



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**LA CONTRIBUCIÓN DE LOS PLANETAS
ENANOS Y CUERPOS MENORES DEL
CINTURÓN DE ASTEROIDES A LA POBLACIÓN
DE OBJETOS CERCANOS A LA TIERRA**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA TIERRA
P R E S E N T A:**

NORMA IMELDA MORALES SÁNCHEZ



FACULTAD DE CIENCIAS
UNAM

**DIRECTOR DE TESIS:
DRA. BÁRBARA SELÉN PICHARDO SILVA
CDMX. 2018**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Hoja de Datos

1. Datos del alumno

Morales

Sánchez

Norma Imelda

984 231 0380

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Ciencias de la Tierra

311525452

2. Datos del tutor

Dra.

Bárbara Selén

Pichardo

Silva

3. Datos del sinodal 1

Dr.

Fernando

Ortega

Gutiérrez

4. Datos del sinodal 2

Dra.

María Guadalupe

Cordero

Tercero

5. Datos del sinodal 3

Dra.

María Dolores

Mata

Chávez

6. Datos del sinodal 4

Dra.

Antígona

Segura

Peralta

7. Datos del trabajo escrito

La Contribución de los planetas enanos y cuerpos menores del Cinturón Principal a la Población de Objetos Cercanos a la Tierra

90 p

2018

Dedico este trabajo a mi abuela Imelda por inculcar en mí una fuerza de roble, que solo ella tenía. También a Maya, quien me enseñó a sonreírle a la vida.

Porque cuando una persona nace, una estrella baja a darnos sonrisas. Cuando una persona muere, una estrella sube para iluminarnos en el camino.

Agradecimientos Académicos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, la Facultad de Ciencias y al Instituto de Astronomía por brindarme el espacio y el lugar para iniciar una vida académica.

Agradezco a mi asesora Bárbara Pichardo por confiar en mi, por darme la oportunidad de trabajar con ella en el Instituto de Astronomía, por sus enseñanzas y paciencia en este camino, su alegría infinita, que sin importar el tono de las situaciones, siempre me motivó a continuar con el trabajo y la vida.

También agradezco la colaboración de los doctores Héctor Manuel Velázquez y Marco Muñoz Gutiérrez, en la supervisión de las simulaciones hechas con el código "MERCURY". También el uso de la supercomputadora *Atocatl*, del Instituto de Astronomía y a la supercomputadora de la UNAM, *Miztli*, en donde pude realizar mi investigación.

Este trabajo fue realizado gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM IN-105916 bajo la autorización del doctor Edmundo Moreno Díaz. Agradezco a la DGAPA-UNAM por la beca recibida.

Agradecimientos Personales

Es inefable la gratitud que tengo a todo lo que envolvió esta culminación de licenciatura.

Agradezco a mi madre, María del Carmen, por enseñarme a luchar por mis ideales y a construir a la mujer que soy hoy. Y a mi familia llena de tias, tios y primos amorosos que hicieron de mi camino un suave andar.

Gracias a Tatiana, Lulú, Malinali y a todos mis *juriquillos* por estar conmigo desde el inicio de la vida universitaria, ha sido un regalo nuestra amistad. También a Eliab Canul por compartir su conocimiento y amistad durante mi estancia en el Instituto de Astronomía. Y a mis amigos de la Factoría Escénica por acogerme en la CDMX. Doy gracias al teatro y a la danza, disciplinas que fueron parte de mi formación.

Índice general

Agradecimientos Académicos	6
Agradecimientos Personales	7
Resumen	10
I. Introducción	12
I.1. El Cinturón de Asteroides (Cinturón Principal)	17
I.1.1. Origen	17
I.1.2. Composición y distribución espacial en el Cinturón Principal de Asteroides	30
I.1.3. Dinámica de los cuerpos en el Cinturón Principal	34
I.2. Objetos Cercanos a la Tierra, NEOs y NEAs	39
I.2.1. Definición	39
I.2.2. Clasificación de NEAs	39
I.2.3. Relación de NEOs con el Cinturón Principal de Asteroides . .	42
I.3. La contribución de este trabajo	43
2. Metodología	45
2.1. Condiciones iniciales	45
2.1.1. Parámetros Orbitales	45
2.1.2. Disco sintético	49
2.2. El código MERCURY	51
2.3. Las simulaciones numéricas ejecutadas para este trabajo	56

3. Resultados	61
3.1. Dinámica del Cinturón Principal	61
3.1.1. Motivación	61
3.1.2. Validez de las simulaciones	67
3.1.3. Resultados de las simulaciones con tiempo de evolución de 20 Millones de años	74
3.1.4. Influencia de Júpiter en la estabilidad del disco de asteroides .	79
4. Conclusiones	83
5. Trabajo a futuro	86
Bibliografía	87

Resumen

Para las geociencias el objeto de estudio es la Tierra y los NEOs están íntimamente ligados a la historia de la vida en la Tierra. Desde el descubrimiento de estos cuerpos que cruzan la órbita de la Tierra, se ha reconocido el peligro de impacto. Por ello se han realizado clasificaciones exhaustivas de asteroides. Los Asteroides Potencialmente Peligrosos (PHAs), tienen su importancia debido a su diámetro de 140m a kilómetros y su distancia mínima de intersección con la órbita de la Tierra menor a 0.05 UA. La dinámica dominante para abastecer la población de NEOs son las resonancias con Júpiter y Marte. En este trabajo se estudió el posible caos que generan los cuerpos y planetas menores ubicados en el Cinturón Principal, y como esta dinámica a lo largo de millones de años también contribuye al estado constante de la población de NEAs. Se realizaron dos simulaciones numéricas para un tiempo de 20 millones de años en las supercomputadoras *Mitzli* (DGTIC, UNAM) y *Atocatl* (Instituto de Astronomía, UNAM). La primera simulación describió el fenómeno de la dinámica del Cinturón Principal de Asteroides bajo la influencia del potencial gravitacional de 4 planetas, Tierra, Marte, Júpiter y Saturno. La segunda simulación representó la misma población de asteroides pero las perturbaciones fueron por los 4 planetas antes mencionados y los 12 asteroides de mayor masa y tamaño ubicados en el Cinturón Principal de Asteroides. Los resultados de ambas simulaciones muestran que al agregar cuerpos menores que perturben secularmente los parámetros orbitales de las poblaciones de asteroides en el Cinturón Principal, varios de estos cuerpos interactúan con los planetas y en algunos casos colisionan contra ellos. Las simulaciones realizadas permitieron entender el mecanismo de las resonancias ubicadas en el Cinturón Principal y resolver el mecanismo de reabastecimiento de NEAs.

For geosciences, the object of study is the Earth and the NEOs are intimately linked to the history of life on Earth. Since the discovery of these bodies that cross the orbit of the Earth, the danger of impact has been recognized. For this reason, exhaustive classifications of asteroids have been made. The Potentially Hazardous Asteroids (PHAs) have their importance due to their diameter of 140m to kilometers and their minimum distance of intersection with the orbit of the Earth less than 0.05 AU. The dominant dynamics to supply the population of NEOs are the resonances with Jupiter and Mars. In this work we studied the possible chaos generated by the minor bodies and planets located in the Main Belt. And as this dynamic over millions of years also contributes to the constant state of the population of NEAs. Two numerical simulations were carried out for a time of 20 million years in the supercomputers *Mitzli* (DGTIC, UNAM) and *Atocatl* (Institute of Astronomy, UNAM) for 20 Million years. The first simulation described the phenomenon of the dynamics of the Main Asteroid Belt under the influence of the gravitational potential of 4 planets, Earth, Mars, Jupiter and Saturn. The second simulation represented the same population of asteroids but the perturbations were for the 4 planets previously mentioned and the 12 asteroids of greater mass and size located in the Main Belt of Asteroids. The results of both simulations show that by adding smaller bodies that secularly disturb the orbital parameters of the asteroid populations in the Main Belt, several of these bodies interact with the planets and in some cases collide against them. The simulations carried out allowed to understand the mechanism of the resonances located in the Main Belt and to solve the refueling mechanism of NEAs.

Capítulo I

Introducción

La orientación en Ciencias Espaciales de la carrera Ciencias de la Tierra, da a los estudiantes la información científica de las características físicas y químicas de los cuerpos que forman el sistema Solar, así como de las condiciones compatibles con el inicio y el sostenimiento de los procesos biológicos. Dentro de las asignaturas los estudiantes comprenden el espacio exterior, a partir de la ionosfera, la magnetosfera, el medio interplanetario y los planetas. Se comparan y se establecen pautas entre los procesos que han ocurrido y ocurren en la Tierra con otros planetas. Con los objetivos mismos de mi orientación y carrera, presento este trabajo de investigación con el título "La contribución de planetas enanos y cuerpos menores del Cinturón Principal de Asteroides a la población de Objetos Cercanos a la Tierra (NEOs: Near Earth Objects)".

El sistema Solar es un sistema planetario en el que 8 planetas, satélites, asteroides, cometas, planetas enanos y una estrella llamada Sol se trasladan bajo la influencia de las leyes de Kepler alrededor del centro de masa del sistema. Los 8 planetas se dividen en: planetas rocosos o terrestres (Mercurio, Venus, Tierra y Marte), gigantes gaseosos (Júpiter y Saturno) y gigantes de hielo (Urano y Neptuno). Por otra parte los cuerpos conocidos como Plutón, Ceres, Eris y Makemake son algunos de los planetas enanos que junto con la población de cuerpos menores componen al sistema Solar. Estos cuerpos se encuentran a diferentes distancias del Sol. La unidad básica de medida para el espacio exterior es la Unidad Astronómica, UA , de aquí en adelante, que representa la distancia del centro de la Tierra al Sol: ≈ 150 millones de kilómetros. La Tierra se ubica a $1UA$, el Cinturón Principal de Asteroides de 2 a $4UA$, Júpiter a $5.2UA$, Neptuno

a 30UA, etc.

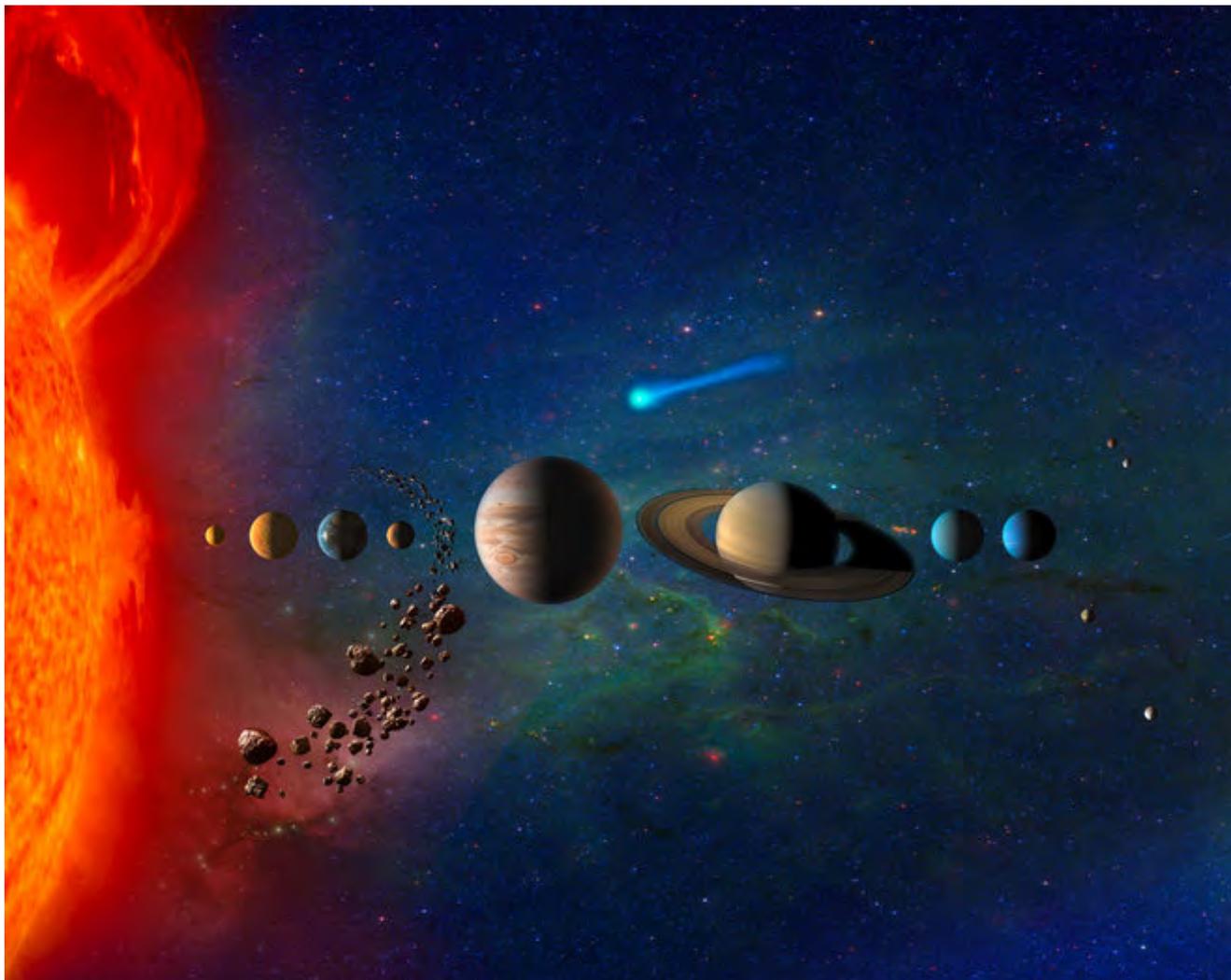


Figura 1.1: Representación artística del sistema Solar (tomada de www.space.com. Créditos NASA).

A lo largo de la historia muchos astrónomos se dedicaron a estudiar el sistema Solar y así llegar a las mediciones que conocemos hoy en día. Dentro de esta materia conocemos por ejemplo a Johann Daniel Titius (1729-1796), profesor de física en la antigua universidad de Wittenberg (Sajonia), que relacionó las distancias conocidas de los planetas al Sol con una sucesión matemática $n = 0, 3, 6, 12, 24, 48, \dots$, dándole un valor a cada planeta por su posición, la Tierra es el planeta 3 entonces $Tierra = 6$ y

con una operación matemática simple él deduce las distancias de los planetas al Sol:

$$a = \frac{(n + 4)}{10} \tag{1.1}$$

El valor a representa la distancia al Sol en UA ; de esta sucesión la Tierra tendrá valor de $1UA$ (Fig.1.2).

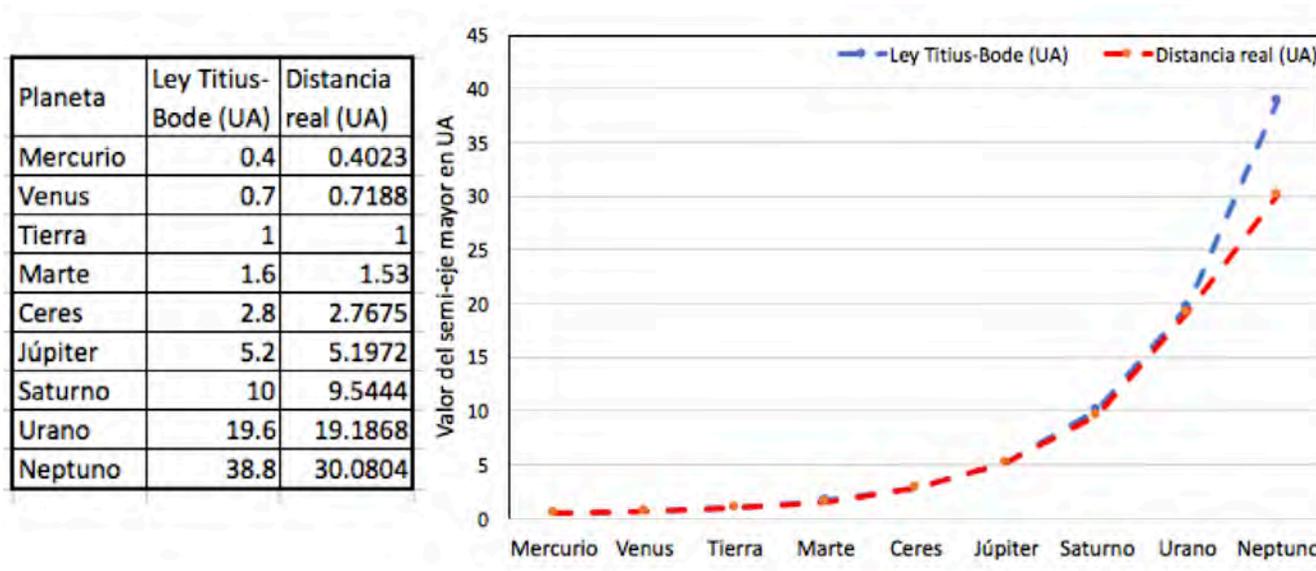


Figura 1.2: Comparación de las distancias al Sol de los planetas calculadas con la Ley de Titius-Bode con los datos actuales. La ley de Titius-Bode solo coincide con las distancias reales desde Mercurio hasta Urano.

Para 1772 Johann Elert Bode populariza esta idea, generando así la Ley de Titius-Bode. En el siglo XVIII solo se conocían Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter y Saturno como planetas, pero esta sucesión proponía que había un planeta entre Marte y Júpiter, por lo que ésta ley empírica permitió a los astrónomos observacionales de la época dirigir sus telescopios a donde se sugería había un planeta de acuerdo a las distancias calculadas por la ley Titius-Bode. Así en 1781, William Herschel, buscando un séptimo planeta descubre Urano a 19.6UA (el valor actual es 19.19UA) y en 1801 Guiseppe Piazzi descubre al planeta enano Ceres a 2.8UA (el valor actual es 2.76UA) siendo el quinto planeta después de Marte. Descubrir a Ceres ayudó a confirmar la ley de Titius-Bode, pero varios años más tarde, se descubrieron más cuerpos similares

a Ceres (Fig.1.3), estos cuerpos menores tenían distancias al Sol de 2 UA a 4 UA, sus diámetros (d de aquí en adelante) eran menores al planeta enano Ceres ($d < 952.4\text{km}$) y el brillo de estos cuerpos observados desde la Tierra era similar al de las estrellas, por estas características William Hershel en 1802 propone un nuevo tipo de cuerpos en el sistema Solar y les da el nombre de *Asteroides* (Del griego "de figura estelar").

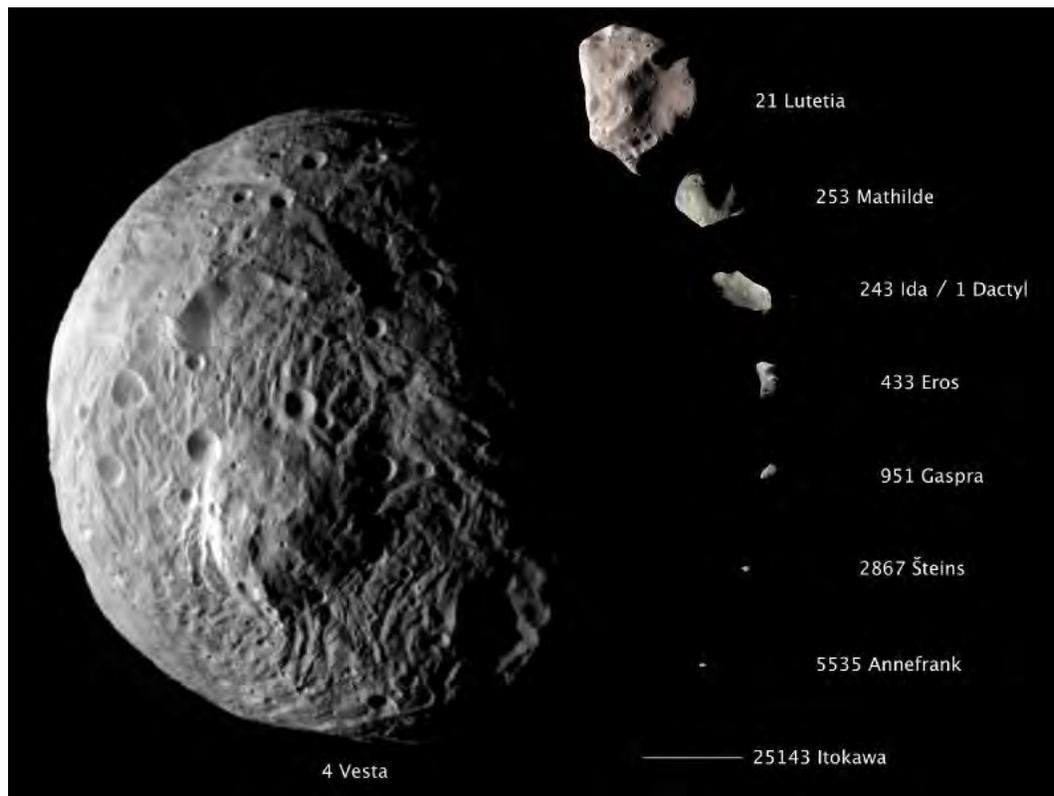


Figura 1.3: Tamaños de diversos asteroides. Vesta tiene un diámetro de 530km, en comparación con Ceres 946km el planeta enano en el Cinturón Principal (tomada de Space Portal <http://www.kosmo.cz>)

Para las geociencias el objeto de estudio es la Tierra y los asteroides están íntimamente ligados a la historia de la vida en la Tierra; se sabe que contienen agua y compuestos orgánicos los cuales pudieron contribuir al origen de la vida en la Tierra así como a sus características geológicas. Los impactos de asteroides con la Tierra han también cambiado la biota como sucedió hace 66 millones de años en la extinción masiva del Cretácico-Paleógeno y eones anteriores. Desde el descubrimiento de estos cuerpos que cruzan la órbita de la Tierra, se ha reconocido el peligro de impacto.

Por ello se han realizado estudios y clasificaciones exhaustivas de asteroides. El grupo de asteroides mayormente estudiados son los Asteroides Cercanos a la Tierra (*Near Earth Asteroids*, NEAs de aquí en adelante) ver Fig.1.4. Las divisiones de este grupo son: *Atones* que tienen órbitas más pequeñas que la de la Tierra, *Apolos* tienen órbitas más grandes que la órbita de la Tierra (las órbitas de estos dos grupos sin embargo, interceptan a la órbita de la Tierra en dos puntos), los *Amor* están completamente afuera de la órbita terrestre cruzando la órbita de Marte y de manera equivalente pero a menor escala el grupo *Atiras* esta completamente dentro de la órbita de la Tierra. Los Asteroides Potencialmente Peligrosos (*Potentially Hazardous Asteroids*, PHAs de aquí en adelante), tienen su importancia debido a su diámetro de 140m a kilómetros y su distancia mínima de intersección con la órbita de la Tierra menor a 0.05UA. Es claro que entender la población de NEAs ayudará sin duda en la reconstrucción y evolución del sistema Solar y de la Tierra, ya que los planetas fueron formados por estos cuerpos menores que ahora vagan por todo el sistema Solar.

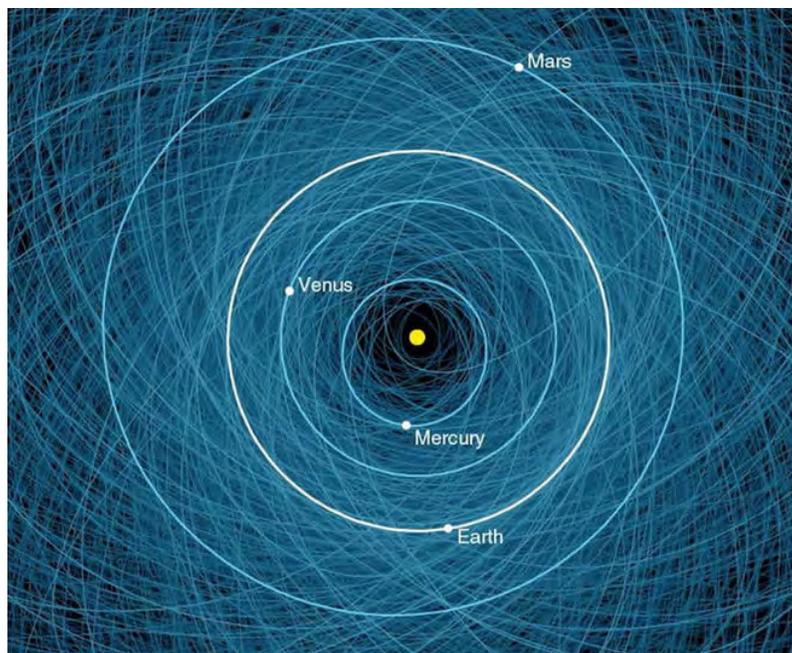


Figura 1.4: Órbitas de los NEAs observados actualmente. En color blanco la órbita terrestre y en amarillo el Sol (tomada de www.space.com)

1.1. El Cinturón de Asteroides (Cinturón Principal)

1.1.1. Origen

Las estrellas se forman a partir del colapso gravitacional de grumos dentro de nubes moleculares muy densas debido a una inestabilidad gravitacional. El momento angular debe conservarse, por lo que la nube se colapsa en forma de disco, el cual transporta masa hacia el centro del disco donde se encuentra la protoestrella. Este disco de acreción (o acrecimiento) se transforma rápidamente en un disco protoplanetario, es decir, un disco inhomogéneo de gas y polvo que concentra el material en grandes núcleos protoplanetarios. La evolución de estos discos protoplanetarios desde el momento del colapso hasta antes de que se transforme en un disco de escombros, prácticamente sin gas, es decir, un sistema planetario como nuestro sistema Solar, es de ≈ 10 Millones de años (Ma de aquí en adelante) [34].

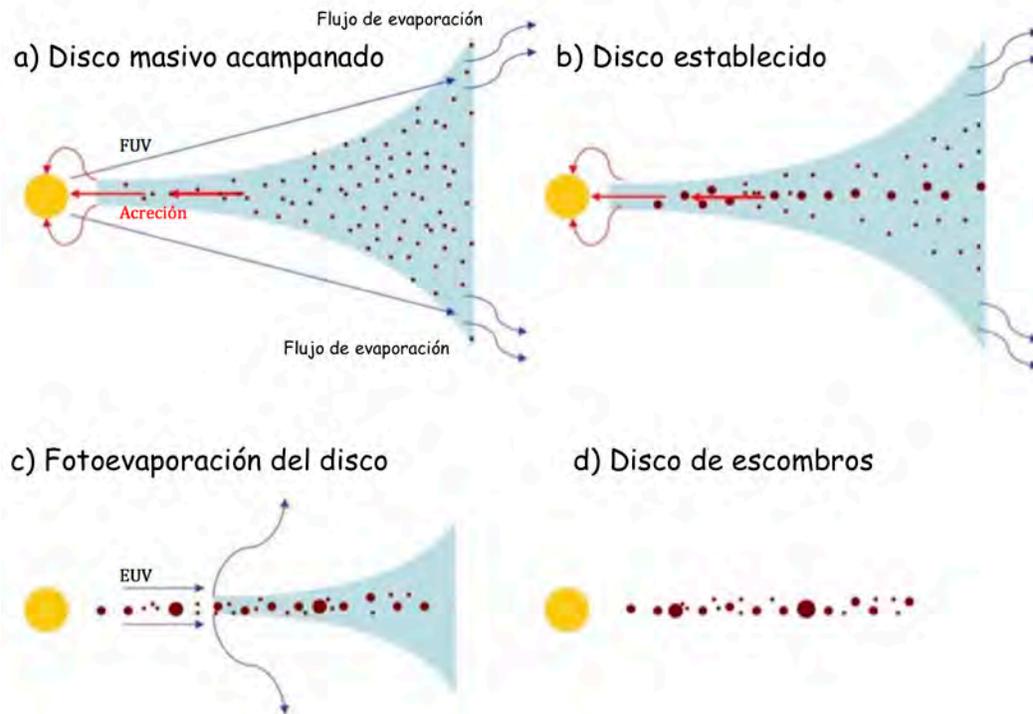


Figura 1.5: Evolución de un disco típico. La distribución de gas se muestra en azul y el polvo en marrón. a) El disco pierde masa a través de la acreción hacia la estrella. b) Al mismo tiempo, los granos crecen en cuerpos más grandes que se asientan en el plano medio del disco. c) Disminuye la masa del disco y la velocidad de acreción. La fotoevaporación adquiere importancia. d) Una vez que el gas restante se fotoevapora, los granos pequeños ($> 1\text{cm}$) se eliminan por la presión de radiación y la resistencia de Poynting-Robertson, dejando un disco de escombros con masa baja [34].

En la Fig.1.5, se muestra la evolución de un disco típico. Al principio de su evolución, el disco pierde masa a través de la acreción hacia la estrella y la fotoevaporación del disco externo. La fotoevaporación puede ser impulsada por fotones energéticos en el intervalo ultravioleta lejano (FUV: $6\text{eV} - 13.6\text{eV}$, donde eV: es una unidad de energía conocida como electrónvoltio $\approx 1.602176 \times 10^{-19}$ Joules), ultravioleta extremo (EUV: $13.6\text{eV}-0.1\text{keV}$) y rayos X (0.1keV). Este proceso es uno de los principales mecanismos mediante los cuales los discos circunestelares primarios pierden masa y finalmente se disipan. Al mismo tiempo, los granos de polvo crecen en cuerpos más grandes que se asientan en el plano medio del disco. La deriva causada por la diferencia de velocidades del gas y el polvo ocasiona que se aproximen entre ellos a velocidades

muy bajas permitiendo que las fuerzas de Van der Waals¹ actúen entre sus superficies y pegan las partículas de polvo. Esta fase es la coagulación de partículas de polvo, donde las adherencias y golpes suaves dan como resultado la formación de objetos del tamaño de un centímetro [13].

En el disco protoplanetario, la interacción gravitacional con la estrella da lugar a órbitas keplerianas, de este modo el gas y el polvo giran alrededor de la estrella. Las partículas de polvo con tamaño menor a un centímetro son arrastradas por el gas hacia la estrella, cuando las partículas tienen tamaños mayores a un centímetro sufren un desvío en su órbita por la diferencia de velocidades entre el gas y estas partículas, haciendo que pierdan momento angular y se dirijan a la estrella. A medida que disminuye la masa del disco y la velocidad de acreción² de la estrella, los fotones energéticos impactan el borde interno del disco (≈ 0.1 UA) sin obstáculos y la velocidad de fotoevaporación inducida en el ultravioleta extremo (EUV) aumenta aún más, evitando que cualquier material del disco externo (< 3 UA) fluya hacia el disco interno³. La acreción sobre la estrella cesa y el disco se disipa rápidamente de adentro hacia afuera. Una vez que el gas restante se fotoevapora, los granos pequeños con tamaño de centímetros que orbitan alrededor de la estrella se vuelven inestables por la presión de radiación, lo que hace que disminuyan la velocidad y giren en espiral hacia la estrella y eventualmente se evaporan cuando alcanzan el radio de sublimación del polvo. Este efecto de arrastre sobre la partícula cuando se mueve con respecto a la fuente de radiación se le llama Poynting-Robertson [19].

Finalmente este disco se convierte en escombros con una masa muy baja. Cuando el

¹Las fuerzas de Van der Waals forman un enlace químico no covalente (no se comparten electrones, sino que se involucran variaciones de interacciones electromagnéticas entre los átomos) en el que participan dos tipos de interacción, fuerzas de atracción y fuerzas de repulsión entre las capas electrónicas de 2 átomos contiguos. La presencia de pequeños dipolos transitorios debidos al giro de los electrones en torno al núcleo hace que el átomo se polarice produciendo fuerzas de atracción electrostática. Las fuerzas de Van der Waals conforman el tipo más débil de fuerza intermolecular que puede darse en la naturaleza

²*Acrecimiento* es un término que se utiliza para nombrar el crecimiento de un cuerpo por agregación de cuerpos menores. La RAE admite la palabra *acreción* como sinónima de la anterior, más usada que ella en los textos astrofísica para explicar fenómenos como la formación de planetas en discos circunestelares.

³Esto se obtiene al observar la emisión térmica de los granos de polvo. La temperatura disminuye conforme el polvo se aleja de la estrella central, emitiendo en diferentes longitudes de onda, lo que permite limitar los radios internos y externos [34].

gas está presente⁴ amortigua las excentricidades orbitales, al ser removido las excentricidades crecen rápidamente dando lugar órbitas que se intersectan y colisiones entre embriones. Las órbitas excéntricas de la mayor parte de los sistemas planetarios conocidos indica que han pasado por inestabilidades dinámicas violentas [34].

El crecimiento de cuerpos mayores a un centímetro (tamaños de 1 kilómetro) son menos comprendidos. Las simulaciones han demostrado que a medida que las partículas de polvo crecen, su acoplamiento con el gas se debilita, porque las velocidades relativas del polvo aumentan en comparación con el gas (el cual se está disipando [13]). Dado que los objetos grandes son más propensos a la destrucción por colisión (las propiedades de adherencia de los cuerpos sólidos se debilitan a medida que crecen), se espera que muchos de estos impactos provoquen la fragmentación de los cuerpos al momento de colisionar. Lo que posteriormente detiene su crecimiento a tamaños grandes. Este problema es conocido como la barrera de los metros (*meter-size barrier problem*). Para permitir el crecimiento de los planetésimos se propone la inestabilidad magnetorotacional que genera vórtices que permiten acumular material sólido formando cuerpos con tamaño de 1 kilómetro. Otra investigación sugiere la concentración de objetos sólidos en la línea de nieve⁵ como resultado de la sublimación de agregados de hielo. A pesar del problema de crecimiento existen planetas y muchos cuerpos de un kilómetro, como los asteroides y los objetos del Cinturón de Kuiper. Puede ser que los planetésimos de un kilómetro no se formen como resultado del mero crecimiento colisional de los granos de polvo; otros mecanismos también pueden haber contribuido [13].

La siguiente fase dentro de la evolución del disco protoplanetario es la formación de embriones planetarios, los cuales representan una etapa intermedia entre planetésimos y planetas, éstos serían acretados por atracción gravitacional entre pares de planetésimos. El crecimiento de los embriones planetarios puede suceder por tres fenómenos: crecimiento ordenado, donde la velocidad de los planetésimos es similar o mayor a la velocidad de escape al embrión planetario, entonces todos los cuerpos crecen al mismo tamaño de una manera lenta, crecimiento desbocado, sucede porque la velocidad

⁴Al inicio del disco protoplanetario la masa del gas domina a la masa del polvo por dos ordenes de magnitud[34]. Permitiendo el arrastramiento del polvo hacia la estrella y el plano medio del disco.

⁵La región más allá del cual el agua está en estado permanente de hielo.

relativa de los planetésimos es pequeña, este crecimiento termina cuando el protoplaneta ha consumido los planetésimos a su alcance [16]. En este proceso el enfocamiento gravitacional (ver Fig.1.6), que es el área efectiva para que ocurra la colisión entre dos cuerpos, se vuelve más fuerte. El último proceso de crecimiento posible para formar embriones planetarios es el crecimiento oligárquico, que ocurre cuando ya existe un embrión, pero es lo suficientemente masivo para aumentar las velocidades relativas de la población de planetésimos a su alrededor, haciendo que el cuerpo crezca de una manera lenta en comparación con el crecimiento desbocado y rápida en contraste con el crecimiento ordenado.

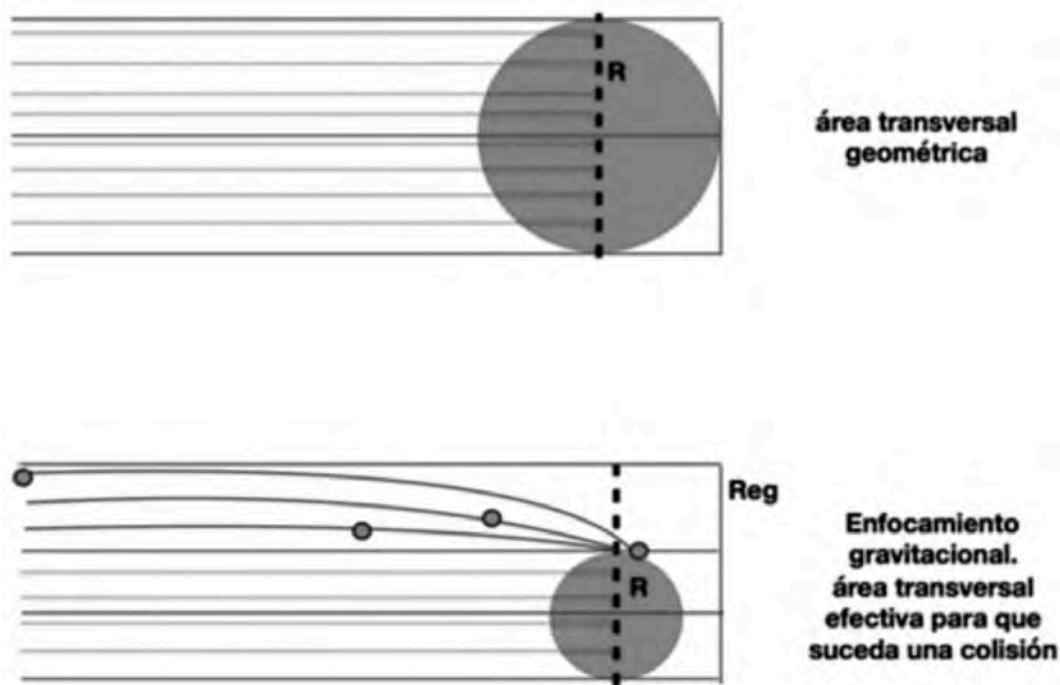


Figura 1.6: Enfocamiento gravitacional

Sección recta para dos cuerpos en colisión

$$\pi * R^2 * \left[1 + \frac{\nu_{esc}^2}{\sigma_{esc}^2} \right] \tag{1.2}$$

Siendo ν_{esc} la velocidad de escape superficial del cuerpo en colisión y σ_{esc} la dispersión

de velocidad de los cuerpos en colisión. Si $\sigma_{esc} \ll \nu_{esc}$, el planeta crecerá más rápidamente.

Con este marco teórico se puede explicar la evolución del sistema Solar. Nuestro sistema planetario se formó hace 4500Ma junto con todo el material que ahora forma a los 8 planetas, planetas enanos y cuerpos menores. Los planetas terrestres o rocosos tienen composiciones dominadas por hierro (Fe), silicio (Si) y magnesio (Mg). Júpiter y Saturno son los gigantes gaseosos por estar constituidos en su mayoría por hidrógeno (H) y helio (He), mientras que Urano y Neptuno tienen menores cantidades de H y He con mayor cantidad de agua, metano (CH₄) y amoníaco (NH₃) en estado sólido (hielos). A medida que el sistema Solar evolucionó, la fuerte atracción gravitatoria que recibieron los embriones planetarios de los planetas gigantes y entre sí, deformaron las órbitas de los embriones, los cuales comenzaron a cruzarse. Le sigue una cascada de colisiones, formando planetas a medida que los embriones se fusionan y recolectan planetésimos. Los planetésimos sobrantes se convirtieron en asteroides. Las investigaciones sobre la evolución de nuestro sistema planetario han sido complejas debido a las características químicas de los 8 planetas y sus diversos tamaños, así mismo es complejo entender el proceso de evolución de los discos de asteroides y cometas ubicados en diferentes regiones del sistema Solar; o más interesante aún sería conocer el desarrollo futuro de nuestro disco de escombros [31].

En este trabajo investigaremos al Cinturón Principal de Asteroides, Cometas y Núcleos Cometarios [5], ubicado entre Marte y Júpiter con *semi-eje mayor* (a de aquí en adelante) $a \approx 2\text{UA}$ a 4UA y una masa estimada de $4.5 \times 10^{-3} M_{\oplus}$, tan sólo 0.45 % de la masa de la Tierra. (*Masa terrestre*, $M_{\oplus} \approx 5.972 \times 10^{24} \text{kg}$) [17]. El Cinturón Principal nos ayuda a reconstruir el origen y la evolución del sistema Solar pues proporciona varias restricciones clave para validar los modelos evolutivos de nuestro disco de escombros. La importancia del Cinturón Principal se define al compararlo con otra población de cuerpos menores, en su mayoría cometas, como el Cinturón de Kuiper que abarca desde $\approx 40 \text{UA}$ hasta $\approx 50 \text{UA}$, con una masa estimada de $\approx 0.01 M_{\oplus}$, o con la Nube de Oort, una estructura aproximadamente esférica, donde el material se distribuye de manera isotrópica, las distancias estimadas de estos cuerpos varían entre $\approx 10,000\text{UA}$

hasta $\approx 100,000\text{UA}$ [24]. Una característica principal de los asteroides es la excitación orbital, es decir, su excentricidad⁶ (e de aquí en adelante), y su inclinación (i , de aquí en adelante) son grandes, comparados con los valores de las órbitas de los planetas de nuestro sistema Solar (Fig.1.7). Los valores de las excentricidades $e \approx 0 - 0.30$ y de las inclinaciones $i \approx 0^\circ - 30^\circ$ [23].

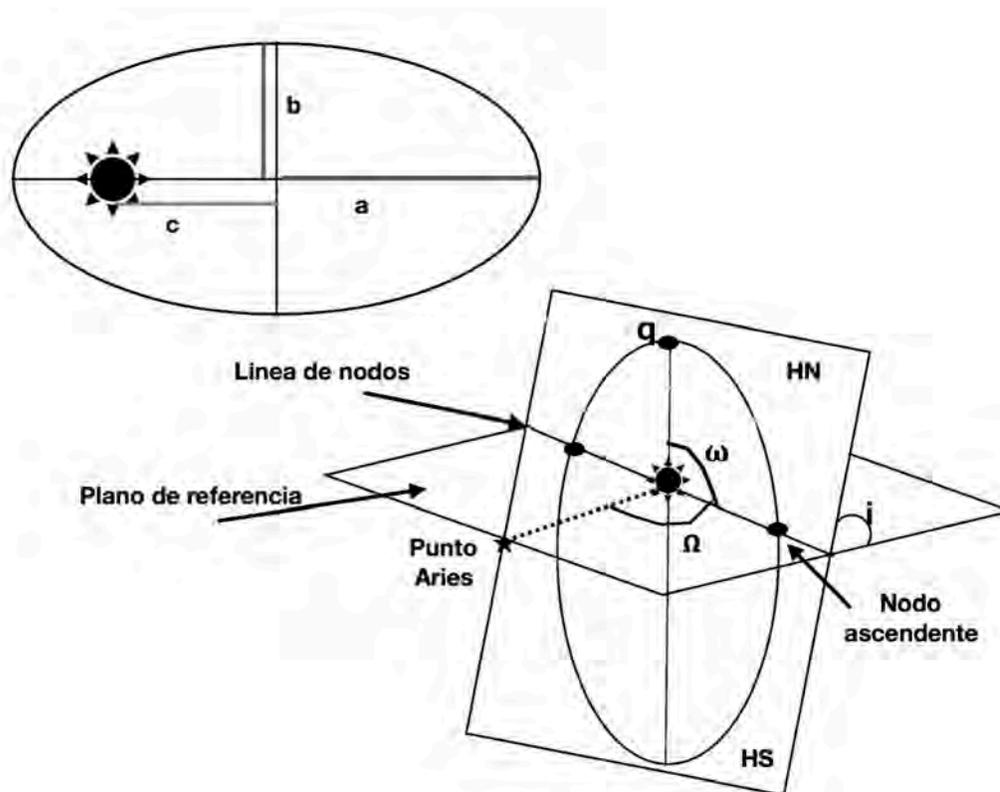


Figura 1.7: Parámetros orbitales. a : semi-eje mayor. b : semi-eje menor. c : longitud del centro al foco de la elipse. i : inclinación de la órbita con respecto al plano de referencia, la eclíptica. e : excentricidad, forma de la órbita. Ω : Longitud del nodo ascendente, es un ángulo que está formado por el nodo ascendente y el punto Aries, es el punto donde el objeto cruza al plano de referencia mientras se mueve del hemisferio sur (HS) al hemisferio norte (HN). q : perihelio, es la menor distancia entre un cuerpo y el Sol, medida desde la órbita del objeto. ω : Argumento del perihelio, es el ángulo que se forma desde el nodo ascendente hasta el perihelio sobre el plano orbital del cuerpo.

Una segunda característica fundamental del Cinturón de Asteroides es la mezcla parcial de clases taxonómicas, observadas a partir de las firmas espectroscópicas visua-

⁶La excentricidad, e , de una cónica (de una curva) determina su forma. Para las elipses $e < 1$, $e = 0$ para la circunferencia, para la parábola es $e = 1$ y para las hipérbolas es $e > 1$. En elipses e hipérbolas, $e = \frac{c}{a}$ [30]

les e infrarrojas de diferentes familias de asteroides. Otra clave que ofrece el Cinturón Principal es la poca masa que tiene. Suponiendo que los cuerpos que forman este Cinturón iban a formar un planeta en su etapa temprana, su masa es menor a la que se necesitaría para llegar a formar un planeta terrestre o el núcleo de Júpiter. Entonces la masa del Cinturón Principal ha sido reducida [23], es decir que varios de los cuerpos menores han sido expulsados del sistema Solar o fueron acretados por alguno de los 8 planetas. Se ha sugerido que la excitación dinámica y el agotamiento de la masa fueron eventos simultáneos para así obtener los valores en excentricidad e inclinación que medimos en el presente. Las restricciones señaladas se han estudiado generando modelos que las expliquen, los tres modelos más importantes son:

- a) El primer modelo que vinculó la evolución del Cinturón Principal de Asteroides con el proceso de formación de planetas terrestres, fue el propuesto por George W. Wetherill en 1992. En este modelo, al tiempo que el gas era removido del sistema planetario, el disco interior a Júpiter consistía en una población de planetésimos y embriones planetarios, estos últimos con masas comparables a las de la Luna o Marte. Suponiendo que Júpiter y Saturno estaban originalmente en sus órbitas actuales, las simulaciones numéricas con estas características muestran que bajo el efecto de las perturbaciones mutuas de los embriones planetarios y las perturbaciones periódicas generadas por Júpiter, los embriones son eliminados de la región del Cinturón de Asteroides y colisionan entre ellos para construir a los planetas terrestres dentro de una distancia al Sol de 2UA. Mientras los embriones planetarios se mueven a esta distancia, llegan a excitar y expulsar a la mayoría de los planetésimos residentes del cinturón original, solo una minoría de planetésimos permanecen en el Cinturón Principal al final del proceso de formación de los planetas terrestres, lo que explica el agotamiento masivo de la población actual de asteroides y la excitación de las excentricidades e inclinaciones. También los resultados de este modelo muestran que los asteroides restantes se han dispersado en relación con sus semi-ejes mayores originales[23].
- b) Las simulaciones hidrodinámicas muestran que los planetas gigantes pueden ex-

perimentar una migración en dos etapas, hacia adentro acercándose a la estrella y hacia afuera moviéndose a regiones frías lejos de su estrella. Walsh et al (2012) han propuesto un modelo dinámico que relaciona los resultados de la migración planetaria con la baja masa en el Cinturón Principal, los altos valores de la excentricidad e inclinación de los asteroides, la mezcla de las diferentes familias taxonómicas de estos cuerpos y explicar porque Marte tiene un diámetro menor con respecto a los planetas terrestres. Este modelo se llama "*Grand Tack*" y fue construido con varias simulaciones dinámicas. El escenario de Walsh et al (2011) postula que Júpiter formado casi en su totalidad, tiene un semi-eje mayor $a \approx 3.5\text{UA}$, esta distancia al Sol sería favorable para la formación de un planeta gigante debido a la densidad superficial del disco protoplanetario, la cual permitiría al núcleo de Júpiter alcanzar una masa crítica en donde la envoltura significativa gaseosa que rodea al núcleo no puede mantener el equilibrio hidrostático y comienza una fase rápida de agregación de gas. La posición de equilibrio en el disco donde se detiene la migración del núcleo está asociada con la línea de nieve (la ubicación donde el vapor de agua se condensa en hielo, ver Fig.1.8; [32]).

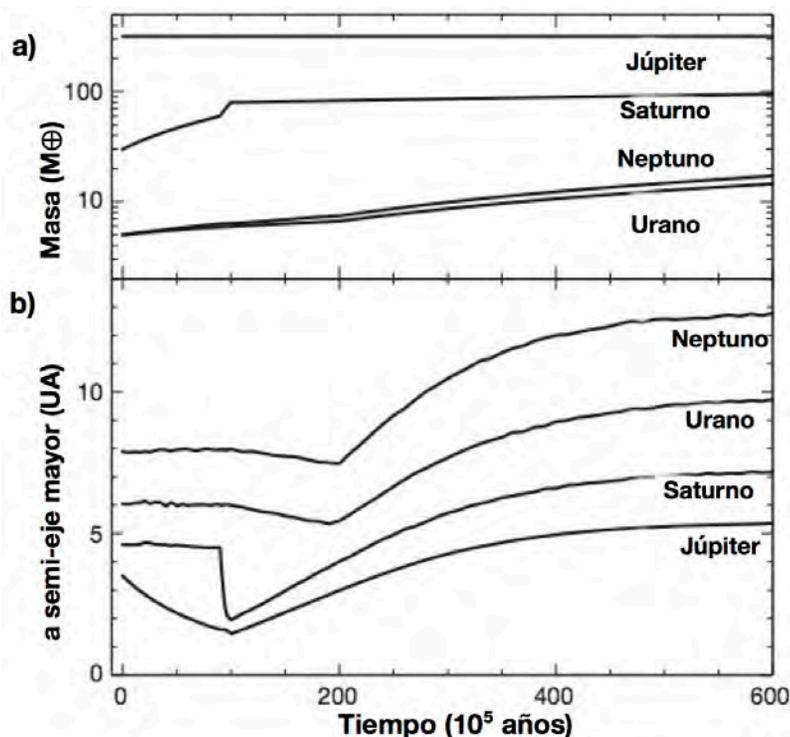


Figura 1.8: [32] a) Crecimiento de los planetas gigantes. b) Aumento y disminución del semi-eje mayor. (i) Júpiter migra hacia adentro mientras está solo en el disco (es decir, cuando Saturno sigue siendo un núcleo); (ii) cuando Saturno crece hacia su masa final se acerca a Júpiter hasta que queda atrapado en resonancia; (iii) cuando los dos planetas están en resonancia, migran hacia afuera

Las interacciones del disco protoplanetario y los protoplanetas definen las migraciones⁷, mientras tanto el planeta agrega material hasta alcanzar la masa crítica y definir un órbita estable alrededor de la estrella. El núcleo de Saturno con $30M_{\oplus}$ ubicado inicialmente $a \approx 4.5\text{UA}$ en este modelo, empieza a crecer hasta llegar a $60M_{\oplus}$, una vez que los planetas alcanzan una masa del orden de la mitad de una masa de Saturno dejarán la posición de equilibrio donde crecieron. Si el disco es

⁷Todos los protoplanetas sufren migración debido a cambios de velocidad orbital a lo largo del tiempo. La migración tipo I, se presenta en protoplanetas de masa pequeña que se ven perturbados por la fuerza gravitacional del disco. Los protoplanetas viajan en espiral hacia la estrella. La migración tipo II, se genera con protoplanetas que han alcanzando una masa tipo Júpiter [7] y las interacciones con el disco permiten intercambio en el momento angular al interior de la órbita del protoplaneta como en el exterior de la órbita generando la dispersión de material alrededor del planeta, abriendo un hueco en el disco, durante esta fase el protoplaneta puede trasladarse cerca a su estrella o alejarse [33]. La migración tipo II permite modelar la formación de planetas tipo Júpiter que acretaron una cantidad significativa de gas durante su etapa temprana.

lo suficientemente masivo, la migración hacia adentro de un planeta con masa de Saturno se puede convertir en migración del Tipo III, que es un modo de migración más rápida, acelerada y autosostenida. Las simulaciones hidrodinámicas muestran que los planetas gigantes aislados incrustados en discos protoplanetarios gaseosos crean espacios anulares y migran hacia adentro. Júpiter abrió un espacio ancho en el disco protoplanetario y migró hacia adentro del disco, en más de 10^5 años, avanzando a la velocidad a la que el gas es conducido a la estrella por su propia viscosidad, y por lo tanto, esta migración será del tipo II que es más lenta que la migración tipo III. La migración interna de Júpiter llegó hasta 1.5 UA [23]

Las simulaciones hidrodinámicas, donde Júpiter y Saturno se tienen en cuenta simultáneamente con las masas fijas, muestran que Saturno se acercó a Júpiter en unos pocos períodos orbitales y llevó a que los dos planetas queden atrapados en resonancia. Una vez en la resonancia de movimiento medio 2 : 3 (*Mean Motion Resonance*, MMR de aquí en adelante), la migración hacia el interior de Júpiter y Saturno se detiene. Las simulaciones hidrodinámicas muestran que estos planetas gigantes pueden experimentar una migración en dos etapas, hacia adentro y hacia afuera. La velocidad de migración hacia afuera depende de la profundidad del espacio abierto por Saturno en el disco. La dinámica de Júpiter y Saturno en la resonancia 2 : 3 fue identificada como la clave para explicar por qué, en nuestro sistema Solar, la migración de Tipo II no acercó a Júpiter al Sol. El fenómeno de reversión de la migración de dos planetas en resonancia ocurre sólo si el planeta externo es menos masivo que el planeta interno, con la relación de masa ideal entre $1/4$ y $1/2$ [32]. Esto conduce a que la densidad del disco de planetesimos sea truncada en 1UA ; los planetas terrestres terminaron de crecer mucho más tarde, y sus características, incluida la masa pequeña de Marte, se reproducen mejor comenzando desde un disco de planetesimos con un borde externo a aproximadamente una unidad astronómica del Sol. (Siendo la estructura del Cinturón Principal un remanente de las órbitas caóticas de Júpiter y Saturno al inicio del sistema Solar [17])

c) Los modelos individuales pueden recrear con éxito partes específicas de la evolución del sistema Solar, pero aún se intenta definir un conjunto de eventos que explique todos los aspectos de nuestro sistema planetario. Cada acción de los planetas causa una reacción en el Cinturón de Asteroides, por lo que estos modelos también deben ser consistentes con las composiciones que hoy podemos observar [11]. Probablemente el Cinturón de Asteroides sufrió una segunda etapa de excitación y agotamiento de masa. Las restricciones del sistema Solar sugieren que esta etapa sucedió a los 450 Ma cuando el gas fue removido en su totalidad, Fig.1.9 [23]. Estas inestabilidades provocaron eventos de colisiones; la cronología absoluta de estos eventos es de hace 3.8×10^9 años, fechación dada por la tasa de craterismo en la Luna, calibración hecha con las rocas lunares traídas por las misiones Apolo [21]. El modelo de Nice fue la primera solución integral que pudo explicar simultáneamente muchas propiedades estructurales únicas del sistema Solar [5]. Para este nuevo proceso de inestabilidad existen dos categorías, la primera son los encuentros cercanos entre Saturno, Urano y Neptuno, ninguno de ellos con Júpiter. Saturno dispersa a Urano o Neptuno hacia afuera haciendo que Saturno retroceda hacia adentro del sistema Solar, generando en Urano y Neptuno altas excentricidades en sus órbitas, de modo que los planetas cruzan el disco trans-Neptuniano de planetésimos (Cinturón de Kuiper actualmente). La interacción entre los planetas gigantes y un disco de Kuiper masivo y distante hace que el sistema se desestabilice. La segunda categoría de inestabilidad es por la separación que hay entre Saturno y Júpiter. En el modelo original, Júpiter se mueve hacia adentro mientras los otros planetas gigantes migran hacia afuera. Cuando Júpiter y Saturno cruzaron su MMR 1 : 2, el sistema se desestabilizó [5]. Esta segunda fase ayuda a explicar los satélites irregulares de Júpiter y la captura de los asteroides Troyanos alrededor de los puntos Lagrangianos L_4 y L_5 . Estas dos fases, como continuación del Gran Tack son del modelo de Nice. Mediante las dos fases de inestabilidad, se transportó material al interior del sistema Solar desde dos fuentes, el Cinturón Principal de Asteroides y el disco original trans-Neptuniano. Las mediciones hechas por simulaciones dinámicas su-

gieren que 10^{22} gramos de material impactó contra la Luna en un intervalo de 100 – 200Ma lo cual concuerda con la magnitud y duración del Bombardeo Tardío (*Late Heavy Bombardment*) en el registro de cráteres lunares. Así el modelo de Nice también ayuda a explicar el bombardeo que sufrieron los planetas terrestres a un edad temprana, debido a las migraciones de los planetas gigantes [21].

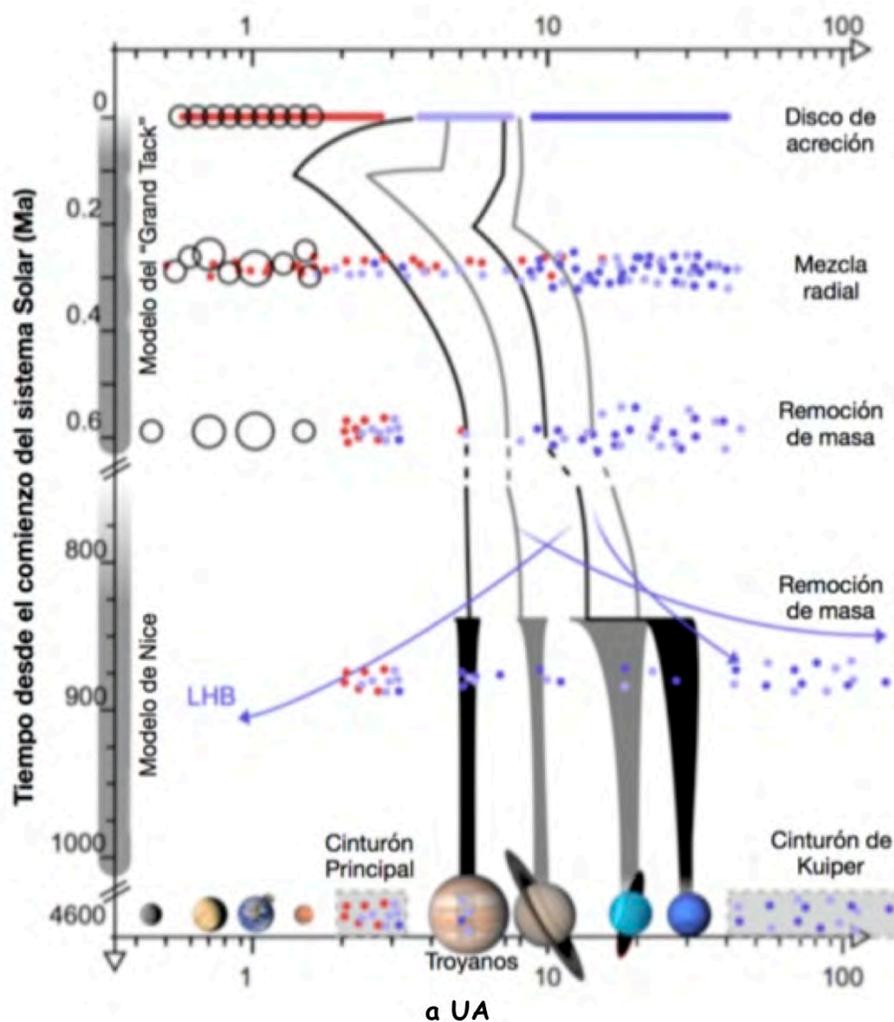


Figura 1.9: Representación animada de los efectos de la migración planetaria en el Cinturón Principal. Estos modelos pueden no representar la historia real del sistema Solar, pero son historias plausibles. Contienen períodos de mezcla radial, remoción de masa y migración planetaria que finalmente llegan a la distribución actual de planetas y poblaciones de pequeños cuerpos [5]

1.1.2. Composición y distribución espacial en el Cinturón Principal de Asteroides

El tiempo de vida de los asteroides más grandes, como lo son Vesta, Pallas, Europa, se encuentra en el mismo orden de magnitud que la vida de nuestro sistema Solar. Por lo tanto, algunos de los asteroides más grandes pudieron haber sobrevivido desde el momento de su creación, mientras que los asteroides más pequeños, en comparación a los mencionados, son fragmentos resultados de las colisiones sufridas durante las fases de calentamiento del disco protoplanetario [?]. La característica principal de la población del Cinturón Principal es su excitación orbital, es decir, el hecho de que la excentricidad y la inclinación de las órbitas de los asteroides son grandes. Para estos planetésimos se esperaría que formaran órbitas circulares y coplanares, dado que provienen según la teoría estándar de discos de gas super fríos. Entonces uno o más mecanismos de excitación con el Cinturón fue necesario para elevar la excentricidad y la inclinación a valores aleatorios. La excentricidad e inclinación en el Cinturón no parecen tener una fuerte dependencia con el semi-eje mayor (ver Fig.1.10) [23].

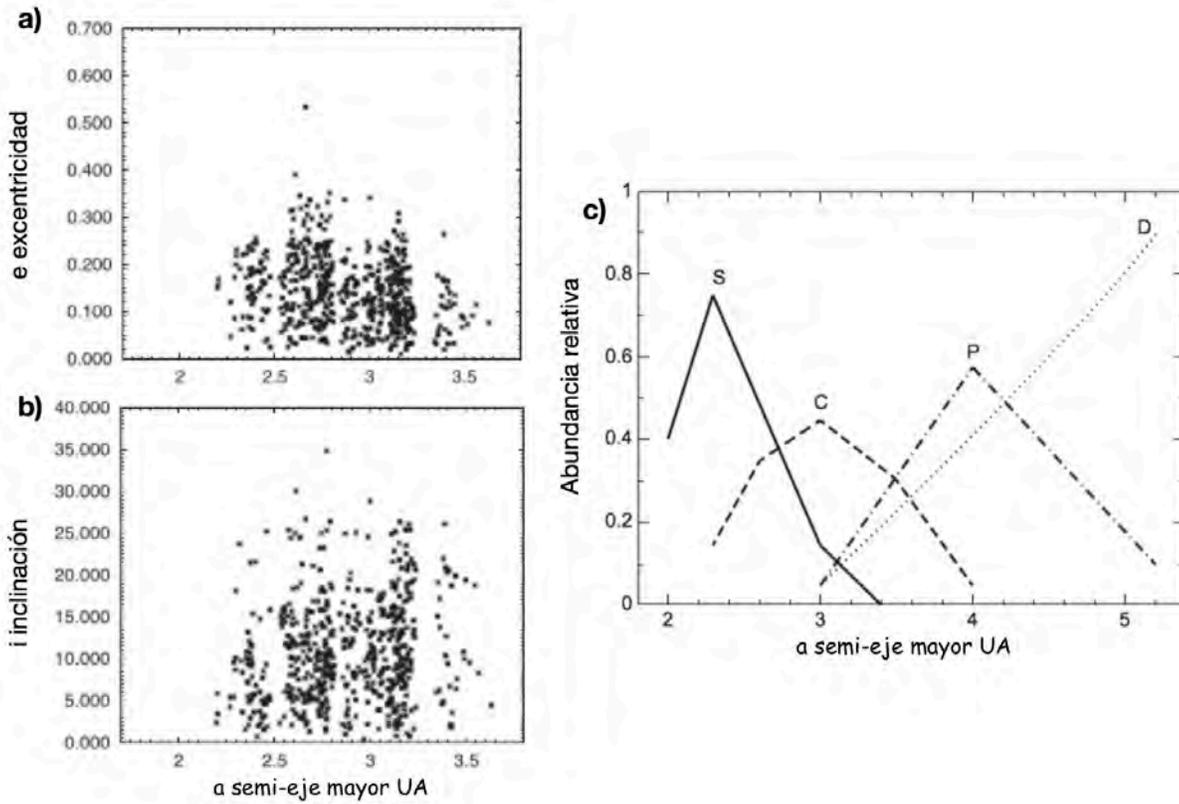


Figura 1.10: Distribución orbital de la población real de asteroides con un diámetro $d > 50\text{km}$. a) e vs. a , magnitud absoluta $H < 9.7$. b) i vs. a , magnitud absoluta $H < 9.7$ [16] c) La distribución relativa de diferentes tipos taxonómicos (S,C,P y D) observados originalmente por Gradie y Tedesco (1982) [23]

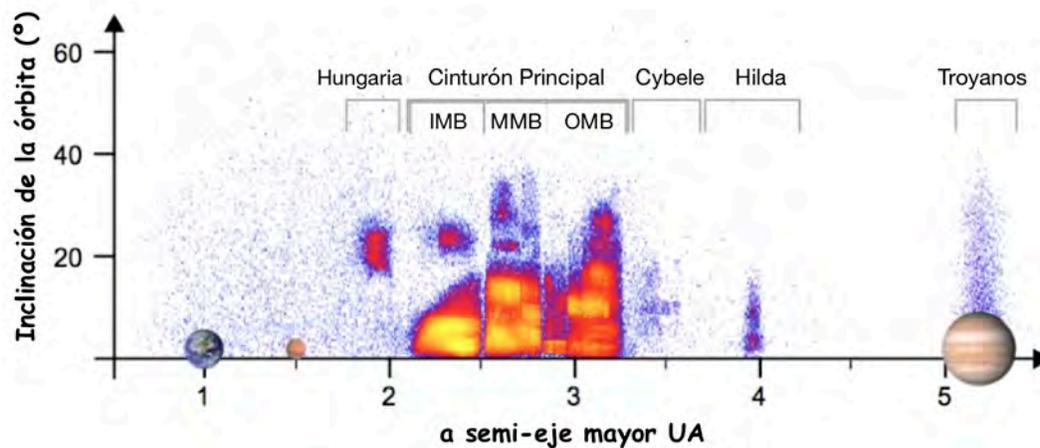


Figura 1.11: Esta imagen muestra la ubicación del Cinturón Principal con respecto a los planetas y al Sol, así como la estructura orbital de la inclinación y densidad de los objetos (el gradiente de color representa alta y baja densidad). La estructura del Cinturón está dividida en regiones inestables, las más prominentes están a 2.5UA y 2.8 UA (distancias donde las órbitas de los asteroides están en resonancia con la órbita de Júpiter) [5]

Las familias de asteroides observadas se componen de cuerpos que se cree que son el resultado de colisiones energéticas que conducen a interrupciones catastróficas de sus cuerpos principales más grandes. Las familias de asteroides como la asociada con Vesta también pueden ser creadas por impactos de cráteres menor energéticos. Como complemento de los enfoques experimentales y teóricos, la modelización numérica se ha convertido en un componente importante para estudiar colisiones de asteroides y procesos de impacto [18]. El Cinturón se puede dividir en siete secciones o familias, cada una se distingue de la otra por su composición química, su distancia al Sol, por escalas de tiempo muy diferentes y por sufrir una resonancia con Júpiter (ver Fig.1.11; [5]):

- Hungaria, son los asteroides más cercanos al Sol, $a < 2\text{UA}$, situados en la resonancia 4 : 1.
- Interior del Cinturón (*Inner Main Belt*, IMB de aquí en adelante), $a < 2.5 \text{ UA}$, y resonancia 3 : 1.
- Parte central del Cinturón (*Mid Main Belt*, MMB de aquí en adelante), $2.5 < a <$

2.8UA, y resonancia 5 : 2.

- Exterior del Cinturón (*Outer Main Belt*, OMB de aquí en adelante), $a > 2.8$ UA, con resonancia 2 : 1.
- Cybele con una densidad menor que las otras familias, $a < 4$ UA, y con dos resonancias 11 : 6 y 5 : 3.
- Hilda localizados cerca de 4UA compartiendo resonancia con Cybele 5 : 3.
- Asteroides Troyanos de Júpiter en los puntos de Lagrange $L4$ y $L5$ de la órbita de Júpiter.

Con estas divisiones la taxonomía desde el punto de vista químico es aproximadamente la siguiente: el Cinturón Interno esta dominado por asteroides de tipo espectral S (contienen silicatos como piroxeno y olivino), relacionados con las condritas ordinarias⁸; en el Cinturón Medio la población que domina es el tipo C, objetos carbonáceos oscuros (silicatos hidratados con hierro), relacionado con las condritas carbonáceas⁹; los tipos asteroidales en las regiones de Hilda y Troyanos son físicamente diferentes al resto del Cinturón Principal; los Hildas están dominados por el tipo espectral P, y los Troyanos por el tipo espectral D [23]. La clasificación espectral P y D, se refiere a una composición de silicatos anhídros y compuestos orgánicos [4]. Otros grupos menores que se encuentran en el Cinturón son tipo M, de metal¹⁰, tipo E, de estatita y del Asteroide Vesta, el cual es un cuerpo parental de las meteoritas HED¹¹, Howarditas,

⁸Las condritas son meteoritas rocosas que contienen estructuras eféricas de silicatos llamados cóndrulos en su interior, los cuales no han sufrido procesos de fundido desde su cristalización en la nebulosa solar. Las condritas ordinarias son las meteoritas rocosas que constituyen más del 80% de caídas en la superficie terrestre, al ser las muestras espaciales más abundantes reciben el nombre de ordinarias. Este grupo de rocas se clasifica dependiendo el contenido de olivino y piroxeno. Siendo los asteroides tipo S los más observados en la población de NEAs, se ha relacionado a las condritas ordinarias con los asteroides tipo S [4]

⁹Las meteoritas más primitivas, son las que presentan una composición más similar al Sol. Se formaron en regiones ricas en oxígeno, por lo que la mayor parte del metal se encuentra en forma de silicatos, óxidos y sulfuros [4]

¹⁰Los meteoritos rocosos, compuestos de Fe-Ni, están relacionados con cuerpos parentales en el Cinturón Principal y la población de NEAs se dividen en Palasitas y Mesosideritas. Dado que los metales son los primeros en condensar, al estar muy cerca a la estrella, los cuerpos metálicos también se formaron in situ [28].

¹¹Este grupo es clasificado como acondritas. Las acondritas son meteoritas rocosas que no poseen cóndrulos. Su composición principal es de piroxenos y olivinos [4]

Eucrites y Diogenites [28]. En el Sol, los elementos rocosos más importantes son el magnesio (Mg), silicio (Si) y hierro (Fe). Las meteoritas condriticas nos muestran esta misma firma química, el 20 % de Mg/Si, 50 % para Al/Si y en menor proporción Fe/Si [28].

Entonces la estratificación en el Cinturón Principal de Asteroides nos da una vista general de los elementos primordiales en el disco protoplanetario que posiblemente tuvo un gradiente de temperaturas relacionado a la distancia de la estrella central. Por ejemplo las condritas ordinarias en la sección S del disco son menos abundantes en componentes orgánicos y en agua en comparación con las condritas carbonáceas, de modo que los asteroides tipo S pudieron formarse en la parte más caliente del disco. Ahora con el modelo del Grand Tack se puede explicar que los asteroides tipo S se formaron más o menos *in situ* (2 – 3 UA); los asteroides tipo C se formaron en la región de los planetas gigantes aproximadamente (3 – 15 UA) y los asteroides tipo P y D se formaron pasando la región original de formación de Neptuno (15 – 30 UA). En el extremo opuesto, las meteoritas carbonáceas tipo CI no muestran relación química con la composición Solar, teniendo estas muestras hidrógeno (H), carbono (C), nitrógeno (N), oxígeno (O) y todos los gases nobles, se sugiere que debieron formarse en la zona del disco con una baja temperatura para permitir la condensación de estos elementos (ver Fig.1.10; [23]). Los NEAs más abundantes son los tipo S, compuestos de silicatos. Siendo este tipo espectral el que domina en el Cinturón Principal, el modelo de Grand Tack, además explica la composición de la mayoría de la población de NEAs [4].

1.1.3. Dinámica de los cuerpos en el Cinturón Principal

Los asteroides se convierten en cruzadores de las órbitas planetarias incrementando su excentricidad orbital bajo la acción del fenómeno de resonancia [22]. En esta sección abordaremos los fenómenos dinámicos presentes en el Cinturón, primero entenderemos por Resonancia de Movimiento Medio (*Mean Motion Resonance*, MMR de aquí en adelante), cuando dos cuerpos en órbita ejercen una influencia gravitatoria regular y periódica entre ellos. Por ejemplo esto ocurre cuando los periodos orbitales entre un asteroide (n_a) y un planeta (n_p) da una fracción simple [12] por ejemplo:

$$\frac{n_a}{n_p} = 2. \quad (1.3)$$

Las MMR mejoran la influencia gravitacional mutua de los cuerpos al permitir alterar o restringir las órbitas de los cuerpos alrededor. Esto da como resultado una interacción inestable, en la que los cuerpos intercambian momento angular y desplazan órbitas. En los inicios de nuestro disco protoplanetario esta transferencia de momento angular se dió en las resonancias generadas por los embriones planetarios [9]. En esta tesis estudiaremos las partículas prueba en rotación, donde las MMR son lugares donde el planeta puede perturbar fuertemente su movimiento. Si el sistema Solar consistiera sólo del Sol y de otro cuerpo, las dos órbitas seguirían el mismo camino alrededor de su centro de masa indefinidamente. Cuando hay varios planetas en un sistema, sus perturbaciones gravitacionales mutuas hacen que las formas y parámetros orbitales de sus órbitas cambien con el tiempo. Las Resonancias Seculares (*RS* de aquí en adelante) son entonces posiciones que cambiarán gradualmente las propiedades de la órbita de un cuerpo. Una resonancia secular ocurre cuando la tasa de precesión del parámetro orbital, “argumento del pericentro (ω)”, se acopla a una de las frecuencias propias fundamentales del sistema Solar [12]. La resonancia secular ν_6 es la más fuerte y se localiza dentro del Cinturón Principal cerca de 2 UA. Esta resonancia es debida a la influencia gravitacional de Saturno sobre las partículas del Cinturón Interno de Asteroides. Si un objeto deja la resonancia, vagaría por decenas a millones de años, cambiando su semi-eje hasta sufrir encuentros cercanos con los planetas [12]. Estas resonancias pueden en alrededor de 1 millón de años aumentar la excentricidad de un objeto hasta acercarlo al Sol [10]. Así, la estratificación del Cinturón Principal se debe a resonancias con Júpiter, descritas brevemente a continuación (ver Fig.1.12):

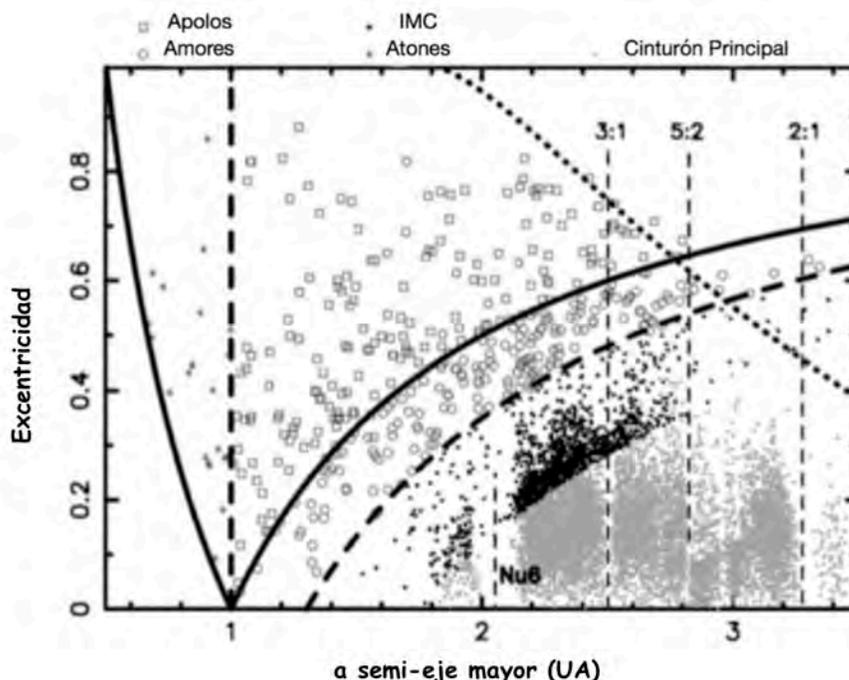


Figura 1.12: Regiones de asteroides tipo NEAs y Cinturón Principal [21]. Se indican tres grupos de NEAs: Atones, Apolo y Amor. También se indican los asteroides que cruzan la órbita de Marte (*Intermediate Mars Crossers*, IMC). Ubicación de las resonancias principales MMR con Júpiter y la Resonancia Secular ν_6 . Las líneas sólidas representan perihelio y afelio igual a 1 UA, la línea curva punteada indica el cruce con Marte en el perihelio y la línea de puntos en la parte superior derecha es la línea de cruce con Júpiter en el afelio.

- La resonancia ν_6 es una resonancia secular que marca el límite de la sección interior del Cinturón, la vida media de un asteroide atrapado en esta sección es de 2 Ma, y típicamente terminará colisionando con el Sol. El asteroide que empiece en una órbita cuasicircular, dentro de esta región, se convertirá en un cruzador de la órbita terrestre en 0.5Ma [22].
- La resonancia 3:1 está ubicada a 2.5UA; es una zona inestable, la excentricidad se eleva rápidamente de tal forma que permite un mecanismo para que los cuerpos que entren en esta zona evolucionen rápido hacia la población de objetos cruzadores de Marte (IMC); una vez cerca de Marte los objetos pueden volver a sufrir perturbaciones lo cual hace que el objeto entre en la población de Objetos Cercanos a la Tierra [12]. El tiempo medio para que un cuerpo en esta sección

se vuelva cruzador de la Tierra es de 1 Ma, la vida total será de 2 Ma y la mayoría de objetos de esta población termina colisionando con el Sol [22].

- La resonancia 5:2 se localiza a 2.8 UA [22]; el tiempo medio para que cruce la órbita terrestre es de 0.3 Ma y la vida media 0.5 Ma, esto es debido a su cercanía con Júpiter el cual lanzará a los objetos a órbitas hiperbólicas [10].
- La resonancia 2:1, localizada a 3.28 UA, está asociada a una región de baja densidad de asteroides en el Cinturón Principal. Se necesitan millones de años para que un objeto en esta resonancia se convierta en cruzador terrestre, pero si lograra entrar a una distancia de perihelio menor a 1.3UA, su excentricidad sería elevada y en aproximadamente 0.1 Ma, Júpiter lo pondría en órbita hiperbólica [22].

Las resonancias producen los conocidos “huecos de Kirkwood”, llamados así en honor a Daniel Kirkwood, que los descubrió; se trata de regiones en el cinturón principal que han sido limpiadas de asteroides por los efectos perturbadores de Júpiter. Estas regiones de baja densidad de asteroides ocurren en resonancias MMR con Júpiter (ver Tabla 1.1). Estas resonancias generan acumulación de material en 3.9UA (grupo Hilda) y 5.2UA (grupo Troyano). La presencia de resonancias seculares ayuda también en mantener los huecos de Kirkwood y en el aumento de dispersión de material, particularmente en los bordes internos del cinturón como lo es la ν_6 [22]. La Fig.1.13 muestra la ubicación de las resonancias más importantes en el Cinturón Principal de Asteroides y sus fuerzas asociadas¹²

¹²A partir de las ecuaciones de movimiento de Lagrange, se calcula la función de perturbación orbital, que depende de la excentricidad, inclinación, argumento del perihelio, longitud del nodo ascendente y del ángulo crítico (ángulo permite tener una evolución lenta en el tiempo). La función para calcular la fuerza, mide la amplitud de los cambios en la función de perturbación orbital debido al ángulo crítico. (Para una descripción detallada véase [8] y [9]).

Resonancia	semi-eje mayor <i>a</i> UA
3:1	2.5000
7:3	2.5600
5:2	2.8000
2:1	3.2800
3:2 (grupo Hilda)	3.9700
1:1 (grupo troyano)	5.2042

Cuadro 1.1: Resonancias donde se encuentran los Huecos de Kirkwood.

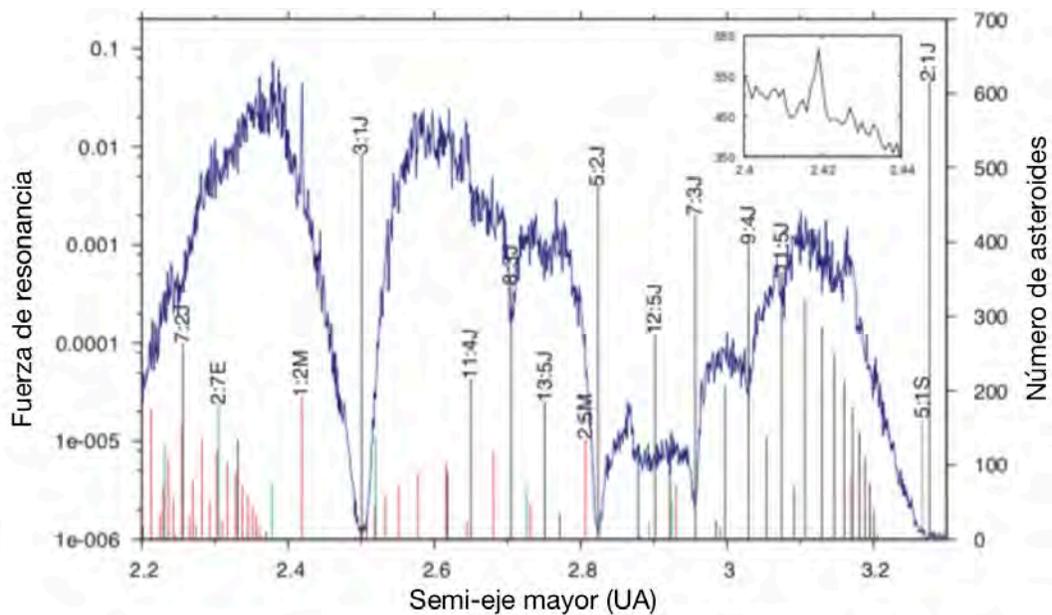


Figura 1.13: Ubicaciones de las MMR en el Cinturón Principal de Asteroides con sus fuerzas asociadas [9]. La zona más poblada es en 2.419 UA, ver el zoom en la esquina superior derecha

1.2. Objetos Cercanos a la Tierra, NEOs y NEAs

1.2.1. Definición

Como hemos explicado antes, la dinámica pasada y presente de nuestro sistema Solar, por resonancias con Júpiter, sobre los cuerpos: asteroides y cometas, genera un aumento progresivo y rápido en las excentricidades, que eventualmente condiciona a las órbitas de cuerpos menores se crucen con la órbita terrestre. Con estos estudios se ha reconocido que este tipo de objetos pueden colisionar con la Tierra [14], y en las últimas décadas se ha creado un campo de estudio dedicado al estudio específico de los Objetos Cercanos a la Tierra (*Near Earth Objects*, NEOs de aquí en adelante). Los NEOs son todos aquellos cuerpos que poseen un perihelio $q < 1.3\text{UA}$ y un afelio $Q < 0.983\text{UA}$ [22]; entre estos objetos hay cometas, asteroides y núcleos cometarios. Los cometas se restringen a aquellos de periodo corto, su grupo se llama Cometas Cercanos a la Tierra, (*Near Earth Comets*, NECs de aquí en adelante) y los asteroides se dividen en el grupo de Asteroides Cercanos a la Tierra (NEAs) los cuales a su vez se dividen en familias dependiendo de su perihelio, afelio y semi-eje mayor [14].

1.2.2. Clasificación de NEAs

Para este trabajo nos enfocaremos en la población más grande de NEOs, i.e., los asteroides. Por convención los NEAs tienen la siguiente clasificación, [12, 22] Fig.1.14:

- Atiras: afelio $0.718 \text{ UA} < Q < 0.983 \text{ UA}$. Sus órbitas están completamente embebidas en la órbita terrestre.
- Vatiras: cuerpos en la región Atiras que por encuentros con la Tierra y Venus cambiaron sus parámetros orbitales para ser dominados por la fuerza de Venus.
- Vulcanoids: son una pequeña población de Vatiras, que al momento de tener a Venus cerca de Mercurio, estos cuerpos disminuyen su afelio, sufriendo dominio de Mercurio.

- Atones: semi-eje mayor $a < 1.0$ UA, afelio $Q > 0.983$ UA. Tienen órbitas más pequeñas que la órbita terrestre, pasan mucho tiempo en el interior de la órbita de la Tierra.

- Apolos: semi-eje mayor $a > 1.0$ UA, perihelio $q < 1.0167$ UA. Objetos en órbitas más largas a la órbita terrestre y pasan más tiempo fuera de la órbita de la Tierra, al contrario de los Atones.

- Amores: perihelio $1.0167 \text{ UA} < q < 1.3$ UA. Tienen órbitas completamente externas a la órbita terrestre; son cuerpos cruzadores de la órbita de Marte también.

- Potencialmente Peligrosos (Potentially Hazardous Asteroids, PHAs): éstos tienen gran importancia debido a su diámetro (desde 140m a kilómetros) y su distancia mínima de intersección con la órbita de la Tierra (menor a 0.05 UA). La colisión de PHAs con la Tierra generaría catástrofes mundiales e incluso, la extinción de la especie humana.

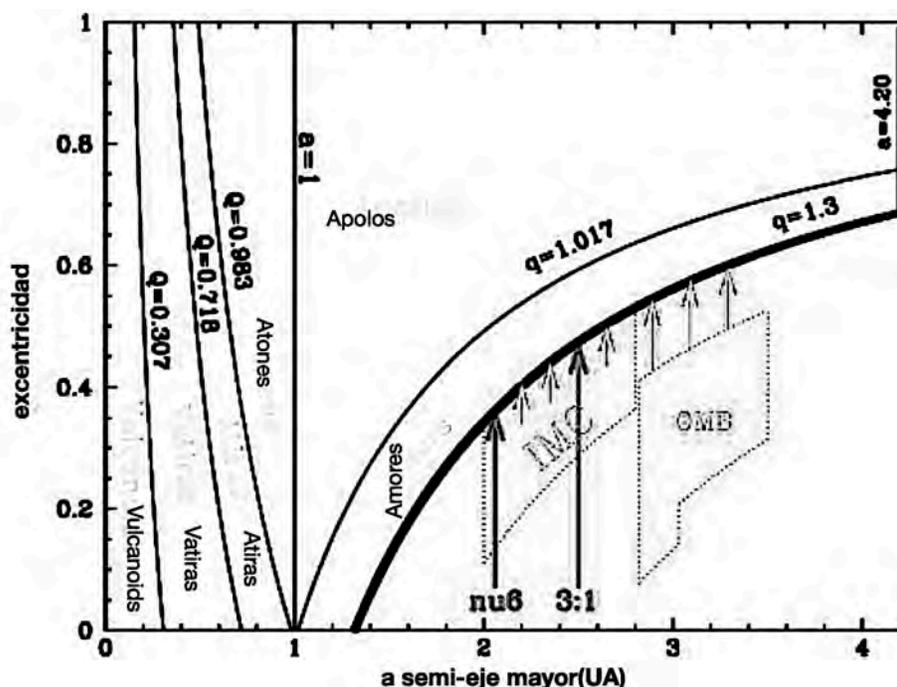


Figura 1.14: Población de NEOs restringida con $q < 1.3$ UA y $a < 4.2$ UA (línea sólida en negro) [12]. Los parámetros orbitales, afelio (Q) y perihelio (q) están delimitados para cada clase. Están señaladas la resonancia secular ν_6 y la MMR 3 : 1 con Júpiter. Limitados en negro se define la población de Objetos Cruzadores de Marte (*Intermediate Mars Crossers, IMC*) y la población de OMB (*Outer Main Belt, OMB*).

Es ahora aceptado que los NEAs presentan un riesgo para la vida en la Tierra y en particular, por supuesto, para la civilización. Mientras el descubrimiento de NEOs es la principal preocupación, el entendimiento teórico del origen y la evolución de NEOs es también de suma importancia para contribuir a las soluciones de estos peligrosos vecinos de la Tierra (Fig.1.15) [3].

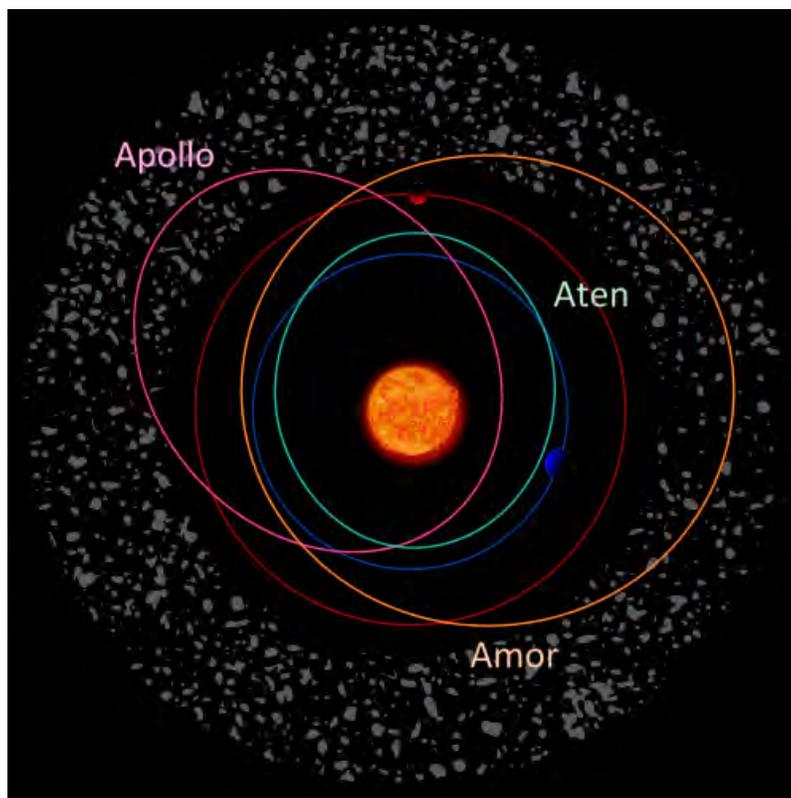


Figura 1.15: Familias de NEAs representadas artísticamente. Créditos: ESA 2002. Ilustración por Medialab.

1.2.3. Relación de NEOs con el Cinturón Principal de Asteroides

El Cinturón Principal se considera la fuente de la mayoría de meteoritas y probablemente la mayoría de NEAs. En este Cinturón el fenómeno de las resonancias ayuda a incrementar la excentricidad al punto donde colisionar con la Tierra es posible. Si estas partículas escapan de las resonancias por medio de encuentros cercanos con planetas, éstas deambularán lentamente hasta encontrar una resonancia fuerte en donde su vida dinámica será corta, a menos que algún evento haga que el objeto escape [10]. Con esta fenomenología podemos explicar que las fuentes de NEOs serán esos discos de asteroides, cometas y núcleos cometarios; que cambiaron su excentricidad e inclinación de forma resonante. Por ejemplo, Júpiter dispersa a los cometas de la Familia

de Júpiter (JFCs) a la región de NEOs. Pero el tiempo de un objeto en la región JFCs es muy corto (0.1 Ma) por lo que debe existir una población significativa de cometas en el Cinturón de Kuiper (30 – 50 UA) que suministren a esta familia, mediante los efectos de transporte dados por resonancias. Por esta razón, los cometas de la Familia de Júpiter son fuente primaria de NEOs [12]. Ahora, las órbitas de objetos cruzadores de la Tierra con $a > 2$ son producidos rápidamente a partir de inyecciones resonantes, que una vez puestos en la regiones Apolo o Amor, su tiempo de residencia será corto. La mayoría de cuerpos que entran en la población de NEAs lo hacen transitoriamente; varios vienen con $a < 2$ UA solo por un pequeño tiempo de 1 Ma y regresan con $a > 2$ UA para ser enviados hacia el Sol por las resonancias $3 : 1$ y ν_6 [10]. La población restante de NEAs orbitan por la dinámica de encuentros cercanos con los planetas terrestres, como el caso de los Vatiras y Vulcanoides, aunque primero deben sobrevivir a las múltiples resonancias localizadas entre 1.8 UA y 2 UA (estas son $4 : 1$, $5 : 1$ MMR con Júpiter y las resonancias seculares ν_6 y ν_{16}). Otro ejemplo de fuente abastecedora de NEOs se puede dar por las colisiones entre asteroides en el Cinturón Principal, las cuales empujarán estos fragmentos a las resonancias $3 : 1$ o ν_6 [1].

1.3. La contribución de este trabajo

Como se ha mencionado, el mecanismo dominante para abastecer a la población de NEOs proviene seguramente de las regiones resonantes del Cinturón Principal con Júpiter y Marte, pero, una vez que estas zonas resonantes son vaciadas por completo (se trata de procesos rápidos) ¿cómo es que siguen entrando asteroides de la zona estable del Cinturón a las regiones resonantes? En este trabajo se estudiará la dinámica caótica inducida por los cuerpos y planetas menores ubicados en el Cinturón Principal. Explicaremos cómo esta dinámica a lo largo de millones de años puede contribuir de forma importante al estado constante de la población de NEOs. De esta manera agregaremos una fuente probable de NEOs/NEAs explicados a través de la influencia secular de los planetas enanos, aumentando la información teórica sobre la dinámica de estos cuerpos en el sistema Solar y alrededor de la Tierra. Con esta investigación

podremos entender mejor las tasas de craterismo de impacto que sufrieron los planetas a lo largo de la historia del sistema planetario, así como las posibles colisiones de estos objetos con nuestro planeta en el futuro.



Figura 1.16: Representación de un asteroide cercano a la Tierra (tomada de Dieter Spannkebel/Getty Images).

Capítulo 2

Metodología

2.1. Condiciones iniciales

2.1.1. Parámetros Orbitales

Los elementos orbitales utilizados tradicionalmente en el estudio de sistemas planetarios son los parámetros conocidos como “keplerianos”; éstos definen una órbita dada y se les conoce así por las leyes de movimiento planetario descritas por Johannes Kepler. Para definir los seis elementos orbitales, el sistema Solar se coloca en un marco no inercial donde el centro es el Sol y las trayectorias de los planetas son aparentes. Los dos elementos que definen la forma y tamaño de la elipse son:

- a) Excentricidad, e : describe cuánto se desvía una elipse de un círculo, se evalúa entre 0 y 1, donde 0 es un círculo, 1 es una parábola y > 1 es una hipérbola.
- b) Semi-eje mayor a : Es la suma de las distancias de periapsis, q , y apoapsis, Q . Para las órbitas circulares, el semi-eje mayor es la distancia entre los centros de los cuerpos. En el sistema Solar, la excentricidad de las órbitas de los planetas es muy pequeña, es decir, se trata de órbitas casi circulares.

Dos elementos más que definen la orientación del plano orbital de la elipse son:

- c) Inclinación, i : inclinación vertical de la elipse con respecto al plano de referencia, medida en el nodo ascendente. El ángulo de inclinación se mide perpendicularmente.

larmente a la línea de intersección entre el plano orbital y el plano de referencia.

Fig.1.7

- d) Longitud del nodo ascendente, Ω : es el ángulo entre el nodo ascendente de la elipse (donde la órbita pasa hacia arriba a través del plano de referencia) con respecto al punto vernal (punto de la eclíptica a partir del cual el Sol pasa del hemisferio sur celeste al hemisferio norte, lo que ocurre en el equinoccio de primavera).

Y finalmente:

- e) Argumento del periapsis, ω : este ángulo define la orientación de la elipse en el plano orbital, como un ángulo medido desde el nodo ascendente hasta el periapsis (o perihelio).
- f) Anomalía media, MA : La anomalía media define la posición del cuerpo en un momento específico la "época" dada en días julianos (JD: día Juliano elegido para calcular la posición del cuerpo celeste sobre la órbita). La anomalía media es un ángulo matemáticamente conveniente que varía linealmente con el tiempo.

No sólo los parámetros orbitales definen la trayectoria del cuerpo celeste, también lo hará la atracción gravitatoria, F_g dada por el Sol.

$$F_g = G \frac{Mm}{r^2}. \quad (2.1)$$

Esta fuerza central se describe en la segunda ley de Kepler: "*Los planetas se mueven a velocidad areolar constante. Es decir, el vector posición de cada planeta con respecto al Sol barre áreas iguales en tiempos iguales*". Para ello se considera que el Sol no se mueve, así la fuerza de atracción ejercida por el Sol es una fuerza central siempre a lo largo del radio vector dirigido hacia el Sol. Esto es una consecuencia de la conservación del momento angular \vec{L} . Esta magnitud caracteriza la rotación de un cuerpo y se define como:

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = M_p \vec{r} \times \vec{v} = cte, \quad (2.2)$$

donde \vec{p} es el momento lineal que describe la traslación del planeta y \vec{r} es el vector de posición. También se demuestra que la torca τ , una cantidad vectorial que provoca que un objeto adquiera aceleración angular, sea igual a cero. Sea la velocidad \vec{v} y el momento lineal \vec{p} paralelos, su producto vectorial vale cero y tenemos:

$$\tau = \vec{r} \times \vec{F}, \quad (2.3)$$

$$\tau = \vec{r} \times \frac{d\vec{p}}{dt} = cte, \quad (2.4)$$

$$\sum \tau = \frac{d\vec{L}}{dt} = 0. \quad (2.5)$$

Donde \vec{F} es la fuerza de Gravedad, como se observa en la Fig.2.1, al ser una fuerza central, el momento angular es constante, las órbitas son planas y se recorren siempre en el mismo sentido.

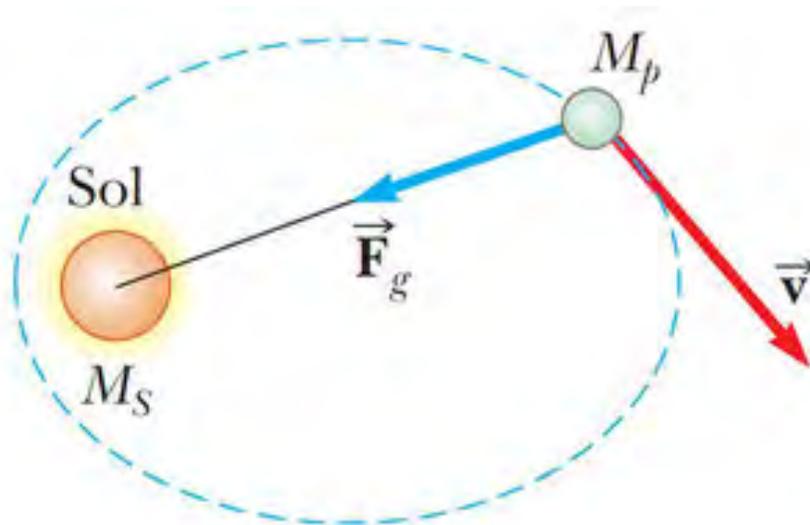


Figura 2.1: Planeta de masa, M_p , que va una velocidad, \vec{v} , girando en una órbita elíptica en torno al Sol que está en uno de sus focos. La fuerza de atracción ejercida por el Sol es una fuerza central, siempre a lo largo del radio vector dirigido hacia el Sol. La torca neta es perpendicular al plano de referencia y es igual a cero (tomada de www.fisic.ch).

Aunque el movimiento de la mayoría de los Asteroides en el Cinturón Principal se puede describir simplemente con la segunda ley de Kepler a primera aproximación, existen otros que a lo largo de la evolución del sistema Solar, se ven afectados en su energía potencial, V , debido a la fuerza gravitatoria que ejercen planetas cercanos a éstos. En el Cinturón Principal los planetas que influyen son Júpiter (mayormente) y Saturno; esto debido a su masa mucho mayor a estos cuerpos y la corta distancia que los separa. Los siguientes cuerpos que pueden influir (aunque ligeramente) las órbitas de los cuerpos menores son la Tierra y Marte, el resto de los planetas tienen una influencia despreciable para el sistema de asteroides, por lo que solo se consideran cuatro planetas para el estudio de la dinámica del Cinturón Principal en este trabajo, así entenderemos la relación de los NEOs con el cinturón.

En el Cinturón Principal también hay cuerpos con masa suficiente que de manera secular pueden contribuir a la población de NEOs, cambiando los parámetros orbitales de los asteroides en escalas de tiempo de varios centenares de millones de años, hasta hacerlos llegar a las resonancias con Júpiter y de esta manera tomar dirección al Sol o

cerca a la Tierra. La inclusión de estos cuerpos es nueva en la literatura para explicar el reabastecimiento de NEAs en el sistema Solar.

2.1.2. Disco sintético

Para describir estadísticamente la evolución de la población asteroidal, es necesario conocer la distribución de las masas y los elementos orbitales de estos objetos [6]. En este trabajo se propone estudiar el efecto del planeta enano Ceres y cuerpos menores del Cinturón Principal sobre la población asteroidal. Para este propósito se requiere de la construcción de un sistema con partículas prueba que simulan a los asteroides del Cinturón Principal. Las partículas prueba al no tener masa, no intercambiarán energía entre ellas ni con los asteroides grandes permitiendo conocer sólo la dinámica generada por los cuerpos menores y planetas. Las partículas prueba forman un disco con las siguientes características:

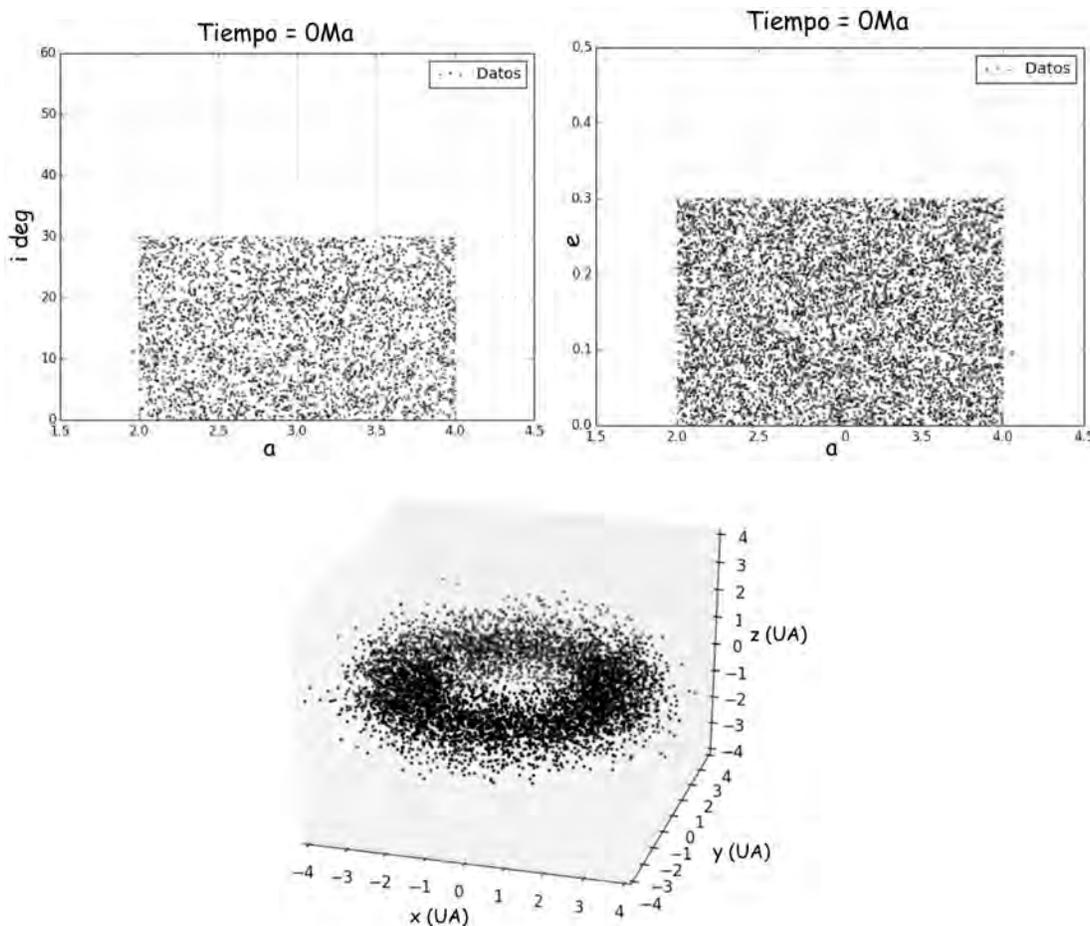


Figura 2.2: Distribución aleatoria de la excentricidad, inclinación (en grados) y semi-eje (en UA) mayor de las partículas prueba. Disco de partículas prueba en el espacio xyz .

- Disco de partículas prueba, generadas aleatoriamente dentro de los límites de los parámetros orbitales reales observados en el Cinturón Principal de Asteroides. Es decir, con semi-eje mayor: $2UA \leq a \leq 4UA$, excentricidades: $0 \leq e \leq 0.3$, valores grandes en inclinación: $0^\circ \leq i \leq 30^\circ$ y los valores Ω, ω y MA distribuidos entre 0° y 360° [23], ver Fig.2.2, imagen xyz de los objetos a tiempo $t_{inicial} = 0$.
- Tierra, Marte, Júpiter y Saturno (planetas principales en términos de su influencia gravitacional en el cinturón de asteroides). Los parámetros orbitales de estos planetas se presentan en una fecha dada que elegimos como 13 de junio de 2017. Época 2457917.5 tomados en coordenadas heliocéntricas. La inclinación de los planetas ha sido cambiada a 0° con propósitos de simplificar el problema pero

sin cambio en los propósitos físicos del problema que estudiamos en este trabajo. La masa de los planetas está referida en Masas Solares (M_{\odot}) y también se ha usado la densidad de cada cuerpo (datos obtenidos de www.jpl.nasa.gov).

- La contribución a la población de NEAs se estudiará entonces en este trabajo a partir de la caída de objetos del disco desde las resonancias probablemente hacia la vecindad de los planetas terrestres. Sus parámetros orbitales están en la fecha dada elegida, pero las inclinaciones de estos cuerpos se han conservado. Los cuerpos menores y planeta enano elegidos para interactuar con las partículas prueba son 12, los mayores conocidos en el Cinturón Principal de Asteroides [15]:
 - Ceres. Planeta enano. Masa: $939.3 \times 10^{18}\text{kg}$.
 - Vesta. Cuerpo menor. Masa: $259.076 \times 10^{18}\text{kg}$.
 - Pallas. Cuerpo menor. Masa: $201 \times 10^{18}\text{kg}$.
 - Hygiea. Cuerpo menor. Masa: $86.7 \times 10^{18}\text{kg}$.
 - Euphrosyne. Cuerpo menor. Masa: $58.1 \times 10^{18}\text{kg}$.
 - Interamnia. Cuerpo menor. Masa: $38.8 \times 10^{18}\text{kg}$.
 - Davida. Cuerpo menor. Masa: $37.7 \times 10^{18}\text{kg}$.
 - Herculina. Cuerpo menor. Masa: $33 \times 10^{18}\text{kg}$.
 - Eunomia. Cuerpo menor. Masa: $31.8 \times 10^{18}\text{kg}$.
 - Juno. Cuerpo menor. Masa: $28.6 \times 10^{18}\text{kg}$.
 - Psyhe. Cuerpo menor. Masa: $22.7 \times 10^{18}\text{kg}$.
 - Europa. Cuerpo menor. Masa: $22.7 \times 10^{18}\text{kg}$.

2.2. El código MERCURY

En el sistema Solar casi toda la masa está concentrada en el Sol, esto permite estudiar la trayectoria de planetas con el problema de dos cuerpos (planeta y Sol) con ecuaciones simples e integrables. Sin embargo, para periodos extendidos de tiempo,

los planetas influyen sobre el movimiento del cuerpo considerado, y por lo tanto, su trayectoria será ligeramente diferente en tamaño y orientación espacial, a medida que transcurre el tiempo. Por otro lado, cuando se consideran configuraciones de más de tres cuerpos, como la del problema que estudiaremos en esta tesis, las ecuaciones diferenciales que se generan no tienen una solución analítica, por lo que se deben usar integradores matemáticos para generar aproximaciones confiables [29].

Entre los integradores de ecuaciones diferenciales, los conocidos como integradores simplécticos tienen dos ventajas clave sobre otros integradores de N-cuerpos: la energía se conserva en periodos largos de tiempo y son sustancialmente más rápidos para problemas en los que la mayoría de la masa está contenida en un solo cuerpo. Esto los hace adecuados para estudiar problemas que involucran sistemas planetarios o satelitales [2]. La alta eficiencia viene del hecho de que la fuerza dominante en cada objeto puede ser incorporada, dejando sólo las perturbaciones más pequeñas para restringir el tamaño del paso de tiempo. El cual debería disminuir durante un encuentro para preservar la precisión de la integración general. Sin embargo, cambiar el tamaño de paso de un integrador simpléctico introduce un error con cada cambio. Una solución a este problema es dividir los términos de perturbación y dar a cada parte un tamaño de paso separado, de tal forma que las perturbaciones más fuertes tengan tamaños de paso más pequeños.

MERCURY es un integrador híbrido que combina el uso de un integrador simpléctico de segundo orden, escrito por J. E. Chambers en 1999, más un integrador numérico tradicional Bulirsh-Stöer, que entra en acción únicamente para resolver los encuentros cercanos entre objetos en la integración, se usa a menudo ya que es robusto para problemas de N-cuerpos. El integrador MERCURY incorpora un componente no simpléctico, lo cual puede mostrarse aplicando una técnica simple de separación de potencial [2], por lo que el error en la energía se comporta como en todo integrador simpléctico, es decir, no crece con el tiempo, sino que se mantiene acotado [24].

El truco de los integradores simplécticos es dividir las ecuaciones de movimiento en el sistema de Hamilton, H , en partes, cada una de las cuales se puede resolver por sí misma, y luego aplicar las soluciones de una en una de éstas, de tal forma que se aproximen

a la solución del problema [2]:

$$H = \sum_{i=1}^N \frac{p_i^2}{2m_i} - G \sum_{i=1}^N m_i \sum_{j=i+1}^N \frac{m_j}{r_{ij}}, \quad (2.6)$$

H es la suma de la energía cinética y potencial de todos los cuerpos, m_i es la masa de cada uno de los cuerpos y r_{ij} es la separación entre los cuerpos i y j . Los integradores simplécticos describen la evolución en el tiempo de un sistema Hamilton asociado H_{integ} el cual es muy cercano a H .

$$H_{integ} = H + \frac{\tau}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial H_B}{\partial x_i} \frac{\partial H_A}{\partial p_i} - \frac{\partial H_B}{\partial p_i} \frac{\partial H_A}{\partial x_i} \right) + O(\tau^2), \quad (2.7)$$

$$O(\tau^2) = e^{\tau B/2} e^{\tau A} e^{\tau B/2} q(t - \tau), \quad (2.8)$$

donde, $q(t - \tau)$ es el valor de q , posición o momento de un cuerpo, en una época anterior y τ es el tamaño del paso de tiempo de la integración. Los operadores $e^{\tau B/2}$, $e^{\tau A}$ y $e^{\tau B/2}$ representan un algoritmo que comienza con la evolución del sistema bajo la influencia de sólo H_B por medio paso de tiempo, luego evolucionando para un paso de tiempo completo bajo la influencia de H_A , y luego evolucionando para otro medio paso de tiempo bajo H_B [20]. Cada paso del integrador consiste en dos subpasos:

- Avanzar en el sistema sujeto a las fuerzas asociadas a H_B para un paso de tiempo, ignorando el efecto de H_A .
- Avanzar el sistema resultante sujeto a las fuerzas asociadas con H_A para un paso de tiempo.

H_A : Cada cuerpo se mueve en una órbita kepleriana, sin sufrir alteración, alrededor del Sol.

H_B : Cada cuerpo permanece fijo y recibe una aceleración debido a las perturbaciones de los otros cuerpos.

Para mantener H_{integ} constante se divide cada uno de los términos de interacción entre H_A y H_B de tal forma que la parte en H_B siempre permanezca pequeña, mientras que la parte en H_A solo se evalúa durante un encuentro cercano [2]

$$H_A = \sum_{i=1}^N \left(\frac{p_i^2}{2m_i} - \frac{Gm_{\odot}m_i}{r_{i\odot}} \right) - G \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \frac{m_i m_j}{r_{ij}} [1 - K(r_{ij})], \quad (2.9)$$

$$H_B = -G \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \frac{m_i m_j}{r_{ij}} K(r_{ij}), \quad (2.10)$$

donde la función K permite cambiar entre el esquema de un integrador simpléctico y el régimen del integrador Bulirsch-Stör. Cuando el valor r_{ij} es grande, K tenderá a 1 y tenderá a 0 cuando r_{ij} sea pequeño.

$$K = \begin{cases} 0, & \text{para } y < 0 \\ y^2 / (2y^2 - 2y + 1) & \text{para } 0 < y < 1, \\ 1 & \text{para } y > 1, \end{cases} \quad (2.11)$$

$$y = \left(\frac{r_{ij} - 0.1r_{crit}}{0.9r_{crit}} \right), \quad (2.12)$$

r_{crit} es un parámetro libre que indica la distancia en radios de Hill ¹, en que el algoritmo numérico comienza a integrar un encuentro cercano [2]. Si r_{crit} es muy pequeño, el encuentro no será calculado correctamente. Si r_{crit} es muy grande, entonces el tiempo

¹El radio Hill limita la esfera de influencia gravitacional de un cuerpo celeste sometido a la gravedad de otro cuerpo de más masa alrededor del cual orbita

de cómputo necesario para seguir el encuentro será más de lo que puede justificarse por la precisión general de la integración. En este trabajo, el tipo de integración cambiará cuando dos cuerpos estén a una distancia mínima de 3 radios de Hill, distancia recomendada para encuentros entre planetas [20]

MERCURY trabaja con varios archivos que guardan la información a usar en las integraciones:

- *big.in*: Información de los cuerpos mayores que perturbarán a las partículas prueba, excepto el Sol. Se usaron los datos de los 4 planetas antes mencionados y de los 12 cuerpos menores localizados en el Cinturón Principal. En este archivo también se indica la máxima distancia, en radios de Hill, entre los cuerpos que constituirán un encuentro. En este trabajo los planetas gigantes, Júpiter y Saturno, tienen como parámetro 1 Radio Hill, debido a su gran influencia sobre el Cinturón Principal de Asteroides. Para Tierra y Marte elegimos 10 radios de Hill, y en los cuerpos menores se limitó a 20 radios de Hill. En ambos casos se consideró su baja masa y distancia al Cinturón Principal.
- *small.in*: Archivo con los datos de las partículas prueba que simularán el Cinturón Principal y se verán perturbadas por los cuerpos descritos en el archivo *big.in*.
- *param.in*: Este documento contiene los parámetros que controlarán la integración como la época y días donde la integración comienza, los días que durará la simulación y el paso de tiempo, en días, que usará el integrador.
- *mercury6.for*: Este es el programa base donde se encuentran las subrutinas para llevar a cabo la integración usando el algoritmo de un integrador simpléctico.
- *element6.for*: Este programa convierte el archivo de salida de *mercury6.for* en un archivo que contiene los elementos keplerianos de cada objeto (*big.in* y *small.in*)

2.3. Las simulaciones numéricas ejecutadas para este trabajo

Las simulaciones se hicieron en la supercomputadora de la UNAM, Miztli (del Náhuatl “felino mayor” o “puma”), la cual tiene 228 teraflops de rendimiento teórico, equivalente a 86 mil 365 computadoras personales de última generación (Dirección de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación, DGTIC) y en la supercomputadora Atocatl (del Náhuatl “pulpo”) del Instituto de Astronomía, UNAM. La primera simulación fue para obtener un disco de partículas prueba con órbitas estables. Estas partículas se obtuvieron poniendo el disco sintético de 14000 partículas prueba (generadas aleatoriamente dentro de los límites de los parámetros orbitales reales observados en el Cinturón Principal de Asteroides con una distribución homogénea), por 10Ma en MERCURY, siendo el archivo *small.in* las partículas prueba y en el archivo *big.in* sólo los 4 planetas antes mencionados por su alta influencia sobre el Cinturón Principal (ver Fig.2.3). Las partículas que al final de la simulación no fueron expulsadas (límite para que una partícula se considere expulsada es $a = 100\text{UA}$) formaron al disco sintético, generando así 6642 partículas con órbitas estables (ver Fig.2.4).

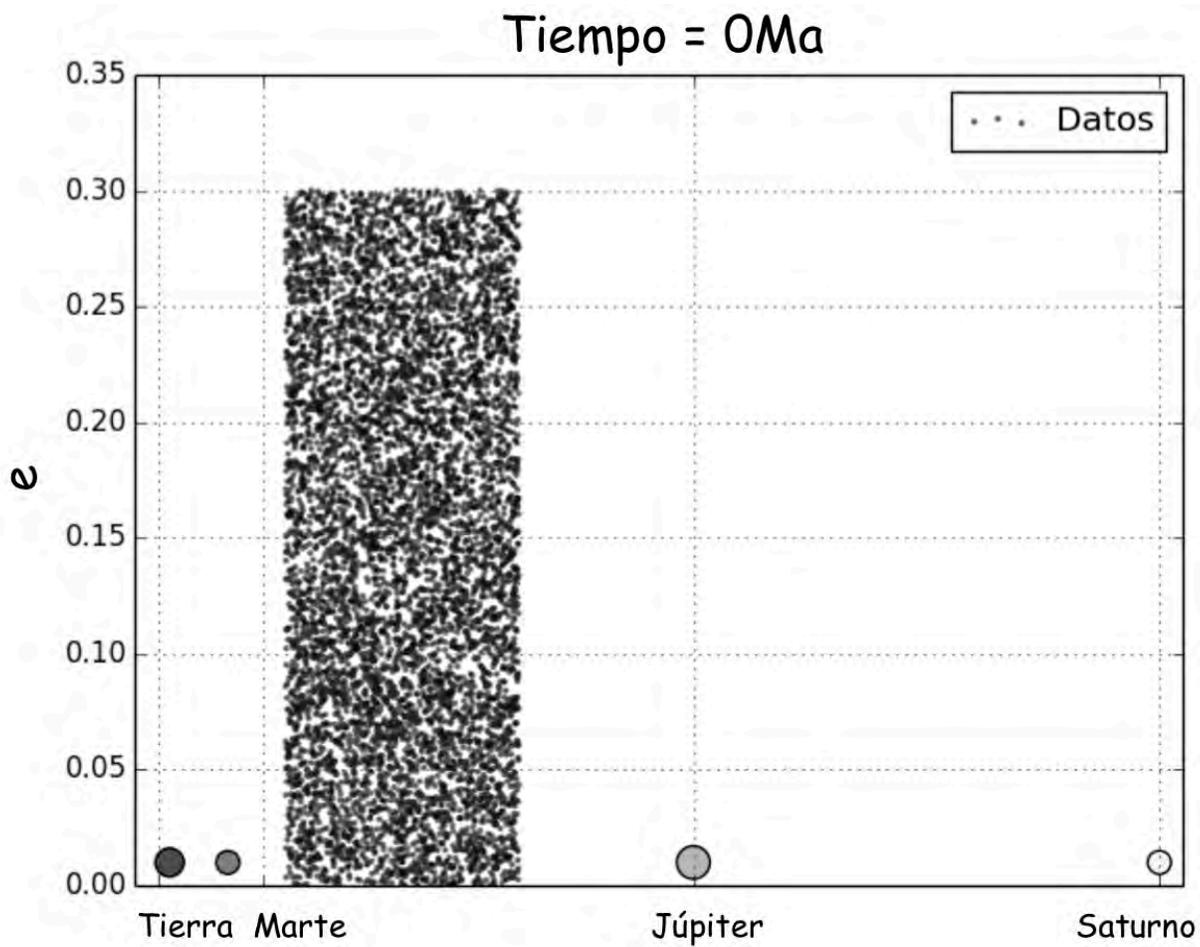


Figura 2.3: Partículas prueba bajo la influencia gravitacional de 4 planetas, Tierra $a = 1\text{UA}$, Marte $a = 1.5\text{UA}$, Júpiter $a = 5.5\text{UA}$ y Saturno $a = 9.5\text{UA}$. Este disco simula al Cinturón Principal de Asteroides en sus parámetros orbitales y en las fuerzas ejercidas sobre éste.

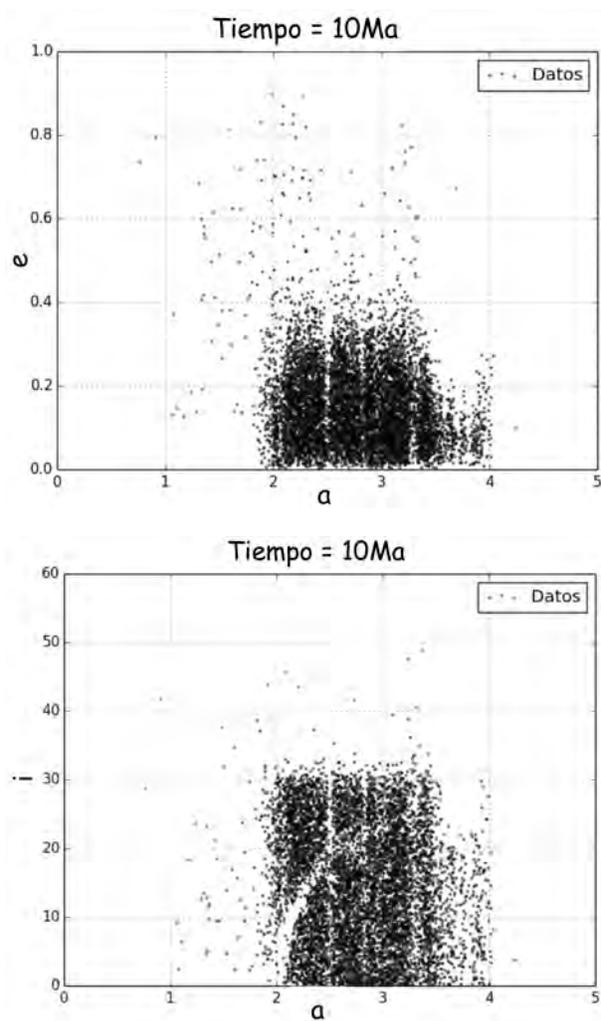


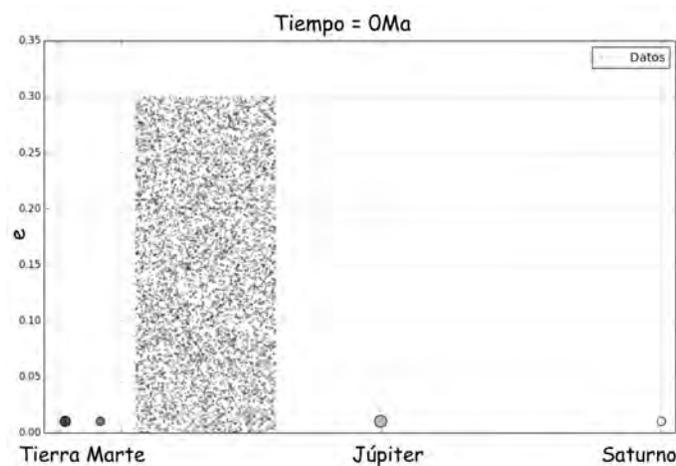
Figura 2.4: La primera simulación nos permitió obtener 6642 partículas prueba con órbitas estables después de $10Ma$. La distribución se presenta con a en UA, i en grados y excentricidad.

Las 6,642 partículas se duplicaron, cambiando sus parámetros orbitales en una porción de 0% a 10% sobre el valor inicial generando así 13,284 partículas prueba, las cuales formaron al disco sintético con las condiciones iniciales para las simulaciones que abordan el problema principal de esta investigación. Para analizar la contribución de Cuerpos Menores al cambio orbital de partículas estables se realizaron dos simulaciones, en la Fig.2.5 se muestra a tiempo inicial ambos experimentos. La distribución de a y e es aleatoria. Las posiciones de los 4 planetas y de los cuerpos menores, corresponden a la época elegida $JD : 2457917.5$ (13 de junio de 2017).

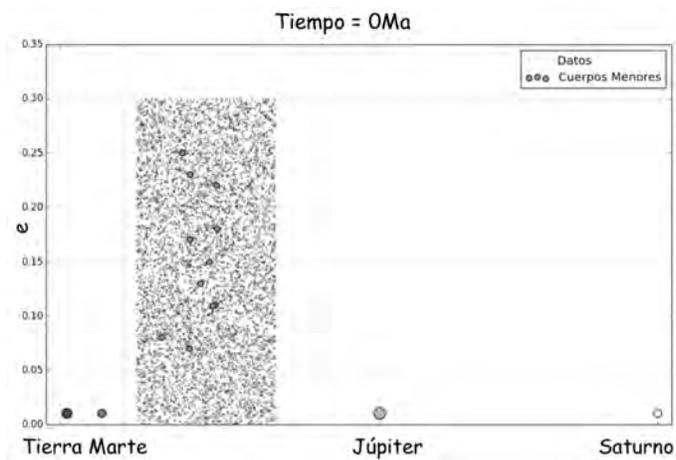
- En este experimento el archivo *big.in* contenía toda la información de estos cua-

tro planetas que perturbarían a las partículas prueba estables. La simulación fue para un tiempo de 100Ma, y fue la base para observar el mecanismo de las resonancias en el Cinturón Principal (nuestro disco sintético).

- Simulación con partículas prueba en el archivo *small.in*, los 4 planetas y los 12 cuerpos menores y planeta enano Ceres en el archivo *big.in*. Al igual que la simulación anterior, el tiempo de evolución de estas partículas fue por 100Ma.



(a) Simulación 1. Partículas prueba bajo las perturbaciones de 4 planetas



(b) Simulación 2. Partículas prueba bajo las perturbaciones de los cuerpos menores (rosa) y los 4 planetas.

Figura 2.5: Comparación de ambos experimentos

Al termino de las simulaciones se realizaron análisis sobre las nuevas posiciones adquiridas por las partículas prueba. En el estudio de un disco frío similar al Cinturón de Asteroides, se deben comparar los valores iniciales y finales de semi-eje mayor, excentricidad e inclinación para observar el calentamiento secular de los Asteroides sobre las partículas prueba.

Capítulo 3

Resultados

3.1. Dinámica del Cinturón Principal

3.1.1. Motivación

Para el 17 de agosto de 2018 se han contabilizado 18,529 Asteroides Cercanos a la Tierra; La Figura 3.6 muestra el aumento en los descubrimientos de estos cuerpos desde el año 2010 hasta el presente. Esto ha llevado a investigar los NEAs como un peligro latente que corre la Tierra, específicamente por supuesto, la vida en la Tierra. Aproximadamente cien toneladas de material meteorítico al año se desplazan hacia la superficie terrestre, la mayoría son partículas de polvo que se desintegran al entrar en nuestra atmósfera, pero en promedio cada varios cientos de miles de años, puede caer en la Tierra un asteroide mayor a 1 km de diámetro, con la capacidad de producir catástrofes globales [3]. Como se ha mencionado en la introducción, existen dos poblaciones de NEAs que cruzan la órbita de la Tierra en dos puntos y de estas poblaciones se desprenden los *Potencialmente Peligrosos*; en la Fig.3.6 vemos que 155 de estos cuerpos superan el diámetro de 1km. Debido a la gran importancia de estos asteroides, observamos un aumento en sus descubrimientos.

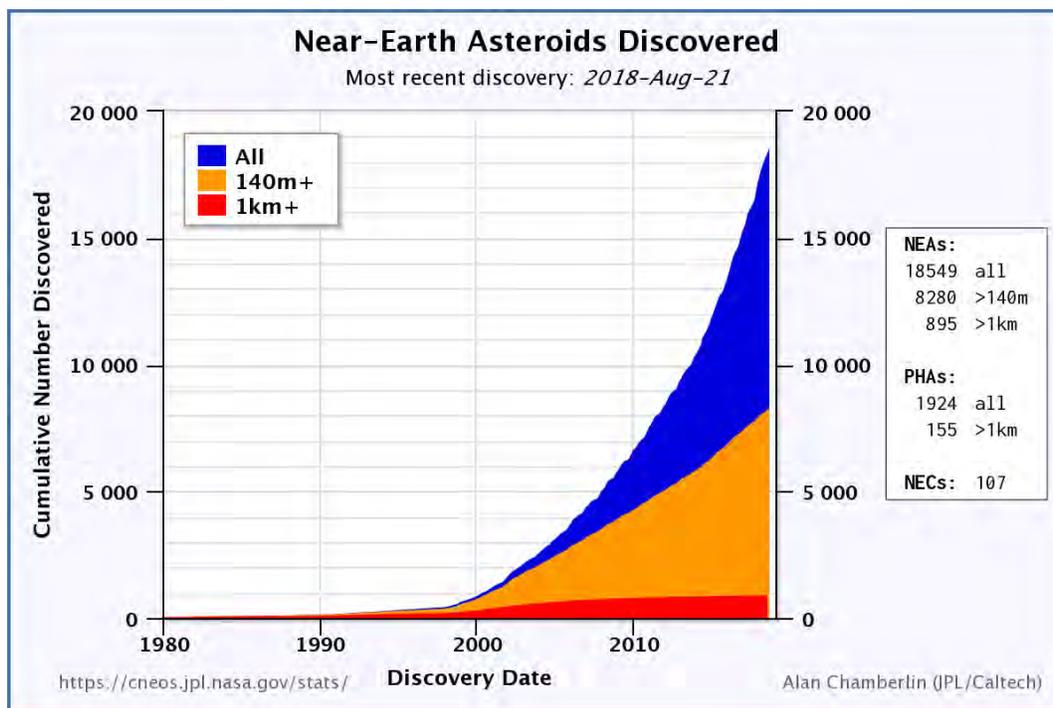


Figura 3.1: Descubrimiento de NEAs. Descubrimiento más reciente 17 de agosto de 2018. En azul están los 18,529 asteroides de los cuales, 8,277, en amarillo, tienen $d > 140\text{m}$ y de éstos sólo 155 se consideran PHAs (Alan Chamberlin, JPL/Caltech).

Los PHAs son por un lado los más peligrosos por acercarse a la Tierra, sin embargo, son también los objetos que podrían explotarse en términos de sus minerales más fácilmente. Así, los intereses no han quedado sólo en los posibles impactos que sufriría la Tierra, ahora el objetivo también es monetario, pues se conoce que al menos 9 compañías privadas están estudiando las propiedades de los NEAs para invertir en una misión que obtenga todas las materias primas localizadas en estas rocas y traerlas a la Tierra. Como se puede ver en la Tabla 3.1 ya se tienen los candidatos próximos a ser la fuente de materia prima.

Cuadro 3.1: Asteroides considerados los mejores candidatos para la minería. Datos obtenidos de www.asterank.com.

Nombre	a UA	Ganancia (Mil millones USD)	Composición
Ryugu	1.190	30.07	Niquel, Hierro, Cobalto, Agua
1989 ML	1.272	4.38	Niquel, Hierro, Cobalto
Nereus	1.489	1.39	Niquel, Hierro, Cobalto
Didymos	1.645	16.41	Niquel, Hierro, Cobalto
2011 UW ₁₅₈	1.621	1.74	Niquel, Hierro, Cobalto y Platino
Bennu	1.126	0.185	Hierro, Hidrógeno, Amoníaco y Nitrógeno

La importancia social y económica han llevado a generar más interés en la población NEAs, aumentando las investigaciones científicas en estos cuerpos.

Teniendo ahora la hipótesis de la existencia de una “fuente” de NEAs que cada periodo de tiempo abastezca de material a las poblaciones de asteroides. En esta tesis se busca específicamente una explicación para la generación constante de NEAs, es decir, su origen o al menos una contribución al origen dinámico constante de éstos objetos en la vecindad de la Tierra (y en general de todos los planetas internos). Aunque el Cinturón Principal es la fuente obvia de estos cuerpos, se sabe que es altamente estable, no es fácil explicar la caída de estos cuerpos en las cantidades que se pueden observar actualmente; contiene algunas fuentes de inestabilidad como la interacción con los planetas, aunque es muy pequeña dadas las distancias, excepto Júpiter que ya ha limpiado las regiones más inestables, es decir sus resonancias, por lo que Júpiter no es la fuente (al menos no la principal) de la caída continua de estos objetos al sistema Solar interno. Este trabajo propone que una de las fuentes de caída de los asteroides son los Cuerpos Menores que tienen la capacidad de desestabilizar en escalas largas de tiempo a los asteroides en el Cinturón Principal, haciéndolos entrar en las zonas de las

resonancias con Júpiter, de donde el proceso es conocido y rápido para su consecuente caída al sistema planetario interno. La motivación y metodología seguidas para este trabajo se basa en los resultados presentados en el artículo de Muñoz-Gutierrez et al. (2017). En sus simulaciones se describe el comportamiento de un disco frío de partículas prueba, con parámetros orbitales parecidos a los del Cinturón de Kuiper, bajo las perturbaciones gravitacionales de 50 planetas enanos y un planeta gigante, tipo Neptuno, el cual se ubicó en el borde interno del disco. La motivación de este artículo fue proporcionar un mecanismo capaz de contribuir a uno de los misterios actuales de los estudios dinámicos del sistema planetario que es la caída constante de cometas al sistema Solar; al igual que el Cinturón Principal, el Cinturón de Kuiper tiene características orbitales extraordinariamente estables, no hay una explicación integral de qué produce la inestabilidad de estos objetos y la caída subsecuente de los cometas al interior del sistema planetario. La propuesta de dicho trabajo fue que los planetas enanos son capaces de alterar las excentricidades e inclinaciones de los núcleos cometarios y convertirlos en cometas activos. Igualmente se encontró que el planeta gigante presentaba dos mecanismos desconocidos en la literatura: el primero es que puede actuar como un estabilizador del disco (en el régimen donde el planeta gigante es suficientemente grande), el segundo mecanismo es la capacidad de los planetas enanos de ayudar en el aumento secular de la dispersión de partículas, aún con la presencia del gigante, aunque el gigante por supuesto la reduce fuertemente comparado con un disco sin la presencia de un gigante [27]. Al observar la Fig.3.2, donde el disco de partículas prueba tiene inclinaciones máximas de 30° y una masa de $0.01M_\oplus$ notamos cómo la excentricidad e inclinación del disco no aumenta dramáticamente debido a la importante influencia del planeta gigante como estabilizador, la cual está por encima de la perturbación generada por planetas enanos.

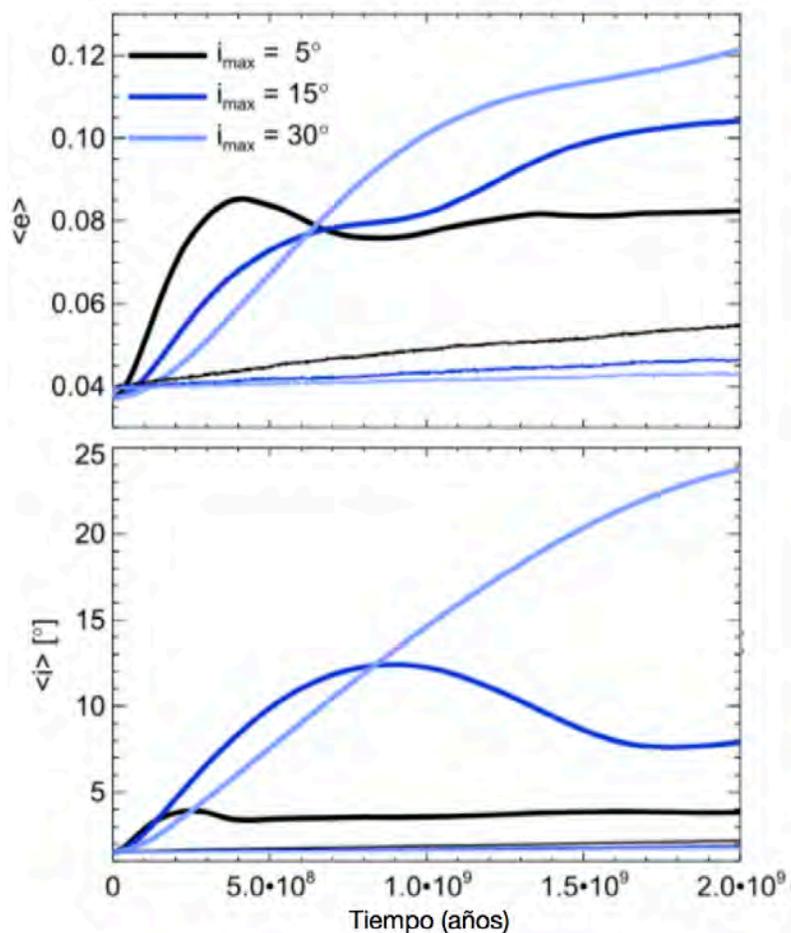


Figura 3.2: Evolución de la excentricidad, e , y de la inclinación, i , de un disco de partículas prueba. Las líneas negras representan un disco frío con $i_{max} = 5^\circ$ y las líneas azules (claro y fuerte) representan un disco con $i_{max} = 15^\circ$ y 30° respectivamente. Las líneas gruesas son simulaciones hechas con los planetas enanos y las líneas delgadas sólo con el planeta gigante [25].

En la Fig.3.3 se observa que la presencia del planeta gigante y los planetas enanos aumentan el número de partículas “cruzadoras”, es decir, partículas que, debido al cambio en sus parámetros orbitales (producidos lenta pero continuamente por los planetas enanos), se acercaron significativamente a las resonancias con el planeta gigante, produciendo su caída al interior del sistema Solar. Este número de partículas, como ilustra la figura, aumenta con la presencia de planetas enanos, ya que el planeta gigante ayuda en este régimen a estabilizar el disco. El análisis de esta figura se basa en una excentricidad límite e_{lim} que representa el borde de las condiciones iniciales a $t_{inicial} = 0$.

El segundo límite de las partículas es la distancia al perihelio q , el cual permite identificar a las partículas que sufrirán un encuentro cercano con el planeta gigante. Los siguientes límites son las resonancias (MMR) con el planeta gigante. Este acomodo en la figura permite observar los caminos posibles de las partículas prueba.

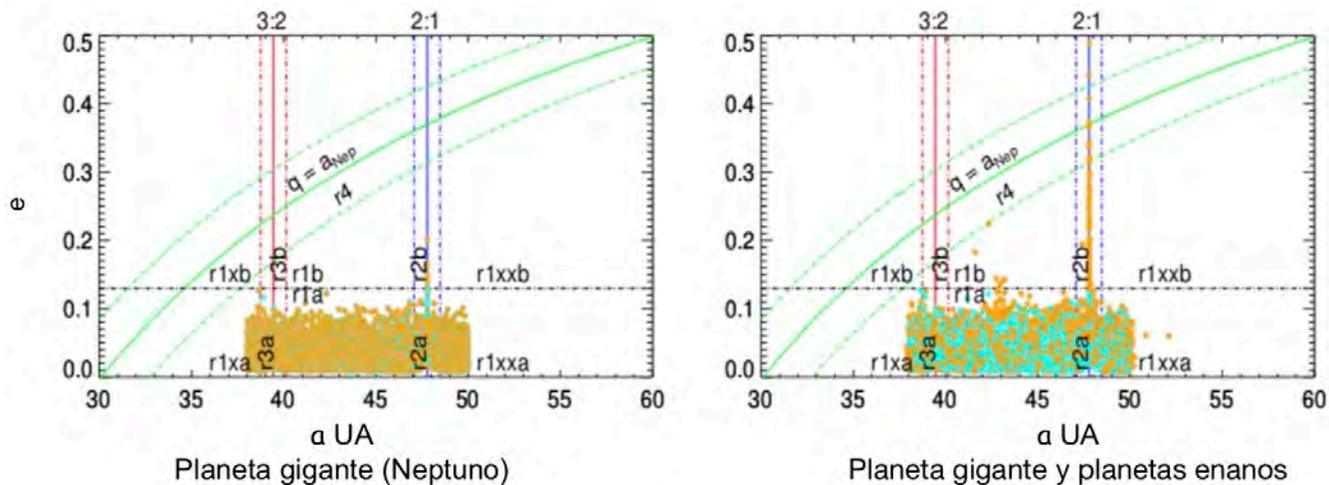


Figura 3.3: Posiciones de las partículas a $t_{inicial} = 0\text{Ma}$ (cyan) y posiciones a $t_{final} = 1\text{Gy}$ (naranja), en el plano a vs. e . Comparación de un disco perturbado por el planeta gigante y los planetas enanos. Las curvas verdes representan las distancias de perihelio q significativas para tener un cruce con el planeta gigante, señalando la región 4 (r_4), en color rojo (r_3b) y azul (r_2b) se muestran las resonancias 3:2 y 2:1. La línea negra punteada señala la e_{lim} , la cual divide las regiones en “b”(partículas con $e > e_{lim}$) y en “a”(partículas con $e < e_{lim}$) [26]

Para esta tesis se aplicaron las bases científicas de los artículos de Muñoz-Gutiérrez al Cinturón Principal de Asteroides, el cual es nuestro objeto de estudio. Una diferencia importante de nuestro caso respecto al de Muñoz-Gutiérrez, es que el planeta gigante se encuentra en el borde exterior del disco de asteroides (a diferencia del caso del Cinturón de Kuiper, donde el gigante es interno al disco). Al igual que en el caso del Cinturón de Kuiper, este trabajo analiza el efecto estabilizador del gigante sobre el Cinturón Principal, en caso de que exista alguno. Asimismo, se estudia la caída de Asteroides con pericentros, $q < 1.3$, y semiejes, $a < 2\text{UA}$, para determinar si los cuerpos menores en el Cinturón Principal incrementan de forma secular la presencia de la población de NEAs.

3.1.2. Validez de las simulaciones

Las condiciones iniciales descritas para el disco sintético de partículas se asemejan a las características del Cinturón Principal de Asteroides. Las similitudes se observaron dentro de los primeros 10 millones de años de la simulación. De la Fig.3.4 hecha por el *Minor Planet Center*, vemos la densidad de asteroides en un intervalo de distancias al Sol de [1 : 6] UA. La mayor población se encuentra ubicada en el Cinturón Principal de Asteroides (de 2 – 4 UA), a 5 UA de distancia se encuentra la familia de Asteroides Troyanos y a 1 UA podemos observar a la población de Asteroides Cercanos a la Tierra. Otro detalle importante de estas observaciones son las posiciones de las resonancias, éstas se encuentran en los espacios de menor densidad de cuerpos, que son los Huecos de Kirkwood.

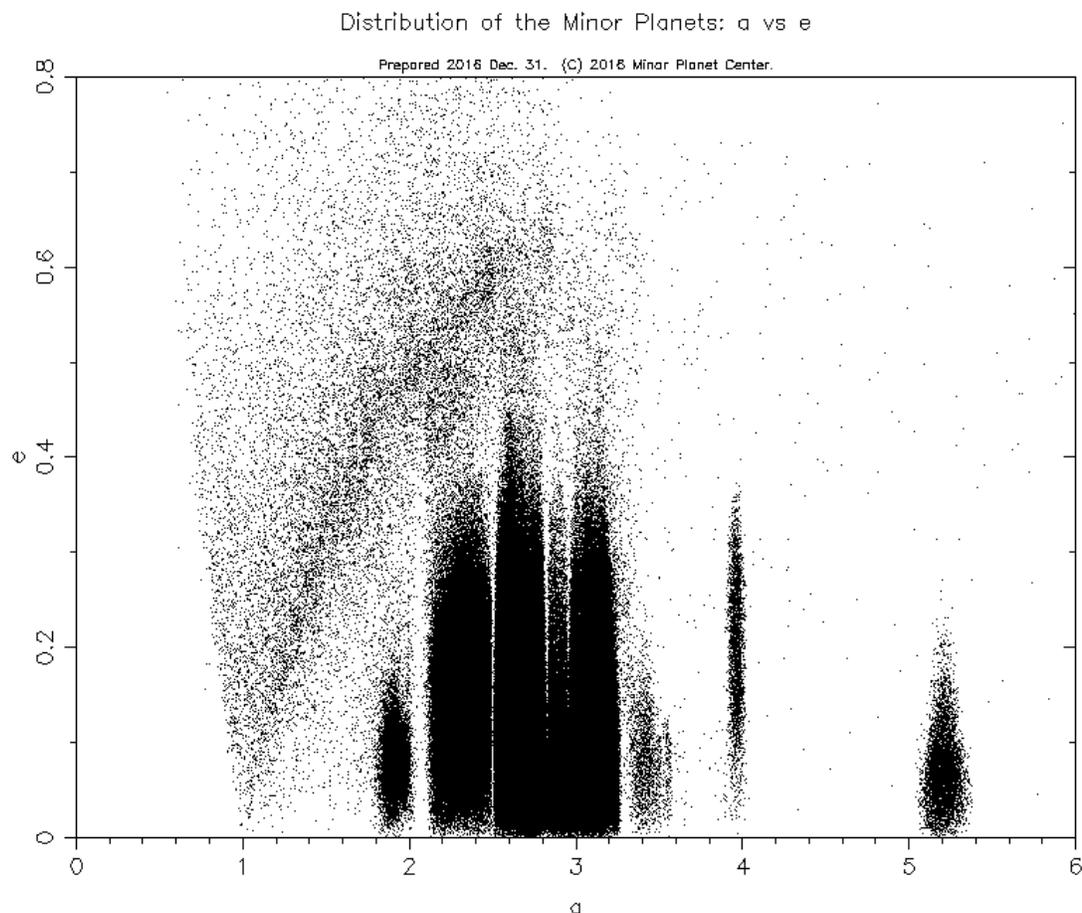
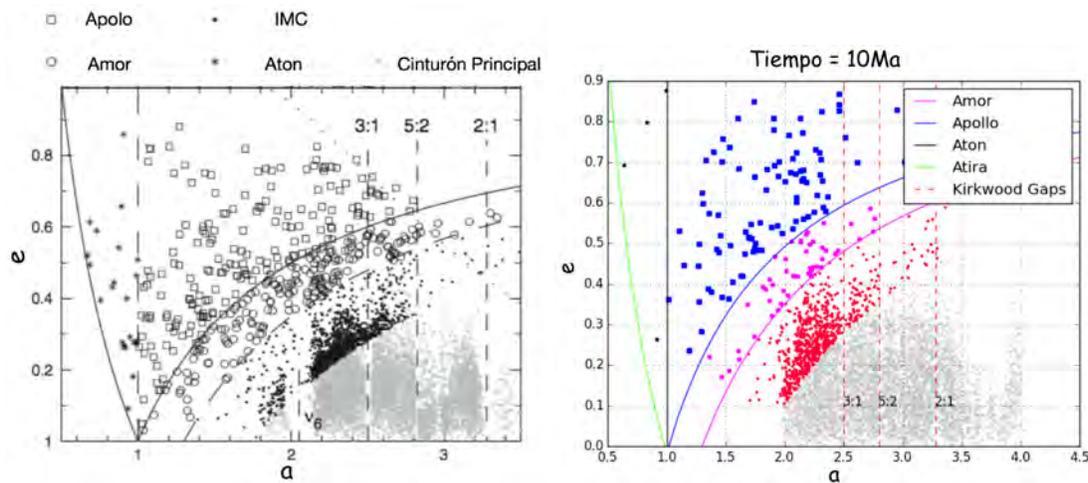


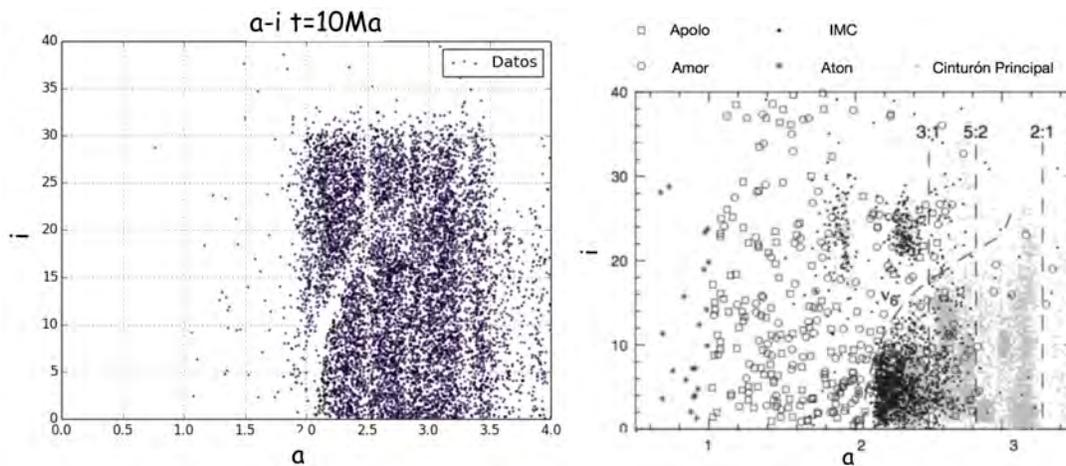
Figura 3.4: Distribución de Asteroides con respecto al semi-eje mayor, a y la excentricidad e . Esta gráfica incluye a todos los cuerpos que han sido observados hasta el presente (tomada de www.minorplanetcenter.net/iau/lists/MPDistribution.html)

Con la referencia del Minor Planet Center y el artículo *Origin and Evolution of Near-Earth Objects* de Morbidelli et al. (2002), las condiciones iniciales que fijamos para estudiar el fenómeno de aumento en la población de NEAs, generan lo ya observado. En la Fig.3.5 comparamos los resultados de nuestra primera simulación por 10Ma con los resultados de [22]. Dentro de las resonancias en el Cinturón Principal, la resonancia secular ν_6 es una de las más fuertes y se puede observar al graficar i vs. a en el borde interno del Cinturón Principal, ver Fig.3.6.



(a) Morbidelli et al. 2002. La simbología mues- (b) Distribución de la Poblaciones de NEAs. En tra las diferentes poblaciones de NEAs, se mues- color rojo es el grupo IMC y en líneas punteadas tran las resonancias del CP y su relación con Kirk- se muestran las resonancias del CP wood

Figura 3.5: Validación de nuestras condiciones iniciales y el uso del código MERCURY



(a) Simulación realizada por 10Ma

(b) Morbidelli et al. 2002

Figura 3.6: Distribución de Asteroides con respecto al semi-eje mayor, a , y la inclinación i . Se observa claramente la resonancia ν_6 ubicada a 2UA en ambas imágenes

Los primeros resultados parten de la simulación de un disco con 13, 284 partículas prueba, con parámetros orbitales similares a los observados en el Cinturón Principal. Este disco es perturbado por los planetas Tierra (1UA), Marte (1.5UA), Júpiter (5.5UA) y Saturno (9.2UA). La Fig.3.7 muestra la evolución de a y e vs. tiempo. El número total

de partículas inicia en 13, 284 y para $t = 100$ Ma sólo quedan 2, 518 partículas debido a que bajo los efectos gravitacionales de los planetas y el Sol aumentan su excentricidad hasta colisionar con el Sol o algún planeta, o bien aumentaron su excentricidad hasta ser expulsadas del sistema Solar. Como se describió en la metodología, para tener una población mayor de partículas, se duplicaron las partículas estables, pero con un cambio del 0 % al 10 % sobre los parámetros orbitales originales.

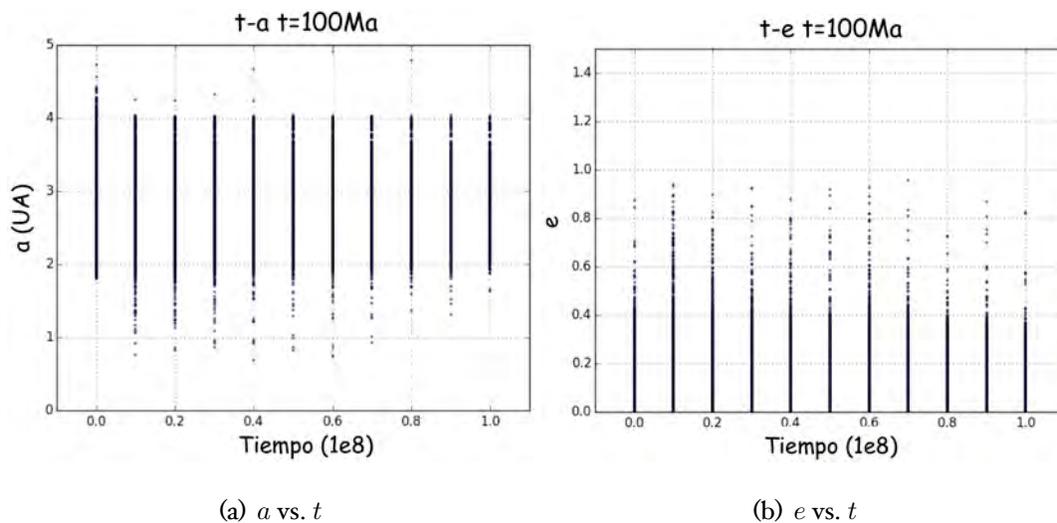


Figura 3.7: Evolución del semi-eje mayor y la excentricidad cuando el disco sintético está perturbado por los 4 planetas.

El tiempo en que un asteroide orbita el Sol depende principalmente de su cercanía a las resonancias. Como describe Gladman et al. (1997), los cuerpos que migren a la región de los planetas terrestres serán empujados a órbitas con inclinaciones elevadas y mediante las resonancias, estos objetos serán eliminados en escalas de tiempo muy corto (≈ 10 Ma). La fuerza dominante sobre las partículas la tiene el Sol para semi-ejes $a < 2.5$ UA. Partículas con $a = 2.5$ UA serán perturbadas hasta elevar su excentricidad y entonces cruzarán la órbita de Júpiter y serán removidas. La resonancia ν_6 es una de las más importantes, ya que aumenta de manera significativa la excentricidad haciendo que los cuerpos crucen la órbita de la Tierra o Venus. La vida media de cuerpos ubicados en esta resonancia es de 2 Ma, después de lo cual, la mayoría termina colisionando con el Sol y el resto en órbitas hiperbólicas [22]. La resonancia MMR 3:1 ubicada en 2.5UA presenta dos regiones: la región central donde la excentricidad de los asteroides

sufre oscilaciones regulares causando que los cuerpos crucen la órbita de Marte, y la segunda región, ubicada en los bordes de la resonancia, ésta es tan caótica que rápidamente lleva a los asteroides a cruzar la órbita de la Tierra y también a orbitar más cerca al Sol. La vida media de los asteroides en estas regiones es de 2 Ma, donde un 70 % colisiona con el Sol y el resto termina en órbitas hiperbólicas [22]. Este proceso produce una migración de objetos a las resonancias 5:2 y 7:3; estas partículas rara vez terminan viviendo decenas de millones de años cerca a una de estas resonancias, terminando dentro de ellas con una vida media de 0.5Ma. En la Fig.3.8 se observa como el número de partículas decrece dependiendo de la resonancia. Por ejemplo, partículas con $a > 2$ UA son rápidamente llevadas a cruzar la órbita de la Tierra, pero una vez dentro de las poblaciones de los Apolo o los Amor su tiempo de residencia es corto, ya que las resonancias los empujarán al Sol. La población actual de NEAs entonces es sesgada hacia los objetos de vida más larga porque tienen más probabilidades de sobrevivir y de ser observados [10].

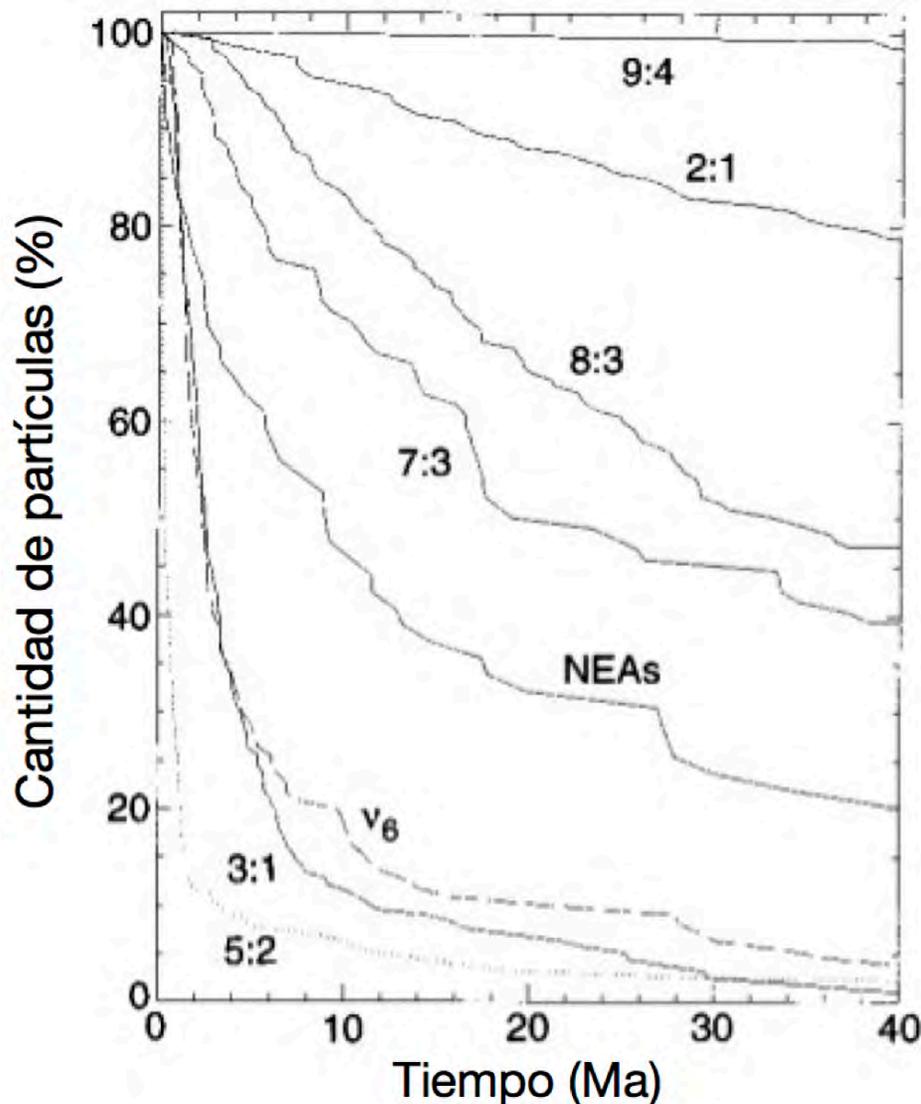


Figura 3.8: Disminución de partículas vs. tiempo. Las resonancias ν_6 , 3:1 y 5:2 muestran tiempos de vida muy cortos para las partículas. Las resonancias al exterior (7:3, 9:4 y 2:1) también generan periodos cortos de vida para las partículas, una vez que estas se encuentren en la región más fuerte de la resonancia. Pero encontrar esta ubicación requiere decenas de millones de años. También se muestra la curva de disminución de partículas de la población de NEAs [10].

La Fig.3.9 se muestra un análisis similar al hecho por [26] donde las líneas rojas punteadas se muestran las resonancias más fuertes que sufren los asteroides con Júpiter. También se graficaron las poblaciones de NEAs restringidas por su perihelio, q , y afelio, Q . *Amor*, $1.017\text{UA} < q < 1.3\text{UA}$. *Apollos*, $a > 1.0\text{UA}$ y $q < 1.017\text{UA}$. *Aton*, $a < 1.0\text{UA}$ y $Q > 0.983\text{UA}$. *Atiras*, $0.718\text{UA} < Q < 0.983\text{UA}$, definiendo así a las

partículas que cruzarán las órbitas de la Tierra y Marte.

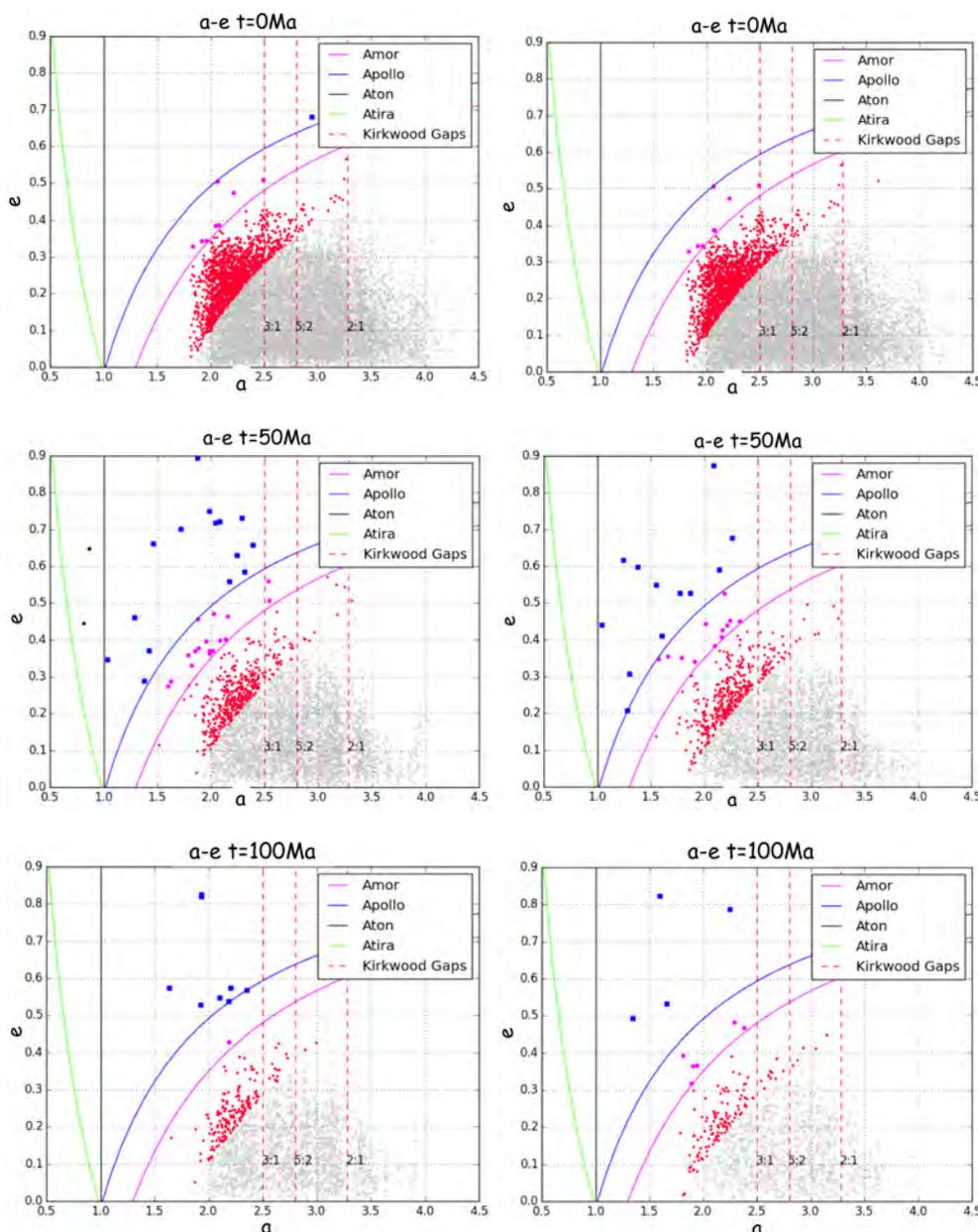


Figura 3.9: Evolución de e vs. a cuando el disco sintético está perturbado por los 4 planetas (izquierda) y perturbado por los 4 planetas y los cuerpos menores elegidos (derecha). Se muestran poblaciones de NEAs, resonancias con Júpiter (huecos de Kirkwood). Los puntos rojos señalan las partículas cruzadoras de la órbita de Marte (IMC), con $1.3\text{UA} < q < 1.8 \text{UA}$ y en gris están las partículas ubicadas en el Cinturón Principal

Con estos resultados, las simulaciones hechas por 100Ma nos muestran que el tiempo de vida de estos objetos en las resonancias es muy corto de tal forma que, para lograr observar la influencia de los cuerpos menores del Cinturón Principal sobre las partícu-

las es necesario un análisis más fino (i.e. de mayor resolución temporal) y detallado de la evolución del disco. Con este propósito en mente, se volvieron a realizar las simulaciones, esta vez con un tiempo de evolución de sólo 20 Ma.

3.1.3. Resultados de las simulaciones con tiempo de evolución de 20 Millones de años

Para estas simulaciones se usó un tiempo total de evolución del disco de 20 Ma, guardando la información de los parámetros orbitales de los cuerpos cada 1,000 años. La simulación de N-cuerpos nos permite conocer las colisiones que sufren los cuerpos mayores (los planetas) con las partículas prueba (asteroides). Las perturbaciones de los planetas y cuerpos menores generan cambios en los parámetros orbitales de las partículas prueba permitiendo encuentros cercanos que lleven a los cuerpos a colisionar o producen que las partículas sean expulsadas del sistema Solar cuando alcanzan semi-ejes mayores de $a > 100$ UA. Para comparar las colisiones se usó una gráfica de barras. En color azul se muestra la cantidad de colisiones que sufrieron los cuerpos mayores durante los primeros 10 Ma y en color rojo las colisiones después de los 10 Ma. Se hizo una división después de 10Ma, debido a que un disco de escombros (libre de gas) donde ya se formaron protoplanetas, tiene una evolución de ≈ 10 Ma [5]; entonces en nuestra simulación para el primer intervalo de tiempo, las partículas prueba buscan tener órbitas estables, las resonancias empiezan a generar los huecos de Kirkwood en el disco sintético, muchas de estas partículas son expulsadas del sistema Solar y otras colisionan con los planetas. En el segundo intervalo, las partículas ya estables empiezan a sufrir un cambio secular en sus parámetros orbitales por su interacción con las resonancias. En la Fig.3.10 se muestra el análisis del experimento 1, donde sólo los 4 planetas y el Sol perturbaron al disco. Se puede ver una mayor cantidad de colisiones con el Sol y después con Júpiter, por lo ya mencionado por [10] y [22]. Durante los primeros 10Ma los asteroides mantienen órbitas estables. Las perturbaciones provocadas por el Sol permiten que el cambio en la excentricidad de las órbitas acerque a las partículas prueba a los 4 planetas, seguido por un encuentro cercano donde dominará

la atracción gravitacional del planeta sobre la partícula, sufriendo así una colisión. El caso más general es sobre Júpiter ya que es el planeta con mayor masa y más próximo al Cinturón de Asteroides simulado. Es un caso particular que en este experimento Saturno no haya sufrido ninguna colisión, se esperaría que, por su masa y cercanía a Júpiter, fuera el segundo planeta más golpeado por las partículas prueba.

El segundo planeta en recibir más colisiones fue la Tierra, esto se debe a que hubo un aumento en la población de NEAs, generado por las perturbaciones producidas por el Sol, las resonancias con Júpiter sobre el Cinturón Principal de Asteroides (resonancias que limpian constantemente los huecos de Kirkwood) y los encuentros cercanos con Marte y Tierra. Dentro del aumento de la población de NEAs, 14 partículas colisionaron con la Tierra; 6 asteroides, dentro de los primeros 10Ma impactaron al planeta. Después de este tiempo se asume que el disco ya tiene órbitas aproximadamente estables, entonces los 8 asteroides que golpearon a la Tierra, en el intervalo de tiempo [10Ma-20Ma] son los casos generales que explican Gladman et al. (1997), donde son las resonancias con Júpiter y Saturno las que empujan a los asteroides a órbitas cercanas a la Tierra. En el caso de este aumento de NEAs de la época presente elegida (13 de junio de 2017) a los 20Ma, tiempo final de la simulación, 8 cuerpos pueden interactuar con la Tierra y pertenecer de manera constante a la población de NEAs observada y contabilizada por la NASA (ver Fig.3.6). Marte por su baja masa no atrajo partículas, solo una después de los 10Ma colisionó con el planeta. Esta partícula prueba, probablemente fue parte de la población de IMC o de Amor, dichas poblaciones son cruzadoras de la órbita de Marte, por lo que el asteroide prueba colisionó con Marte por las características de su población.

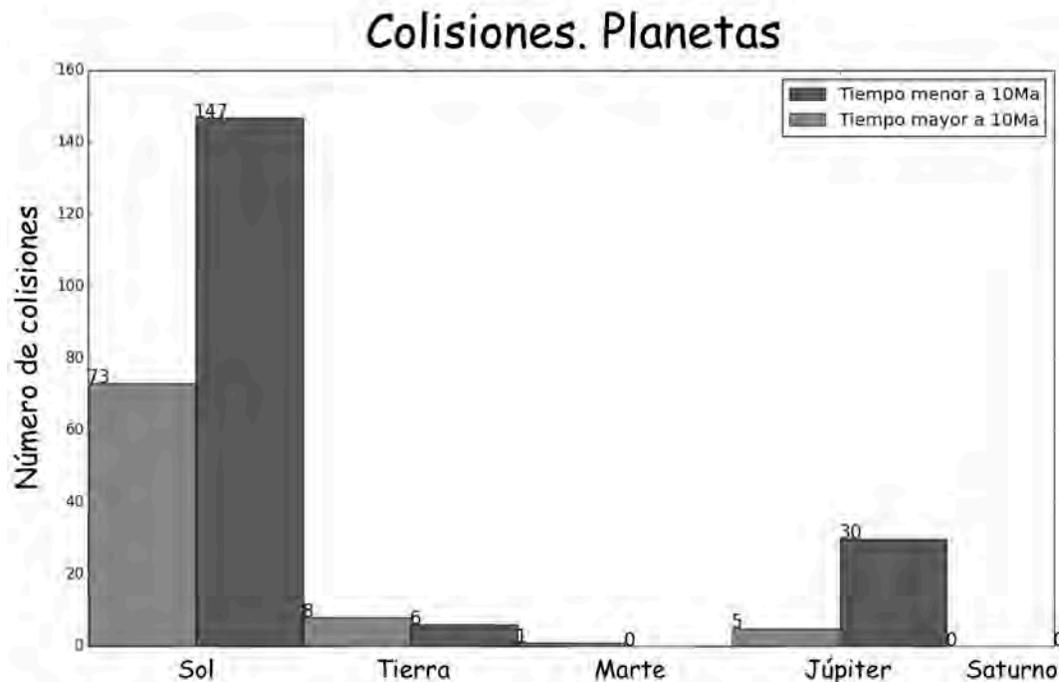


Figura 3.10: Comparación de las colisiones generadas entre 0Ma-10Ma (azul) y 10Ma-20Ma (rojo). El disco fue perturbado sólo por los 4 planetas mencionados.

La Fig.3.11 se muestra la simulación 2. El disco que fue perturbado por 12 cuerpos menores más 4 planetas. De este experimento, no hubo colisiones contra los 12 cuerpos menores durante los 20 millones años de la simulación, sólo los 4 planetas sufrieron golpes. A diferencia del experimento 1, en este análisis Saturno y Marte sí fueron impactados por algunos cuerpos. Se observa que el Sol durante los primeros 10Ma tuvo más colisiones en comparación con el experimento 1, lo mismo sucedió con Júpiter. Saturno sufrió 3 golpes y Marte 2. En esta simulación la Tierra ha conservado la misma cantidad de colisiones que en la simulación 1. En los primeros 10Ma 6 partículas colisionaron la Tierra y 8 durante los siguientes 10Ma.

Después de los primeros 10 Ma, para Saturno, Júpiter y el Sol aumentó el número de colisiones. Marte, al igual que en el experimento 1, sólo un asteroide colisionó con éste. De estos experimentos vemos que, efectivamente, las perturbaciones generadas por

los planetas enanos y cuerpos menores al Cinturón de Asteroides, ayudaron a dispersar partículas sobre los cuerpos mayores. Del tiempo 10Ma a 20Ma, en comparación con la simulación 1, el Sol presentó 2 colisiones, Júpiter 1 y Saturno 3. Estos asteroides llegaron a formar parte de la población de NEAs por uno o dos millones de años [10], pero la excentricidad de sus órbitas los llevó a colisionar con los cuerpos mayores.

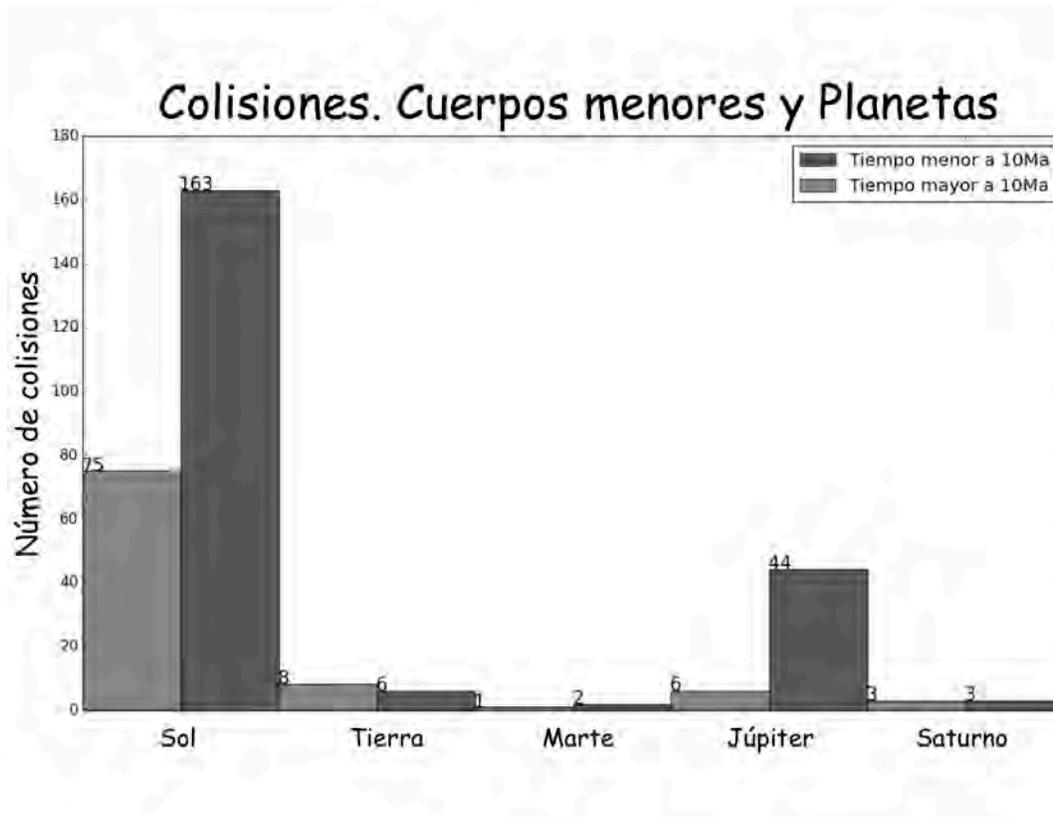


Figura 3.11: Colisiones de partículas prueba sobre los 4 planetas y el Sol, bajo la perturbación de los 4 planetas y los 12 cuerpos menores. Los golpes se generaron en un intervalo de 0Ma-10Ma (azul) y 10Ma-20Ma (rojo).

Evolución de NEAs

Otro efecto interesante que se notó en las simulaciones cortas fue la migración de las partículas prueba del Cinturón de Asteroides simulado hacia las regiones de las diferentes poblaciones de NEAs. En la Fig.3.12 se muestra al disco perturbado por 4 planetas. Durante los primeros 10Ma hay un aumento de NEAs debido a la fuerza

del Sol y de Júpiter solamente; como veremos en la siguiente sección el Sol tira de las partículas prueba hacia éste, aumentando así la población de NEAs.

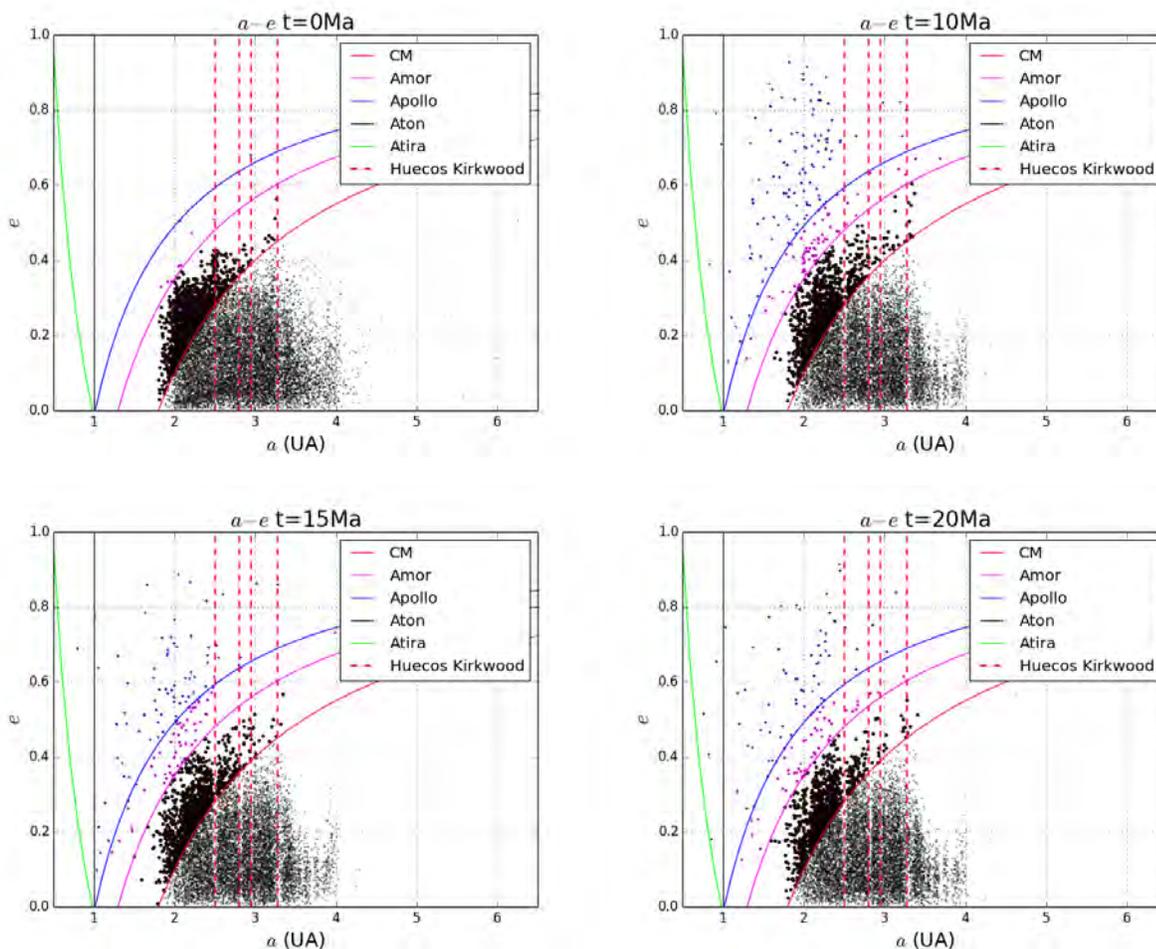


Figura 3.12: Evolución de las diferentes poblaciones de NEAs de 0 Ma a 20 Ma. Esta es la simulación realizada sólo con 4 planetas. Las líneas punteadas son las resonancias con Júpiter. Los puntos negros grandes señalan las partículas cruzadoras de la órbita de Marte (IMC) y en gris las partículas prueba.

La Fig.3.13 se muestra la simulación 2, donde las partículas prueba también sufren la fuerza gravitacional de los 12 Cuerpos Menores. Observamos que los Cuerpos Menores permiten la entrada de partículas prueba a las resonancias con Júpiter (líneas punteadas).

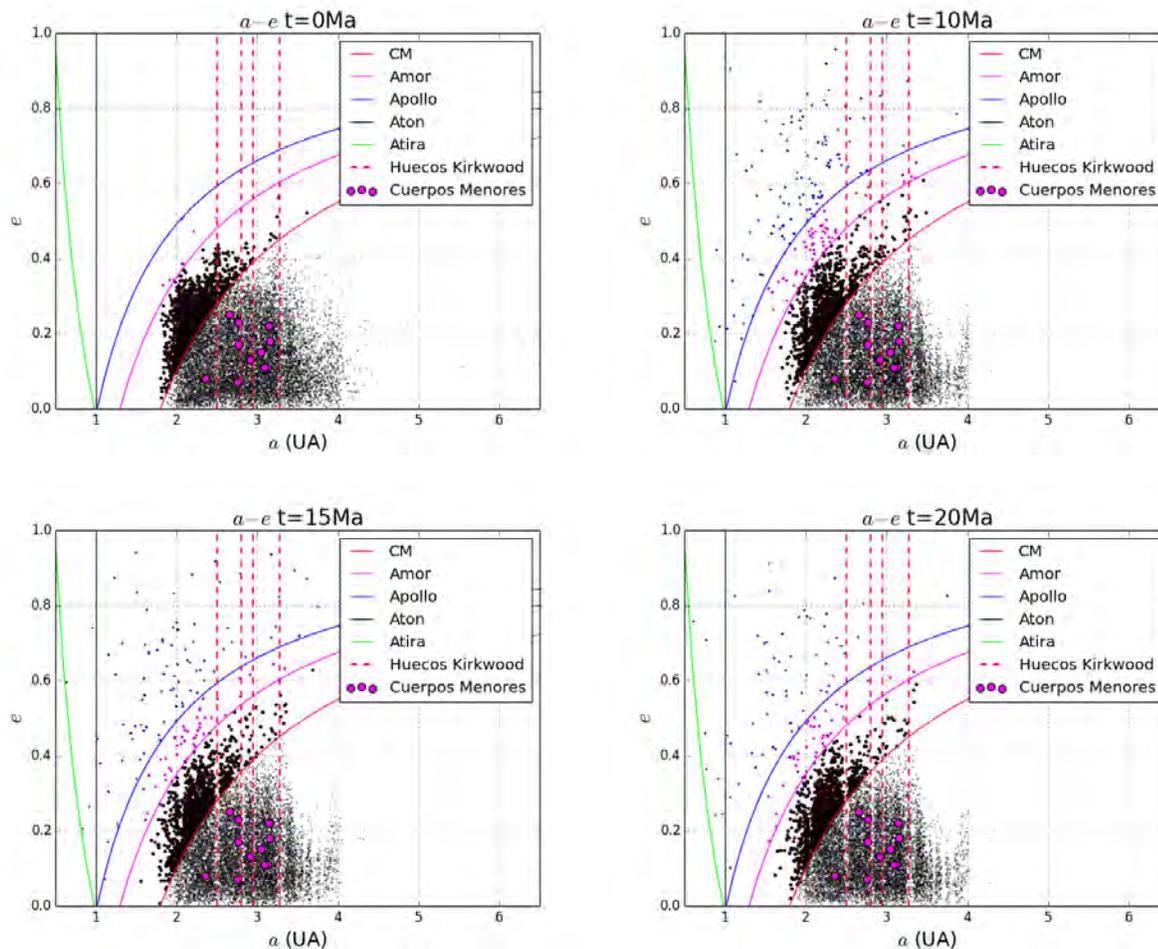


Figura 3.13: Evolución de las diferentes poblaciones de NEAs de 0Ma a 20Ma. Esta es la simulación realizada con 4 planetas y los 12 Cuerpos Menores. Las líneas punteadas son las resonancias con Júpiter. Los puntos negros grandes señalan las partículas cruzadoras de la órbita de Marte (IMC) y en gris las partículas prueba.

3.1.4. Influencia de Júpiter en la estabilidad del disco de asteroides

A los planetas gigantes se les ha adjudicado la propiedad de desestabilizar las partículas de los discos de escombros, particularmente a través de las resonancias, sin embargo, se sabe ahora que, bajo cierto régimen que tiene que ver con la razón de masa entre el planeta gigante y el disco de escombros, un planeta gigante puede actuar conteniendo y estabilizando un disco; éste es el caso del Cinturón de Kuiper por ejemplo [27]. El efecto de contención puede verse cualitativamente en un diagrama de semi-eje

mayor contra la altura (Z) de las partículas en el plano vertical. En ese diagrama puede notarse cómo la influencia del planeta gigante produce una forma característica de trapecio donde la parte angosta tiene que ver con el efecto de contención del gigante sobre el disco de partículas que afecta más la región cercana a éste (ver Figura 3.14).

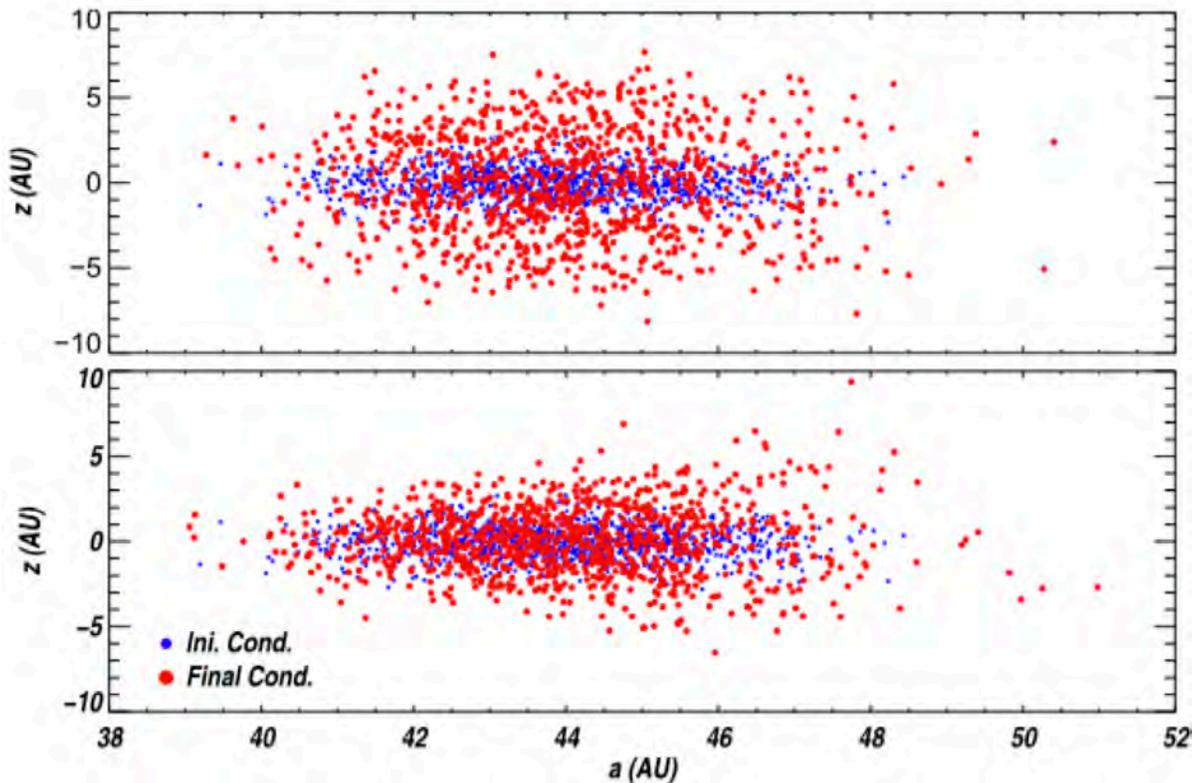


Figura 3.14: Altura del plano (z) vs. semieje mayor (a). El panel superior muestra las condiciones iniciales (azul) y finales (rojo) de los núcleos cometarios para la simulación con 50 planetas enanos y ningún planeta gigante. El panel inferior muestra lo mismo, pero con los 50 planetas enanos más el planeta gigante [27].

Muñoz-Gutierrez et al. (2015) realizaron dos simulaciones en donde las partículas prueba eran núcleos cometarios. Estos núcleos, usando el código MERCURY, fueron perturbados por 50 planetas enanos y un planeta gigante (tipo Neptuno). La Fig.3.14 muestra los resultados de los experimentos realizados por [27] donde se ve que el planeta gigante tiene la fuerza para disminuir verticalmente las posiciones de los núcleos cometarios (efecto de contención vertical), generando en el disco una forma de triángulo (o “trapecio afilado”) que apunta hacia el planeta gigante. El planeta gigante de

esta simulación está ubicado a 30UA y el disco de partículas prueba se distribuye entre $42.5 < a < 44.5$. El planeta gigante tiene de esta forma una relación directa con las colisiones entre los núcleos cometarios, esto es, debido al efecto de contención vertical, mantiene a los núcleos en un ambiente de mayor densidad que puede producir colisiones entre ellos. Este mismo efecto se esperaría en el Cinturón de Asteroides.

Para este trabajo pretendíamos buscar el mismo efecto de contención producido por el planeta gigante (Júpiter en ese caso) sobre el Cinturón de Asteroides. Dos diferencias principales respecto al sistema Cinturón Kuiper-Neptuno fueron, primero que Júpiter es ahora un planeta externo al Cinturón y segundo que el Sol es también una fuerza dominante, muy por encima del gigante por la cercanía. La Fig.3.15 muestra el plano $a-Z$ (altura) en UA. Por la cercanía y enorme masa, el Sol, domina en el efecto de contención vertical del disco, como puede verse del trapecio que es angosto en la dirección del Sol. Aunque el Sol domina evidentemente, la gran masa de Júpiter, produce el mismo efecto hacia la derecha del diagrama (es decir, cerca de Júpiter) aunque no de forma tan clara como lo hace el Sol, que por supuesto, es muy dominante a esa distancia.

Para comparar estadísticamente el aumento o disminución de las poblaciones de NEAs, se necesita tener más simulaciones con poblaciones diferentes de partículas prueba, pero en intervalos de tiempo mayores, para observar el cambio secular de estos grupos de Asteroides Cercanos a la Tierra.

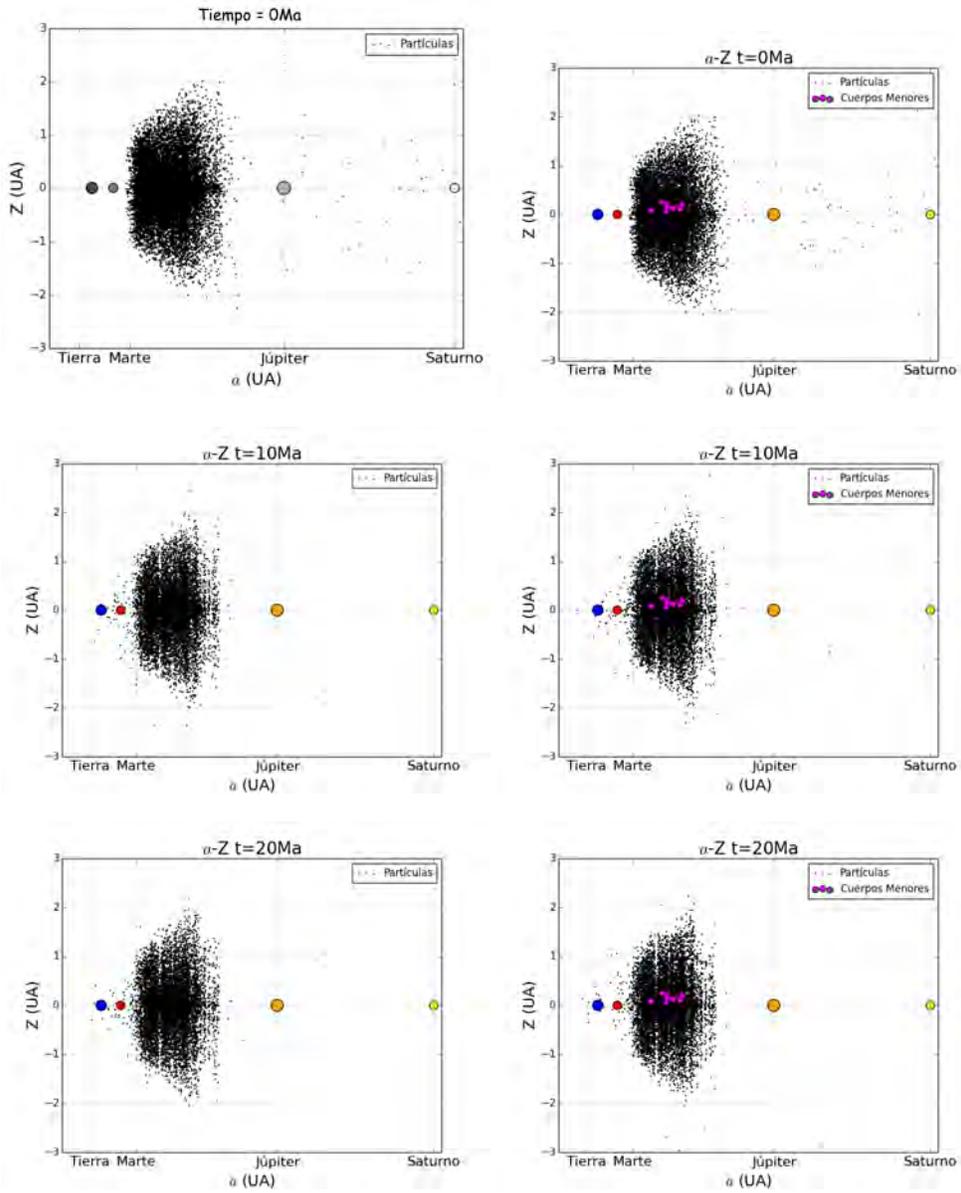


Figura 3.15: Evolución del disco sintético de 0 Ma a 20 Ma. En las figuras de la izquierda se muestra la simulación 1. La simulación 2 se observa en las figuras de la derecha, los círculos rosas son los cuerpos menores. En ambas simulaciones el Sol, a 0 UA, domina sobre la contención vertical del disco.

Capítulo 4

Conclusiones

Los experimentos realizados por Muñoz-Gutierrez et al. (2018) se basan en las masas de los planetas enanos, cuya masa total de los 50 planetas enanos va en sus experimentos de $0.01M_{\oplus}$, que es la masa actual del Cinturón de Kuiper, hasta $0.25M_{\oplus}$. Ellos demuestran que los planetas enanos perturban al Cinturón de Kuiper originando el incremento secular de cometas con inclinaciones bajas al interior del sistema Solar. En esta tesis la masa total distribuida en los 12 Cuerpos Menores elegidos es de $2.95 \times 10^{-4}M_{\oplus}$, si comparamos la simulación con la realizada en [26], la masa de los Cuerpos Menores es muy pequeña, sin embargo los 12 cuerpos usados en las simulaciones bastaron para dispersar las partículas prueba hasta generar colisiones con los 4 planetas. La Fig.4.1 muestra un histograma de las colisiones en un intervalo entre 10Ma y 20Ma. Se observa un aumento de 6 impactos sobre los planetas en presencia de los Cuerpos Menores.

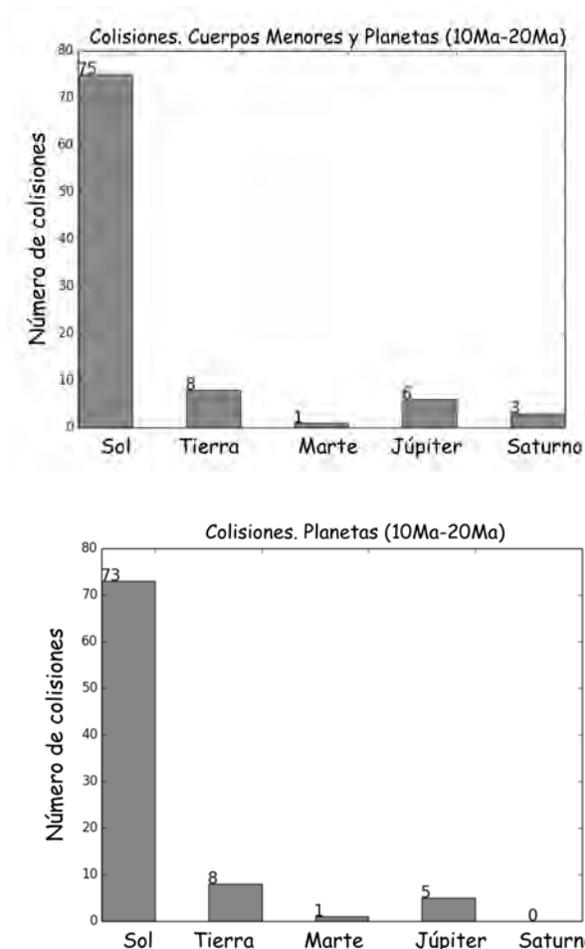


Figura 4.1: Colisiones hacia los planetas y al Sol en un intervalo de tiempo desde 10Ma hasta 20Ma.

Al comparar los promedios de los parámetros orbitales, excentricidad, inclinación y semi-eje mayor para evaluar el calentamiento al disco de partículas prueba por Cuerpos Menores, se observó que en 20Ma, los valores son similares para ambas simulaciones. Este análisis nos muestra la fuerza del Sol y de Júpiter para amortiguar la dispersión de partículas prueba, independientemente de los valores altos en excentricidad e inclinación. Este efecto de contención vertical en ambos extremos del cinturón simulado, retrasa la capacidad de los Cuerpos Menores de aumentar la dispersión de partículas prueba.

En 20 millones de años nuestra simulación creó los patrones esperados de las poblaciones de NEAs. Los asteroides de este grupo durante su afelio recorren el Cinturón

Principal a velocidades más lentas, lo cual les permite mayor tiempo de interacción con los cuerpos del Cinturón Principal. El efecto de calentamiento por Cuerpos Menores se da de manera secular, por lo que una simulación de 1Ga (*Giga-año*= 10^9 años, [25]) permitiría observar mayores interacciones entre el grupo de NEAs y Cinturón Principal permitiendo explicar el aumento de NEAs. El cambio de energía debido al integrador híbrido usado en el código MERCURY después de 20 Ma fue de 1.73×10^{-8} . Debido a la conservación casi total de la energía en esta simulación y a la precisión de MERCURY se pueden realizar simulaciones mayores a 1Ga.

El número total de NEAs por año es fluctuante debido a las interacciones con las resonancias *MMR* [10] y al efecto de contención vertical del Sol y de Júpiter. Con el análisis realizado en esta tesis sobre las colisiones que sufrieron los 4 planetas debido al introducir los Cuerpos Menores, del tiempo presente a 20Ma, se concluye que la población de NEAs incrementa debido a la introducción de éstos cuerpos.

Las simulaciones realizadas en esta tesis, tienen una baja resolución debido a que se tuvo una asignación limitada de tiempo y de memoria en las supercomputadoras. Los resultados permitieron explorar la evolución de los parámetros orbitales y la confirmación de fenómenos observados del Cinturón Principal de Asteroides en nuestro disco de partículas prueba. Para resolver adecuadamente el efecto de perturbación por Cuerpos Menores a las partículas prueba se requieren varias simulaciones de alta resolución que permitan la comparación entre resultados. Estas simulaciones no pueden reproducirse sin grandes cantidades de tiempo de CPU.

En esta tesis, 20Ma de tiempo en las simulaciones nos permitieron entender el fenómeno de las resonancias en el Cinturón Principal de Asteroides, los huecos de Kirkwood, la influencia de Júpiter en la estabilidad del disco y el papel de los Cuerpos Menores en el Cinturón Principal, que pueden secularmente, contribuir a la población de Objetos Cercanos a la Tierra de una forma importante.

Capítulo 5

Trabajo a futuro

Como trabajo a futuro planeamos correr nuevamente todas las simulaciones pero esta vez el tiempo será de 1Ga, pretendemos incluir la influencia gravitacional de los 8 planetas de nuestro sistema Solar, aumentar la cantidad de cuerpos menores que también perturbarían a un Cinturón de Asteroides sintético, es necesario aumentar el numero de cuerpos menores perturbadores del disco sintético ya que los fragmentos de los cuerpos parentales, aunque tienen una masa demasiado pequeña comparada con Ceres, de manera secular y constante perturbarán las partículas prueba; ésto, con el propósito de convertir este trabajo de investigación en uno publicable que incluya no sólo un modelo sencillo del sistema Solar, sino uno más cercano a como lo conocemos. Estas simulaciones se realizarán con el código de N-cuerpos REBOUND, el cual también resuelve el problema con un mapeo simpléctico pero su desarrollo computacional está mucho más optimizado que el utilizado en este trabajo (MERCURY), permitiendo que el tiempo de supercomputo sea prohibitivo (como se convirtió al final de este trabajo).

También de esta investigación ha surgido la posibilidad de estudiar la dinámica de los cometas que tienen órbitas con un semi-eje mayores de decenas de miles de Unidades Astronómicas, dónde posiblemente se encuentra la conocida como nube de Oort, así se clasificarían las características de los límites de nuestro sistema Solar y las perturbaciones que permiten la caída de cometas desde esta frontera al Sol, en la interacción con modelos detallados pero veloces computacionalmente de la Vía Láctea.

Bibliografía

- [1] W. F. Bottke Jr. Understanding the Distribution of Near-Earth Asteroids. *Science*, 2000.
- [2] J. E. Chambers. A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1999.
- [3] Clark R. Chapman y David Morrison. Impacts on the Earth by asteroids and comets: assessing the hazard. *Nature*, 1994.
- [4] Julia María De León Cruz. *Caracterización mineralógica de Asteroides Cercanos a la Tierra*. Tesis Doctoral, Universidad de la Laguna. Instituto de de Astrofísica de Canarias, 2009.
- [5] F. E. DeMeo y B. Carry. Solar System evolution from compositional mapping of the asteroid belt. *Nature*, 2014.
- [6] J.S. Dohnanyi. Collisional Model of Asteroids and Their Debris. *Journal of Geophysical Research*, 1969.
- [7] D. N. C. Lin Richard P. Nelson G. Bryden, Xingming Chen y John C. B. Pappalozou. Tidally induced gap formation in protostellar disks: Gap clearing and supression of protoplanetary growth. *The Astronomical Journal*, 1999.
- [8] Tabaré Gallardo. Atlas of the Mean Motion Resonances in the Solar System. *Icarus*, 2006.
- [9] Tabaré Gallardo. The occurrence of high-order resonances and Kozai mechanism in the scattered disk. *Elsevier*, 2006.

- [10] B. J. Gladman. Dynamical Lifetimes of Objects Injected into Asteroid Belt Resonances. *Science*, 1997.
- [11] R. Gomes, H. F. Levison, K. Tsiganis, y A. Morbidelli. Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. *Nature*, 2005.
- [12] Sarah Greenstreet, Henry Ngo, y Brett Gladman. The orbital distribution of Near-Earth Objects inside Earth's orbit. *Icarus*, 2012.
- [13] Nader Haghighipour. The Formation and Dynamics of Super-Earth Planets. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2013.
- [14] Alan W Harris y Germano D Abramo. The population of near-Earth asteroids. *ICARUS*, 2015.
- [15] James L Hilton. Asteroid Masses and Densities. Asteroids III. *U.S. Naval Observatory*, 2002.
- [16] André Izidoro, Sean N. Raymond, Alessandro Morbidelli, y Othon C. Winter. Terrestrial planet formation constrained by mars and the structure of the asteroid belt. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015.
- [17] André Izidoro, Sean N. Raymond, Arnaud Pierens, Alessandro Morbidelli, Othon C. Winter, y David Nesvorný⁴. The Asteroid Belt As a Relic From a Chaotic Early Solar System. *The Astrophysical Journal*, 2016.
- [18] Martin Jutzi. Modeling of Family-Forming Impacts. A Focus Meeting at the 2018 IAU General Assembly, 2018.
- [19] Hiroshi Kimura, Hajime Okamoto, y Tadashi Mukai. Radiation Pressure and the Poynting–Robertson Effect for Fluffy Dust Particles. *Icarus*, 2002.
- [20] Harold F. Levison Martin J. Duncan y Man Hoi Lee. A Multiple Time Step Symplectic Algorithm for Integrating Close Encounters. *The Astronomical Journal*, 1998.

- [21] Patrick Michel y Alessandro Morbidelli. Population of Impactors and the Impact Cratering Rate in the Inner Solar System. *Impact Cratering: Processes and Products*, 2012.
- [22] A. Morbidelli, W. F. Bottke, Jr., C. Froeschlé, y P. Michel. *Origin and Evolution of Near-Earth Objects*. 2002.
- [23] Alessandro Morbidelli, Kevin J. Walsh, David P. O'Brien, David A. Minton, y William F. Bottke. The Dynamical Evolution of the Asteroid Belt. 2015.
- [24] Marco A. Muñoz-Gutiérrez. *Dinámica Orbital Caótica en el Cinturón de Kuiper*. Tesis Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, 2016.
- [25] M. A. Muñoz-Gutierrez, B. Pichardo, y A Peimbert. Giant Planets Can Act as Stabilizing Agents on Debris Disks. *The Astronomical Journal*, 2017.
- [26] M. A. Muñoz-Gutierrez, B. Pichardo, y A Peimbert. The Contribution of Dwarf Planets to the Origin of Low Inclination Comets by the Replenishment of Mean Motion Resonances. *A publicarse en: The Astronomical Journal*, 2018.
- [27] M. A. Muñoz-Gutierrez, B. Pichardo, M. Reyes-Ruiz, y A Peimbert. Dynamical Heating Induced by Dwarf Planets on Cold Kuiper Belt Like Debris Disks. *The Astrophysical Journal Letters*, 2015.
- [28] Herbert Palme y Jutta Zipfel. *Assessment and Mitigation of Asteroid Impact Hazards*. Springer International Publishing Switzerland, 2017.
- [29] Carmen Peña y Jesús F Palacián. Simulación en tres dimensiones del problema de N cuerpos. Inf. téc., Universidad Pública de Navarra. E-3006 Pamplona. Departamento de Matemática e Informática., 2006.
- [30] Ana Irene Ramírez-Galarza. *Geometría Analítica: una introducción a la geometría*. las prensas de ciencias. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México, 2015.
- [31] Klemenis Tsiganis. How the Solar System didn't form. *Nature*, 2015.

-
- [32] Kevin J. Walsh, Alessandro Morbidelli, Sean N. Raymond, David P. O'Brien, y Avi M. Mandell. A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration. *Nature*, 2012.
- [33] William R. Ward. Protoplanet Migration by Nebula Tides. *Icarus*, 1997.
- [34] Jonathan P. Williams y Lucas A. Cieza. Protoplanetary Disks and Their Evolution. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2011.