordinários (OC - ordinary chondrites), enquanto os condritos mais primitivos, ricos em carbono, tendem a se tornar mais azuis e brilhantes, como os meteoritos. Desta forma, Lantz et al. (2017) concluíram que a resposta espectral para envelhecimento espacial dos CCs, compostos em sua maioria por condritos de silicato (LAURETTA; MCSWEEN, 2006), bem como dos asteroides do complexo-C, estão relacionados com suas diferentes quantidades de compostos coexistentes inicialmente, como o elemento de carbono.

Embora os asteroides do complexo-C pareçam distintos na sua mineralogia quando comparados ao solo lunar e asteroides de complexos-S, ricos em silicato (BUS; BINZEL, 2002), muitas das características visíveis de absorção do comprimento de onda nesses asteroides são atribuídas às transições de Ferro (Fe) oxidado. Assim, a disponibilidade de Fe e as tendências espectrais observadas sugerem que os processos de envelhecimento espacial nos asteroides complexo-C resultam na produção de partículas de SMFe (Samário-ferro). Os modelos clássicos de envelhecimento espacial atribuem a profundidade reduzida da banda espectral<sup>2</sup>, o escurecimento e o avermelhamento dos corpos sem atmosfera aos efeitos ópticos das partículas de SMFe (BUS; BINZEL, 2002).

O experimento de Lantz et al. (2017), no qual utilizou doses elevadas de irradiação por íons, simulando o vento solar, mostrou que os prazos para ocorrer o envelhecimento correspondem a  $10^3 - 10^4$  anos para um objeto a 3 UA, com profundidade de implementação de algumas centenas de nanômetros. Por outro lado, os experimentos realizados por Binzel et al. (2010), mostram que para um condrito comum se assemelhar à forma espectral de um asteroide tipo-S, por conta do envelhecimento espacial, leva-se cerca de  $\sim 10^6$  anos. De acordo com Nesvorný et al. (2010), a escala de tempo do envelhecimento espacial está compreendida entre  $\sim 0,1$  Ma e  $\sim 10$  Ma. Outros autores, como Strazzulla et al. (2005), Brunetto et al. (2006), obtiveram dados da escala de tempo em torno de  $10^4 - 10^6$  anos para ocorrer o envelhecimento espacial.

De acordo com Kaluna, Masiero e Meech (2016), Lazzarin et al. (2006), Nesvorný et al. (2005), o envelhecimento espacial é um processo de longo prazo tanto para os asteroides do complexo-S quanto para os asteroides do complexo-C. Atualmente, dispõe-se mais informações acerca do processo de envelhecimento espacial em asteroides do complexo-S, que resulta no escurecimento e avermelhamento de suas superfícies ao longo do tempo, manifestando-se através do aumento da inclinação espectral para um comprimento de onda mais longo (BRUNETTO et al. 2015; CHAPMAN, 1996; BINZEL et al. 1996; KALUNA; MASIERO; MEECH, 2016).

<sup>2</sup> Banda espectral é um intervalo de comprimentos de onda da luz que é refletida ou emitida por um asteroide

Além disso, é importante ressaltar que os regolitos<sup>3</sup> presentes na superfície mais externa dos asteroides são alterados por diversos fatores, incluindo impactos de poeira interplanetária em alta velocidade e absorção de radiação, sendo a radiação solar a maior fonte, na forma de fótons no infravermelho e visível, que causam aquecimento em sua superfície, modificando suas propriedades ópticas e até mesmo sua composição química (MADEY; JOHNSON; ORLANDO 2002).

Segundo Sasaki et al. (2002), a efetividade do envelhecimento espacial está relacionada com a presença de regolitos na superfície do asteroide. Asteroides muito pequenos sem a presença desses regolitos dificilmente poderiam ser envelhecidos.

Estudos recentes sobre os movimentos de regolitos revelam a existência do processo de *ressurfacing*, no qual ocorre a movimentação de regolitos não alterados pelo efeito de envelhecimento espacial para a camada externa da superfície, rejuvenescendo-o espectralmente (DELL'ORO; MARCHI; PAOLICCHI 2011). Esse processo pode ocorrer devido a impactos, tremores sísmicos, ou ao efeito YORP (BOTKE et al. 2006). Deste modo, esses processos estão a contrabalancear a taxa de envelhecimento espacial, camuflando os dados reais do efeito de envelhecimento espacial (LANTZ et al. 2017; BINZEL et al. 2010).

Consequentemente, os estudos sobre asteroides que apresentam o efeito de envelhecimento espacial são importantes. Entre os objetos mais recentes que apresentaram a existência desse fenômeno e que foram objetos de expedições para observação e coleta de amostras, destaca-se o asteroide Ryugu.

---

<sup>3</sup> Regolito é uma camada de detritos soltos e fragmentos rochosos que cobre a superfície sólida de planetas, asteroides e luas no sistema solar.

## 4 RYUGU

O asteroide (161273) Ryugu foi alvo da missão de retorno de amostras realizada pela JAXA - Hayabusa2 (WATANABE et al., 2019). Durante a missão, a sonda coorbitou o asteroide no período de junho de 2018 a novembro de 2019, e, depois, realizou duas aterrissagens para coletar amostras de sua superfície em diferentes localidades. A primeira aterrissagem ocorreu em 22 de fevereiro de 2019 e a segunda em 11 de julho de 2019. A escolha dos locais para coleta de amostras foi baseada em critérios de segurança, considerando áreas com menor densidade de pedregulhos e materiais de interesse científico, incluindo materiais que apresentaram o efeito de envelhecimento e materiais onde este efeito não foi observado (MOROTA et al., 2020). Essas amostras foram entregues à Terra em dezembro de 2020 e estão atualmente em processo de análise (BOTT et al., 2022; YOKOYAMA et al., 2022; NAKAMURA et al., 2022; OKAZAKI et al., 2022; NARAOKA et al., 2023; YABUTA et al., 2023).

Conforme mencionado anteriormente, os NEAs muitas vezes originaram-se de corpos parentais do cinturão principal, e por meio de fenômenos como colisões e ressonância, são levados para órbitas próximas à órbita da Terra. Uma vez que eles não sofreram grandes alterações internas durante sua vida, eles nos fornecem informações sobre condições de formação primordial e composição do Sistema Solar (BOTT et al., 2022). Desta forma, a missão Hayabusa2 procurou compreender a origem e a natureza da matéria volátil e orgânica do Sistema Solar primitivo, através da exploração do asteroide Ryugu.

Análises de meteoritos e modelos teóricos indicam que as superfícies de alguns asteroides CCs próximos da Terra podem ter sofrido alterações térmicas durante aproximações com o Sol (NAKAMURA 2005; MARCHI et al., 2009; CHAUMARD et al., 2012; MICHEL; DELBO, 2010). Dados obtidos pela missão Hayabusa2 indicam que o asteroide Ryugu é um exemplar desses corpos que passaram por uma mudança em sua superfície devido ao efeito do envelhecimento espacial (MOROTA et al., 2020). Desta forma, é importante compreender a evolução orbital desse asteroide, para investigar esses processos e obter uma melhor compreensão de sua composição superficial.

Antes da missão Hayabusa2, as informações disponíveis sobre as propriedades físicas do asteroide Ryugu eram limitadas a dados espectrais (BINZEL et al., 2001). Após a missão, adquiriu-se dados por diversos equipamentos presentes na sonda e também pelas amostras coletadas. Por exemplo, para estimar o albedo e seu diâmetro utilizou-se o método radiométrico e propriedades físicas observacionais (HASEGAWA et al., 2008). Observou-se que Ryugu é um *rubble pile*<sup>1</sup> com um formato quase esférico (raio equatorial =  $502 \pm 2$  m, raio polar =  $438 \pm 2$  m), com albedo geométrico visível de  $p_V = 0,07 \pm 0,01$ , e diâmetro equivalente de  $0,87 \pm 0,03$  km (CAMPINS et al., 2013).

Ryugu é um NEA pertencente ao grupo Apolo (HASEGAWA et al., 2008), sendo também um PHA, devido ao seu tamanho e à sua magnitude absoluta ( $H = 19,39$ ) (WATANABE et al., 2019; BOTT et al., 2022). Na Tabela 1, contém informações orbitais e físicos sobre Ryugu, tais como o

<sup>1</sup> Rubble pile é um tipo de asteroide composto por fragmentos rochosos mantidos juntos pela força da gravidade, com baixa resistência coesiva e alta porosidade aparente.

seu semieixo maior de 1,191 UA, inclinação de  $5,866^\circ$  e excentricidade de 0,191. Ryugu possui uma rotação lenta e irregular, levando cerca de 7,63 horas para completar uma volta em torno de seu próprio eixo (WATANABE et al., 2019; GROTT et al., 2019). Além disso, Michel e Delbo (2010) estimaram que a sua vida média como NEA é de aproximadamente 40 Ma.

Tabela 1 – Dados orbitais e físicos de Ryugu - Época: 21/01/2022

|                                            |                      |
|--------------------------------------------|----------------------|
| Semieixo maior (UA)                        | 1,191                |
| Excentricidade                             | 0,191                |
| Inclinação                                 | $5,866^\circ$        |
| Argumento do Pericentro                    | $211,612^\circ$      |
| Longitude do nodo ascendente               | $251,306^\circ$      |
| Anomalia Média                             | $289,011^\circ$      |
| Diâmetro (km)                              | 0,896                |
| Massa (kg)                                 | $4,5 \times 10^{11}$ |
| Fonte: NASA (2021), Watanabe et al. (2019) |                      |

Outra informação importante sobre Ryugu é relacionada à sua propriedade de superfície conhecida como inércia térmica. Essa propriedade descreve a capacidade do asteroide de reter e armazenar calor. Assim, corpos com baixa inércia térmica perdem e ganham calor com maior facilidade do que aqueles com alta inércia térmica. Para o asteroide Ryugu, a informação referente à sua inércia térmica tem variado ao longo dos anos. Hasegawa et al. (2008), através de modelos teóricos associados a dados observacionais, estimou o valor para a inércia térmica de Ryugu como sendo superior a  $500 \text{ Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$ , valor esse que sugere uma superfície dominada por pedregulhos e rochas brutas. Por outro lado, Campins et al. (2013) encontrou valores entre 200 e  $600 \text{ Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$ . Já, Grott et al. (2019) adquiriu valores de pedregulho no campo de visão do MASCOT radiômetro (MARA) de  $282 \text{ Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$ , enquanto os valores determinados por imagens térmicas infravermelhas na sonda Hayabusa2 variam de 200 à  $500 \text{ Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$ . Desta forma, a baixa inércia térmica indica que a superfície de Ryugu não é coberta por regolitos do tamanho de pedregulhos, como era o esperado (WADA et al., 2018).

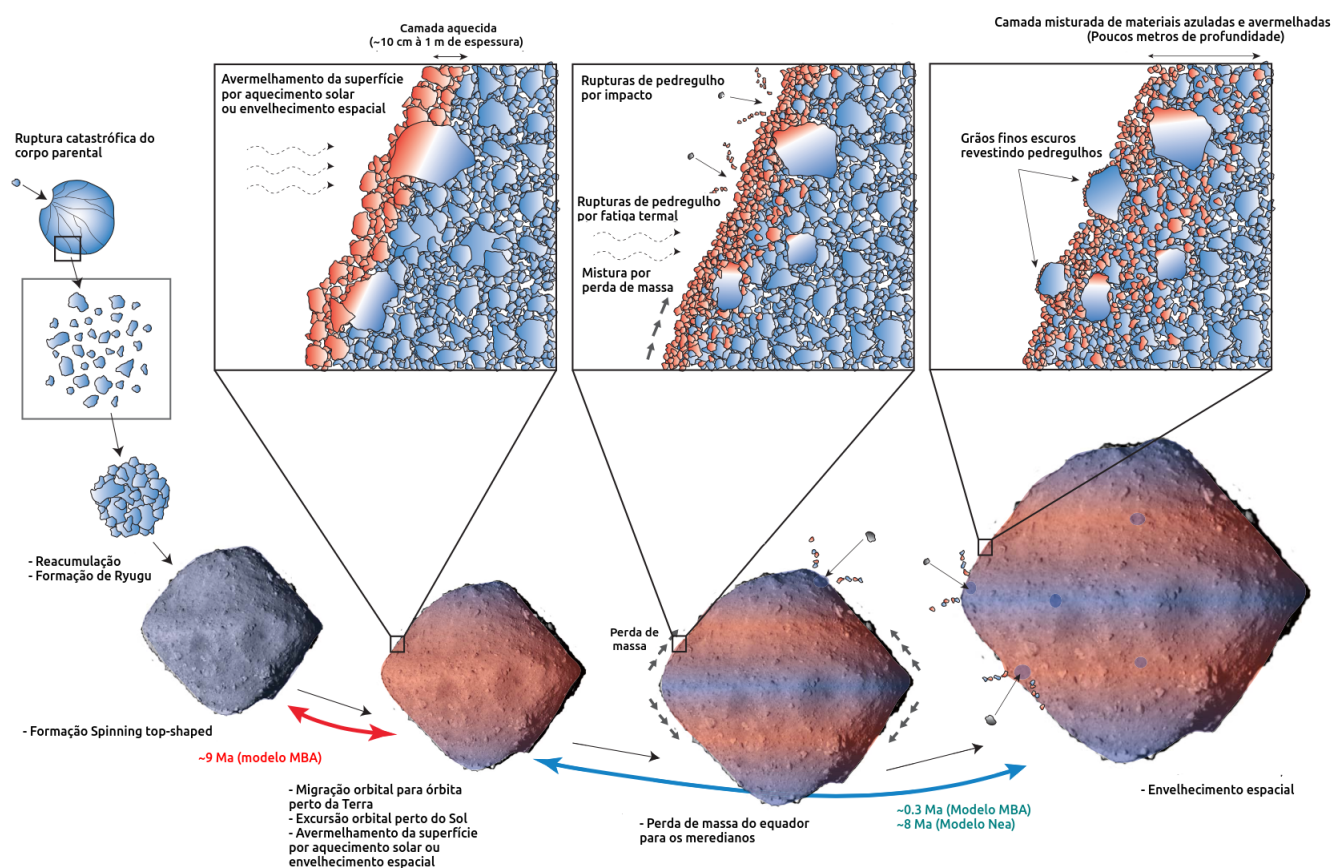
Embora ainda não haja resultados publicados de uma amostra de meteorito cujo espectro de reflexão corresponda perfeitamente ao de Ryugu no comprimento de onda visível e infravermelho (KITAZATO et al., 2019) (GROTT et al., 2019), foi possível estimar, por meio da análise do baixo albedo do asteroide e da comparação com meteoritos, que o tipo taxonômico que melhor se adéqua a ele é o do tipo-C (HASEGAWA et al., 2008; SUGITA et al., 2019; CAMPINS et al., 2013; KITAZATO et al., 2019).

Apesar de os objetos pertencentes à classe C serem mais abundantes na faixa externa do cinturão principal, eles também estão presentes na faixa interna do cinturão ( $a < 2,5$  UA) (CAMPINS et al., 2013). Segundo Campins et al. (2013), Michel e Delbo (2010), a fonte provável de Ryugu é o escape da faixa interna do cinturão principal, entre a região de 2,15 UA e 2,5 UA, com uma inclinação orbital inferior a  $12^\circ$ , região esta sujeita à ação da ressonância secular  $\nu_6$ .

Ryugu apresenta uma superfície geral uniformemente escura (KITAZATO et al., 2019), ligeiramente avermelhada e hidratada, caracterizada pela presença de uma banda de absorção fraca e estreita a  $2,72 \mu\text{m}$  de comprimento de onda, atribuída ao filossilicatos-Mg (BOTT et al., 2022).

Conforme citado anteriormente, Ryugu é um asteroide que apresenta mudanças morfológicas em sua superfície, as quais são atribuídas ao processo de envelhecimento espacial. A ilustração apresentada na [Figura 3](#) esquematiza a suposta evolução da superfície do asteroide Ryugu, de acordo com ([MOROTA et al., 2020](#)). Essa evolução supõe que um corpo parental foi fragmentado em diversas partículas, que subsequentemente foram reacumuladas, originando o corpo que conhecemos atualmente, o qual se assemelha a um *spinning-top-shaped asteroid*<sup>2</sup> devido à sua formação e rotação. Posteriormente, houve a migração do objeto do cinturão principal para uma órbita próxima à Terra, com possíveis passagens próximas ao Sol durante essa jornada, o que resultou no avermelhamento da superfície de Ryugu devido ao envelhecimento espacial. Em seguida, ocorreu a perda de massa da superfície por processos colisionais, os quais, juntamente com o movimento de rotação do asteroide, promoveram a migração das partículas mais leves do equador em direção aos meridianos, rejuvenescendo, assim, a superfície do asteroide. Além disso, os mesmos autores observaram a mistura de partículas envelhecidas com aquelas sem alterações.

Figura 3 – Ilustração esquemática da evolução da superfície de Ryugu



Evolução do asteroide Ryugu desde a fragmentação, a reacumulação, formação das crateras, e o avermelhamento causado pelo processo de envelhecimento espacial.

Fonte: Adaptado de [Morota et al. \(2020\)](#)

De acordo com [Morota et al. \(2020\)](#), a presença de crateras avermelhadas na superfície de Ryugu sugere que o processo de envelhecimento dessa superfície ocorreu em um curto período no passado.

<sup>2</sup> Asteroide em forma de pião

Por outro lado, as análises laboratoriais realizadas por Kitazato et al. (2021), indicam que essa mudança espectral ocorreu ao longo de milhares de anos.

As análises de Kitazato et al. (2021) também indicaram uma diferença espectral entre a superfície e a subsuperfície de Ryugu, sendo o subsolo mais enriquecido em filossilicato MG-OH (hidróxido de Magnésio) em relação à superfície. O mesmo estudo demonstrou que a posição da banda OH não está correlacionada com o tamanho do grão e/ou porosidade, o que torna improvável que os atributos físicos intrínsecos possam explicar as diferenças espectrais observadas entre os materiais da superfície e subsuperfície do referido asteroide. Conforme sugerido pelos autores, uma possível explicação para essas diferenças espectrais pode ser o envelhecimento espacial.

Kitazato et al. (2021) também observou o material da superfície de Ryugu, utilizando o Espectrômetro de infravermelhos próximos (NIRS3), presente na sonda Haybusa2. Os resultados obtidos revelaram que o espectro de reflectância do material escavado apresenta uma característica de absorção da hidroxila (OH) ligeiramente mais forte e com um pico deslocado em comparação com o observado na superfície, indicando a ocorrência do fenômeno de envelhecimento espacial, o que provocou alterações espectrais na camada mais externa da superfície. A resistência e a forma característica de OH sugerem que o material da subsuperfície sofreu um aquecimento acima de 300°C, o que é semelhante ao registrado na superfície. Porém, a desidratação e desidroxilação da subcamada indicam que ele não atingiu temperaturas superiores a 700°C. Esses resultados sugerem que o asteroide não deve ter se aproximado do Sol a uma distância inferior a 0,15 UA (KITAZATO et al. 2021). Entretanto, o modelo termofísico adotado pelos mesmos autores indicou que o aquecimento radiativo não pode aumentar a temperatura acima de 200°C à profundidade de 1m, mesmo na menor distância possível de Ryugu ao Sol.

Contudo, há a possibilidade de que a característica OH fraca ocorra devido a reações de hidratação incompleta no corpo parental, assim Kitazato et al. (2021) consideraram que o processo primário de alteração térmica do material de Ryugu é mais consistente com o aquecimento radiogênico e de impacto no corpo parental, do qual se formou, em vez do aquecimento radiativo após sua formação. Como dito em Grott et al. (2019), o material atualmente observado na superfície de Ryugu foi produzido na camada externa de um corpo maior (50 – 100 km) do corpo parental, ou no interior de um corpo menor.

No entanto, a falta de medições diretas no subsolo não permite distinguir a alteração térmica devido ao aquecimento radiativo do processo do corpo parental (KITAZATO et al. 2021). Logo, estudos sobre a ocorrência de processos de envelhecimento espacial e aquecimento radiativo em sua superfície não foram descartados.

O trabalho realizado por Yokoyama et al. (2022) estimou que a desidratação da intercamada de água presente nas amostras coletadas do asteroide Ryugu ocorre completamente a uma temperatura de 170°C. No entanto, durante os experimentos, foi observada a emissão de um pequeno pico de água na intercamada. Esse resultado sugere que a superfície do asteroide Ryugu nunca tenha sido exposta a temperaturas superiores a 100°C.

O estudo teórico realizado por Michel e Delbo (2010), indica a possibilidade da distância do periélio de Ryugu ter sido menor que 0,1 UA ao longo de sua história, o que teria resultado em

temperaturas de superfície da ordem de  $\approx 1200^{\circ}\text{C}$ . Isto sugere que o envelhecimento espacial pode ser uma explicação plausível para as alterações térmicas observadas na superfície de Ryugu, conforme sugerido recentemente por [Morota et al. \(2020\)](#), que propuseram que essa forma de aquecimento provavelmente influenciou as propriedades espectrais do asteroide em comprimentos de onda visíveis.

## 5 METODOLOGIA

O objetivo deste trabalho consiste em estudar a evolução orbital passada de Ryugu, com o propósito de verificar suas aproximações em relação ao Sol, averiguar por quanto tempo o asteroide esteve sujeito aos efeitos do envelhecimento espacial, ocorrendo ou não a saturação em sua superfície, assim como, analisar as temperaturas em sua superfície nesse período. Para isso, foram utilizadas integrações numéricas do problema gravitacional de N-corpos (ROY, 2020), por meio dos algoritmos disponíveis no pacote Mercury (CHAMBERS, 1999), a fim de investigar a evolução orbital de Ryugu ao longo do tempo, desde o momento em que deixou o cinturão principal de asteroides até se aproximar da sua órbita atual. Nas próximas seções são apresentadas as condições iniciais (seção 5.1), as adaptações no integrador numérico (seção 5.2), e a metodologia empregada para a análise dos dados (seção 5.3).

Todos os programas, rotinas e integrações foram executados em um servidor da UNESP-FEG e no GRID UNESP.

### 5.1 CONDIÇÕES INICIAIS

No Capítulo 4 foi visto que Ryugu provavelmente se originou no cinturão principal pela ação da ressonância secular  $\nu_6$ . Desta forma, como o objetivo deste trabalho é verificar a evolução orbital passada desse asteroide e estimar sua distância em relação ao Sol, foram distribuídas partículas-teste na vizinhança dessa ressonância, com suas órbitas integradas numericamente. Ao longo das integrações numéricas, foram monitoradas aquelas que se tornaram um clone de Ryugu, i.e., aquelas que se aproximaram da órbita atual de Ryugu em algum momento.

Assim, inicialmente, foram distribuídas 29 mil partículas-teste em 7 regiões na vizinhança da ressonância secular  $\nu_6$ , conforme os intervalos apresentados na Tabela 2. Os parâmetros listados nesta tabela concordam com Bottke et al. (2015), o qual mostrou que os asteroides que deixam o cinturão principal dentro destes limites de semieixo maior, inclinação orbital e, com excentricidade igual a 0,1, devem atingir a região dos planetas terrestres.

O conjunto de condições iniciais das partículas-teste foi gerado por meio de um programa escrito pelo autor, utilizando a linguagem de programação Python (ROSSUM; JR, 1995). O código completo desse programa pode ser acessado no repositório do GitHub<sup>1</sup>. As partículas-teste foram distribuídas de uma maneira aleatória e uniforme, de acordo com as seguintes especificações: semieixo maior variando entre  $\nu_6 \pm 0,01$  UA, inclinação orbital variando de  $0^\circ$  a  $17,2^\circ$ , com intervalos de  $2,5^\circ$ , e excentricidade igual a 0,1. Os elementos orbitais angulares - longitude do nodo ascendente, argumento do pericentro e anomalia média - também foram distribuídos de uma maneira aleatória e uniforme no intervalo de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ . A distribuição das partículas-teste na vizinhança da ressonância secular  $\nu_6$  pode ser vista na Figura 4.

As regiões 1 a 4 receberam 5 mil partículas cada, enquanto as regiões 5 a 7 receberam 3 mil partículas cada. Essa diferença na quantidade de partículas em cada região é justificada com base na

<sup>1</sup> [https://github.com/Millenacg/Dissertation\\_Study.git](https://github.com/Millenacg/Dissertation_Study.git)

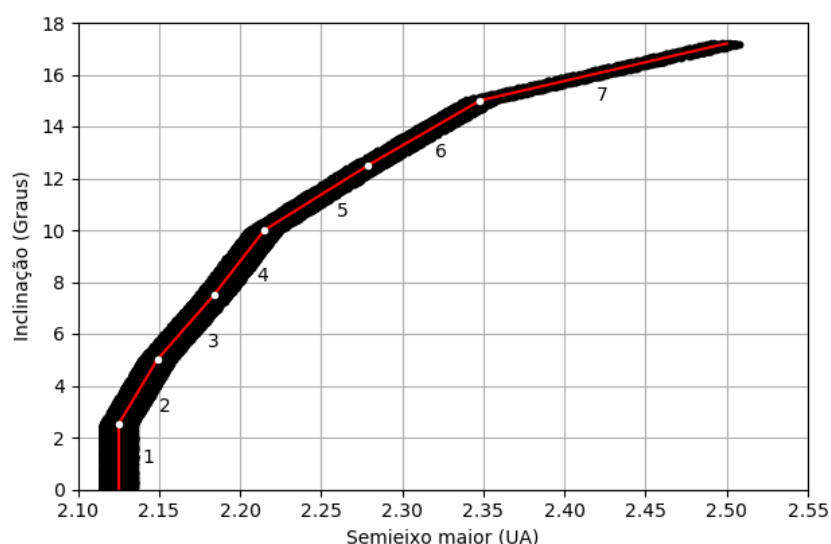
análise realizada no Capítulo 4, que indica que a origem provável do asteroide foi no cinturão principal com uma inclinação abaixo de  $12^\circ$ . Portanto, as regiões 1, 2, 3 e 4 receberam uma quantidade maior de partículas-teste em comparação com as regiões 5, 6 e 7.

Tabela 2 – Intervalos de semieixo maior e inclinação orbital que caracterizam as regiões da ressonância secular  $\nu_6$

| Regiões | Semieixo maior (UA) | Inclinação (Graus) |
|---------|---------------------|--------------------|
| 1       | [2,125 ; 2,125[     | [0 ; 2,5[          |
| 2       | [2,125 ; 2,149[     | [2,5 ; 5[          |
| 3       | [2,149 ; 2,184[     | [5 ; 7,5[          |
| 4       | [2,184 ; 2,215[     | [7,5 ; 10[         |
| 5       | [2,215 ; 2,279[     | [10 ; 12,5[        |
| 6       | [2,279 ; 2,348[     | [12,5 ; 15[        |
| 7       | [2,348 ; 2,5]       | [15 ; 17,2]        |

Fonte: Bottke et al. (2015)

Figura 4 – Condições iniciais das partículas-teste na vizinhança da ressonância  $\nu_6$



Condições iniciais de 29 mil partículas-teste (pontos pretos) na vizinhança da ressonância secular  $\nu_6$  (linha vermelha), divididas em 7 regiões. Os pontos brancos destacam os limites de cada região.

Fonte: Elaborado pela autora.

Além dos dados iniciais das partículas-teste empregados no trabalho, foram implementados os dados iniciais dos corpos massivos (objetos que perturbam e interagem com todos os outros objetos durante a integração), sendo estes os oito planetas do Sistema Solar: Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Netuno. Os elementos orbitais para esses planetas, como semieixo maior (UA), excentricidade, inclinação (Graus), argumento do pericentro (Graus), longitude do nodo ascendente (Graus) e anomalia média (Graus), foram obtidos do site da Horizons NASA (NASA, 2021), para a época 01/01/2020. Neste trabalho, não foram considerados pequenos corpos, como a Lua e asteroides maiores, interagindo gravitacionalmente no sistema. As partículas-teste são tais que, elas não perturbam os corpos massivos e nem se perturbam mutuamente, mas são perturbadas pelos demais corpos massivos.

## 5.2 INTEGRAÇÕES NUMÉRICAS

Para que se possa obter a evolução orbital de Ryugu, precisa-se usar ferramentas numéricas a fim de calcular sua órbita ao longo do tempo. Neste trabalho utilizou-se o Pacote Mercury (CHAMBERS 1999), que é um conjunto de programas escrito em Fortran 77 com o propósito de fazer integrações numéricas das equações de movimento do problema gravitacional de N-corpos. Seu objetivo é calcular o problema gravitacional de objetos que se movem ao redor de um corpo central, a fim de obter suas evoluções orbitais.

No pacote existem cinco tipos de integradores numéricos que podem ser utilizados, os quais são descritos da seguinte maneira em seu manual:

- MVS (*Mixed-variable symplectic*) - algoritmo que incorpora corretores simpléticos simples. Integração rápida, mas não pode computar encontros próximos entre objetos;
- BS (*General Burlirsch-Stoer*) - algoritmo mais lento, porém, é mais preciso na maioria das situações. É mais utilizado quando se quer testar se os outros algoritmos são apropriados para o problema que se deseja estudar;
- *Conservative Bulirsch-Stoer* - duas vezes mais rápido que o General-BS, mas funciona somente para sistemas conservativos;
- RADAU (*Everhart's RA15*) - duas a três vezes mais rápido que o General-BS, geralmente confiável, exceto para encontros muito próximos ou órbitas muito excêntricas;
- *Hybrid Symplectic/Bulirsch-Stoer* - muito rápido, mas moderadamente preciso. Pode computar encontros próximos.

No presente trabalho foi utilizado o integrador *Hybrid symplectic / Burlirsch-Stoer*, o qual propaga mais rapidamente as órbitas, mas que ao verificar um encontro próximo entre os corpos do sistema, muda para o integrador BS, que é mais lento, porém, fornece maior precisão aos cálculos.

O tempo de integração adotado foi de 100 milhões de anos para o futuro, englobando toda a vida das partículas, desde o momento em que elas saem do cinturão principal até seus destinos finais, sendo considerada a ejeção para distâncias acima de 35 UA (além da órbita de Netuno), ou colisão com algum corpo celeste (raio físico). A escolha desse tempo de integração deve-se ao fato da vida média de Ryugu ser de 40 milhões de anos. Não se considerou integração para o passado, pois, como discutido em (MORBIDELLI et al. 2020), integrações numéricas para trás no tempo não representam a evolução passada de corpos reais em sistemas dinâmicos que evoluem caoticamente. Este é o caso dos asteroides que atingem a região mais interna do sistema solar e que sofrem múltiplos encontros próximos com os planetas terrestres.

Outros parâmetros considerados foram: intervalo de saída (*output interval*) de 30 anos; passo de integração inicial (*timestep*) de 2 dias. A distância de troca (*Hybrid integrator changeover*), que é a distância mínima entre objetos para o BS entrar em vigor - 0,5 raio de Hill dos corpos massivos. As justificativas para as escolhas destes parâmetros estão explicadas no Apêndice A

Nesta primeira abordagem será considerado um modelo simplificado, em que não serão considerados efeitos não-gravitacionais, como o efeito Yarkovsky.

### 5.3 ANÁLISE DE DADOS

A fim de se verificar a evolução orbital passada do asteroide Ryugu, foram definidos intervalos, para os quais se considera que uma partícula-teste tornou-se um clone de Ryugu. Tal abordagem permite analisar estatisticamente a vida passada de Ryugu.

Foi então desenvolvido um programa escrito em linguagem de programação Python, com o propósito de filtrar os dados resultantes das integrações numéricas. Neste programa, os dados de cada uma das partículas são selecionados a partir de três intervalos de órbitas centradas na órbita atual de Ryugu, os quais são referidos como deltas ( $\delta$ ). O chamado  $\delta_3$ , compreende os clones que chegaram na região mais próxima à órbita atual de Ryugu, com uma margem de  $\pm 0,01$  UA em semieixo maior,  $\pm 0,01$  em excentricidade e  $\pm 0,01^\circ$  em inclinação. O  $\delta_2$  compreende o intervalo de 2 vezes o tamanho de  $\delta_3$ , e  $\delta_1$ , 5 vezes o intervalo de  $\delta_3$ . Conforme os dados da Tabela 1, os dados de Ryugu são:  $a = 1,19$  UA,  $e = 0,19$ ,  $i = 5,87^\circ$ . O programa completo pode ser visto no GitHub<sup>2</sup>.

Além do interesse em verificar quais clones chegaram na região atual de Ryugu, neste trabalho tem-se o interesse em analisar o seu passado em relação à distância mínima em que o asteroide chegou ao Sol. Desta forma, dentre os dados brutos fornecidos pelo integrador Mercury, foram escolhidos para serem analisados o semieixo maior, a inclinação, a excentricidade e a distância heliocêntrica ( $r$ ), pelo tempo de integração de cada partícula.

Posteriormente analisou-se quais foram as temperaturas dos clones atingidas em sua superfície, para então compará-las com os dados experimentais das amostras recebidas pela sonda espacial Hayabusa2. Para isso, desenvolveu-se outro programa em Python. Já a discussão sobre o procedimento de como foi realizado os resultados, será discutido no Capítulo 7.

Foi criado outro programa para computar o tempo equivalente no qual a superfície do asteroide ficou no ambiente espacial, para verificar se houve a saturação em sua superfície ocorrida pelo efeito de envelhecimento espacial. Este resultado é discutido no Capítulo 8.

Todos esses dados obtidos pela evolução orbital, distância com o Sol, temperaturas da superfície e sua saturação foram dispostos em gráficos também por programas em Python, utilizando a biblioteca matplotlib (HUNTER, 2007).

<sup>2</sup> [https://github.com/Millenacg/Dissertation\\_Study.git](https://github.com/Millenacg/Dissertation_Study.git)

## 6 EVOLUÇÃO ORBITAL

Um dos objetivos deste trabalho consiste em analisar a evolução orbital passada do asteroide Ryugu, para averiguar a possibilidade de encontros extremos com o Sol em sua história. Desta forma, considerou-se 29.000 partículas-teste distribuídas na vizinhança da ressonância secular  $\nu_6$ . As órbitas dessas partículas foram integradas numericamente pelo período de 100 milhões de anos.

A primeira análise realizada consistiu em verificar quais partículas-teste obtiveram êxito em se aproximar da órbita atual de Ryugu - tornando-se clones de Ryugu. Para isso, como explicado na seção 5.3, os dados das 29 mil partículas-teste foram filtrados em três intervalos: delta grande ( $\delta_1$ ), delta médio ( $\delta_2$ ) e o delta pequeno ( $\delta_3$ ). Os resultados das partículas-teste selecionadas como clones encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Número de Clones

|            | Região 1 | Região 2 | Região 3 | Região 4 | Região 5 | Região 6 | Região 7 | Total |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| $\delta_1$ | 57       | 38       | 25       | 7        | 0        | 1        | 0        | 128   |
| $\delta_2$ | 36       | 26       | 15       | 3        | 0        | 2        | 0        | 82    |
| $\delta_3$ | 47       | 27       | 11       | 7        | 2        | 1        | 2        | 97    |
| Total      | 140      | 91       | 51       | 17       | 2        | 4        | 2        | 307   |

Número de clones que entraram nos respectivos deltas em função das regiões de origem no cinturão principal

Fonte: Elaborado pela autora.

No total, das 29 mil partículas-teste colocadas no cinturão principal na região da ressonância secular  $\nu_6$ , 307 se aproximaram da região da órbita atual de Ryugu. Dessas, 128 do  $\delta_1$  (grande), 82 do  $\delta_2$  (médio) e 97 do  $\delta_3$  (pequeno). Cabe ressaltar que esses valores são mutuamente exclusivos, ou seja, os valores pertencentes a  $\delta_3$  não estão presentes em  $\delta_2$  ou  $\delta_1$ , e os valores pertencentes a  $\delta_2$  não estão presentes em  $\delta_1$ .

Através da análise dos dados apresentados na Tabela 3, pode-se observar que a maioria dos clones que chegaram na vizinhança da órbita de Ryugu provêm das Regiões 1, 2, 3 e 4, corroborando com os dados teóricos de Michel e Delbo (2010) e Campins et al. (2013), que estimaram que Ryugu, provavelmente, veio de uma órbita com semieixo maior inferior a 2,5 UA e inclinação orbital inferior a  $12^\circ$ .

Considerando-se a distribuição inicial dos clones em cada uma das sete regiões, constatou-se que a região 1 obteve um êxito de 2,8% em alcançar a vizinhança atual de Ryugu, enquanto a região 2 apresentou um índice de sucesso de cerca de 1,82%. Já a região 3 apresentou um resultado de 1,02%, enquanto a região 4 obteve 0,34%. A região 5 apresentou o menor índice de sucesso, com apenas 0,067%, seguida da região 6 com 0,133% e da região 7 com 0,067%. Em resumo, das 29.000 partículas-teste iniciais,  $\approx 1,1\%$  obteve êxito em alcançar a órbita desejada de Ryugu.

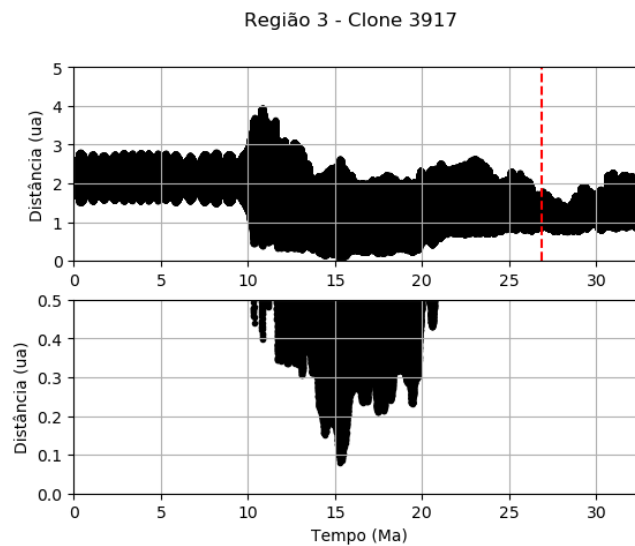
O tempo médio de vida dos 307 clones analisados foi de cerca de 25 milhões de anos, e seu destino foi a ejeção para além da distância de 35 UA ou a colisão com outros corpos celestes.

## 6.1 ENCONTROS COM O SOL

Na etapa anterior, foi realizada a contabilização dos clones que se aproximaram da órbita atual de Ryugu. Agora, é possível analisar quais desses clones se aproximaram do Sol. Com base nos dados obtidos, estima-se que o asteroide tenha sofrido poucos encontros próximos com o Sol. Dos 307 clones, somente 3 chegaram a distâncias inferiores a 0,1 UA, correspondendo somente a 0,97%. Sendo eles um da região 1 -  $\delta_1$  e os outros dois da região 3 - um do  $\delta_1$  e outro do  $\delta_3$ , respectivamente.

Entre esses três clones, o que alcançou a maior proximidade do Sol foi o pertencente à Região 3 do  $\delta_1$ , situando-se a uma distância de 0,07888 UA. A evolução ao longo do tempo em função da distância heliocêntrica que este clone atingiu, pode ser observada na **Figura 5**. Os outros dois clones chegaram a uma distância de 0,093843 UA, Região 1 -  $\delta_1$ , e de 0,091158 UA, Região 3 -  $\delta_3$ .

Figura 5 – Evolução Orbital em relação à distância ao longo do tempo



Evolução Orbital do Clone 3917 da Região 3 que entrou na região do  $\delta_1$ . O tempo final corresponde ao instante que o clone sai da região do  $\delta_1$  pela última vez, sem retornar. A linha vermelha corresponde ao tempo em que ele se tornou um Ryugu (entrou na vizinhança de Ryugu dentro dos limites do  $\delta_1$ ). A figura abaixo mostra o *zoom* da figura acima, destacando o ponto de maior aproximação com o Sol.

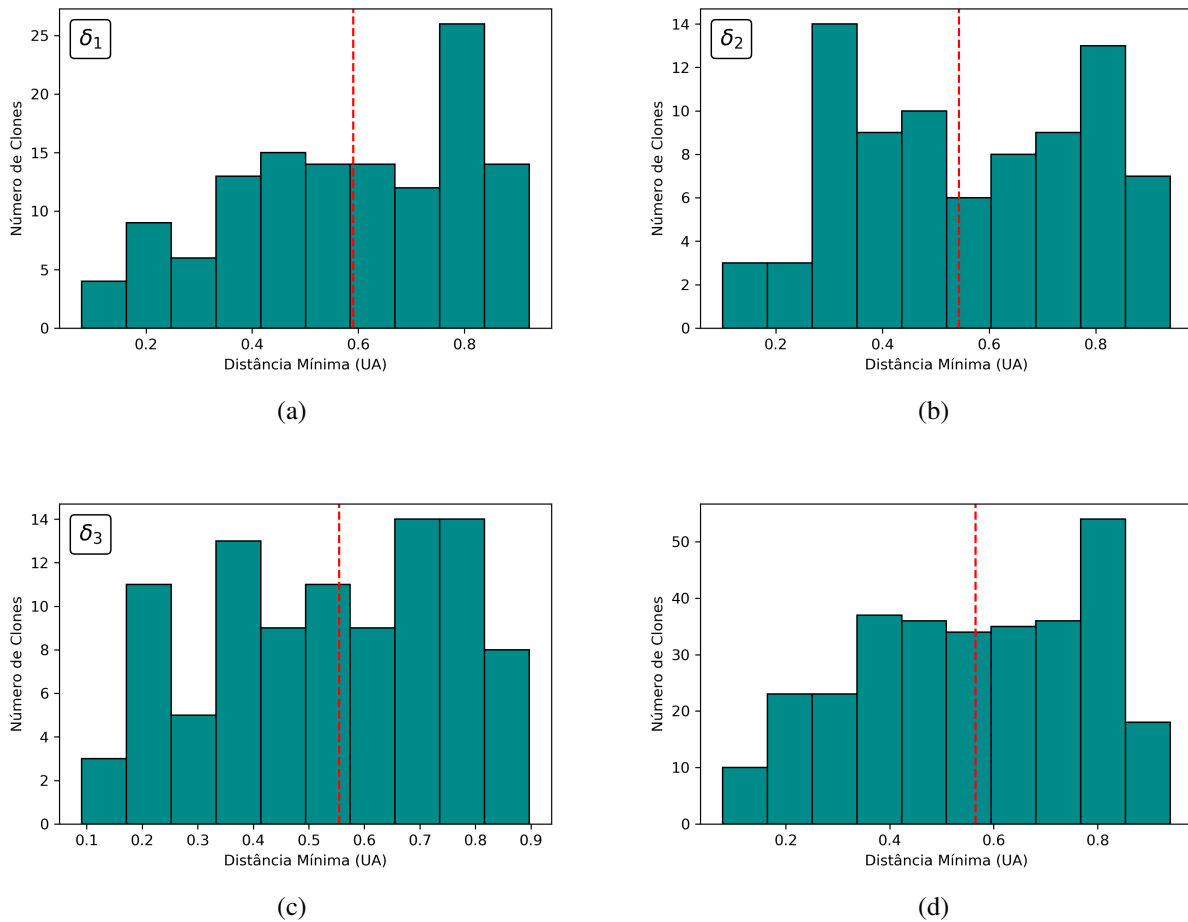
Fonte: Elaborado pela autora.

Para uma melhor visualização dos dados relativos à distância mínima heliocêntrica alcançada por cada clone, foram criados histogramas que estão apresentados na **Figura 6**, para os três deltas separadamente e da quantidade total. Estes histogramas mostram o número de clones que atingiram determinada distância mínima em relação ao Sol.

Para cada um desses histogramas, foi calculada a mediana da distância mínima dos clones. A mediana do  $\delta_1$  é de 0,59 UA,  $\delta_2$  de 0,54 UA e  $\delta_3$  de 0,55 UA. Esses valores mostram uma mediana similar entre os três deltas. A mediana calculada considerando a amostra de 307 clones é de 0,567 UA, o que corresponde a uma localização entre as órbitas de Mercúrio e Vênus.

Os resultados indicam que é improvável que o asteroide Ryugu tenha atingido uma distância muito próxima ao Sol. Assim, a análise dinâmica sugere que a alteração observada em sua superfície não deve ser atribuída a um único evento extremo dessa natureza.

Figura 6 – Histograma da distância mínima



Distribuição das distâncias heliocêntricas mínimas dos clones. a) Clones da região  $\delta_1$  - mediana da distância: 0,593058 UA. b) Clones da região  $\delta_2$  - mediana da distância: 0,55867 UA. c) Clones da região  $\delta_3$  - mediana da distância: 0,554389 UA. d) Considerando todos os 307 clones de Ryugu - mediana da distância: 0,567126 UA.

As linhas vermelhas indicam a posição das medianas das distâncias

Fonte: Elaborado pela autora.

Mesmo que os dados mostram-se baixos em relação à distância mínima em que o asteroide chegou ao Sol, é importante analisar as temperaturas que a superfície do objeto atingiu e também calcular quanto tempo essa superfície esteve exposta às intempéries do meio espacial, para averiguar se essa mudança é possível devido ao grande tempo de exposição nesse ambiente. Estas análises foram realizadas sendo apresentadas nos capítulos seguintes.

## 7 TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE

Uma análise de relevância a ser realizada refere-se à temperatura alcançada pela superfície do asteroide ao longo de sua trajetória desde sua partida do cinturão principal até atingir sua órbita atual. Para tal análise, foram utilizados estudos teóricos de termofísica, em conjunto com dados numéricos da evolução orbital de Ryugu. O objetivo é estimar as temperaturas a que a superfície do asteroide esteve exposta e compará-las com os dados obtidos a partir das análises das amostras coletadas pela missão espacial, discutidas no Capítulo 4

O presente estudo emprega a abordagem na qual a temperatura de um elemento de superfície de um asteroide é estabelecida como função da distância heliocêntrica, do albedo, da emissividade e do ângulo de inclinação em relação à direção solar (DELBO; HARRIS, 2002; MARCHI et al., 2009; MICHEL; DELBO, 2010). De acordo com estes autores, assumindo que cada elemento da superfície esteja em equilíbrio instantâneo com a radiação solar, a expressão adaptada para calcular a temperatura máxima da superfície é dada por:

$$T(r) = \left[ \frac{(1 - A)S_{\odot}}{r^2 \epsilon \sigma} \right]^{1/4} \quad (1)$$

em que,  $A$  é o *Bond Albedo*<sup>1</sup>;  $S_{\odot}$  é a constante solar;  $r$ , distância heliocêntrica;  $\epsilon$ , emissividade;  $\sigma$ , constante de *Stefan-Boltzmann*.

É possível aprimorar esse modelo termofísico por meio da inclusão de condições de contorno. Por exemplo, podem ser consideradas facetas distribuídas na superfície do objeto em relação ao ângulo incidente do raio solar e também diferentes profundidades na extensão do corpo.

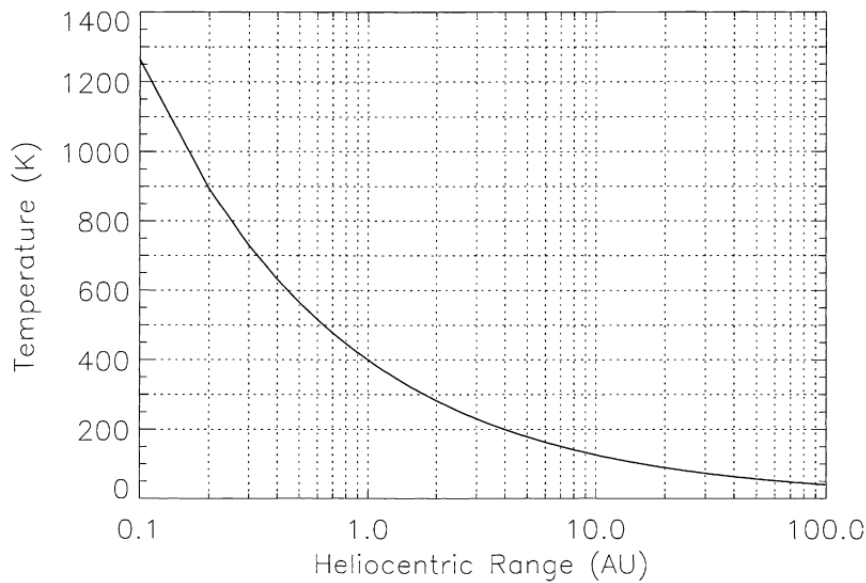
No entanto, para simplificar os cálculos, assumiu-se que a temperatura máxima de uma superfície de um corpo sem atmosfera, aquecido radiativamente pela luz solar, ocorre no equador, onde a superfície é perpendicular à direção do Sol. Além disso, neste modelo não foi considerado o movimento de rotação do corpo e adotou-se uma superfície homogênea. Assim, essa temperatura pode ser estimada por meio da expressão 1

Desta forma, com base na Equação 1 Delbo e Harris (2002) produziu um gráfico que ilustra a relação entre a temperatura da superfície de um asteroide e sua distância heliocêntrica, o qual é apresentado na Figura 7. Conforme os resultados apresentados no gráfico, é possível observar que a máxima temperatura é alcançada a uma distância de 0,1 UA, atingindo aproximadamente 1273 K ( $\approx 1000^{\circ}\text{C}$ ). Em contraste, a uma distância de 1 UA, a temperatura cai para aproximadamente 400 K ( $\approx 130^{\circ}\text{C}$ ).

Por outro lado, (MICHEL; DELBO, 2010) adotaram uma abordagem numérica para determinar cada faceta independentemente para resolver o problema de aquecimento unidimensional da equação de difusão na subsuperfície. Como resultado, eles encontraram que a temperatura máxima no equador a uma distância de 0,1 UA é de aproximadamente 1500 K ( $1230^{\circ}\text{C}$ ), enquanto a uma distância de 1 UA, a temperatura fica em torno de 453 K ( $\approx 180^{\circ}\text{C}$ ).

<sup>1</sup> Bond albedo é a fração de luz solar total refletida por um objeto

Figura 7 – Temperatura superficial em função da distância heliocêntrica



Temperatura superficial em função da distância heliocêntrica para um elemento de superfície de um asteroide voltado para o Sol em equilíbrio térmico com insolação. Os parâmetros utilizados nesse gráfico foram:

$$A = 0,0393, \epsilon = 0,9, S_{\odot} = 1373 \text{ Wm}^{-2} \text{ e } \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$$

Fonte: Delbo e Harris (2002)

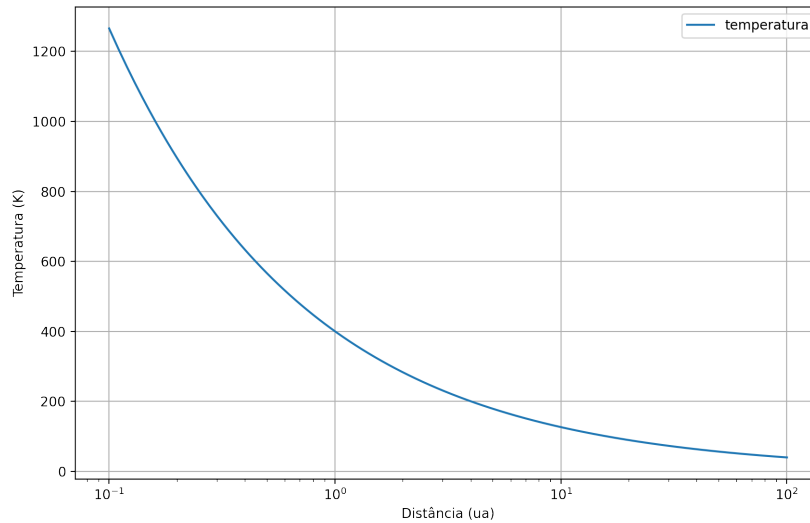
Visando validar este método e os dados a serem empregados, foi gerado um gráfico similar ao apresentado na Figura 7 porém utilizando informações do asteroide Ryugu, o qual pode ser visto na Figura 8. A única diferença entre as duas figuras foi a utilização do parâmetro do *Bond Albedo*, que foi baseado nos dados de Ryugu (GROTT et al., 2019), enquanto os demais parâmetros são constantes. Observa-se que, neste caso, a temperatura máxima a uma distância de 0,1 UA foi de aproximadamente 1303 K ( $\approx 1030^{\circ}\text{C}$ ), enquanto a uma distância de 1 UA, a temperatura fica em torno de 400 K ( $\approx 127^{\circ}\text{C}$ ).

Após a seleção do método mais apropriado para verificar a temperatura da superfície de uma forma simplificada, a equação correspondente (Eq. 1) foi aplicada para calcular a temperatura em cada clone. Para este fim, foram utilizados os seguintes parâmetros:  $S_{\odot} = 1373 \text{ Wm}^{-2}$ ,  $A = 0,0146$ ,  $\epsilon = 0,9$  e  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ , enquanto as distâncias heliocêntricas correspondem aos dados de evolução de cada clone, que foram obtidos via integrações numéricas, conforme descrito nos Capítulos 5 e 6.

Desta maneira, é possível calcular as temperaturas superficiais máximas alcançadas por cada clone. Inicialmente, foram analisados os casos extremos. Conforme descrito no Capítulo 6, o clone 3917, inicialmente localizado na região 3, foi o que teve o encontro mais próximo com o Sol. Consequentemente, este foi o clone que atingiu a temperatura superficial máxima de  $1163^{\circ}\text{C}$ . Esse resultado é ilustrado no gráfico da Figura 9. Este é um exemplo de um clone que se aproximou consideravelmente do Sol em um único evento extremo, resultando em uma alteração em sua superfície de forma pontual. Todavia, devido à dinâmica dos asteroides, sabe-se que sua superfície pode ser modificada não necessariamente em um único instante, mas ao longo de sua trajetória.

Contudo, embora tenha ocorrido casos extremos, em que o corpo foi exposto a temperaturas eleva-

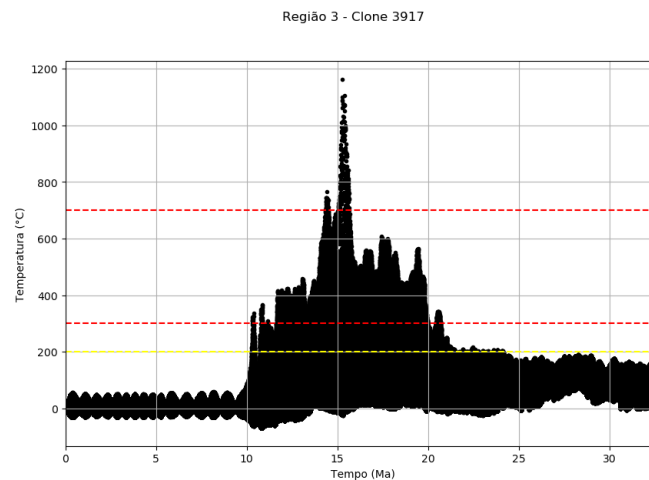
Figura 8 – Temperatura superficial em função da distância heliocêntrica



Temperatura superficial em função da distância heliocêntrica. Os parâmetros utilizados nesse gráfico foram:  
 $A = 0,0146$  (*Bond Albedo* de Ryugu (GROTT et al. 2019)),  $\epsilon = 0,9$ ,  $S_{\odot} = 1373 \text{ W m}^{-2}$  e  
 $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 9 – Temperatura máxima do clone 3917 - Região 3 -  $\delta_1$



Comparando com o gráfico na Figura 5 verifica-se que a máxima temperatura é atingida no instante de maior aproximação com o Sol. Linha amarela: 200°C, linhas vermelhas: 300°C e 700°C respectivamente.

Fonte: Elaborado pela autora.

das, a análise de todos os 307 clones indica que foram poucos os que apresentaram esse comportamento. A relação entre a quantidade de clones e suas respectivas temperaturas máximas, pode ser observada nos histogramas da Figura 10, divididas em  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  e todos os 307 clones, respectivamente. A grande maioria não atingiu temperaturas tão altas, sendo que apenas 0,98% deles registraram temperaturas acima de 1000°C. A mediana das temperaturas máximas registradas ficou em torno de 263,51°C.

Nos gráficos em questão, existem linhas destacadas inseridas para uma melhor compreensão e comparação das temperaturas discutidas no Capítulo 4. Conforme Kitazato et al. (2021), a temperatura

da superfície a uma profundidade de 1 metro atingiu 200°C, representada pela linha amarela. Esses mesmos autores também analisaram amostras e constataram que a superfície do objeto deve ter atingido pelo menos 300°C, mas não ultrapassado 700°C, representados pelas linhas vermelhas, respectivamente. A linha azul, por sua vez, corresponde à mediana das temperaturas obtidas.

Ao analisar os gráficos de cada delta de forma geral, é possível observar que eles apresentaram semelhanças significativas. As suas medianas foram de 251,90°C para o  $\delta_1$ , 274,29°C para o  $\delta_2$  e 268,79°C para o  $\delta_3$ . Além disso, como mencionado anteriormente, a mediana de todas as amostras foi de 263,51°C. A faixa de temperatura entre 200°C e 300°C corresponde a 28,4% dos clones, totalizando 87 amostras. Por outro lado, a faixa abaixo de 200°C foi observada em 31,04% dos clones, ou seja, 95 amostras.

Portanto, a análise da evolução dinâmica de Ryugu sugere que sua superfície provavelmente não foi exposta a temperaturas muito elevadas, o que indica que não houve mudanças significativas na temperatura de sua superfície. Dessa forma, é improvável que a temperatura superficial tenha ultrapassado os valores de 300°C a 700°C, mas sim, permanecido entre 200°C e 300°C.

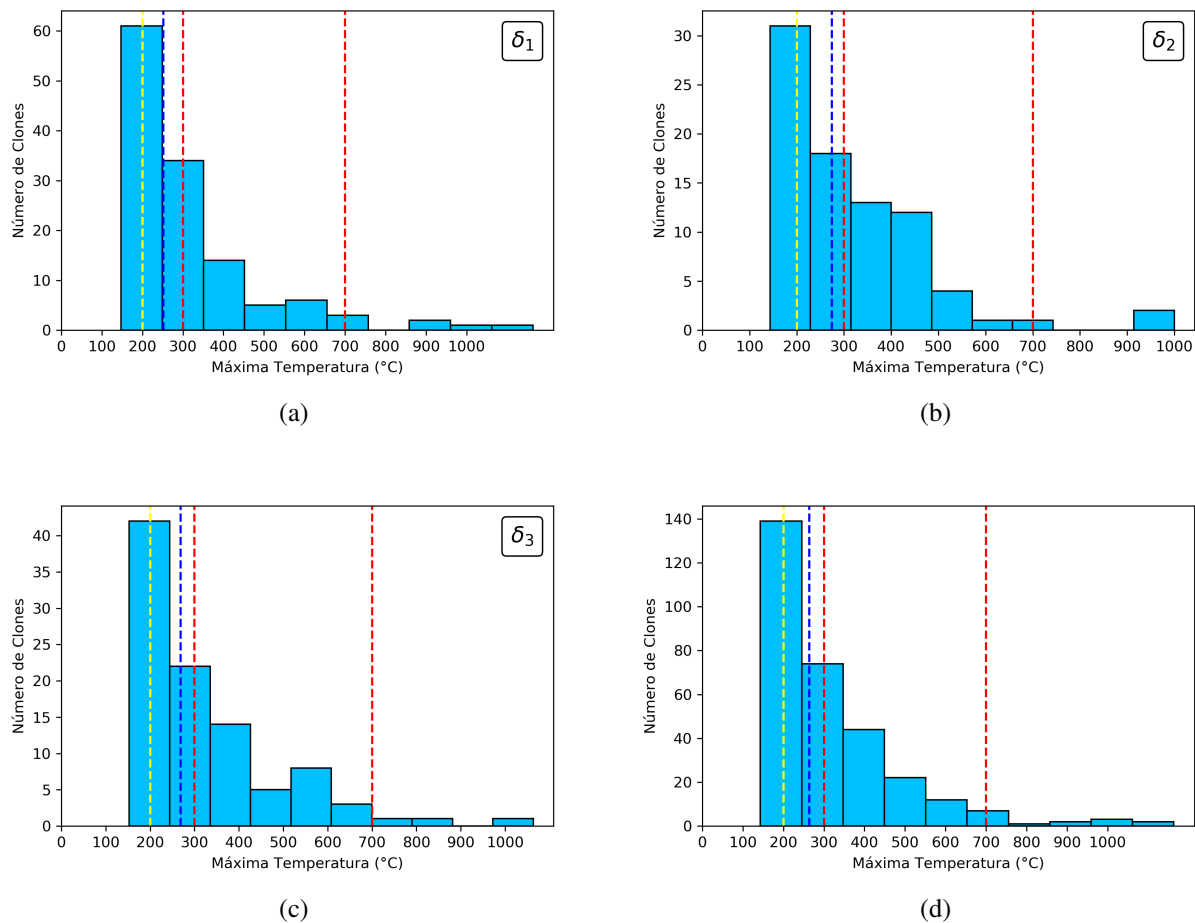
No entanto, é importante considerar que a utilização de cálculos simplificados pode ter gerado uma pequena margem de erro nas temperaturas obtidas. Ao comparar os dados de Michel e Delbo (2010) e Delbo e Harris (2002), observa-se uma diferença de quase 200°C na distância de 0,1 UA, mas a temperatura permanece a mesma na distância de 1 UA. Portanto, é possível que os dados obtidos possam ter essa mesma diferença.

Entretanto, considerando que os dados deste trabalho representam uma média, a temperatura superficial estimada a partir da dinâmica orbital corrobora com a teoria proposta por (YOKOYAMA et al., 2022), que postula uma menor variação de temperatura na superfície do asteroide Ryugu.

Nesse sentido, faz-se necessário realizar estudos adicionais a fim de obter maior precisão nos cálculos teóricos da termofísica de Ryugu para análise das temperaturas de sua superfície. É necessária também a realização de análises experimentais das amostras do objeto, tendo em vista haver divergências de informações mesmo entre os dados experimentais disponíveis.

Assim, é fundamental a realização de estudos sobre a duração do período em que o objeto esteve exposto a essas temperaturas, uma vez que esse fator é uma das componentes do envelhecimento espacial que dependem da dinâmica orbital, que pode levar a mudanças significativas na superfície do asteroide. É necessário avaliar se o Ryugu apresenta um alto ou baixo grau de envelhecimento espacial, que pode ter resultado de uma longa exposição no ambiente espacial em sua vida ao longo de sua vida, e não apenas em um único instante. As análises complementares são cruciais para uma melhor compreensão da história e evolução dinâmica de Ryugu e de outros corpos celestes similares a ele.

Figura 10 – Temperatura Máxima dos clones



Distribuição das temperaturas máximas dos clones. a) Clones da região  $\delta_1$  - mediana da temperatura: 251,90°C. b) Clones da região  $\delta_2$  - mediana da temperatura: 274,29°C. c) Clones da região  $\delta_3$  - mediana da temperatura: 268,79°C. d) Considerando todos os 307 clones de Ryugu - mediana da temperatura: 263,51°C. Linha amarela: 200°C, linhas vermelhas: 300°C e 700°C respectivamente, linha azul: posição da mediana

Fonte: Elaborado pela autora.

## 8 GRAU DE ENVELHECIMENTO ESPACIAL

O envelhecimento espacial, conforme mencionado anteriormente no Capítulo 3, é um fenômeno complexo que envolve uma variedade de fatores, tais como o bombardeamento por radiação e por micrometeoritos, bem como a irradiação iônica, entre outras influências. O objetivo deste trabalho não se concentra em examinar um efeito específico, mas sim, em analisar a evolução de um corpo em um ambiente espacial, sujeito a esses fatores por um longo período, o qual pode alterar significativamente a sua superfície.

O presente estudo tem como objetivo investigar a duração necessária da exposição de um corpo ao ambiente espacial a fim de gerar um grau de envelhecimento que possa causar mudanças físicas e químicas em sua superfície. A literatura científica sugere que objetos submetidos a esse ambiente por períodos prolongados podem apresentar tais mudanças.

Diversos experimentos laboratoriais foram realizados, utilizando amostras mineralógicas, a fim de determinar o tempo necessário de exposição ao ambiente espacial para ocorrer alterações perceptíveis na superfície de um objeto. Além disso, foram desenvolvidos modelos teóricos para calcular a escala de tempo requerida para o envelhecimento espacial, visando aprofundar a compreensão desse fenômeno (SASAKI et al., 2002; LANTZ et al., 2017; GRAVES et al., 2019).

Existe uma grande variação no tempo necessário para que o fenômeno de envelhecimento espacial se manifeste na superfície de um corpo celeste. Loeffler, Dukes e Baragiola (2009), por exemplo, constaram que o tempo médio para o avermelhamento decorrente desse processo situa-se entre 10 mil e 100 mil anos a uma distância de 1 UA. Strazzulla et al. (2005), Brunetto et al. (2006), por sua vez, obtiveram uma escala de tempo de 10 mil a 1 milhão de anos, considerando essa mesma distância. Mais recentemente, Graves et al. (2019), encontrou soluções plausíveis para a escala de tempo do envelhecimento espacial em órbitas circulares  $\leq 5$  Ma a 1 UA. Estes dados indicam o tempo mínimo de exposição necessário do objeto ao ambiente espacial para ocorrerem alterações na superfície, a uma determinada distância.

As escalas de tempo previamente mencionadas sugerem que a superfície do objeto pode ser afetada pelo envelhecimento espacial se este persistir naquela distância mínima por um tempo igual ou superior àquele pré-estabelecido. Por outro lado, se o objeto não permanecer nessa condição pelo tempo necessário, é improvável que ele apresente alterações devido ao envelhecimento espacial. No entanto, se o objeto permanecer exposto por um período superior ao estabelecido, sua superfície sofrerá uma degradação progressiva que resultará em uma saturação, cuja reversão é improvável. Por este motivo, é crucial determinar a duração mínima em que o asteroide permaneceu no ambiente espacial, sujeito a este efeito, a fim de avaliar se sua superfície sofreu algum grau de envelhecimento. Contudo, como evidenciado anteriormente, os intervalos de tempo mínimos estabelecidos a 1 UA variam significativamente, apresentando um amplo intervalo.

Desta forma, neste trabalho, busca-se determinar o tempo equivalente, em milhões de anos por unidade astronômica, para o asteroide Ryugu, a fim de comparar este dado com dados previamente descritos na literatura científica. Para isso, foi adotado um modelo que permite calcular o tempo

equivalente que o asteroide permaneceu a uma distância de 1 UA.

O modelo utilizado consiste, em primeiro lugar, na obtenção da distância heliocêntrica dos clones de Ryugu a cada ponto da evolução orbital. Assim, como explicado no Capítulo 5, esses dados foram gerados por meio das integrações numéricas, sendo a distância heliocêntrica calculada e fornecida pelo integrador a cada passo de saída do programa, ou seja, a cada 30 anos.

Para determinar o tempo total em que o asteroide Ryugu ficou sujeito a esse efeito, é necessário realizar uma soma ao longo de todo o período em análise. Além disso, é preciso considerar que a radiação não se comporta de uma forma linear em relação à distância do objeto central, mas sim, que decai com o quadrado dela. Dessa forma, a equação para o cálculo do tempo equivalente fica expressa da seguinte maneira:

$$\frac{\text{tempo}}{(\text{distância})^2} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t_i}{\langle r_i \rangle^2} = \frac{[\text{Ma}]}{[\text{UA}^2]} \quad (1)$$

em que  $n$  é o número de pontos. Desta forma, o tempo adotado para o cálculo foi  $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ , o qual é fixo e corresponde ao intervalo de 30 anos. Além disso, visando aperfeiçoar o resultado, foi considerada a distância média  $\langle r_i \rangle = \frac{r_i + r_{i+1}}{2}$ , correspondente à distância média entre cada ponto do intervalo de saída.

Conforme mencionado anteriormente, a soma da Eq. 1 corresponde ao tempo equivalente que cada clone permaneceu a uma distância de 1 UA. Assim sendo, é possível comparar o tempo calculado com os dados de referência da literatura e estimar se o asteroide Ryugu esteve sujeito a um alto grau de envelhecimento espacial, o qual poderia ter ocasionado as alterações observadas em sua superfície.

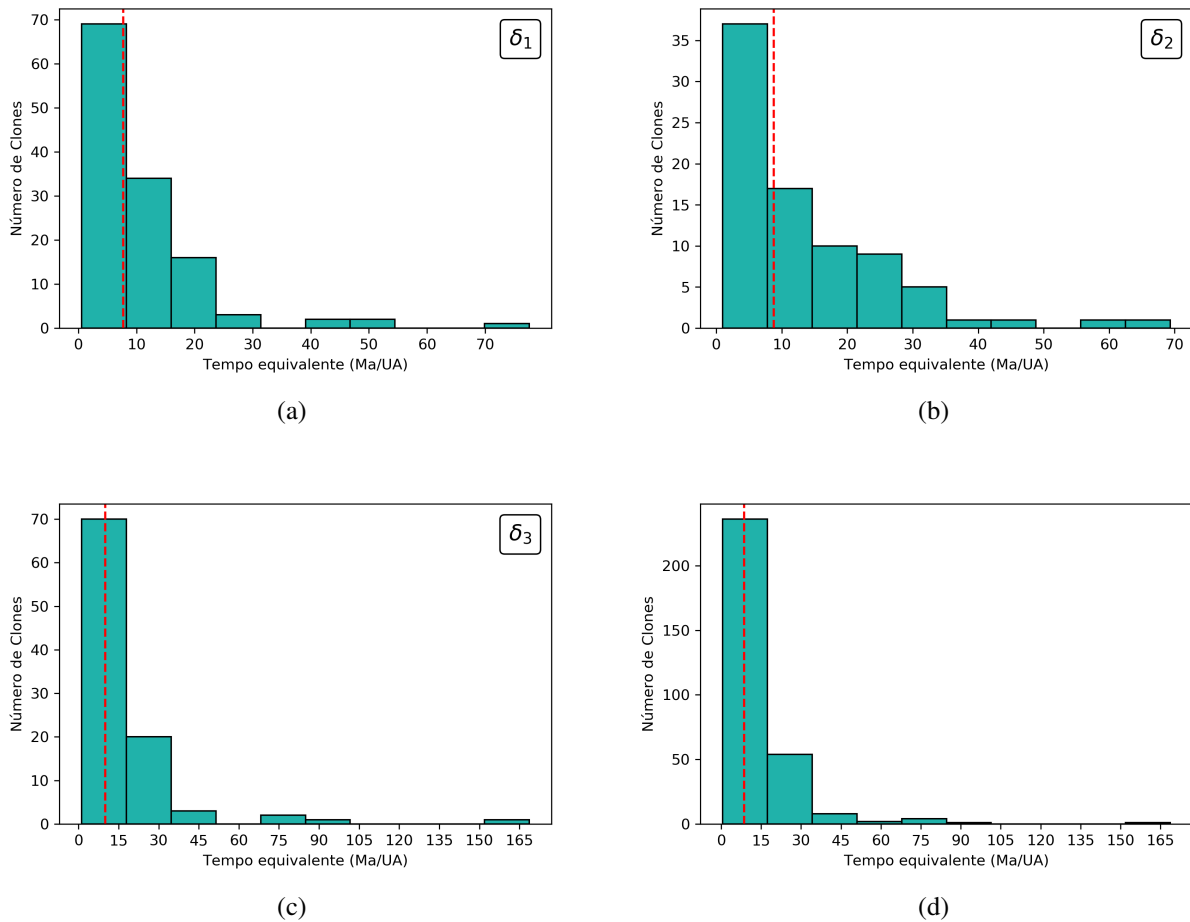
Foram gerados histogramas que permitem visualizar a distribuição do tempo equivalente em função do número de clones. Os histogramas apresentados na Figura 11 mostram a distribuição separadamente, considerando cada um dos deltas, além da distribuição obtida considerando todos os 307 clones.

Ao comparar os gráficos de cada delta, pode-se observar uma certa similaridade entre eles, visto que a maioria dos valores de tempo equivalente obtidos está ligeiramente abaixo de 15 Ma. A linha vermelha presente em cada gráfico corresponde à mediana da distribuição dos dados, referido como tempo equivalente mediano. Foi calculado um tempo equivalente mediano de 7,7071 Ma/UA, considerando apenas os clones que se aproximaram da órbita de Ryugu, nos limites do  $\delta_1$ . Considerando os limites  $\delta_2$  e  $\delta_3$ , foram obtidos 8,7632 Ma/UA e 10,0041 Ma/UA, respectivamente. A Figura 11(d) mostra que a mediana calculada, considerando todos os 307 clones, foi de 8,6431 Ma/UA.

Nota-se também que há uma diferença na escala do histograma correspondente ao  $\delta_3$ , o qual não se estende até 70 Ma/UA como os outros, mas sim até 165 Ma/UA. Entretanto, é importante ressaltar que este é um caso particular, no qual somente um clone atingiu tal valor. Especificamente, trata-se do clone 797 do  $\delta_3$ , originário da Região 1, o qual obteve um tempo equivalente de 168,61 Ma/UA. Outro valor extremo é o tempo equivalente mínimo, o qual foi obtido pelo clone 3948 do  $\delta_1$ , originário da Região 2, com um valor de 0,5727 Ma/UA.

Portanto, conforme citado anteriormente e observado na Figura 11(d), estima-se através do estudo da evolução orbital passada do asteroide Ryugu, que ele foi exposto a uma equivalência de 8,6431 Ma à distância de 1 UA, sugerindo a ocorrência de efeitos decorrentes do envelhecimento espacial observados em sua superfície. Ao comparar este resultado com os valores apresentados em outros

Figura 11 – Tempo equivalente a uma distância de 1 UA para os clones



Distribuição do tempo equivalente a uma distância de 1 UA dos clones. a) Clones da região  $\delta_1$  - mediana do tempo equivalente: 7,7071 Ma/UA. b) Clones da região  $\delta_2$  - mediana do tempo equivalente: 8,7632 Ma/UA. c) Clones da região  $\delta_3$  - mediana do tempo equivalente: 10,0041 Ma/UA. d) Considerando todos os 307 clones de Ryugu - mediana do tempo equivalente: 8,6431 Ma/UA. A linha vermelha representa a posição da mediana.

Fonte: Elaborado pela autora.

artigos, constata-se que Ryugu ficou provavelmente exposto por tempo suficiente para que ocorresse alguma alteração em sua superfície. Por exemplo, [Strazzulla et al. \(2005\)](#), [Brunetto et al. \(2006\)](#) mencionou que esse tempo precisaria ser de pelo menos entre 10 mil e 1 milhão de anos, enquanto [\(GRAVES et al., 2019\)](#) afirmou que deveria ser menor ou igual a 5 milhões de anos. Ao comparar esses valores com os dados obtidos neste trabalho, verifica-se que há uma alta probabilidade de que Ryugu tenha sofrido esses efeitos, uma vez que o valor obtido foi maior do que todos os valores citados nos trabalhos citados acima. Desta forma, os resultados aqui obtidos corroboram com os dados observados pela sonda espacial Hayabusa2 e pelas amostras coletadas, os quais indicam a presença de alterações significativas em sua superfície devido ao alto grau de envelhecimento.

## 9 COMENTÁRIOS FINAIS

O asteroide Ryugu foi alvo da missão Hayabusa2, desenvolvida com o objetivo de coletar dados e amostras, fornecendo informações acerca da história composicional e geológica desse corpo primitivo. Uma das descobertas da missão foi a observação do efeito de envelhecimento espacial em Ryugu.

O envelhecimento espacial, como dito anteriormente, é um processo pelo qual a superfície de um objeto no espaço é alterado devido a efeitos como vento solar, impactos por micrometeoritos, raios cósmicos, dentre outros. Esse processo pode causar mudanças, químicas, mineralógicas e nas propriedades físicas do material da superfície.

O processo de envelhecimento espacial resultou em diversos efeitos observáveis na superfície de Ryugu. Uma das mudanças mais notáveis é o escurecimento da superfície. Além disso, ao longo de sua existência, a superfície do asteroide foi submetida a diferentes temperaturas, o que pode ter influenciado a mudança de composição química da superfície. Ademais, a longa exposição da superfície de Ryugu ao ambiente espacial possivelmente resultou em um alto grau de envelhecimento, contribuindo também nas mudanças da superfície.

O estudo do envelhecimento espacial em Ryugu é de extrema importância para a compreensão da evolução dos corpos primitivos no Sistema Solar. Ao estudar os efeitos desse processo na superfície dos asteroides, pode-se aprofundar o conhecimento acerca das mudanças químicas e mineralógicas que ocorrem nesses corpos ao longo do tempo. Tal entendimento é fundamental para a compreensão mais aprofundada sobre a formação e evolução do Sistema Solar.

Considerando o cenário apresentado, o objetivo deste trabalho consistiu em estudar a evolução orbital do asteroide Ryugu para verificar a ocorrência de aproximações com o Sol que pudessem ter ocasionado mudanças significativas em sua superfície, analisar as temperaturas que a superfície do asteroide alcançou ao longo do tempo, bem como, avaliar o grau de envelhecimento a que o objeto foi submetido, considerando o prolongado período em que esteve exposto ao ambiente espacial. Com base nessas informações, foi possível comparar os resultados obtidos com as amostras coletadas pela sonda da missão Hayabusa2.

Para alcançar os objetivos propostos neste estudo, foi adotado um método que consistiu em utilizar integrações numéricas do problema de N-corpos, utilizando o pacote Mercury, a fim de calcular a evolução orbital do asteroide Ryugu. Como a origem provável de Ryugu é o cinturão principal com a ação da ressonância secular  $\nu_6$ , foram gerados 29000 partículas-teste de Ryugu distribuídas no cinturão principal de asteroides na vizinhança dessa ressonância, a fim de determinar quantos desses clones chegaram à órbita atual do Ryugu. Com os dados gerados por esse programa, incluindo os elementos orbitais e as distâncias heliocêntricas desses clones, foi possível verificar se houve aproximações extremas com o Sol. Utilizando programas desenvolvidos pelo autor, foram realizadas análises adicionais para determinar as temperaturas atingidas na superfície do asteroide ao longo de sua evolução orbital e o grau de envelhecimento de sua superfície.

Das 29 mil partículas-teste, verificou-se que 307 delas obtiveram êxito em sair do cinturão principal pela ressonância  $\nu_6$ , alcançando a vizinhança da órbita do asteroide Ryugu, tornando-se então clones

de Ryugu. Esses resultados foram então divididos em três intervalos, sendo que 128 clones obtiveram êxito no intervalo  $\delta_1$ , aproximadamente 82 no  $\delta_2$  e cerca de 97 no  $\delta_3$ . Além disso, a Tabela 3 indica que as regiões com maior taxa de sucesso foram as regiões 1, 2, 3 e 4, correspondendo a inclinações inferiores a  $12^\circ$  e 2,5 UA, o que corrobora com os dados teóricos de (CAMPINS et al., 2013; MICHEL; DELBO, 2010).

Após identificar os possíveis clones de Ryugu, verificaram-se os encontros com o Sol. Observou-se que dentre os 307 clones, somente 3 alcançaram distâncias inferiores a 0,1 UA. E que a mediana da distância heliocêntrica foi de aproximadamente 0,567 UA. Diante disso, é possível inferir que é improvável que o asteroide Ryugu tenha sofrido aproximações muito próximas ao Sol que causassem mudanças significativas em sua superfície. Assim, o próximo passo consistiu em investigar se as alterações observadas na superfície do asteroide foram ocasionadas pelo tempo prolongado de exposição ao ambiente espacial, em vez de uma única aproximação com o Sol. E também foram analisadas as temperaturas alcançadas em sua superfície.

Desta forma, foi proposto um método termofísico que permitiu o cálculo da temperatura superficial a partir da evolução orbital do asteroide. Conforme os dados obtidos, a temperatura mediana dos 307 clones analisados foi de  $263,51^\circ\text{C}$ , indicando que Ryugu provavelmente não sofreu exposição a temperaturas extremamente elevadas em sua superfície.

Entretanto, já foram realizadas análises em algumas amostras recolhidas pela sonda espacial. Kitazato et al. (2021), por exemplo, apontou a presença da componente hidroxila na subcamada da superfície, sugerindo que a superfície pode ter atingido temperaturas acima de  $300^\circ\text{C}$ , mas abaixo de  $700^\circ\text{C}$ . Esses mesmos autores, mostraram que, com base em um modelo teórico, a superfície de Ryugu teria atingido temperaturas de cerca de  $200^\circ\text{C}$ . No entanto, outro estudo, conduzido por Yokoyama et al. (2022), sugere que Ryugu provavelmente não teria sofrido exposição a temperaturas muito elevadas, atingindo cerca de  $170^\circ\text{C}$  ou mesmo menos de  $100^\circ\text{C}$ . Assim, os resultados do presente trabalho concordam mais com os dados de Yokoyama et al. (2022), sugerindo que Ryugu provavelmente não foi exposto a temperaturas muito altas. Contudo, devido à simplificação dos cálculos realizados, a mediana da temperatura seria um pouco mais elevada, podendo, então, corroborar com os dados de Kitazato et al. (2021).

Outra análise relevante consistiu no cálculo do grau de envelhecimento de Ryugu. O qual, estima o tempo equivalente em que o asteroide ficou submetido ao efeito de envelhecimento espacial ao longo de sua vida. Os resultados obtidos indicaram que esse tempo equivale a cerca de 8,6431 Ma/UA, valor superior à escala de tempo encontrada na literatura. Desta forma, esse dado corrobora com as amostras e observações realizadas em Ryugu, que sugerem que o asteroide tenha, de fato, sofrido o efeito de envelhecimento espacial.

Portanto, este trabalho fornece novos elementos para esclarecer a questão da alteração da superfície de Ryugu por meio da análise de sua dinâmica orbital.

## REFERÊNCIAS

- ARAUJO, R. A. N. **O sistema triplo de asteróide 2001 SN263**: Dinâmica orbital e estabilidade. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo - Brasil, 2011. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3AK44AL>. Acesso em: 20 jul. 2019.
- BARNES, P. Y.; PARR, A. C.; EARLY, E. A. Spectral reflectance. P Y. Barnes, Albert C. Parr, E A. Early, 1998.
- BINZEL, R. et al. Physical properties of near-earth objects. In: **Asteroids III**. Tucson, Arizona - Estados Unidos: University of Arizona Press, 2002. p. 255–271.
- BINZEL, R. P. et al. Spectral properties of near-earth asteroids: Evidence for sources of ordinary chondrite meteorites. **Science**, v. 273, n. 5277, p. 946–948, 1996.
- BINZEL, R. P. et al. Spectral properties of near-earth objects: Palomar and irtf results for 48 objects including spacecraft targets (9969) braille and (10302) 1989 ml. **Icarus**, v. 151, n. 2, p. 139–149, 2001.
- BINZEL, R. P. et al. Earth encounters as the origin of fresh surfaces on Near-Earth Asteroids. **Nature**, v. 463, n. 7279, p. 331–334, 2010.
- BOLDRIN, L. A. G.; ARAUJO, R. A. N.; WINTER, O. C. On the rotational motion of neas during close encounters with the earth. **The European Physical Journal Special Topics**, Springer, v. 229, p. 1391–1403, 2020.
- BONANNO, C. An analytical approximation for the moid and its consequences. **Astronomy and astrophysics**, v. 360, p. 411–416, 2000.
- BOTT, N. et al. Clustering analysis of high spatial resolution spectra of asteroid (162173) ryugu from hayabusa2/nirs3. **Planetary and Space Science**, v. 219, p. 105530, 2022.
- BOTTKE, J. W. F. et al. The Yarkovsky and Yorp Effects: Implications for Asteroid Dynamics. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 34, p. 157–191, maio 2006.
- BOTTKE, W. et al. Collisional lifetimes and impact statistics of near-earth asteroids. **Hazards due to comets and asteroids**, Univ. of Arizona Press Tucson, v. 337, 1994.
- BOTTKE, W. F. et al. Debiased orbital and absolute magnitude distribution of the near-earth objects. **Icarus**, v. 156, n. 2, p. 399–433, 2002.
- BOTTKE, W. F. et al. The yarkovsky and yorp effects: Implications for asteroid dynamics. **Annu. Rev. Earth Planet. Sci.**, Annual Reviews, v. 34, p. 157–191, 2006.
- BOTTKE, W. F. et al. In search of the source of asteroid (101955) bennu: Applications of the stochastic yorp model. **Icarus**, v. 247, p. 191–217, 2015. ISSN 0019-1035.
- BRUNETTO, R. et al. Asteroid Surface Alteration by Space Weathering Processes. In: **Asteroids IV**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 597–616.
- BRUNETTO, R. et al. Modeling asteroid surfaces from observations and irradiation experiments: The case of 832 karin. **Icarus**, v. 184, n. 2, p. 327–337, 2006. ISSN 0019-1035.
- BUS, S. J.; BINZEL, R. P. Phase ii of the small main-belt asteroid spectroscopic survey: A feature-based taxonomy. **Icarus**, v. 158, n. 1, p. 146–177, 2002. ISSN 0019-1035.

- CAMPINS, H. et al. The origin of asteroid 162173 (1999 JU<sub>3</sub>). **The Astronomical Journal**, v. 146, n. 2, p. 26, 2013.
- CHAMBERS, J. E. A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Blackwell Science Ltd Oxford, UK, v. 304, n. 4, p. 793–799, 1999.
- CHAPMAN, C. R. S-type asteroids, ordinary chondrites, and space weathering: The evidence from galileo's fly-bys of gaspra and ida. **Meteoritics & Planetary Science**, v. 31, n. 6, p. 699–725, 1996.
- CHAPMAN, C. R. Space weathering of asteroid surfaces. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 32, p. 539–567, 2004.
- CHAUMARD, N. et al. Radiative heating of carbonaceous near-earth objects as a cause of thermal metamorphism for ck chondrites. **Icarus**, v. 220, n. 1, p. 65–73, 2012.
- CLARK, R. N.; RENCZ, A. Manual of remote sensing. **Remote Sensing for the Earth Sciences**, New York, NY: John Wiley and Sons, v. 3, p. 3–58, 1999.
- COAKLEY, J. Reflectance and albedo, surface. **Encyclopedia of the Atmosphere**, Academic Press Cambridge, MA, USA, v. 1, p. 1914–23, 2003.
- DELBO, M.; HARRIS, A. W. Physical properties of near-earth asteroids from thermal infrared observations and thermal modeling. **Meteoritics & Planetary Science**, v. 37, n. 12, p. 1929–1936, 2002.
- DELL'ORO, A.; MARCHI, S.; PAOLICCHI, P. Collisional evolution of Near-Earth Asteroids and refreshing of the space-weathering effects. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters**, v. 416, n. 1, p. L26–L30, 2011.
- DEMEO, F.; BINZEL, R. P. Comets in the near-earth object population. **Icarus**, Elsevier, v. 194, n. 2, p. 436–449, 2008.
- DEMEO, F. E. et al. An extension of the bus asteroid taxonomy into the near-infrared. **Icarus**, v. 202, n. 1, p. 160–180, 2009.
- DRAN, J. et al. Microprobe studies of space weathering effects in extraterrestrial dust grains. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences**, The Royal Society London, v. 285, n. 1327, p. 433–439, 1977.
- DYMOCK, R. The h and g magnitude system for asteroids. **Journal of the British Astronomical Association**, vol. 117, no. 6, p. 342–343, v. 117, p. 342–343, 2007.
- FARNOCCHIA, D. et al. Near earth asteroids with measurable yarkovsky effect. **Icarus**, Elsevier, v. 224, n. 1, p. 1–13, 2013.
- FENUCCI, M.; GRONCHI, G. F.; NOVAKOVIC, B. Maps of secular resonances in the neo region. **arXiv preprint arXiv:2302.08126**, 2023.
- GILLIS-DAVIS, J. J. et al. Incremental laser space weathering of Allende reveals non-lunar like space weathering effects. **Icarus**, v. 286, p. 1–14, abr. 2017.
- GLADMAN, B.; MICHEL, P.; FROESCHLÉ, C. The Near-Earth Object population. **Icarus**, v. 146, n. 1, p. 176–189, 2000.
- GRANVIK, M. et al. Debiased orbit and absolute-magnitude distributions for Near-Earth Objects. **Icarus**, v. 312, p. 181–207, 2018.

- GRAVES, K. J. et al. Resurfacing asteroids from thermally induced surface degradation. **Icarus**, v. 322, p. 1–12, 2019. ISSN 0019-1035.
- GROTT, M. et al. Low thermal conductivity boulder with high porosity identified on C-type asteroid (162173) Ryugu. **Nature Astronomy**, v. 3, p. 971–976, jul. 2019.
- HASEGAWA, S. et al. Albedo, Size, and Surface Characteristics of Hayabusa-2 Sample-Return Target 162173 1999 JU3 from AKARI\* and Subaru† Observations. **Publications of the Astronomical Society of Japan**, v. 60, n. sp2, p. S399–S405, 12 2008.
- HEDO, J. M.; RUÍZ, M.; PELÁEZ, J. On the minimum orbital intersection distance computation: a new effective method. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press, v. 479, n. 3, p. 3288–3299, 2018.
- HUNTER, J. D. Matplotlib: A 2d graphics environment. **Computing in Science & Engineering**, IEEE COMPUTER SOC, v. 9, n. 3, p. 90–95, 2007.
- IAU. **RESOLUTION B5 - Definition of a Planet in the Solar System**. 2023. [https://www.iau.org/static/resolutions/Resolution\\_GA26-5-6.pdf](https://www.iau.org/static/resolutions/Resolution_GA26-5-6.pdf) Acessado em 22/03/2023.
- KALUNA, H.; MASIERO, J.; MEECH, K. Space weathering trends among carbonaceous asteroids. **Icarus**, v. 264, p. 62–71, jan. 2016.
- KITAZATO, K. et al. The surface composition of asteroid 162173 Ryugu from Hayabusa2 Near-Infrared Spectroscopy. **Science**, v. 364, n. 6437, p. 272–275, abr. 2019.
- KITAZATO, K. et al. Thermally altered subsurface material of asteroid (162173) Ryugu. **Nature Astronomy**, v. 5, p. 246–250, jan. 2021.
- LANTZ, C. et al. Ion irradiation of carbonaceous chondrites: A new view of space weathering on primitive asteroids. **Icarus**, v. 285, p. 43–57, 2017.
- LAURETTA, D. S. et al. OSIRIS-REx: Sample Return from Asteroid (101955) Bennu. **Space Science Reviews**, v. 212, n. 1-2, p. 925–984, out. 2017.
- LAURETTA, D. S.; MCSWEEN, H. Y. **Meteorites and the Early Solar System II**. [S.l.]: University of Arizona Press, 2006. 431 p.
- LAZZARIN, M. et al. Space weathering in the main asteroid belt: The big picture. **The Astrophysical Journal**, v. 647, n. 2, p. L179–L182, ago. 2006.
- LEVASSEUR-REGOURD, A. C. et al. Neo sizes, shapes and surface physical properties. **Comptes Rendus Physique**, Elsevier, v. 6, n. 3, p. 313–320, 2005.
- LOEFFLER, M. J.; DUKES, C. A.; BARAGIOLA, R. A. Irradiation of olivine by 4 kev he+: Simulation of space weathering by the solar wind. **Journal of Geophysical Research: Planets**, v. 114, n. E3, 2009.
- MADEY, T. E.; JOHNSON, R. E.; ORLANDO, T. M. Far-out surface science: radiation-induced surface processes in the solar system. **Surface Science**, v. 500, n. 1-3, p. 838–858, 2002.
- MARCHI, S. et al. Heating of Near-Earth Objects and meteoroids due to close approaches to the Sun. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 400, n. 1, p. 147–153, nov. 2009.
- MARCOS, C. de la F.; MARCOS, R. de la F. Dancing with venus in the shadow of the earth: a pair of genetically related near-earth asteroids trapped in a mean-motion resonance. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters**, Oxford University Press, v. 483, n. 1, p. L37–L41, 2019.

- MARSSET, M. et al. Twenty years of spex: Accuracy limits of spectral slope measurements in asteroid spectroscopy. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, IOP Publishing, v. 247, n. 2, p. 73, 2020.
- MCNEILL, A. et al. Constraining the shape distribution of near-earth objects from partial light curves. **The Astronomical Journal**, IOP Publishing, v. 157, n. 4, p. 164, 2019.
- MICHEL, P.; DELBO, M. Orbital and thermal evolutions of four potential targets for a sample return space mission to a primitive Near-Earth Asteroid. **Icarus**, v. 209, n. 2, p. 520–534, out. 2010.
- MORBIDELLI, A. et al. No evidence for interstellar planetesimals trapped in the Solar system. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters**, v. 497, n. 1, p. L46–L49, 06 2020.
- MORBIDELLI, A. et al. Origin and evolution of near-earth objects. In: **Asteroids III**. Tucson, Arizona - Estados Unidos: University of Arizona Press, 2002. p. 409–422.
- MOROTA, T. et al. Sample collection from asteroid (162173) ryugu by hayabusa2: Implications for surface evolution. **Science**, v. 368, n. 6491, p. 654–659, 2020.
- NAKAMURA, T. Post-hydration thermal metamorphism of carbonaceous chondrites. **Journal of Mineralogical and Petrological Sciences**, v. 100, n. 6, p. 260–272, jan. 2005.
- NAKAMURA, T. et al. Formation and evolution of carbonaceous asteroid ryugu: Direct evidence from returned samples. **Science**, American Association for the Advancement of Science, p. eabn8671, 2022.
- NARAOKA, H. et al. Soluble organic molecules in samples of the carbonaceous asteroid (162173) ryugu. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 379, n. 6634, p. eabn9033, 2023.
- NASA. **JPL'S HORIZONS system**. 2021. <<http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>> Acessado em 22/03/2023.
- NEOs-NASA. **Discovery Statistics**. 2023. <<https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html>> Acessado em 24/03/2023.
- NESVORNY, D. et al. Do planetary encounters reset surfaces of Near-Earth Asteroids? **Icarus**, v. 209, n. 2, p. 510–519, 2010.
- NESVORNY, D. et al. Evidence for asteroid space weathering from the sloan digital sky survey. **Icarus**, v. 173, n. 1, p. 132–152, 2005.
- OKAZAKI, R. et al. Noble gases and nitrogen in samples of asteroid ryugu record its volatile sources and recent surface evolution. **Science**, American Association for the Advancement of Science, p. eabo0431, 2022.
- PERNA, D. et al. Grasping the nature of potentially hazardous asteroids. **The Astronomical Journal**, IOP Publishing, v. 151, n. 1, p. 11, 2015.
- PIETERS, C. M.; NOBLE, S. K. Space weathering on airless bodies. **Journal of Geophysical Research: Planets**, v. 121, n. 10, p. 1865–1884, 2016.
- POPESCU, M. et al. Near-Earth Asteroids spectroscopic survey at Isaac Newton telescope. **Astronomy & Astrophysics**, v. 627, p. A124, 2019.
- RICHARDSON, D. C.; JR, W. F. B.; LOVE, S. G. Tidal distortion and disruption of earth-crossing asteroids. **Icarus**, Elsevier, v. 134, n. 1, p. 47–76, 1998.

ROSSUM, G. V.; JR, F. L. D. **Python reference manual**. [S.l.]: Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam, 1995.

ROY, A. E. **Orbital motion**. [S.l.]: CRC Press, 2020.

SASAKI, S. et al. Simulation of space weathering by nanosecond pulse laser heating: dependence on mineral composition, weathering trend of asteroids and discovery of nanophase iron particles. **Advances in Space Research**, v. 29, n. 5, p. 783–788, jan. 2002.

SCHEERES, D. J.; MARZARI, F.; ROSSI, A. Evolution of neo rotation rates due to close encounters with earth and venus. **Icarus**, Elsevier, v. 170, n. 2, p. 312–323, 2004.

SCHEERES, D. J. et al. Effects of gravitational interactions on asteroid spin states. **Icarus**, Elsevier, v. 147, n. 1, p. 106–118, 2000.

SHESTOPALOV, D. I.; GOLUBEVA, L. F.; CLOUTIS, E. A. Optical maturation of asteroid surfaces. **Icarus**, Elsevier Inc., v. 225, n. 1, p. 781–793, 2013.

SHOEMAKER, E. M.; HELIN, E. F. Earth-approaching asteroids: populations, origin, and compositional types. **NASA, Washington Asteroids**, 1978.

SITARSKI, G. Approaches of the parabolic comets to the outer planets. **Acta Astronomica**, Vol. 18, p. 171, v. 18, p. 171, 1968.

SPACE STUDIES BOARD. **The exploration of Near-Earth Objects**. [S.l.]: National Academy Press, 1998.

STRAZZULLA, G. et al. Spectral alteration of the meteorite epinal (h5) induced by heavy ion irradiation: a simulation of space weathering effects on near-earth asteroids. **Icarus**, v. 174, n. 1, p. 31–35, 2005. ISSN 0019-1035.

SUGITA, S. et al. The geomorphology, color, and thermal properties of Ryugu: Implications for parent-body processes. **Science**, v. 364, n. 6437, p. eaaw0422, abr. 2019.

TANCREDI, G. Chaotic dynamics of planet-encountering bodies. **Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy**, Springer, v. 70, p. 181–200, 1998.

VOKROUHLICKY, D. et al. The yarkovsky and yorp effects. **arXiv preprint arXiv:1502.01249**, 2015.

WADA, K. et al. Asteroid Ryugu before the Hayabusa2 encounter. **Progress in Earth and Planetary Science**, v. 5, n. 1, p. 82, dez. 2018.

WATANABE, S. et al. Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu—A spinning top-shaped rubble pile. **Science**, v. 364, n. 6437, p. 268–272, abr. 2019.

WISNIOWSKI, T.; RICKMAN, H. Fast geometric method for calculating accurate minimum orbit intersection distances. **Acta Astronomica**, v. 63, n. 2, p. 293–307, 2013.

YABUTA, H. et al. Macromolecular organic matter in samples of the asteroid (162173) ryugu. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 379, n. 6634, p. eabn9057, 2023.

YOKOYAMA, T. et al. Samples returned from the asteroid ryugu are similar to ivuna-type carbonaceous meteorites. **Science**, 2022.

YOSHIKAWA, M. et al. Hayabusa Sample Return Mission. In: **Asteroids IV**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 397–418.

## APÊNDICE A – SIMULAÇÕES INICIAIS - AJUSTES DE PARÂMETROS

Neste apêndice é apresentado um estudo inicial, feito com o objetivo de se estimar o tempo que o asteroide Ryugu permanece na região atual de sua órbita e, assim, analisar os parâmetros das integrações numéricas empregados no trabalho, de modo a otimizar o desempenho computacional em relação ao tempo de execução, bem como, a memória utilizada. Foram analisados parâmetros como: integrador, o intervalo de saída - *output*, o passo de integração - *timestep*, e a distância de troca do integrador, no caso de se utilizar o integrador Hybrid - *integrator changeover*.

Desta forma, efetuou-se a integração a partir da órbita atual do asteroide Ryugu por 2000 anos, 1000 anos para o passado, aqui podendo integrar para o passado, pois é um curto período, e 1000 anos para o futuro, partindo inicialmente no dia 21/01/2022, utilizando o integrador *Hybrid* do pacote Mercury. Inicialmente foram considerados o *timestep* de 10 dias, o *integrator changeover* para 3 raios de hill, integrador *Hybrid* e os elementos orbitais listados na tabela [1](#).

O resultado desta integração pode ser visto nos gráficos da [Figura 12](#), os quais mostram os elementos orbitais (semieixo maior, excentricidade, inclinação orbital e a distância heliocêntrica) variando em função do tempo ( $t$ ), considerando 1000 anos para o futuro, e nos gráficos da [Figura 13](#) os mesmos elementos, mas considerando 1000 anos para o passado. A [Figura 14](#) mostra a evolução do semieixo maior, considerando o intervalo total de 2000 anos. Analisando a [Figura 14](#), vê-se duas características se destacam. Primeiramente, identifica-se que em torno de  $t = -125$  anos, Ryugu efetua um salto em semieixo maior. Verifica-se também que, por volta de  $t = -150$  à  $t = -750$  anos, ele apresenta características de um coorbital com a Terra.

Desta forma, buscou-se verificar se essas características são típicas da órbita que está sendo estudada ou, se é um efeito causado pela escolha dos parâmetros de entrada e do integrador. Assim, realizou-se diversos testes modificando alguns parâmetros para verificar quais deles são os mais adequados para serem empregados no trabalho. O primeiro teste consistiu em manter as mesmas condições de entrada, trocando apenas o integrador.

**1º Teste:** empregou-se o integrador *Burlisch-Stoer* (BS) do pacote Mercury, com um tempo de integração de 200 anos para o passado e com o *timestep* de 10 dias.

A [Figura 15](#) mostra os gráficos dos elementos orbitais considerando estes novos parâmetros. Vê-se que o salto verificado anteriormente não foi reproduzido e também não aparecem os indícios de que ficou coorbital com a Terra. Os resultados obtidos neste primeiro teste indicam que as características observadas na primeira simulação eram provavelmente resultantes da combinação da escolha do integrador e de seus parâmetros de entrada.

Neste ponto, o uso do integrador BS confirma ser o mais seguro. Entretanto, para o problema aqui proposto o seu uso é inviável, visto que ele demanda um tempo muito maior para executar as simulações. Diante disto, foram realizados outros testes com o integrador *Hybrid*, ajustando os parâmetros de entrada, de modo que os resultados obtidos se assemelhem aos resultados obtidos usando o integrador BS. Uma forma de sanar esse problema seria então diminuir o passo de integração ao se utilizar o integrador *Hybrid*. Novos testes foram realizados, como segue.

**2º Teste:** os novos parâmetros deste teste são, integrador *Hybrid*, *timestep*: 0,5 dia, *integrator changeover* - 3 raios de Hill. Repare que na [Figura 16](#) não ocorre tal salto, portanto a solução é diminuir o *timestep*.

**3º Teste** integrou-se para 2000 anos, com os parâmetros *timestep* de 0,5 dia e *integrator changeover* 3 raios de Hill, visto na [Figura 17](#).

Entretanto, a integração do teste 3 ainda é muito lenta. Portanto, a maneira mais rápida de solucionar o problema é verificar qual *timestep* é o mais adequado. Assim, foi realizado vários testes com diferentes passos de integração, para analisar qual deles é mais viável, sendo-o mais preciso e menos demorado.

**4º Teste** os timesteps examinados foram de 0,5, 1, 2, e 5 dias, todos com o integrador *changeover* de 0,5 raios de Hill e com integrador *Hybrid*, para 1000 anos no passado. Essas modificações podem ser vista na [Figura 18](#), [Figura 19](#), [Figura 20](#), [Figura 21](#) respectivamente.

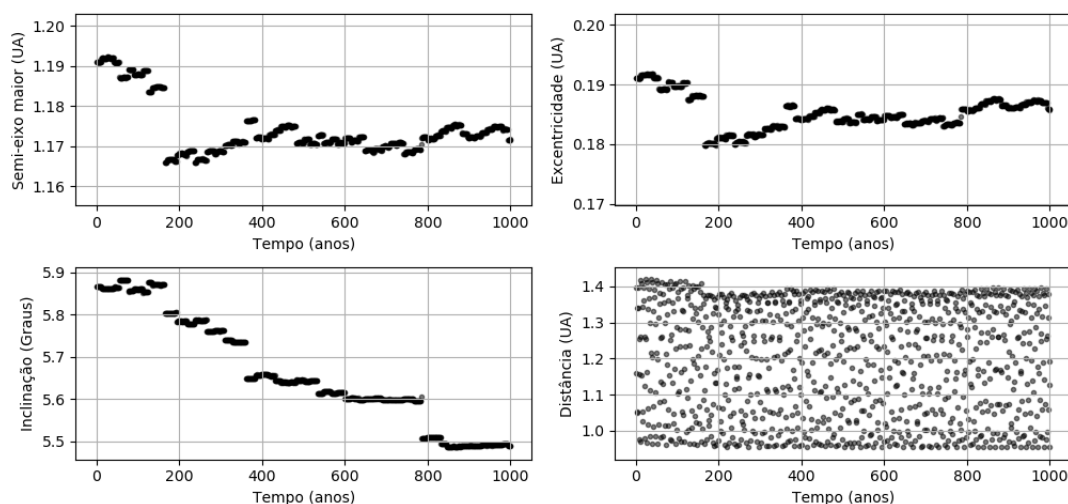
Observe haver pequenas diferenças entre eles, mas nenhum com saltos significativos de regiões e órbita ferradura. Desta forma, neste trabalho utilizou o *timestep* de 2 dias, *integrator changeover* de 0,5 raio de Hill e o integrador *Hybrid*.

Por fim, analisou-se por quanto tempo o asteroide Ryugu ficou na vizinhança de sua órbita atual. Desta maneira, integrou-se com o *timestep* de 2 dias, *integrator changeover* de 0,5 raio de Hill, integrador *Hybrid* por 2000 dias.

O processo utilizado para verificar o tempo de permanência na vizinhança da órbita foi com o programa apresentado na seção [5.3](#)

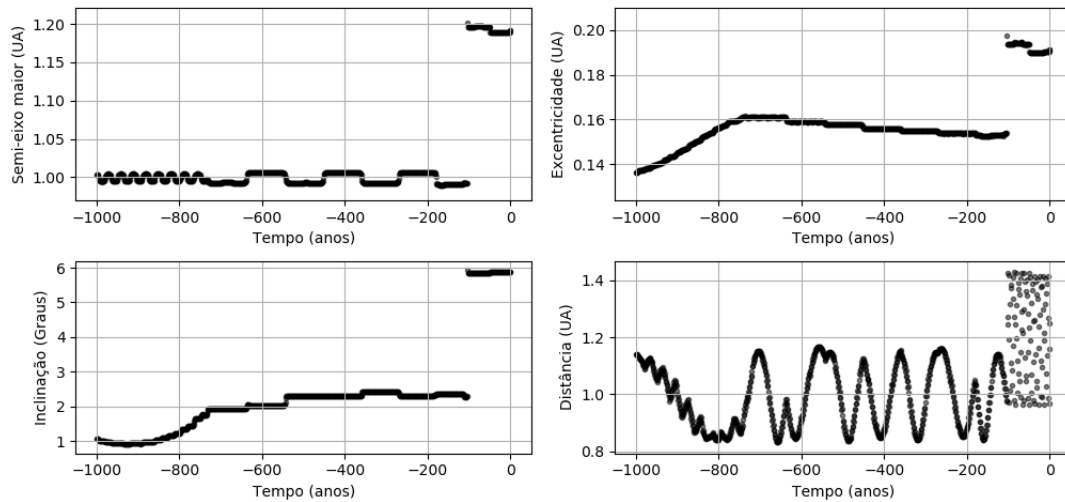
A [Figura 22](#) mostra que o asteroide se manteve nessa região por volta de 350 anos, 100 anos no passado e 200 no futuro. Deste modo, decidiu que o *output* utilizado neste trabalho seria de 30 anos para os clones, que é aproximadamente 1/10 do valor encontrado.

Figura 12 – Elementos Orbitais de Ryugu. Integrador: *Hybrid*. Tempo de integração: 1000 anos, passo de integração: 10 dias, *integrator changeover*: 3 raios de Hill



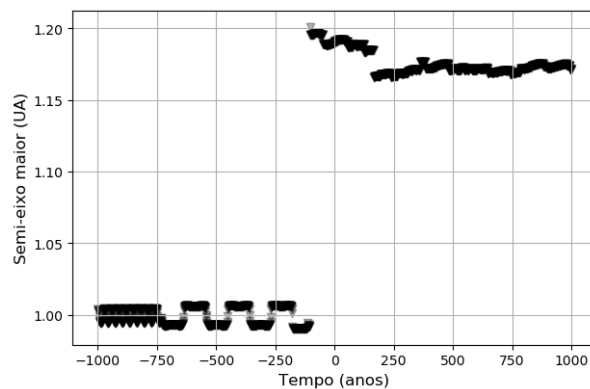
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 13 – Elementos Orbitais de Ryugu. Integrador: *Hybrid*. Tempo de integração: –1000 anos, passo de integração: 10 dias, *integrator changeover*: 3 raios de Hill



Fonte: Elaborado pela autora.

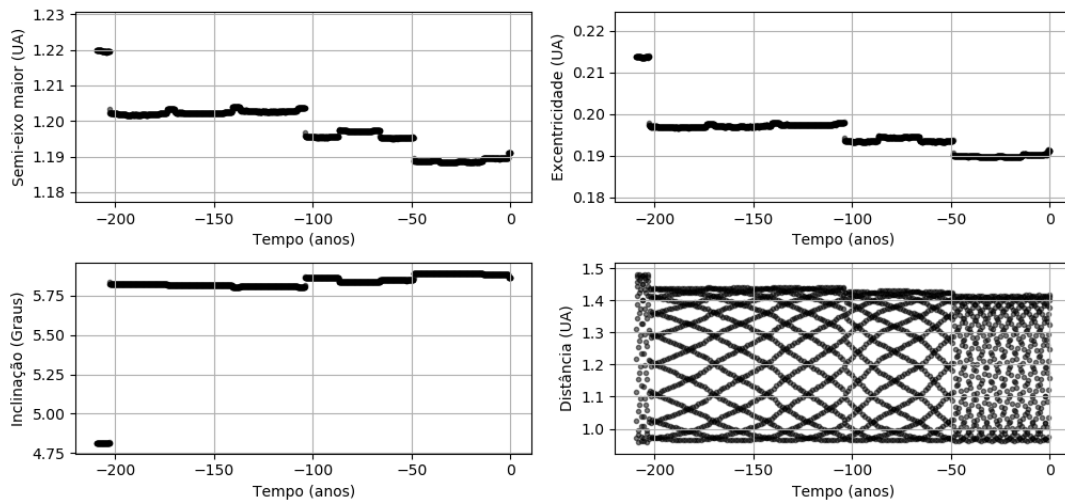
Figura 14 – Semieixo maior de Ryugu. Integrador: *Hybrid*. Tempo de integração: –1000 anos, passo de integração: 10 dias, *integrator changeover*: 3 raios de Hill



Foi registrado um encontro próximo com a Terra em  $t = -104$  anos, a uma distância de 0,00017 UA (aproximadamente 4 raios da Terra)

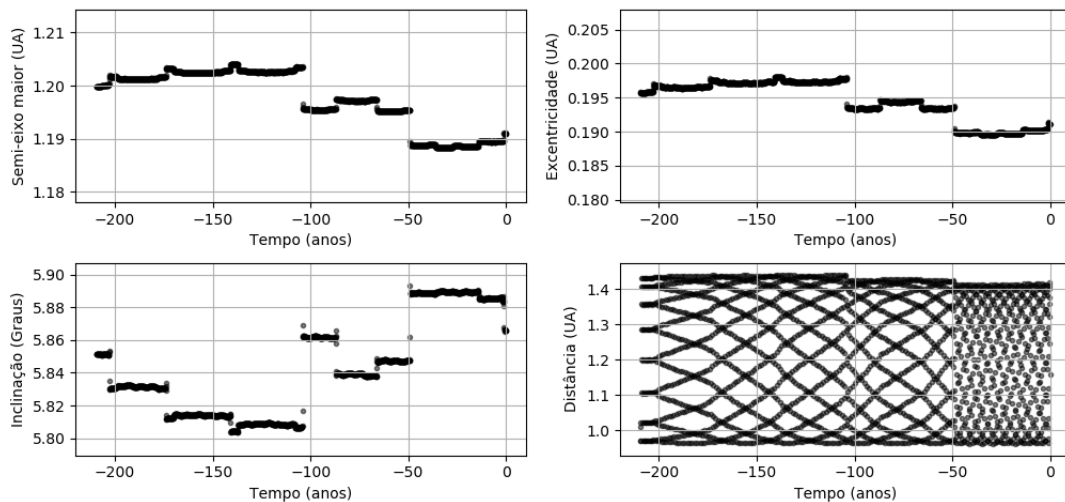
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 15 – Elementos Orbitais de Ryugu. Integrador: Bulirsch-Stoer (BS). Tempo de integração: –200 anos, passo de integração: 10 dias



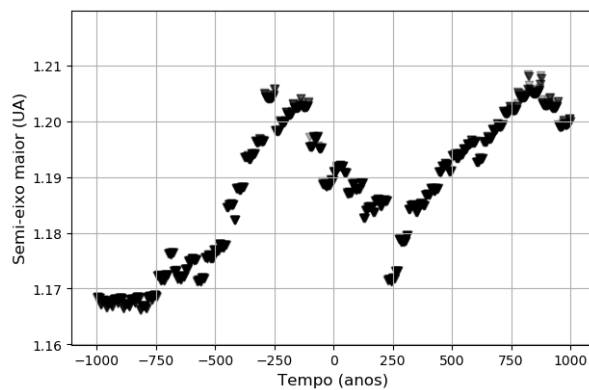
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 16 – Elementos Orbitais de Ryugu. Integrador: *Hybrid*. Tempo de integração: –200 anos, passo de integração: 0,5 dia, *integrator changeover*: 3 raios de Hill



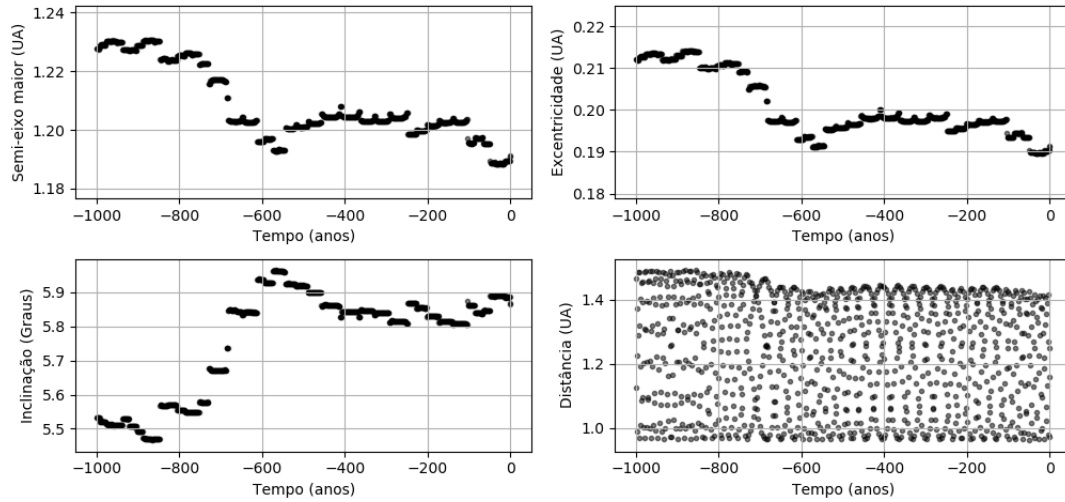
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 17 – Semieixo maior de Ryugu. Integrador: *Hybrid*. Tempo de integração: –1000 anos, passo de integração: 0,5 dia, *integrator changeover*: 0,5 raio de Hill



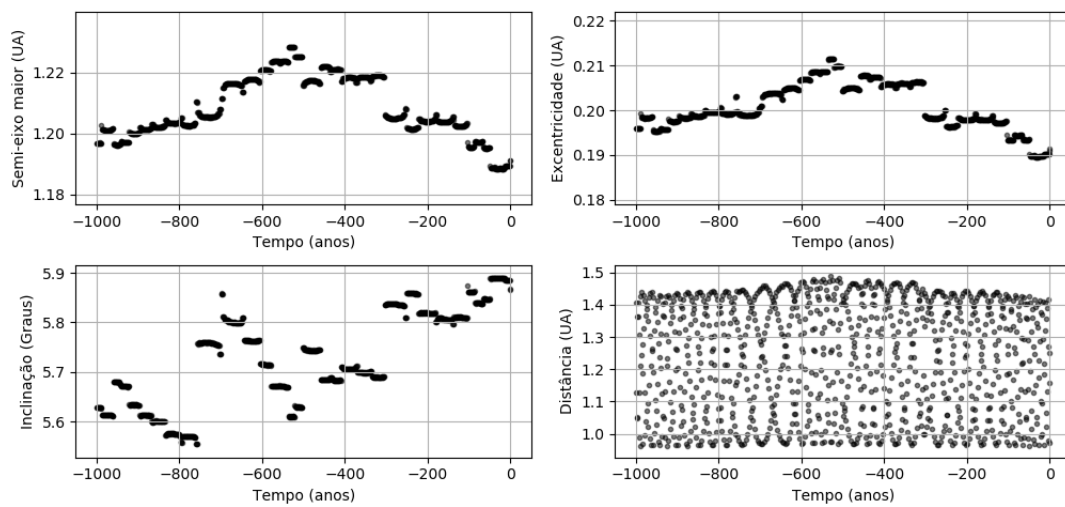
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 18 – Elementos Orbitais de Ryugu. Integrador: *Hybrid*. Tempo de integração: –1000 anos, passo de integração: 0,5 dia, *integrator changeover*: 0,5 raio de Hill



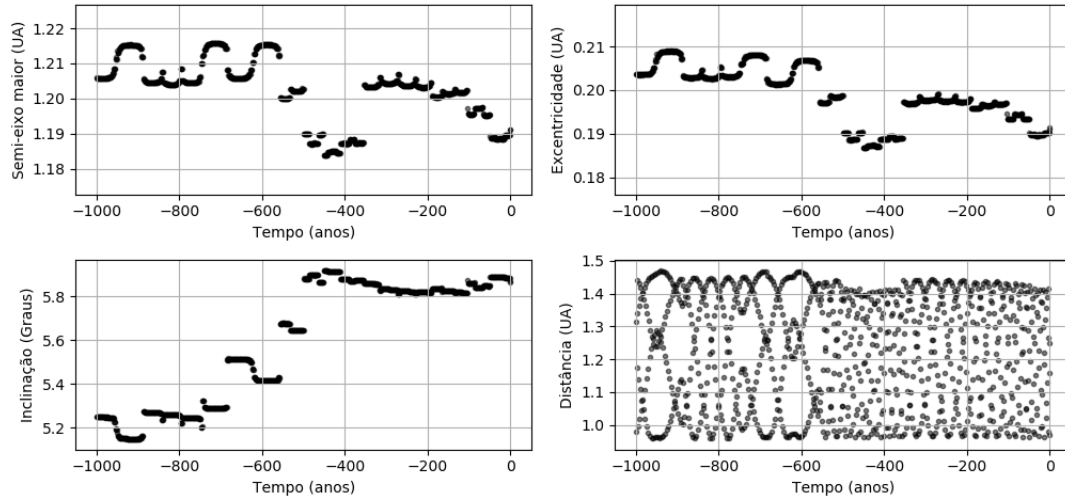
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 19 – Elementos Orbitais de Ryugu. Integrador: *Hybrid*. Tempo de integração: –1000 anos, passo de integração: 1 dia, *integrator changeover*: 0,5 raio de Hill



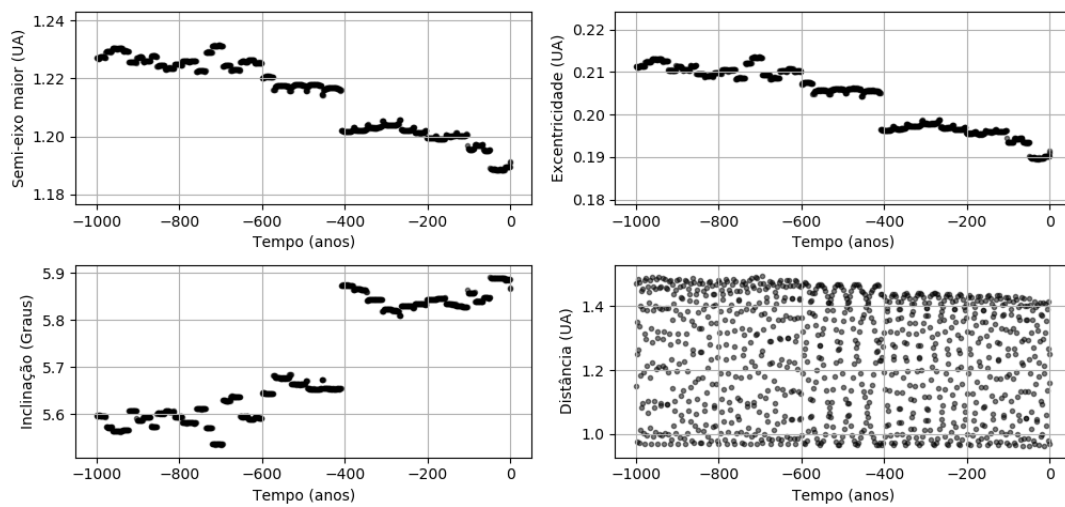
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 20 – Elementos Orbitais de Ryugu. Integrador: *Hybrid*. Tempo de integração: –1000 anos, passo de integração: 2 dias, *integrator changeover*: 0,5 raio de Hill



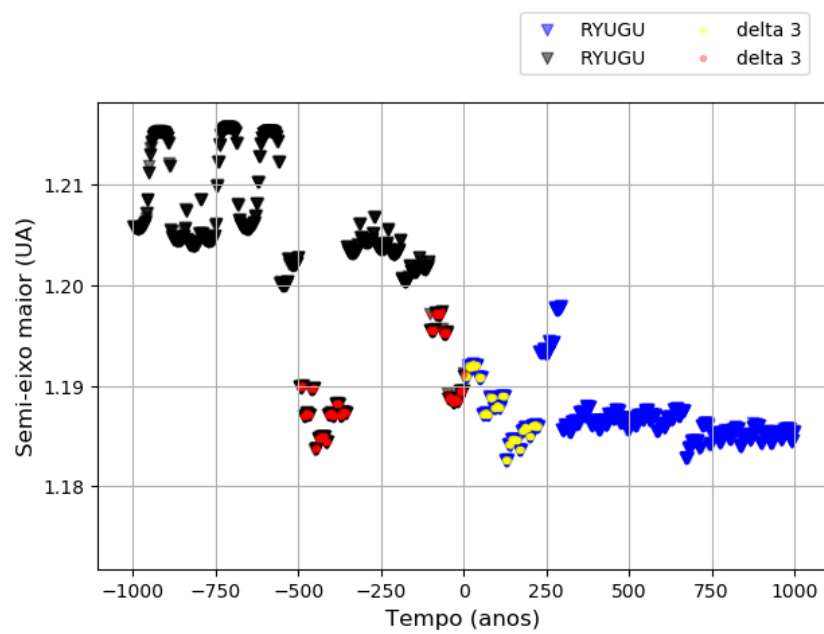
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 21 – Elementos Orbitais de Ryugu. Integrador: *Hybrid*. Tempo de integração: –1000 anos, passo de integração: 5 dias, *integrator changeover*: 0,5 raio de Hill



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 22 – Semieixo maior de Ryugu. Integrador: *Hybrid*. timestep - 2 dias, changeover - 0,5 raio de Hill, 2000 anos



Fonte: Elaborado pela autora.