

Fuentes Probables de Materia Meteorítica



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

José Luis García Martínez

Instituto de Geología

Universidad Nacional Autónoma de México

Tesis para Obtener el Grado de

Doctor en Ciencias de la Tierra, Opción Física Espacial

Director de tesis: Dr. Fernando Ortega Gutiérrez



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.

A la memoria de mis padres y a la de mi hermana

Agradecimientos

Agradezco al Instituto de Geología por haberme proporcionado el espacio y los recursos a su alcance para desarrollar este proyecto. Igualmente agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACyT, por el apoyo económico proporcionado para desarrollar el referido proyecto. De igual manera agradezco al doctor Fernando Ortega por haber aceptado la dirección del mismo. Agradezco también a los Dres. H. Durand y P. Schaaf por haber formado parte de mi Comité Asesor; también agradezco a las Dras. M. Rosado, G. Cordero y M. Reyes por haber formado parte de mi jurado. Finalmente deseo agradecer al Lunar and Planetary Institute por haber financiado nuestro viaje y estancia en Houston durante la XXXVII Lunar and Planetary Science Conference, y al Johnson Space Center por habernos ofrecido una estancia en sus instalaciones, promovida y dirigida por el Dr. K. Righter, a quien reconocemos sus atenciones antes y durante la referida estancia.

Abstract

Within and in the neighborhood of the Main Asteroid Belt are located the 3:1 mean motion resonance, the ν_6 resonance and the Mars Crossing Region, or MCR, between Mars and the Main Belt, which are considered the main sources of asteroid fragments. The Near Earth Asteroids or NEAs, whose origin is in the last sources, at their time become a secondary source as a consequence of the impacts received from smaller fragments.

For each of the last main sources the asteroids with the highest probability of being the parent bodies of meteorites in the collections have been identified.

In the terrestrial neighborhood, the flux of impactors with diameter > 1 m is given by $n(d > 1\text{m}) = 5.556 \times 10^{-6} \text{km}^{-2} \text{year}^{-1}$. On the other hand, the total area estimated for the NEA population is $8.92 \times 10^8 \text{km}^2$, from where the expected impact rate on the whole population by objects 1 m or larger in diameter would be 4900year^{-1} . The identification of meteoroid streams is interpreted in this work as a consequence of the random impacts received by the NEA population.

As the dimension of most NEAs are less than 1 km, it is expected that most meteoroid streams are associated with

small asteroids. The association of 2004TG10 (390 - 880 m) and 2002XM35 (70 - 160 m) with one meteoroid stream supports this conclusion.

The presence of streamlets within the structure of meteoroid streams is interpreted in this work as evidence of several recent impacts on the same body; perhaps between 3 and 9 per century, the latter in agreement with the minimum and maximum number of streamlets within the observed streams. The most natural explanation to this observation is the reimpacted asteroid has crossed periodically through a densely populated stream of fragments; probably cometary. Consequently, for each impact received, a fragment streamlet is created.

The most probable classification for the subpopulations within type I population is expected to correspond mainly to that of ordinary chondrites, followed by Howardite-Eucrite-Diogenite, Fe-Ni, enstatite and stony-iron meteoroids whose global flux is $\sim 25\%$, being the individual fluxes of the five subpopulations 24.45 %, 0.4 %, 0.085 %, 0.023 % and 0.019 %.

The gross fragmentation pressures of ordinary-chondritic meteoroids allow one to distinguish five structural subpopulations with corresponding petrologic types LL5/LL6, L6, L5, L4 y L3.

Regarding type II meteoroids, probably carbonaceous, they represent $\sim 75\%$ of the meteorite-dropping population. The classification of the structural subpopulations are CX,

CI and CM, where CXs probably are prefragmented CI and CM meteoroids. The expected fluxes of CX, CI and CM meteoroids are 19 %, 28 % and 28 % respectively.

The three subdivisions of type IIIA meteoroids are interpreted in this work as the contribution of the three known orbital populations of comets. The anomalous excess of meteoroid fragments between 10 and 20 m of the type IIIB subpopulation probably evidences the typical dimensions of the structural blocks of the cometary nuclei that originate them.

The net force driving meteoroids and small asteroids into the resonances is the resultant from that of Yarkovsky and the radial-centrifugal force, the latter being an immediate consequence of the solar radiation pressure on the affected bodies. The net force is always proactive, yielding a constant secular increment on the semi-major axes of such bodies.

Resumen

Dentro y en la vecindad del Cinturón de Asteroides se localizan la resonancia 3:1 de movimiento medio con Júpiter, la secular ν_6 así como la región entre Marte y el Cinturón, las cuales se consideran las fuentes principales de fragmentos asteroidales. Los Asteroides Cercanos a la Tierra o NEAs, cuyo origen son las fuentes anteriores, a su vez se convierten en una fuente secundaria como consecuencia de los impactos recibidos por fragmentos más pequeños.

Para cada una de las fuentes principales mencionadas se han identificado los asteroides dentro de ellas con máxima probabilidad de ser progenitores de meteoritos en las colecciones.

En la vecindad de la órbita terrestre el flujo de impactores con diámetro > 1 m está dado por $n(d > 1m) = 5.556 \times 10^{-6} km^{-2} año^{-1}$. Por otro lado, el área total estimada para la población de NEAs es de $8.92 \times 10^8 km^2$, de donde la razón esperada de impactos aleatorios en la población completa por objetos de 1 m o más de diámetro sería de $4900 año^{-1}$. La identificación de corrientes de meteoroides se interpreta en este trabajo como una consecuencia de los impactos aleatorios sobre la población de Asteroides Cercanos a la Tierra.

Puesto que las dimensiones de los Asteroides Cercanos a la Tierra en su mayoría son de menos de un kilómetro,

se espera que la mayoría de las corrientes de meteoroides estén asociadas con asteroides pequeños. La asociación de los asteroides 2004TG10 (390 - 880 m) y 2002XM35 (70 - 160 m) con una corriente de meteoroides avala esta conclusión.

La presencia de subcorrientes dentro de la estructura de corrientes de meteoroides se interpreta en este trabajo como evidencia de varios impactos recientes en el mismo cuerpo, quizá de entre 3 y 9 por siglo, según se deduce del mínimo y máximo número de subcorrientes dentro de las corrientes detectadas. La explicación más natural a esta observación es que el asteroide reiteradamente impactado ha cruzado cíclicamente una corriente espacial de fragmentos densa; probablemente cometaria. Consecuentemente, por cada impacto recibido, una subcorriente de fragmentos ha sido creada.

Se espera que la clasificación más probable de las subpoblaciones de la población tipo I corresponda principalmente a la de las condritas ordinarias, seguida de Howarditas-Eucritas-Diogenitas, de metálicos, de enstatita y mixtos cuyo flujo global es el $\sim 25\%$, siendo los flujos individuales de las cinco categorías 24.45% , 0.4% , 0.085% , 0.023% y 0.019% .

Las presiones de fragmentación súbita de los meteoroides condrítico-ordinarios permiten distinguir cinco subpoblaciones constitutivas cuyas tipos petrológicos probables son LL5/LL6, L6, L5, L4 y L3.

Con respecto a los meteoroides tipo II, probablemente carbonáceos, representan el $\sim 75\%$ de la población precursora de meteoritos. La clasificación de las subpoblaciones constitutivas es CX, CI y CM, donde CX probablemente son CI y CM prefragmentados. Los flujos esperados de los CX, CI y CM son 19% , 28% y 28% respectivamente.

Las tres subdivisiones de los meteoroides tipo IIIA en este trabajo se interpreta como la contribución de las tres poblaciones orbitales de cometas conocidas. El exceso anómalo entre 10 y 20 metros de la población tipo IIIB probablemente evidencia las dimensiones típicas de los bloques estructurales de los núcleos cometarios que les dan origen.

La fuerza neta que impulsa los meteoroides y asteroides pequeños hacia las resonancias es la resultante de la de Yarkovsky y la radial centrífuga, consecuencia inmediata ésta de la presión de la radiación solar sobre los cuerpos afectados. La resultante es siempre proactiva, ocasionando un incremento secular constante de los semiejes mayores de dichos cuerpos.

Publicaciones

Streamlets within meteoroid streams on NEA orbits, Geofísica Internacional Volume 47, 319 - 323 (2008); J. L. García-Martínez and F. Ortega-Gutiérrez

Classification and Proportions of Meteorite-Dropping Meteoroids, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas (en revisión); J. L. García-Martínez and F. Ortega-Gutiérrez

Meteoroid Streams of Asteroidal Origin as Evidence of Recent Impacts on NEAs, Resumen en: Proceedings of the 70th Annual Meteoritical Society Meeting (2007); J. L. García-Martínez and F. Ortega-Gutiérrez

Probable Asteroidal Meteoroid Streams with Associated Substreams, Resumen en: Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference XXXVIII (2007); J. L. García-Martínez and F. Ortega-Gutiérrez

Four NEAs Associated with Meteoroid Streams, Resumen en: Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference XXXVII (2006); J. L. García-Martínez and F. Ortega-Gutiérrez

Glosario

CAIs *Calcium Aluminum Inclusions*; Inclusiones de Calcio-Aluminio

CO Condritas Ordinarias

ECAS *Eight-Color Asteroid Survey*; Muestreo Asterooidal de 8 Colores

Fe-Ni Hierro-Níquel

Ga Gigaaño = 1000 millones de años

HED Howarditas-Eucritas-Diogenitas

IAU *International Astronomical Union*; Unión Astronómica Internacional

IAU_MDC *International Astronomical Union Meteor Data Center*; Centro de Datos Meteorológicos de la Unión Astronómica Internacional

Ma Millones de Años

MC *Mars Crossers*; Asteroides que Cruzan la Órbita de Marte

MG *Main Group*; Grupo Principal

NEAs *Near Earth Asteroids*; Asteroides Cercanos a la Tierra

NEOs *Near Earth Objects*; Objetos Cercanos a la Tierra

PHAs *Potentially Hazardous Asteroids*; Asteroides Altamente Riesgosos

SMASS *Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey*; Observación Espectroscópica Detallada de los Asteroides Pequeños del Cinturón Principal

SNC Shergotitas-Nakhlaitas-Chassignitas

UA Unidad Astronómica = 150 000 000 km

VFR *Vibrational Fracturing Rate*; Tasa de Fracturamiento por Vibración

Índice general

1. Introducción	1
2. Asteroides	6
2.1. Introducción	6
2.2. Tipos Asteroidales	7
2.3. Cinturón Principal de Asteroides	17
2.4. Asteroides Cercanos a la Tierra o NEAs	23
2.5. Asteroides Troyanos	27
2.6. Asteroides Centauros	29
2.7. Asteroides Coorbitantes de la Tierra	29
3. Meteoritos	30
3.1. Introducción	30
3.2. Tipos de Meteoritos	32
3.2.1. Condritas	32
3.2.1.1. Condritas Ordinarias	34
3.2.1.2. Condritas Carbonáceas	35
3.2.1.3. Condritas de Enstatita	37
3.2.1.4. Condritas Rumuruti	38
3.2.1.5. Condrita Tagish-Lake	39
3.2.2. Acondritas	40

3.2.2.1.	Introducción	40
3.2.2.2.	Acapulcoitas-Lodranitas	40
3.2.2.3.	Angritas	40
3.2.2.4.	Aubritas	41
3.2.2.5.	Braquinitas	41
3.2.2.6.	Howarditas - Eucritas - Diogenitas .	41
3.2.2.7.	Ureilitas	42
3.2.2.8.	Winonaitas	43
3.2.2.9.	Meteoritos Lunares	43
3.2.2.10.	Meteoritos Marcianos	43
3.2.3.	Metálicos	44
3.2.4.	Mixtos	47
3.2.4.1.	Introducción	47
3.2.4.2.	Palasitas	47
3.2.4.3.	Mesosideritas	48
4.	Meteoroides: tipos y proporciones	50
4.1.	Introducción	50
4.2.	Poblaciones y Subpoblaciones	51
4.2.1.	Poblaciones Básicas	51
4.2.1.1.	Subpoblaciones Tipo I	54
4.2.1.2.	Preliminares	55
4.2.1.3.	Flujo de COs, HEDs, Fe-Ni y Mixtos	56
4.2.1.4.	Tipos petrológicos de las Subpobla- ciones CO	58
4.2.1.5.	Subpoblaciones Tipo II	63
4.2.1.6.	Flujos de Meteoroides Carbonáceos .	64
4.2.1.7.	Subpoblaciones Tipo III	65

5. Fuentes Probables de Meteoritos	67
5.1. Introducción	67
5.2. Fuentes Asteroidales no Identificadas	70
5.2.1. La resonancia 3:1	70
5.2.2. La resonancia secular ν_6	71
5.2.3. Asteroides que cruzan la órbita de Marte . . .	72
5.2.4. Asteroides que cruzan la órbita terrestre o NEAs	73
5.2.4.1. Tasa Media de Impactos entre la Po-	
blación de NEAs	73
5.2.5. Métodos y criterios	77
5.3. Fuentes Asteroidales Identificadas	79
5.3.1. Introducción	79
5.3.2. Fuentes probables de condritas ordinarias . . .	80
5.3.3. Fuentes probables de condritas carbonáceas .	81
5.3.4. Fuentes probables de condritas de enstatita . .	82
5.3.5. Fuentes probables de acondritas	83
5.3.6. Fuentes probables de meteoritos metálicos . .	83
5.3.7. Fuentes probables de meteoritos mixtos	84
5.4. Fuentes Planetarias	84
5.4.1. Introducción	84
5.4.2. Los planetas terrestres	84
6. Discusión	96
7. Resultados y Conclusiones	102
A. Resonancias	106
A.1. La Resonancia Secular ν_6	106

ÍNDICE GENERAL

A.2. La Resonancia 3:1	108
A.3. La Resonancia 5:2	108
A.4. La Resonancia 2:1	109
A.5. Resonancias Difusoras	110
B. Efecto Yarkovsky	111
B.1. Efecto Yarkovsky Diurno	111
B.2. Efecto Yarkovsky Estacional	112
Referencias	128

Índice de figuras

1.1. Orbitas de meteoritos recuperados	3
2.1. Espectros asteroidales según Tholen	8
2.2. Mathilde es el único asteroide tipo C visitado	10
2.3. Ceres, de casi 1000 km de diámetro, es del tipo G . .	13
2.4. El asteroide Kleopatra es notable por su forma de hueso	14
2.5. Ida, de casi 60 km de longitud, es del tipo S	15
2.6. Vesta, el segundo asteroide más grande, es del tipo V	16
2.7. Cinturón de Asteroides	18
2.8. Resonancias de movimiento medio y los vacíos de Kirkwood	20
2.9. Las agrupaciones asteroidales en la figura son las fa- milias	21
2.10. Tipos asteroidales como función de la distancia al Sol	22
2.11. Orbitas de las tres familias de asteroides cercanos a la Tierra	24
2.12. Distribución de tamaños de los asteroides cercanos a la Tierra	25
2.13. Eros es el más conocido de los asteroides cercanos a la Tierra	26

2.14. Asteroides Troyanos en torno a los puntos triangulares de Lagrange	28
3.1. Meteorito de Hoba es el más grande del mundo . . .	31
3.2. Condrita ordinaria Markovka, clasificada como H4 . .	34
3.3. Condrita ordinaria Ghubara, clasificada como L5 . .	35
3.4. Condrita ordinaria NWA 2622, clasificada como LL4 .	36
3.5. Condrita carbonácea de Allende, clasificada como CV3	37
3.6. Condrita de enstatita Sahara 97079, clasificada como EH3	38
3.7. La condrita Tagish-Lake es análoga a los asteroides más distantes	39
3.8. Acondrita howardita. Es una brecha de Eucrita y Diogenita	42
3.9. Acondrita lunar. Es una brecha de rocas lunares . . .	44
3.10. Acondrita marciana clasificada como shergotita . . .	45
3.11. Fragmento del meteorito metálico Sikhote-Alin	46
3.12. Meteorito mixto del tipo palasita, llamado de Ahumada	48
3.13. Meteorito mixto del tipo mesosiderita	49
4.1. Las tres poblaciones de Meteoroides como función de sus tamaños	52
4.2. Distribución de las presiones de fragmentación de los meteoroides	53
4.3. Distribución del coeficiente de ablación como función de la presión	55
4.4. Frecuencia relativa de las diferentes clases de meteoroides tipo I	59

4.5. Frecuencia de caída de las condritas ordinarias según su resistencia	61
4.6. Frecuencia relativa de las tres clases de meteoroides tipo II	62
4.7. Clasificación de las subpoblaciones de meteoroides tipo I y tipo II	64
4.8. Proporción de meteoroides tipo I, II, IIIA y IIIB según su tamaño	66
5.1. Distribución de semiejes mayores de los Meteoroides Asteroidales	69
5.2. Ubicación de las principales fuentes multiasteroidales	87
5.3. Orbitas de las corrientes de meteoroides S1, S2, S3, S4 y S5	91
5.4. Subcorrientes de meteoroides dentro de la corriente S1	92
5.5. Asteroides 2004TG10 y 2002XM35 asociados con la corriente S3	93
A.1. Resonancias Secular ν_6	107
A.2. Resonancias de Movimiento Medio con Júpiter	109
B.1. Efecto Yarkovsky diurno y estacional	112

Índice de cuadros

2.1. Tipos asteroidales	9
4.1. Características físicas y orbitales de los meteoroides tipo I, II y III	53
4.2. Flujo de meteoritos y de sus meteoroides precursores	58
4.3. Resistencia mecánica y frecuencia de caída de condritas ordinarias	60
5.1. Los 52 asteroides más grandes dentro de la resonancia 3:1	88
5.2. Los 50 asteroides más grandes dentro de la resonancia secular ν_6	89
5.3. Los 50 asteroides más grandes dentro de la población MC	90
5.4. Número de NEAs por intervalo de diámetro y área total	91
5.5. Coordenadas de 5 corrientes de meteoroides asteroidales	93
5.6. Subcorrientes dentro de las corrientes de meteoroides S1, S2 y S3	94
5.7. Resumen de las asociaciones meteorítico-asteroidales	95

Capítulo 1

Introducción

Con excepción de los meteoritos lunares y marcianos y una probable contribución cometaria, más del 99% de los meteoritos son de naturaleza asteroidal. Esto es de esperarse dada la cercanía del Cinturón Principal a la Tierra con toda su diversidad de fuentes meteoríticas potenciales, además del sistema de asteroides que cruzan la órbita terrestre. Lo mismo se puede deducir de las órbitas bien determinadas de algunas piezas meteoríticas recuperadas como son Pribram, Lost City, Innisfree, Peekskill, Neuschwanstein, Tagish-Lake, Morávka, etc. (Figura 1.1) así como de las órbitas de los meteoroides detectados ópticamente en la atmósfera terrestre cuyas propiedades físicas estadísticamente determinadas son típicas de meteoritos de origen asteroidal; las órbitas de los meteoritos de Allende y Nuevo Mercurio, aunque determinadas con mayor incertidumbre, favorecen la misma conclusión. Además de lo anterior, los estudios espectroscópicos y fotométricos de los asteroides muestran que éstos, al igual que los meteoritos, van de los cuerpos muy primitivos en la parte externa del Cinturón hasta los ígneos en la parte más interna del mismo. Sin embargo, y a pesar de la multi-

plicidad de evidencias de la naturaleza preferencialmente asteroidal de los meteoritos, solo el caso de la asociación Howarditas-Eucritas-Diogenitas (HED) con el asteroide Vesta es satisfactoria, quedando en diferentes grados de incertidumbre el origen de la abrumadora mayoría de este tipo de meteoritos. Con respecto a los de origen planetario, concretamente los lunares y marcianos, contrario a lo esperado, su contribución es de menos del 1 %.

Según la revisión histórica en la materia hecha por Porubcan, Koronos y Williams [96], la posibilidad de que algunas corrientes de meteoroides pudieran estar asociadas con asteroides fue primeramente expresada por Olivier en 1925 [91]. Posteriormente, en 1937, Hoffmeister [60] llegó a la misma conclusión. En épocas relativamente más recientes, Sekanina [102, 103] identificó corrientes de meteoroides débiles y sugirió que algunas de ellas podrían estar asociadas con al menos 15 asteroides, particularmente la corriente σ Capricornidos con el asteroide 2101 Adonis. Otros autores que posteriormente sugirieron asociaciones de Asteoides Cercanos a la Tierra (NEAs) con corrientes de meteoroides son Drummond [35], Babadzhanov y Obrubov [2], Olsson-Steel [92], Kresak y Stohl [68], Hasegawa et al. [56], Ryabova [100], Babadzhanov [1], Langbroek [69] y Terentjeva y Barabanov [107]. Casi sin excepción estas asociaciones están basadas en la similaridad actual de algunas órbitas asteroidales con las órbitas medias de algunas corrientes meteoroidales.

Dado lo anterior, el propósito del presente trabajo es acumular el mayor número de evidencias que permitan identificar las fuentes as-

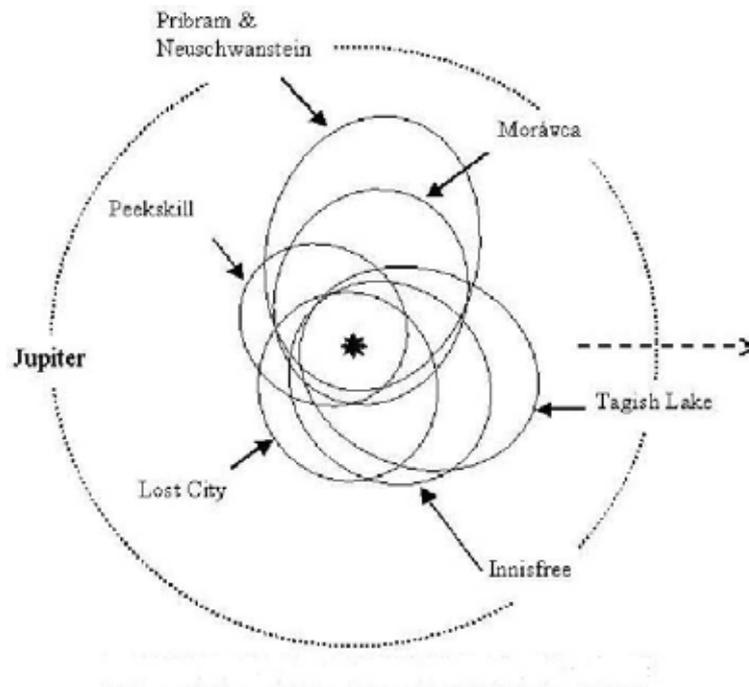


Figura 1.1: Órbitas de meteoritos recuperados cuyas caídas fueron registradas ópticamente. (Imágen: Página web de M. Beech et al.)

teroidales probables de los diferentes tipos de meteoritos, así como algunos asteroides progenitores, cuando esto sea posible.

Para lograr este propósito, en los siguientes tres capítulos se describen las características físicas, químicas, espectrales y orbitales de las poblaciones de asteroides y meteoritos así como las de los meteoroides asociados. Una vez reunida esta información, distinguir afinidades y analogías entre grupos y elementos de las poblaciones de asteroides y meteoritos será una tarea más sencilla.

En el capítulo cinco, en la sección denominada Fuentes Probables de Condritas Ordinarias se presenta un resumen de las propiedades y

características de los grupos asteroidales y de asteroides individuales que guardan mayor afinidad con este tipos de meteoritos cuyo predominio en las caídas así como en las colecciones del mundo es del orden del 80 %.

En la sección siguiente del mismo capítulo, denominada Fuentes Probables de los Meteoritos Carbonáceos, se hace un resumen de las características de asteroides y grupos asteroidales que guardan mayor similaridad con este tipo de meteoritos que, aunque en las caídas solo representan aproximadamente el 4.2 %, la observación fotográfica de meteoros indica que su presencia en la atmósfera superior y, consecuentemente en la vecindad terrestre, es del orden del 75 %.

En la sección denominada Fuentes Probables de los Meteoritos de Enstatita de este mismo capítulo se hace un esbozo acerca de las fuentes probables de este tipo de meteoritos que, aunque en las caídas solo representan aproximadamente el 1 %, su alto contenido metálico, que supera notablemente el de las condritas H, los hacen peculiarmente atractivos.

En la sección titulada Fuentes Probables de Acondritas de este capítulo se resumen las características de los grupos asteroidales y de asteroides individuales que podrían ser progenitores o por lo menos guardar una relación estrecha con algunos de los tipos de meteoritos llamados acondritas. Algunos de estos meteoritos son de origen planetario, lo cual es tratado en la sección denominada Fuentes

Planetarias. En general, este tipo de meteoritos rocosos representa aproximadamente el 8.3 % de las caídas y son casi indistinguibles de las rocas terrestres.

La siguiente sección hace referencia a los asteroides y grupos de éstos que pudieran guardar una posible relación genética con los meteoritos metálicos. Este tipo de meteoritos, que son la expresión máxima de la diferenciación de los cuerpos asteroidales de los cuales provienen, representan, aproximadamente, el 5.1 % tanto en caídas como en las colecciones.

La sección siguiente trata de las características de los asteroides o grupos de éstos que potencialmente podrían ser los progenitores de los meteoritos mixtos y que representan apenas el 1.3 % de las caídas así como en las colecciones.

El propósito del penúltimo capítulo denominado Discusión es retomar los conceptos e ideas expuestos en los capítulos previos y ampliar la discusión en torno a ellos cuando las circunstancias lo ameriten.

El capítulo final de esta tesis: Resultados y Conclusiones, explica detalladamente los hallazgos más representativos y destacados del proceso de investigación de este proyecto.

Capítulo 2

Asteroides

2.1. Introducción

Los asteroides son cuerpos fundamentalmente rocosos o metálicos de menos de 1000 kilómetros de diámetro por lo que se les considera cuerpos menores. Los asteroides se mueven en torno al Sol en órbitas interiores a la de Neptuno y están constituidos por material remanente de la formación del Sistema Solar. Visualmente, los asteroides presentan una apariencia estelar, lo cual los distingue de los cometas ya que estos últimos se caracterizan por la presencia de una coma cuando se aproximan al Sol. En su mayoría los asteroides son fragmentos resultantes de colisiones entre asteroides de mayor tamaño o de impactismo en estos últimos, lo cual ha tenido lugar a lo largo de la evolución dinámica del Cinturón Principal.

La distribución de los asteroides no es homogénea dentro del espacio en el que tienen presencia. La mayor parte de ellos está concentrada en el espacio entre las órbitas de Marte y Júpiter, en lo que se conoce como el Cinturón Principal. Otras poblaciones asteroidales residen

parcialmente en el Cinturón y parcialmente fuera de él; algunos objetos asteroidales residen definitivamente fuera del Cinturón.

2.2. Tipos Asteroidales

Los asteroides se clasifican de acuerdo con su albedo y su espectro óptico e infrarrojo cercano, pues estas propiedades evidencian la composición química de su superficie. La clasificación de mayor aceptación es la de Tholen [99], la cual fue desarrollada a partir de espectros de banda ancha ($0,31\mu m$ y $1,06\mu m$) obtenidos durante el Muestreo Asteroidal de 8 Colores (Eight-Color Asteroid Survey, ECAS) en la década de los 80s, en combinación con mediciones de albedos. La formulación original se basó en 978 asteroides. Este esquema incluye 14 tipos en el que la mayoría de los asteroides cae en una de tres grandes categorías, y el resto, en alguna de las otras 11 categorías minoritarias. Los tipos asteroidales se muestran en la Tabla 2.1 y en la Figura 2.1.

Una clasificación alternativa es la propuesta por Bus y Binzel en el 2002 [19]. Esta está basada en los resultados de la Observación Espectroscópica Detallada de los Asteroides Pequeños del Cinturón Principal (Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey, SMASS), que consistió en 1447 espectros detallados de igual número de asteroides en el rango de longitud de onda de $0.44\mu m$ a $0.92\mu m$, sin considerar albedos. Esta clasificación incluye las clases nuevas K, L y O así como las clases transicionales Sa, Sk, Sl, Sq, Sr, Ld, Xc, Xe y Xk. Se recurre a esta clasificación cuando los recursos

de la de Tholen son insuficnetes.

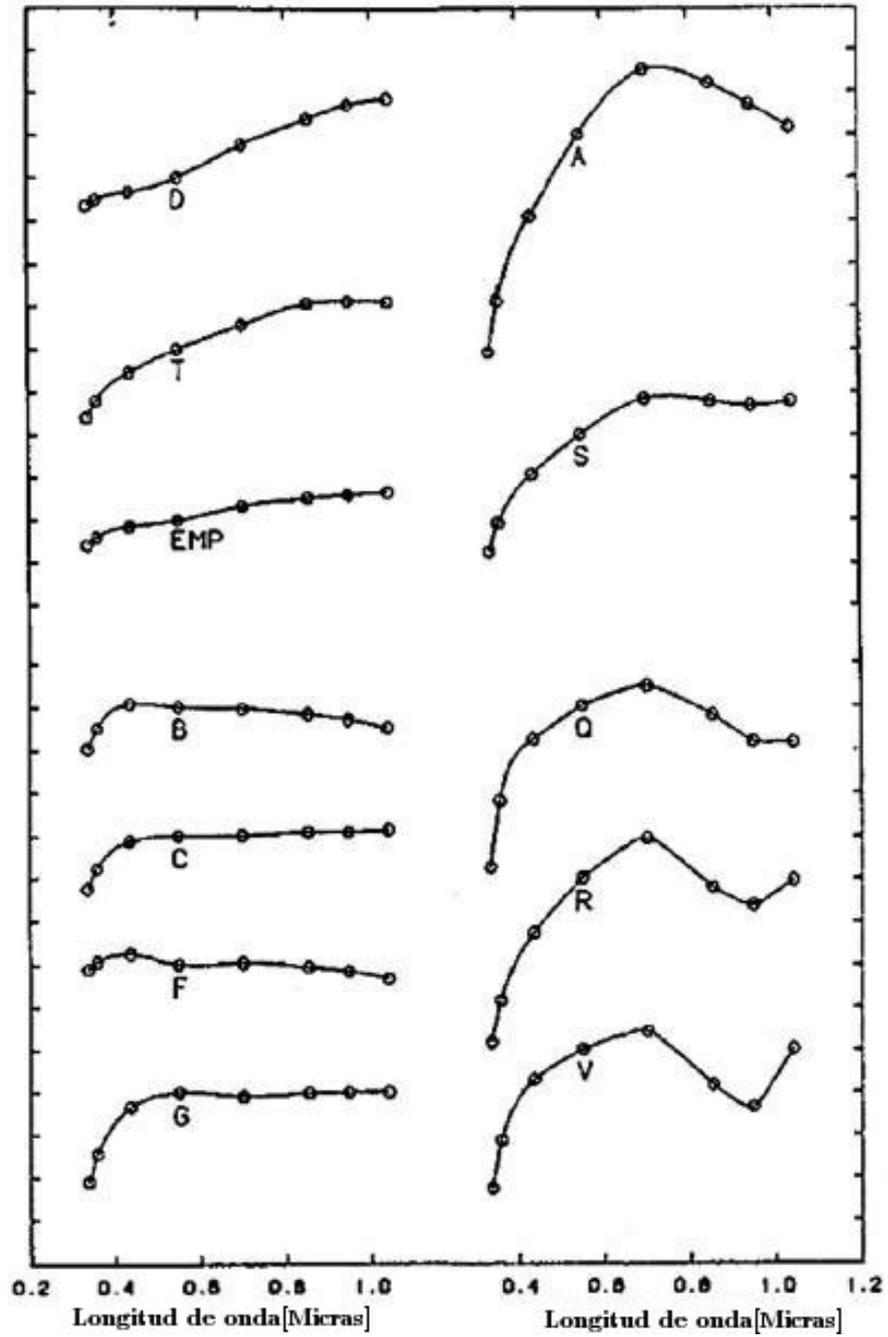


Figura 2.1: Comparación de los perfiles de los espectros asteroidales según la clasificación de Tholen (Gráfica de Tholen [108]).

2.2 Tipos Asteroidales

Tabla 2.1: Tipos de asteroides, albedos típicos y mineralogía probable (Tabla resultado de este proyecto).

Tipo Espectral	Albedo típico	Mineralogía Probable
A	0.055 - 0.255	Olivino
D, P, T	0.03 - 0.06	Carbón, orgánicos, silicatos
C, B, F, G	0.03 - 0.1	Carbón, orgánicos, silicatos hidratados
M	0.1 - 0.2	Metales, enstatita
S	0.1 - 0.3	Silicatos, metales
Q	0.2 - 0.5	Silicatos, metales
V	0.2 - 0.5	Silicatos (Piroxeno y feldspato)
E	0.3 - 0.6	Enstatita y silicatos pobres en hierro
X	0.3 - 0.6	Desconocida

Datos de Harris et al. [54]

Cuando las propiedades de un asteroide muestran una combinación de varios tipos, se le asigna una clasificación híbrida, por ejemplo CG, la cual indicaría que el asteroide posee propiedades típicas de los asteroides C y G.

El tipo de asteroide más abundante es el tipo C con 75 % del total; predomina en el centro y la parte exterior del Cinturón de Asteroides. Le sigue la clase S con el 15 %, la cual predomina en la región interna del Cinturón, luego la clase M con el 8 % que predomina en la región media; las demás clases asteroidales juntas suman el 2 % restante. Las características generales de cada uno de los tipos asteroidales se mencionan a continuación:

Tipo A. Este es un tipo raro del cual conocemos pocos asteroides. Son de color rojo y muy brillantes, con albedos que van de 0.13 a

0.35. Se cree que provienen del manto de asteroides completamente diferenciados. Sus espectros indican que estos asteroides contienen grandes concentraciones de olivino. Un ejemplo de este tipo es 246 Asporina.

Tipo B. Es un subgrupo de los asteroides tipo C. Se distinguen de éstos por sus absorciones en el ultravioleta. Son oscuros, con albedo comprendido entre 0.04 y 0.08 y representan la mayor parte de los asteroides correspondientes a la clase C; están relacionados con las condritas carbonáceas. El asteroide más conocido de esta clase es 2 Palas.



Figura 2.2: De todos los asteroides visitados por las diferentes misiones, Mathilde es el único asteroide tipo C. (Imágen: www.solarviews.com/cap/ast/mathild2.htm).

Tipo C. Representan aproximadamente el 75 % del total de asteroides y, por lo tanto, son los más numerosos. Sus superficies son oscuras ya que su albedo es bajo, de entre 0.03 y 0.09. Probablemente contienen grandes concentraciones de carbono y sustancias orgánicas como los hidrocarburos y algunos silicatos. Algunos de estos asteroides están hidratados. Este tipo de asteroide se divide en tres subgrupos que son las clases B, F y G; es la clase dominante en el centro y la parte externa del Cinturón de Asteroides y están relacionados con los meteoritos conocidos como condritas carbonáceas; 253 Mathilde es uno de éstos (Figura 2.2).

Tipo D. Son aproximadamente el 4 % del total de asteroides. Son rojizos y muy oscuros, con albedos entre 0.02 y 0.05. Se cree que están constituidos por concentraciones de carbono y silicatos orgánicos, es posible que también estén hidratados. Se observan ocasionalmente en el centro del Cinturón, aunque la mayoría se localiza en la parte externa de éste, más allá de 3.3 UA; se les asocia con las condritas carbonáceas. El asteroide más conocido de este tipo es 624 Hektor.

Tipo E. Un tipo raro de asteroide que es ligeramente rojo y extremadamente brillante, con albedo comprendido entre 0.25 y 0.60, siendo los asteroides más brillantes de todos. Se concentran en la parte interna del Cinturón y se relacionan con los meteoritos conocidos como condritas de enstatita. Su composición es similar a la de los grupos M y P pero difieren de éstos en su albedo; aparentemente están formados por hierro metálico, níquel y bajas concentraciones

de cobalto. Debido a su alto albedo se supone que están formados de enstatita, sin embargo, la enstatita es de origen ígneo y algunos asteroides del tipo E no muestran signos de una historia ígnea en su superficie. El asteroide más importante de este tipo es 44 Nysa.

Tipo F. Es un subgrupo de los asteroides tipo C. Estos son oscuros, con albedo entre 0.03 y 0.07 y se diferencian de las demás subcategorías de la clase C debido a la débil absorción de radiación ultravioleta en su espectro. Carecen de la banda de absorción de agua en $3 \mu m$. Sin embargo, se cree que alguna vez hubo hidratación en su superficie. Estos asteroides están relacionados con los meteoritos conocidos como condritas carbonáceas, compuestos principalmente de carbono.

Tipo G. Es un subgrupo de los asteroides tipo C. Son oscuros con albedo comprendido entre 0.05 y 0.09 y se diferencian de éstos debido a la gran absorción ultravioleta observada en su espectro. Se cree que en el pasado hubo hidratación en su superficie. Se componen principalmente de carbono y están relacionados con los meteoritos conocidos como condritas carbonáceas. El asteroide más conocido de esta clase es 1 Ceres (Figura 2.3).

Tipo K. Asteroides identificados con los meteoritos mixtos. Sus albedos son moderados y se cree que se componen principalmente de silicatos y metales, incluyendo minerales como olivinos y piroxenos. Un ejemplo de este tipo de asteroide es el de 273 Atropos.

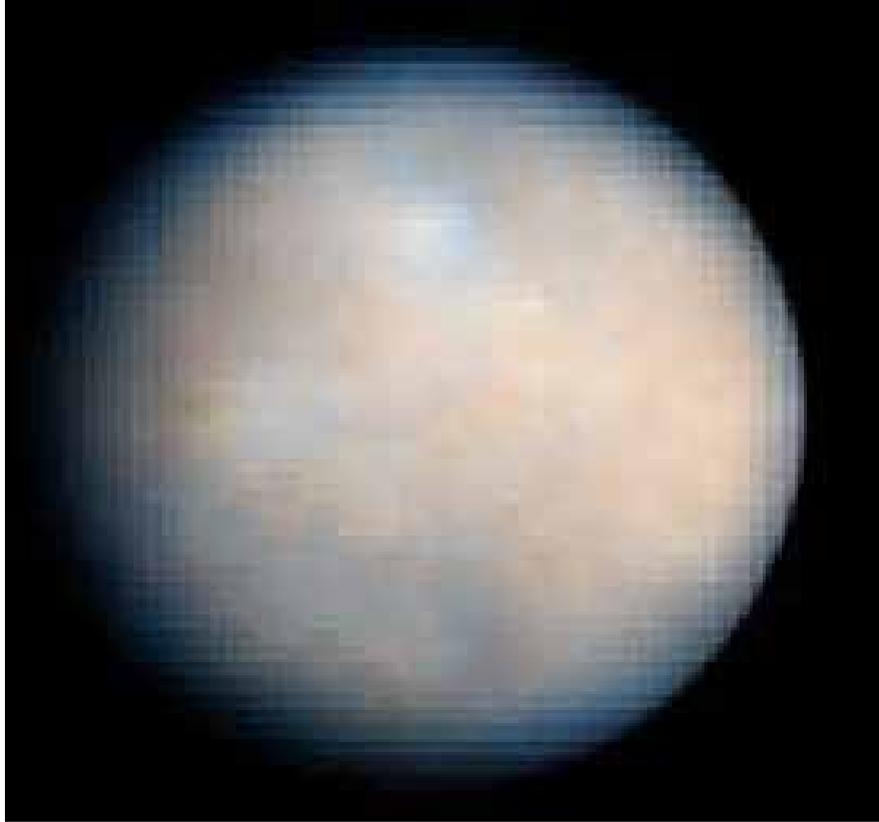


Figura 2.3: Ceres, que es el asteroide más grande con casi 1000 km de diámetro, es del tipo G. (Imágen: www.solarviews.com/eng/ceres.htm).

Tipo M. Representan aproximadamente el 8% del total. Son de color rojo y brillantes, con albedos entre 0.10 y 0.18 y están formados principalmente por aleaciones de hierro metálico y níquel y un poco de cobalto. Son similares a los de las clases E y P pero se diferencian de estos en su albedo. Se cree que son fragmentos de los núcleos de asteroides diferenciados. Se han detectado asteroides de esta clase con silicatos en su superficie. Estos asteroides están relacionados con los meteoritos metálicos y su presencia en el Cinturón es más notable en la parte central de éste. El asteroide más raro de

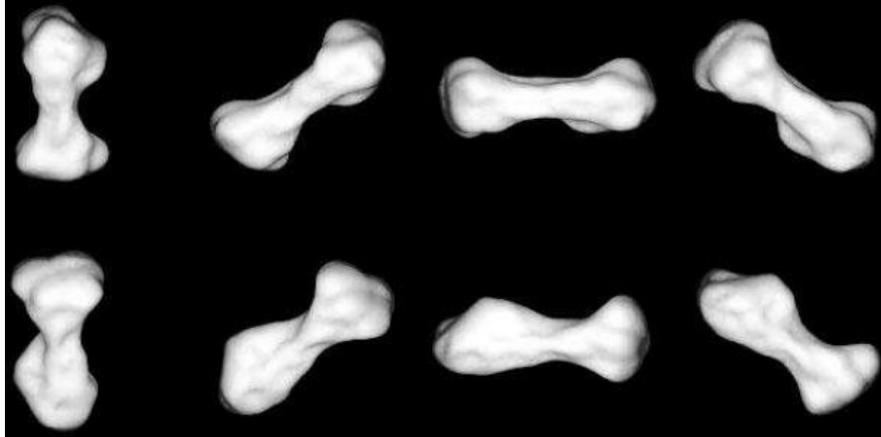


Figura 2.4: De los asteroides tipo M, Kleopatra es notable por su peculiar forma de hueso. (Imágen: en.wikipedia.org/wiki/216_Kleopatra).

este tipo es 216 Kleopatra (Figura 2.4).

Tipo P. Aproximadamente son el 4 % del total. Son asteroides muy oscuros con albedo comprendido entre 0.02 y 0.06 y con espectros rojizos. Se cree que contienen silicatos orgánicos y carbono; no se descarta la presencia de hidratación en su interior. Están relacionados con los asteroides D y T. La mayor parte de estos asteroides se concentran en la parte externa del Cinturón de Asteroides y más lejos aún. No se han encontrado meteoritos de esta clase. Un ejemplo de este tipo de asteroides es 87 Sylvia.

Tipo Q. Un tipo raro de asteroides de los cuáles se conocen muy pocos. Su espectro indica la presencia de metales en su superficie y grandes concentraciones de olivino y piroxeno. Son similares a los de las condritas ordinarias y se localizan en la región interna del Cinturón de Asteroides. Un ejemplo de este tipo de asteroides es

1862 Apolo.

Tipo R. Es una clase de asteroides extremadamente rara de la cuál solo se conoce un asteroide. Es muy rojo y brillante, intermedio entre los tipos A y V. Su espectro muestra las absorciones de olivino y piroxeno en 1 y 2 μm con posibilidades de plagioclasa. Se ubica en la región interna del Cinturón y se le relaciona con las acondritas de olivino-piroxeno. El único ejemplo de este tipo es 349 Dembowska.



Figura 2.5: Ida, de casi 60 km de longitud, es del tipo S. En la imagen se aprecia su satélite Dactilo. (Imágen: en.wikipedia.org/wiki/243_Ida).

Tipo S. Son aproximadamente el 15-17 % del total de los asteroides. Son rojizos y muy brillantes, con albedo entre 0.10 y 0.22. Se componen de cerca de 90 % de hierro metálico y en menor cantidad de níquel, olivino y piroxeno. Este tipo de asteroides domina la región interna del Cinturón de Asteroides y se les asocia con los meteoritos mixtos, con algunas acondritas y con las condritas ordinarias. Un

asteroide de este tipo es 243 Ida (Figura 2.5).

Tipo T. Grupo raro de asteroides de composición desconocida. Son oscuros con espectros moderadamente rojos sin estructura y con albedo entre 0.04 y 0.11. Se cree que están constituidos de carbono y silicatos orgánicos; no se descarta la presencia de minerales hidratados en su interior. Están relacionados con los asteroides tipo D y P y se concentran en la parte interna del Cinturón. Hasta ahora no se conocen meteoritos asociados con ellos. Un ejemplo de este tipo de asteroides es 114 Kassandra.

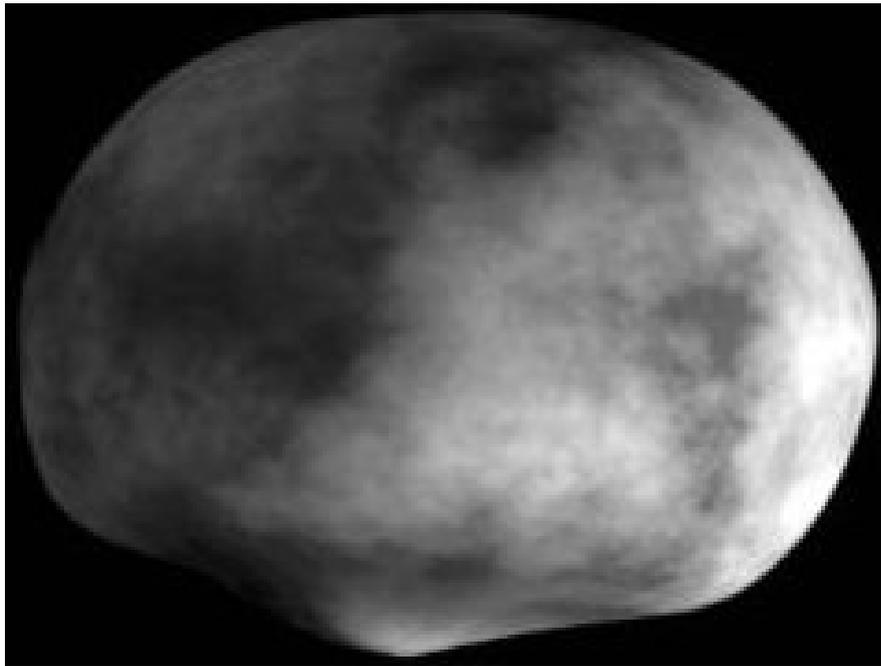


Figura 2.6: Vesta, con cerca de 500 km de diámetro, es el segundo asteroide más grande después de Ceres. Está clasificado como tipo V. (Imágen: www.planetary.org/explore/topics/asteroids_and_comets/vesta.html).

Tipo V. Un grupo de asteroides raro pero importante ya que el asteroide Vesta es de este tipo. Son muy brillantes, con albedo cerca de 0.4. Su composición es similar a la del tipo S pues se compone de hierro, níquel, olivino y piroxeno, aunque se diferencian de los tipo S por tener una mayor concentración de piroxeno. Se cree que la mayoría de los asteroides de esta clase provienen de la fragmentación de 4 Vesta. Se relacionan estrechamente con las acondritas basálticas Howarditas - Eucritas - Diogenitas o HEDs. El mejor ejemplo de este grupo es el asteroide 4 Vesta mismo, el cual se muestra en la Figura 2.6.

2.3. Cinturón Principal de Asteroides

La fuente suprema de meteoritos y de Asteroides Cercanos a la Tierra es el Cinturón de Asteroides. Las características que lo definen como tal son: 1) Es la región del Sistema Solar que concentra la mayoría de los asteroides del sistema; 2) es un sistema intrínsecamente colisional y 3) está relativamente cerca de cualquier punto de la órbita de la Tierra. La eficacia del Cinturón como fuente suprema de meteoritos radica en que cada uno de los asteroides, de los cientos de miles que lo conforman, por estar sujetos a impactos periódicos y a colisiones, se convierten en fuentes tributarias de fragmentos de diversos tamaños, cada uno de éstos con el potencial de convertirse en meteorito.

El Cinturón Principal es una región del Sistema Solar situada entre 2 y 3,5 UA (3×10^8 y $5,25 \times 10^8$ km) del Sol, dentro de las órbitas

2.3 Cinturón Principal de Asteroides

de Marte y Júpiter y que concentra la mayor parte de los asteroides del Sistema Solar (Figura 2.7).

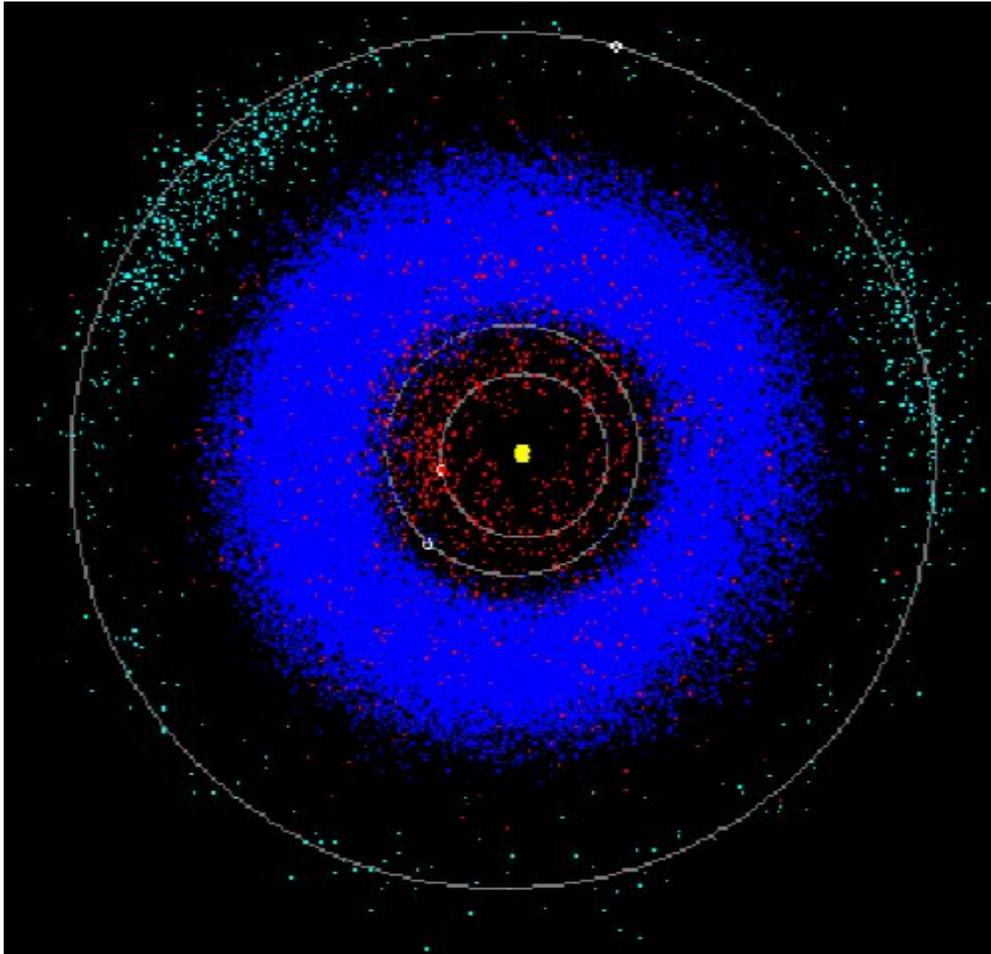


Figura 2.7: La distribución de puntos más densa en forma de dona es el Cinturón de Asteroides; las dos agrupaciones menores en la órbita de Júpiter son los asteroides troyanos. (Imágen: www.tayabeixo.org/sist_solar/asteroides/images/cintur2.gif).

Aunque en un principio se pensó que los asteroides del Cinturón eran los restos de un planeta que fue destruido durante una colisión

2.3 Cinturón Principal de Asteroides

catastrófica, la cuasicircularidad de sus órbitas así como la diferenciación química del Cinturón como función de la distancia al Sol no avalan esta tesis y sí la que sostiene que es el material que no llegó a aglutinarse para formar un planeta.

Dentro del Cinturón los asteroides no se distribuyen uniformemente sino que tienden a agruparse en torno a valores preferenciales del semieje mayor a evitando ocupar otros. Las regiones despobladas se conocen como Vacíos de Kirkwood y los mecanismos de despoblamiento son las Resonancias de Movimiento Medio con Júpiter y la Secular ν_6 (ver Apéndice A). Las resonancias más importantes que dan lugar a los Vacíos de Kirkwood y que en general coinciden con ellos son la 4:1, a 2.06 UA; la 3:1, a 2.5 UA; la 5:2, a 2.82 UA; la 7:3, a 2.95 UA, y la 2:1, a 3.27 UA; Figura 2.8.

En lo que respecta a la distribución de los valores del semieje mayor de los asteroides dentro del Cinturón, tampoco hay homogeneidad, sino que hay intervalos de este parámetro favorecidos por asteroides que forman Familias, tal como se ve en la Figura 2.9. Así, las Familias son aglomeraciones de asteroides con parámetros orbitales similares, relacionadas genéticamente, probablemente como resultado de la fragmentación catastrófica de asteroides, característica de la evolución normal del Cinturón. Las primeras familias identificadas se conocen como Familias de Hirayama (ver Figura 2.9). Las más populosas son Eos, Koronis y Themis; otras minoritarias son Flora y Nysa/Polana. Las agrupaciones como Hungaria, Phocaea, Cybeles, Hildas y Troyanos no son consideradas como auténticas familias, ya

2.3 Cinturón Principal de Asteroides

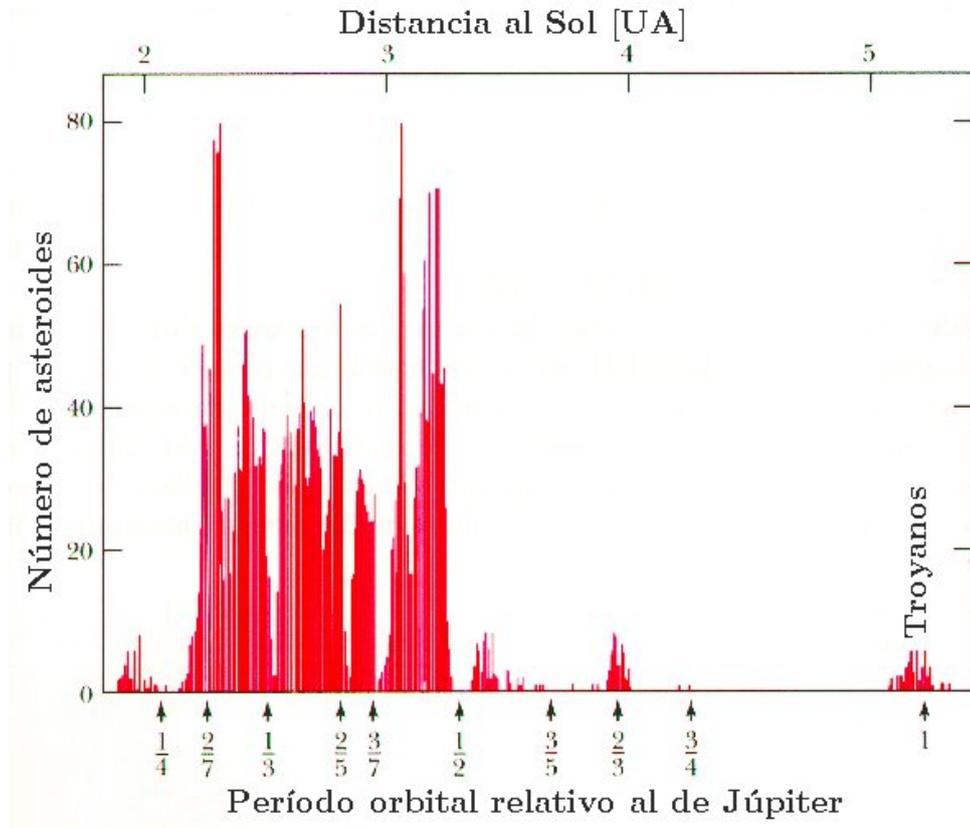


Figura 2.8: Resonancias de Movimiento Medio con Júpiter y los Vacíos de Kirkwood. (Imágen: abyss.uoregon.edu/~js/images/kirkwood_gaps.gif).

que no parecen provenir de un descendiente común sino que más bien parecen ser consecuencia de la acción de las resonancias de movimiento medio y las seculares (Apéndice A). Las resonancias seculares más importantes son las producidas por la precesión secular del eje orbital de los asteroides al ritmo del eje orbital de Júpiter y del perihelio de Saturno. La primera afecta a los asteroides con inclinaciones entre 25 y 30 grados a lo ancho del Cinturón y la segunda, a los asteroides con a mayor de 2 UA y con inclinaciones entre 0 y 21 grados; la más eficaz es esta última que es la ν_6 .

2.3 Cinturón Principal de Asteroides

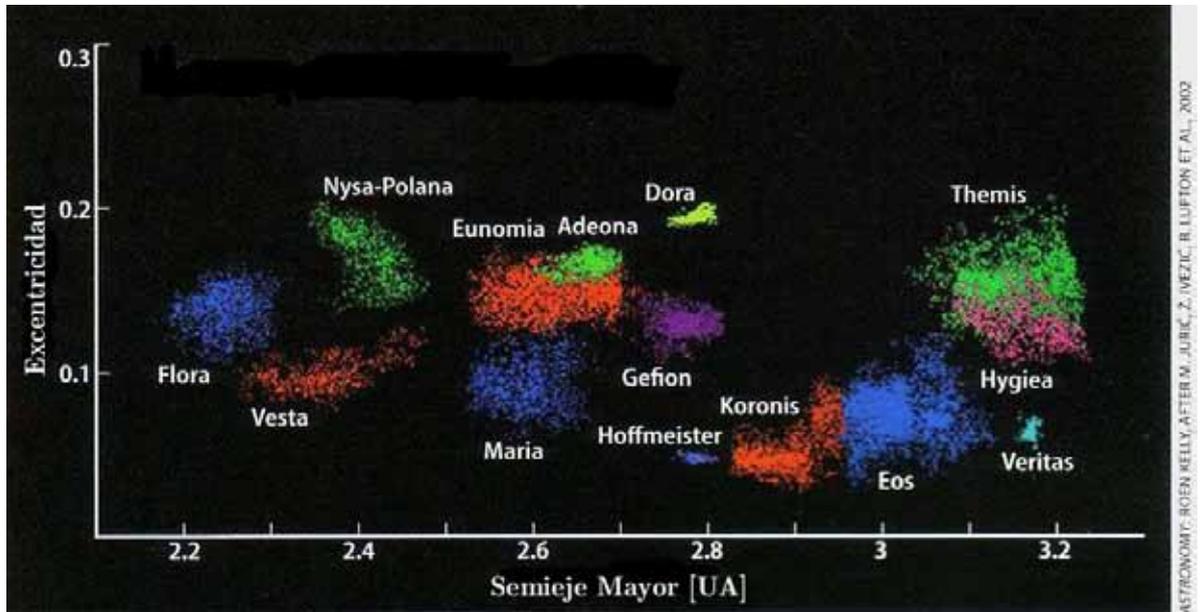


Figura 2.9: Las agrupaciones asteroidales en la figura son las familias. Las más notables están identificadas por su nombre (Imágen: Astronomy).

Se ha demostrado que los asteroides que ingresan a las resonancias más eficaces con Júpiter como son la 3:1, la 4:1 y la 5:2 (Apéndice A), pueden incrementar sus excentricidades hasta el punto de cruzar la órbita terrestre, usualmente en escalas de tiempo del orden de un millón de años. En algunos casos el comportamiento orbital es caótico dentro estas resonancias de tal manera que algunos de estos cuerpos son empujados directamente a órbitas rasantes al Sol.

Aparte de las resonancias con Júpiter, principalmente la 3:1 a 2.5 UA, la resonancia secular ν_6 (Apéndice A) cuyo eficacia es mayor en el borde interno del Cinturón entre 2 y 2.5 UA, la región que ocupan los asteroides que cruzan la órbita de Marte (MC) se considera otra

2.3 Cinturón Principal de Asteroides

de las fuentes primarias de Asteroides Cercanos a la Tierra.

Las fuerzas no gravitacionales, como las que producen el efecto Yarkovsky (Apéndice B), juegan un papel importante en la inyección de asteroides pequeños y material de éstos dentro de las resonancias de movimiento medio y las seculares, las cuales se encargan de expulsarlos del Cinturón Principal.

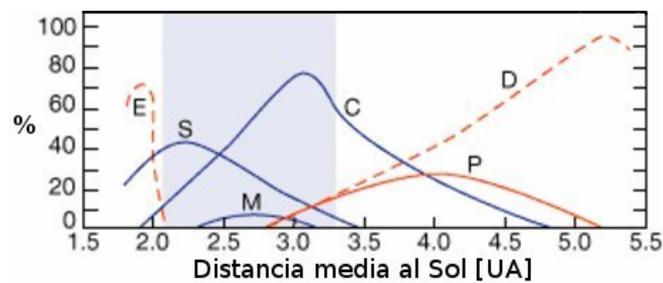


Figura 2.10: Distribución de los tipos asteroidales como función de la distancia al Sol. Los E, son de enstatita; los S, de silicatos y metales; los M, metálicos; los C, de carbón y silicatos hidratados; los P y D, de carbón y compuestos orgánicos (Imágen de Enciclopedia Británica).

En cuanto a las proporciones de los tipos asteroidales, éstas cambian notablemente a través del Cinturón (ver la Figura 2.10). En el borde interno, 60 % son silicatados y 10 % carbonáceos; en el borde exterior la situación se invierte con 80 % carbonáceos y 15 % silicatados.

Actualmente se conocen más de doscientos mil asteroides que orbitan el Sol en el Cinturón Principal y se estima que existen cerca de 2 millones de ellos con diámetro de más de 1 km [10]. El objeto

más grande es 1 Ceres con cerca de 1000 km de diámetro, le siguen 2 Palas y 4 Vesta con cerca de 500 km de diámetro cada uno; 10 Haygea es el cuarto más grande y tiene un diámetro de cerca de 400 km. A pesar de la gran cantidad de asteroides, más del 50 % de la masa total del Cinturón se concentra en los tres asteroides mayores: Ceres, Palas y Vesta.

2.4. Asteroides Cercanos a la Tierra o NEAs

Los Asteroides Cercanos a la Tierra son el subconjunto más importante de los Objetos Cercanos a la Tierra o NEOs, por sus siglas en inglés. Estos incluyen asteroides, cometas activos e inactivos así como a los meteoroides, que son los precursores inmediatos de los meteoritos. Los NEOs están definidos como los cuerpos menores que tienen perihelios $q < 1,3$ UA y afelios $Q > 0,983$ UA.

Con respecto a los Asteroides Cercanos a la Tierra, NEAs, (por sus siglas en inglés), están compuestos por tres familias orbitales de asteroides que son los Apolo, con $a > 1$ UA y $q < 1,0167$ UA; los Atón, con $a < 1$ UA y $Q > 0,983$ y los Amor, con $1,0167 < q < 1,3$ UA, es decir, estos últimos casi cruzan la órbita terrestre (Figura 2.11).

Los NEAs son objetos fundamentalmente pequeños (Figura 2.12). El objeto más grande es 1036 Ganímedes cuyo diámetro esférico equivalente es de 39 km. El segundo NEA más grande y más conocido es 433 Eros (Figura 2.13), sus dimensiones son $13 \times 13 \times 33$ km.

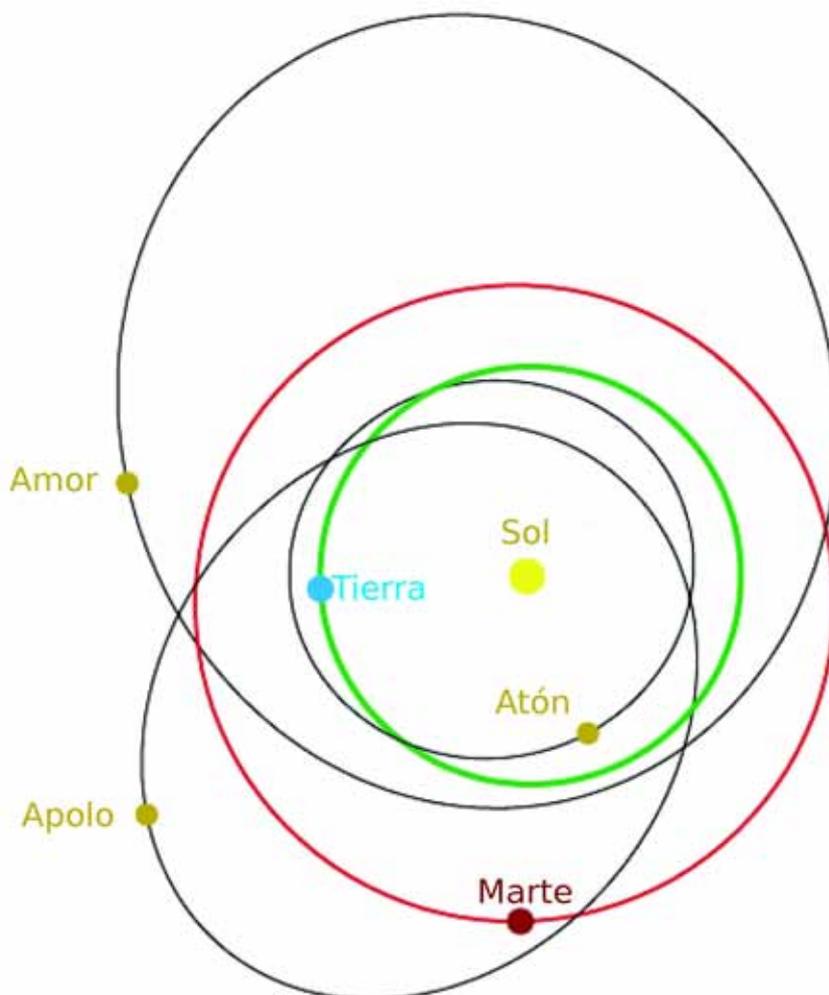


Figura 2.11: Órbitas típicas de las tres familias de asteroides cercanos a la Tierra o NEAs (Gráfica de D. Asher/JPL).

Las propiedades físicas de los NEAs [71] abarcan un rango amplio de valores, compatibles éstos con los observados en el Cinturón Principal, lo cual es consistente con la suposición de que el Cinturón de Asteroides es la fuente principal de NEAs.

El escenario simplificado de cómo los NEAs son enviados del Cin-

2.4 Asteroides Cercanos a la Tierra o NEAs

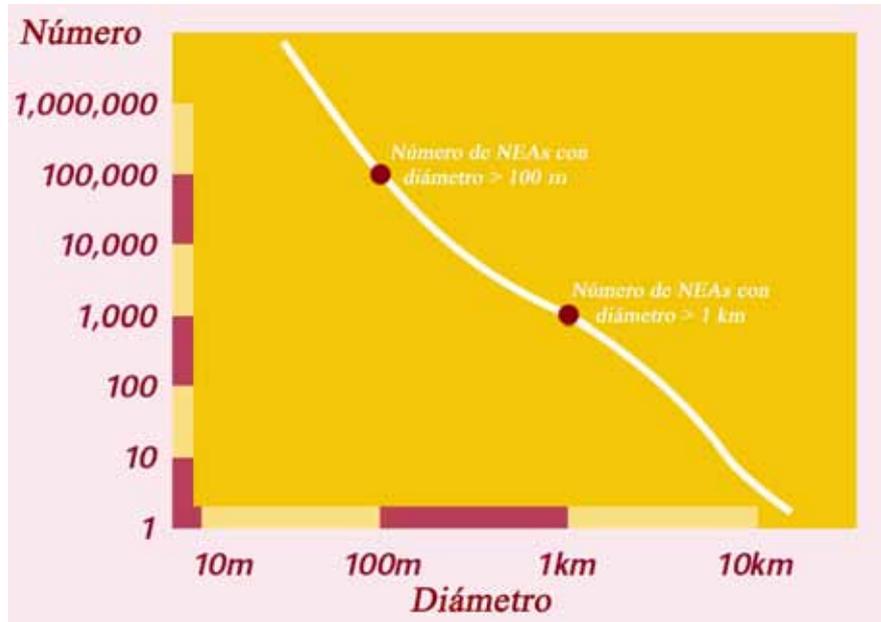


Figura 2.12: Distribución de tamaños de los asteroides cercanos a la Tierra o NEAs (Gráfica de D. Asher/JPL).

turón a la parte interna del Sistema Solar es como sigue:

cuando un asteroide sufre destrucción catastrófica o erosión debidas a impactos, lanza numerosos fragmentos. Los fragmentos con diámetros menores a 20 km que no son lanzados directamente a las resonancias, empiezan a modificar su semieje mayor bajo el Efecto Yarkovsky (Apéndice B). Eventualmente estos objetos ingresan a las resonancias (Apéndice A) y después de algunos encuentros repetidos con el campo gravitacional de Júpiter en el mismo lugar de su órbita, éstos modificarán sus excentricidades y/o sus inclinaciones, lo cual los llevará a cruzar la órbita de la Tierra convirtiéndose así en miembros de la población de Asteroides Cercanos a la Tierra. Alternativamente, estos objetos son atrapados como cruzadores de



Figura 2.13: De los asteroides cercanos a la Tierra o NEAs, Eros es el más conocido y es el segundo más grande después de Ganímedes. (Imágen: en.wikipedia.org/wiki/433_Eros).

la órbita de Marte y, eventualmente, en un encuentro cercano con el planeta, éste modifica sus órbitas obligándolos a cruzar la órbita terrestre, convirtiéndose de todas maneras en NEAs. De cualquier forma, en general, se espera que la vida media de los NEAs sea relativamente corta. Los cálculos dinámicos muestran que ésta es del

orden de diez millones de años cuyo final puede ser estrellarse con el Sol, ser lanzado del Sistema Solar, o colisionar con alguno de los planetas terrestres.

Con respecto a su taxonomía, casi todas las clases taxonómicas del Cinturón Principal están representadas en los NEAs, incluyendo los tipos P y D, comúnmente localizados en la parte externa del Cinturón, entre los asteroides Hilda y los Troyanos. Sin embargo, la gran mayoría de los NEAs conocidos hasta hoy pertenecen a la clase taxonómica S, lo cual indica que se originan principalmente en la parte interna del Cinturón (ver la Figura 2.10).

Actualmente existen unos 4000 objetos catalogados como NEAs. Si un NEA se aproxima a menos de 0.05 unidades astronómicas, o sea, a menos de 7 millones y medio de kilómetros de la Tierra, se le denomina PHA, siglas en inglés que significan Asteroide Altamente Riesgoso. Actualmente algunos 800 NEAs están clasificados como PHAs.

2.5. Asteroides Troyanos

Se denomina Asteroides Troyanos a un grupo de asteroides que se mueven en la órbita de Júpiter. Están situados en los dos puntos de Lagrange triangulares: en el L_4 , a 60 grados por delante de Júpiter y en el L_5 , a 60 grados por detrás del planeta, como lo muestra la Figura 2.14.

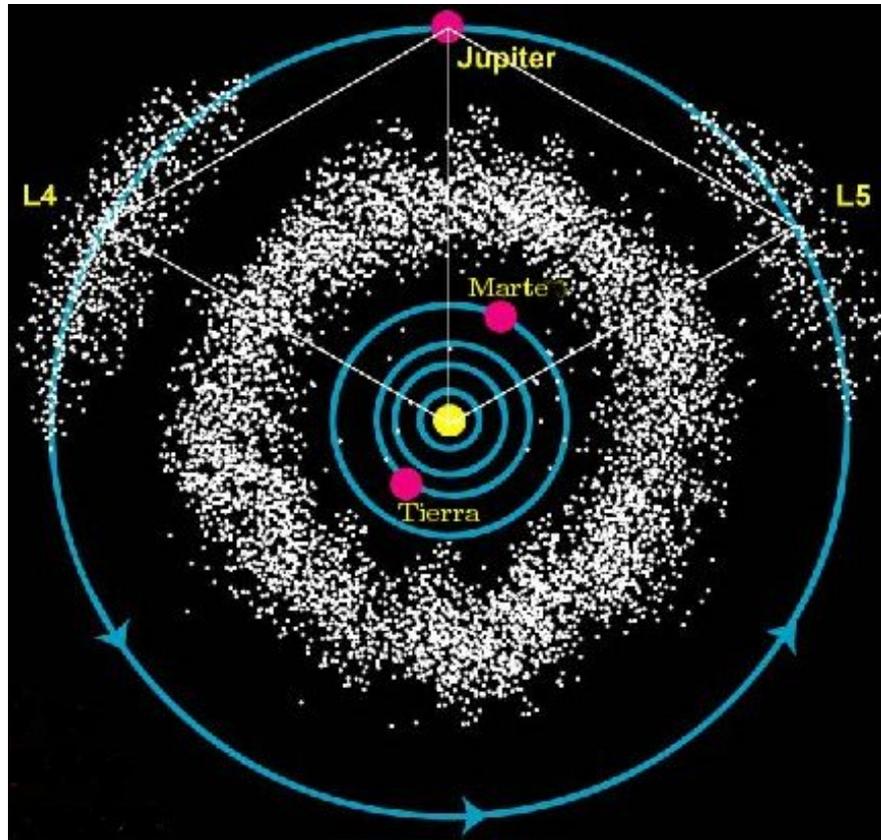


Figura 2.14: Asteroides Troyanos en la órbita de Júpiter en torno a los puntos triangulares de Lagrange Sol-Júpiter-asteroide L_4 y L_5 . (Imágen: keetsa.com/blog/wp-content/uploads/2007/09/asteroid-belt.jpg).

El planeta Marte también tiene, por lo menos, un asteroide troyano que es 5261 Eureka y que ocupa el punto L_5 del sistema Sol - Marte.

El planeta Neptuno también tiene dos asteroides troyanos. Uno es 2001 QR322, descubierto en 2001 y el otro es 2004 UP10, que orbita delante de Neptuno en su punto lagrangiano L_4 . En junio de 2006 se descubrieron tres nuevos asteroides troyanos de Neptuno.

2.6. Asteroides Centauros

Se denominan Asteroides Centauros a los que se encuentran orbitando entre los grandes planetas tales como 2060 Quirón, que orbita entre Saturno y Urano y 5335 Domocles, que orbita entre Marte y Urano.

2.7. Asteroides Coorbitantes de la Tierra

Son asteroides que al acercarse a la Tierra permanecen capturados por la gravedad terrestre por algunos años y luego se alejan nuevamente. Actualmente se conocen dos cuerpos de este tipo: 2003 YN 107 y 2004 GU 9.

Capítulo 3

Meteoritos

3.1. Introducción

Un meteorito es un cuerpo celeste relativamente pequeño, de dimensiones usualmente inferiores a 5 m que logró sobrevivir a su paso por la atmósfera terrestre, cayendo a su superficie. El límite superior de 5 m es el diámetro del meteorito más grande conocido hasta el momento, que es el de Hoba. (Figura 3.1).

Los meteoritos son fragmentos de aproximadamente 100 - 150 asteroides diferentes [18], los cuales van de asteroides ígneos con núcleos metálicos, mantos y cortezas volcánicas hasta asteroides condriticos muy primitivos que consisten en polvo y partículas libremente aglomerados que se formaron durante las primeras fases del Sistema Solar.

Los meteoritos se clasifican en grupos con el propósito de identificar los materiales que pudieran estar asociados en espacio y tiempo durante la acreción en regiones vecinas de la nebulosa solar, o que



Figura 3.1: El meteorito de Hoba, Namibia, con casi 5 m de diámetro, hasta el momento es el más grande del mundo (Imágen: www.travelblog.org).

podrían haber sufrido procesos similares de calentamiento, fusión, diferenciación o de alteración hidrotérmica.

En primera instancia los meteoritos se clasifican en pétreos, metálicos y mixtos cuyas proporciones respectivas son 93.6%, 5.1% y 1.3%. Una clasificación más detallada divide a los meteoritos en grupos según su estructura, composición química, isotópica y mineralógica.

Los meteoritos pétreos están hechos de los mismos elementos que las rocas terrestres: Si, O, Fe, Mg, Ca y Al. Como las rocas terrestres,

los meteoritos pétreos son estructuras de minerales como piroxeno, olivino y plagioclasa pero, a diferencia de las rocas terrestres, también contienen metales y sulfuros. Los meteoritos pétreos se dividen en condritas y acondritas, esto en base a la presencia o ausencia de condros en su matriz. Los condros son subestructuras esféricas de olivino, piroxeno y feldespato de hasta un milímetro de diámetro que fueron fundidos parcial o totalmente antes de su incorporación al cuerpo del cual provienen.

Los meteoritos metálicos están compuestos fundamentalmente de la aleación hierro-níquel y algunos minerales accesorios tales como troilita o grafito, usualmente rodeados por schreibersita y cohenita.

Los meteoritos mixtos están formados de aproximadamente 50 % silicatos y 50 % de la aleación Fe-Ni. Estos meteoritos se dividen en palasitas y mesosideritas.

3.2. Tipos de Meteoritos

3.2.1. Condritas

Las condritas son meteoritos pétreos que no han sido fundidos desde su agregación temprana en la historia del Sistema Solar. Se caracterizan por la presencia de condros en su estructura. Su composición elemental no fraccionada es muy similar a la composición solar, lo cual las identifica como parte del material original del cual se formó el Sistema Solar. Los condros son estructuras esféricas blan-

cas de composición muy diversa, con dimensiones usualmente submilimétricas e inmersas en la matriz de las condritas; algunos son muy refractarios mientras otros contienen volátiles y silicatos ricos en hierro.

Las condritas se subdividen en base a la química, a la matriz, al contenido de metal y condros y a las características de los condros como son el tamaño y el tipo, entre otros.

Las condritas son meteoritos fundamentales para entender la cronología temprana del Sistema Solar, puesto que son los más primitivos de todos los meteoritos y que han experimentado solo metamorfismo térmico o hidrotérmico ligero desde su incorporación a su cuerpo de origen.

Las diferencias entre las clases de condritas provienen de la región de la nebulosa solar en la que se formó el cuerpo de origen. Los subgrupos también se distinguen en base a la composición isotópica del oxígeno de los minerales silicatados importantes, lo cual se interpreta como evidencia de la heterogeneidad de la nebulosa primordial.

Las tres clases principales de condritas son carbonáceas, ordinarias y de enstatita, las cuales se clasifican así de acuerdo con el aumento en el grado de oxidación. Las condritas carbonáceas, ordinarias y de enstatita se subdividen aún más en base a su composición química. También existen dos agrupaciones más pequeñas: las rumuruti y las kakangari.

3.2.1.1. Condritas Ordinarias

Las condritas ordinarias se dividen en condritas H, L y LL en base a su contenido de Fe-Ni:



Figura 3.2: Condrita ordinaria Markovka, clasificada como H4 (Imágen: www.meteorites.com.au/media/).

Condritas H. Estas se caracterizan por tener el mayor contenido total de hierro, mucho hierro metálico (16-22 %) pero bajo contenido de óxido de hierro (fayalita) en los silicatos (Figura 3.2).

Condritas L. Se caracterizan por un bajo contenido total de hierro, bajo contenido de hierro metálico (7-16 %) y alto contenido de óxido de hierro en los silicatos. Aparte de magnetita y hierro-níquel,



Figura 3.3: Condrita ordinaria Ghubara, clasificada como L5 (Imágen: www.meteorites.com.au/media/).

las condritas L están compuestas de olivino e hiperstena de ortopiroxeno (Figura 3.3).

Condritas LL. Estas tienen bajo contenido total de hierro y bajo contenido de hierro metálico ($< 7\%$) pero tienen la mayor concentración de óxido de hierro en los silicatos (Figura 3.4).

3.2.1.2. Condritas Carbonáceas

Las condritas carbonáceas contienen inclusiones de calcio-aluminio (CAIs), que son inclusiones refractarias de forma irregular de óxidos y silicatos minerales como espinel, ebonita, melilita, etc. Las CAIs con frecuencia muestran una zonificación mineralógica com-



Figura 3.4: Condrita ordinaria NWA 2622, clasificada como LL4 (Imágen: www.meteorites.com.au/media/).

pleja, tanto en sus bordes como en sus núcleos. Las condritas carbonáceas, por lo tanto, son de componentes de alta temperatura como son los CAIs y los condros los cuales se formaron, presumiblemente, en la nebulosa antes de su agregación a los cuerpos de donde provienen. Las condritas carbonáceas se dividen en 7 grupos. Con excepción de CH, cada uno está nombrado de acuerdo a su espécimen prototipo: CH para los de alto contenido del hierro como ALH85085; CI, por Ivuna; CK, por Karoonda; CM, por Mighei; CO, por Ornans; CR, por Renazzo y CV, por Vigarano. La Figura 3.5 muestra el meteorito de Allende, clasificado como CV3.



Figura 3.5: Condrita carbonácea de Allende, clasificada como CV3 (Imágen: Meteoritos mexicanos, IG).

3.2.1.3. Condritas de Enstatita

Se dividen en 2 grupos: EH para las de alto contenido de hierro (30%) y EL para las de bajo contenido de hierro (25%). Representan el 1% de todas las caídas y contienen el más alto contenido de metal en forma de hierro y sulfuro, del 23 - 35%, y el más bajo estado de oxidación de todas las condritas Figura 3.6. Lo anterior indica que se formaron en un área de la nebulosa con bajo contenido de oxígeno; probablemente en las inmediaciones de Mercurio.



Figura 3.6: Condríta de enstatita Sahara 97079, clasificada como EH3 (Imágen: www.meteorites.com.au/media/).

3.2.1.4. Condrítas Rumuruti

Las condrítas Rumuruti son meteoritos raros. Su peso total conocido es de solamente 1.5 kilogramos. Esto puede significar que las condrítas Rumuruti vienen de una región del Sistema Solar de la cual es difícil que los materiales lleguen a la Tierra, comparadas con las condrítas ordinarias. Las condrítas Rumuruti se caracterizan por la predominancia de olivino altamente oxidado convergiendo a fayalita (Fe^{38-40}), por su baja abundancia de condros, comparada con las condrítas ordinarias, por isótopos de oxígeno únicos con ^{17}O más alto, 3 por millón, y textura brechada indicando regolita.

3.2.1.5. Condrita Tagish-Lake

Tagish-Lake es un meteorito C2 no agrupado que cayó el 18 de enero del 2000 en el área de Tagish-Lake, en Canadá, del cual se recuperaron más de 500 fragmentos. Con una porosidad casi del 40 %, Tagish-Lake es el meteorito más frágil conocido hasta el momento (Figura 3.7). Este meteorito está compuesto de carbón y materiales orgánicos, característicos de los asteroides más externos del Cinturón como son los tipo P y D así como de los núcleos cometarios. Las características espectrales coinciden con las de este tipo de asteroides, sobre todo con las de los tipo D.



Figura 3.7: La condrita carbonácea Tagish-Lake. Extrañamente análoga a los asteroides más distantes que son los tipo D; sobre todo al asteroide Haidea. (Imágen: M. Zolensky, NASA/JSC).

3.2.2. Acondritas

3.2.2.1. Introducción

Ampliamente hablando, una acondrita es un meteorito pétreo que se formó de material fundido en su cuerpo progenitor. Así, las acondritas tienen composición diferenciada y han perdido una fracción grande de su contenido primordial de metal y, en general, no contienen condros. Hay grupos diferentes de acondritas que se pueden asociar y relacionar con cuerpos progenitores probables comunes.

3.2.2.2. Acapulcoitas-Lodranitas

Son dos grupos de acondritas que muestran una gama de características comunes que las relacionan mutuamente; contienen, además, composiciones isotópicas de oxígeno similares. Se cree que son de materiales condriticos parcialmente diferenciados; se designan como acondritas primitivas ya que estas propiedades sugieren que son transiciones entre las condritas y las acondritas.

3.2.2.3. Angritas

Son rocas ígneas basálticas de grano medio a grueso. Aunque las angritas tienen composiciones isotópicas de oxígeno similares a las HEDs, no tiene relación con ellas.

3.2.2.4. Aubritas

Acondritas de enstatita. Son meteoritos altamente reducidos con mineralogías y composiciones isotópicas de oxígeno similares a las de las condritas de enstatita, lo cual sugiere que los aubritas pudieron haberse formado de material parcialmente diferenciado de un precursor condrítico de enstatita. Las aubritas someras se formaron cuando un magma se mezcló, por impacto, con material condrítico frío.

3.2.2.5. Braquinitas

Rocas ígneas ricas en olivino de composición global aproximadamente condrítica y composiciones isotópicas de oxígeno similares a las HEDs. Como las asociaciones acapulcoitas-lodranitas, las braquinitas se consideran acondritas primitivas. Las braquinitas son rocas ígneas de grano grueso con mucho calcio en el olivino, mostrando así que se enfriaron lentamente en las profundidades del cuerpo donde cristalizaron.

3.2.2.6. Howarditas - Eucritas - Diogenitas

Un grupo de rocas generalmente brechadas las cuales van de ortopiroxenitas (diogenitas) de grano grueso a basaltos de grano fino (eucritas). Las howarditas son brechas de regolita, ricas en gases del viento solar y clastos de material carbonoso. Todas las Howarditas-Eucritas-Diogenitas o HEDs tiene composiciones isotópicas de oxígeno similares; el candidato a cuerpo progenitor de las HED es el aste-

roide 4 Vesta (Figura 3.8).



Figura 3.8: Acondrita howardita. Es una brecha de Eucrita y Diogenita (Imágen: www.meteorites.com.au/media/).

3.2.2.7. Ureilitas

Son un grupo de rocas ígneas ricas en carbón cuyo origen y génesis son inciertos. Han sido descritas como residuos parciales de fusión y como acumulaciones ígneas. Muestran una amplia gama en composiciones isotópicas de oxígeno de tal manera que no pudieron haber alcanzado el equilibrio isotópico en un solo cuerpo parental. Se componen sobre todo de olivino y piroxeno, con cantidades menores de carbón con granos finos de metal, de sulfuros y de silicatos

de grano fino. Se formaron en la profundidad de un cuerpo de más de 200 kilómetros de diámetro que fue destruido y dispersado catastróficamente, probablemente hace 4.5 Ga, sin embargo, no existe evidencia clara que permita relacionarlas con un asteroide específico como cuerpo progenitor. Todas las ureilitas tienen microestructura de piroxeno y otras características que indican enfriamiento a razón de $10^{\circ}\text{C}/\text{h}$, de 1250 a $< 650^{\circ}\text{C}$.

3.2.2.8. Winonaitas

Están estrechamente relacionadas con las inclusiones de calcio de los meteoritos de hierro IAB; posiblemente se derivan del mismo cuerpo.

3.2.2.9. Meteoritos Lunares

Los meteoritos lunares conocidos actualmente son del orden de 31, 15 de los cuales han sido recuperados en la antártida. Varios son de naturaleza gabroica o basálticos, pero la mayoría son brechas anorodósicas de regolita (Figura 3.9).

3.2.2.10. Meteoritos Marcianos

Actualmente hay 37 meteoritos que casi sin lugar a dudas se originaron en la superficie de Marte. Su origen marciano se fundamenta en su edad, en su composición y en el contenido de gases nobles. Estos meteoritos son de naturaleza ígnea y se pueden subdividir en 4 grupos: Shergottitas, que son rocas de piroxeno-plagioclasa las



Figura 3.9: Acondrita lunar. Es una brecha de rocas lunares (Imágen: www.meteorites.com.au/media/).

cuales se subdividen aún más en los tipos basálticos y herzolíticos (Figura 3.10); las Nakhlitas que son acumulaciones someras que han sido expuestas a la hidrosfera marciana y, por lo tanto, contienen estructuras ricas en carbonatos, sulfuros y halita; las Chassignitas, el único ejemplar de su tipo es una dunita rica en olivino; por último, los tipo ALH 84001 que, como en el caso de las chassignitas, es el único de su tipo y es una ortopiroxenita rica en carbonatos.

3.2.3. Metálicos

Los meteoritos metálicos son materiales provenientes de objetos altamente diferenciados, producto de procesos de fusión extensos. Estos se componen de hierro metálico, generalmente con un 5 - 20 %



Figura 3.10: Acondrita marciana clasificada como shergotita (Imágen: www.meteorites.com.au/media/).

de su peso de níquel y representan aproximadamente el 5% de todas las caídas de meteoritos. En la mineralogía de los meteoritos de hierro es dominante una interrelación de dos fases de la aleación hierro-níquel que son la kamacita y la taenita. La kamacita, o el alfa de Fe-Ni, tiene una estructura cúbica centrada en el cuerpo y un contenido de Ni de menos del 7% de su peso mientras que la taenita, o el gama de Fe-Ni, es una estructura cúbica centrada en las caras con aproximadamente 20 - 50% de su peso de Ni (Figura 3.11).

Las division mayor de los meteoritos de hierro es la de los hierros magmáticos y la de los no magmáticos. Además, se subdividen en 13 grupos diferentes en base al níquel y a la química de los elementos traza como son Ga, Ge e Ir. Los hierros no magmáticos son los



Figura 3.11: Fragmento del meteorito metálico Sikhote-Alin caído en Rusia (Imágen: www.meteorlab.com/METEORLAB2001dev/sikhote.htm).

grupos IAB y IIICD y muestran una amplia gama en su contenido de níquel. Muchos metálicos desafían la clasificación química y permanecen como no agrupados. Antes de la clasificación en base de la química de los elementos traza, los meteoritos de hierro se clasificaban en términos de su estructura metalográfica.

Las bandas entrelazadas de kamacita con fases ricas de Ni forman el patrón de Widmanstätten, el cual se revela en meteoritos metálicos pulidos y tratados químicamente. La anchura de las laminillas de kamacita permite clasificar los meteoritos metálicos en 5 grupos estructurales: octaedritas muy gruesas, gruesas, medias, finas y muy finas. Las octaedritas Plessíticas son transiciones entre las

octaedritas y las ataxitas. Las ataxitas son ricas en níquel, el cual representa más del 20 % de su peso, y son principalmente taenita. Las hexaedritas tienen un contenido de níquel de menos del 6 % de su peso y consisten solo de kamacita.

3.2.4. Mixtos

3.2.4.1. Introducción

los meteoritos mixtos son meteoritos con proporciones aproximadamente iguales de minerales silicatados y de la aleación hierro-níquel. Como los pétreos, los mixtos se subdividen en dos grupos que son las palasitas y las mesosideritas, los cuales tienen orígenes e historias muy diferentes.

3.2.4.2. Palasitas

Las palasitas son una mezcla aproximadamente igual de hierro-níquel metálico y silicatos, predominantemente olivino. Se presume que son material representativo de la transición manto-núcleo de sus cuerpos progenitores. Actualmente hay 50 palasitas conocidas, casi todas pertenecen al grupo principal MG. Las palasitas del grupo MG tienen composiciones isotópicas de oxígeno similares a las de las acondritas HED (Figura 3.12).



Figura 3.12: Meteorito mixto del tipo palasita, llamado de Ahumada (Imágen: www.meteorites.com.au/media/).

3.2.4.3. Mesosideritas

Las mesosideritas son una clase de meteoritos mucho más heterogénea que las palasitas. Son una mezcla de cantidades variables de hierro-níquel metálico con silicatos diferenciados, cuya estructura completa parece haber sido brechada (Figura 3.13). Actualmente hay 66 mesosideritas conocidas, subclasificadas en base a su textura y a diferencias composicionales dentro de la fracción silicatada de los meteoritos. Al igual que las palasitas MG, las mesosideritas tienen composiciones isotópicas de oxígeno similares a las de los acondritas HED.



Figura 3.13: Meteorito mixto NWA 1127 del tipo mesosiderita (Imágen: www.meteorites.com.au/media/).

Capítulo 4

Meteoroides: tipos y proporciones

4.1. Introducción

Los meteoroides son fragmentos asteroidales y cometarios en la vecindad terrestre cuyos tamaños van de $100\mu\text{m}$ a 10 m, de acuerdo a la Unión Astronómica Internacional (IAU). A pesar de su importancia como precursores inmediatos de los meteoritos, hasta ahora no ha sido posible cuantificar ni identificar las subpoblaciones que sabemos que poseen. Debido a sus reducidas dimensiones, los meteoroides evaden la detección remota de la mayoría de los telescopios contemporáneos antes de colisionar con la atmósfera terrestre. Es por este inconveniente que solo ha sido posible inferir algunas propiedades físicas y dinámicas de esta población a través de la observación de los fenómenos ópticos y de radio derivados de su interacción violenta con la atmósfera terrestre. De esta forma, la observación fotográfica de los fenómenos ópticos referidos ha permitido clasificar los objetos de esta población en tipo I, tipo II y tipo III de acuerdo a la

fragilidad inferida de sus densidades y coeficientes de ablación estadísticos. Sin embargo, para el propósito actual solo las categorías más consistentes, que son los tipos I y II, son de interés dada su estrecha relación con la caída de meteoritos. La categoría más frágil, que es la tipo III, es fundamentalmente de origen cometario y, debido a su baja resistencia mecánica, a su baja densidad y a su alto coeficiente de ablación inferidos, tiene una probabilidad mínima de llegar alguna vez a la superficie terrestre como meteoritos. En resumen, dado que la naturaleza y características de las subpoblaciones de meteoroides son hasta cierto punto desconocidas, el propósito de este capítulo es presentar un análisis que evidencie tipos probables y proporciones de las subpoblaciones de meteoroides precursores de meteoritos.

4.2. Poblaciones y Subpoblaciones

4.2.1. Poblaciones Básicas

Las poblaciones básicas de meteoroides son las que se deducen de la observación fotográfica de los fenómenos luminosos derivados de su interacción con la atmósfera terrestre. Cada una de ellas se caracteriza por el valor medio de la distribución de densidades de los objetos que las pueblan así como por los valores medios de los coeficientes de ablación σ . Las variables dinámicas como velocidades y parámetros orbitales también caracterizan a cada una de ellas. Estas poblaciones se denominan meteoroides del Tipo I, del Tipo II y del Tipo III. De estas tres poblaciones, las del Tipo I y del Tipo II son

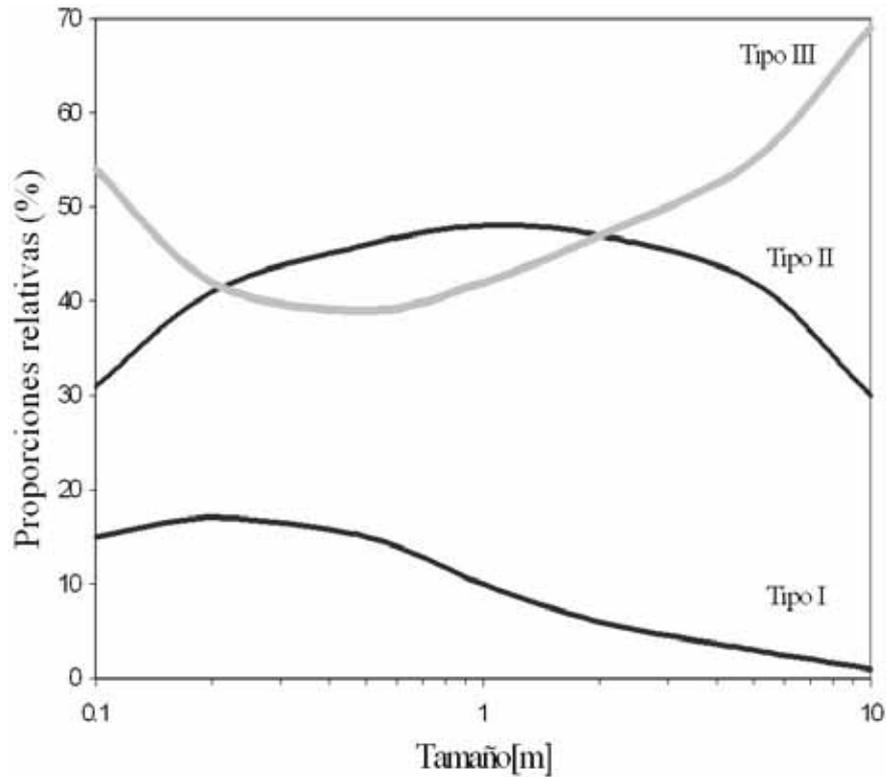


Figura 4.1: Frecuencia de las tres poblaciones básicas de Meteoroides como función de sus tamaños. (Gráfica resultado de este proyecto; datos de [23]).

de mayor importancia debido a su estrecha relación con la caída de meteoritos. La Figura 4.1 muestra las proporciones relativas respecto al total de estas poblaciones como función de sus dimensiones y la Tabla 4.1 resume sus propiedades así como su probable naturaleza asteroidal o cometaria. La misma tabla muestra las subpoblaciones de la población meteoroidal Tipo III.

La Figura 4.2 muestra la distribución de las presiones de fragmentación súbita de los meteoroides. En ésta se puede ver que estas presiones no son arbitrarias sino que se distribuyen en torno a valores

4.2 Poblaciones y Subpoblaciones

Tabla 4.1: Poblaciones meteoroidales tipo I y II, subpoblaciones tipo III, parámetros físicos y orbitales y naturaleza más probable. (Datos de [24]).

Tipo	$\rho(g/cm^3)$	$\sigma(s^2/km^2)$	$a(UA)$	e	$i(^{\circ})$	Naturaleza
I	3.7	0.017	2.4	0.68	6	Asteroidal
II	2.0	0.041	2.3	0.61	5	Aster/Comet
IIIA	0.75	0.10	2.4	0.82	4	Cometario
IIIAi	0.75	0.10	∞	0.99	indef	Cometario
IIIA[C3]	0.75	0.10	2.7	0.67	indef	Cometario
IIIB	0.27	0.21	3.0	0.70	13	Cometario blando

ρ es la densidad; σ el coeficiente de ablación; a el semieje mayor; e la excentricidad e i la inclinación.

medios preferenciales claramente distinguibles. Lo anterior parece evidenciar grupos de meteoroides de igual naturaleza o con propiedades físicas similares, justo como sucede con los meteoritos en las colecciones, por lo que la clasificación de estos grupos de meteoroides debe corresponder a la de los tipos de meteoritos más comunes en las colecciones.

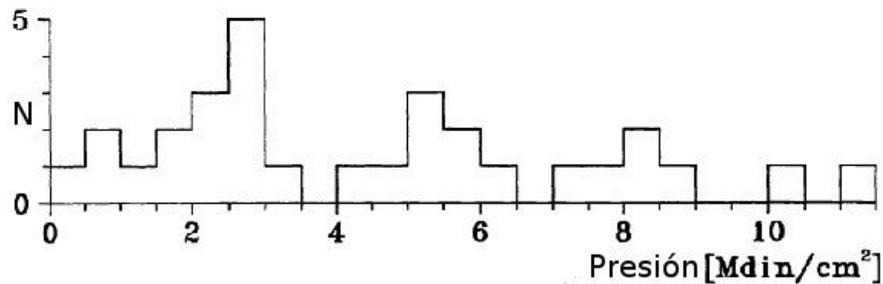


Figura 4.2: Distribución de las presiones aerodinámicas de fragmentación súbita de los meteoroides. (Gráfica de [24]).

La naturaleza de la gráfica en la Figura 4.2 no permite ver qué tipo

de meteoroides pueblan cada uno de los picos estadísticos. Sin embargo, la distribución de los coeficientes de ablación como función de la presión de fragmentación de la misma muestra de meteoroides muestra con toda claridad que la mayoría de estos picos están poblados fundamentalmente por meteoroides de los tipos I y II, que son justo los precursores de meteoritos (ver Figura 4.3). Los meteoroides tipo III, debido a su naturaleza cometaria, es decir, frágil, tienen una probabilidad casi nula de llegar a la superficie terrestre en forma de meteoritos por lo que, para el propósito actual, no son de importancia.

4.2.1.1. Subpoblaciones Tipo I

La Figura 4.3 muestra la distribución de los coeficientes de ablación como función de la presión de fragmentación de la misma muestra de meteoroides de la Figura 4.2. En ella se puede ver que los valores discretos de presión de fragmentación son característicos tanto de la población meteoroidal tipo I como de la tipo II. De acuerdo con la Tabla 4.1, la densidad media de la población de meteoroides tipo I es de 3.7 g/cm^3 , que es muy similar a la de las condritas ordinarias, por lo que las subpoblaciones mayoritarias de los meteoroides tipo I deben ser condritas ordinarias, seguidas por subpoblaciones de densidades similares o superiores y de frecuencias de caída no despreciables como son las tipo HED y metálicas, mixtas y de enstatita.

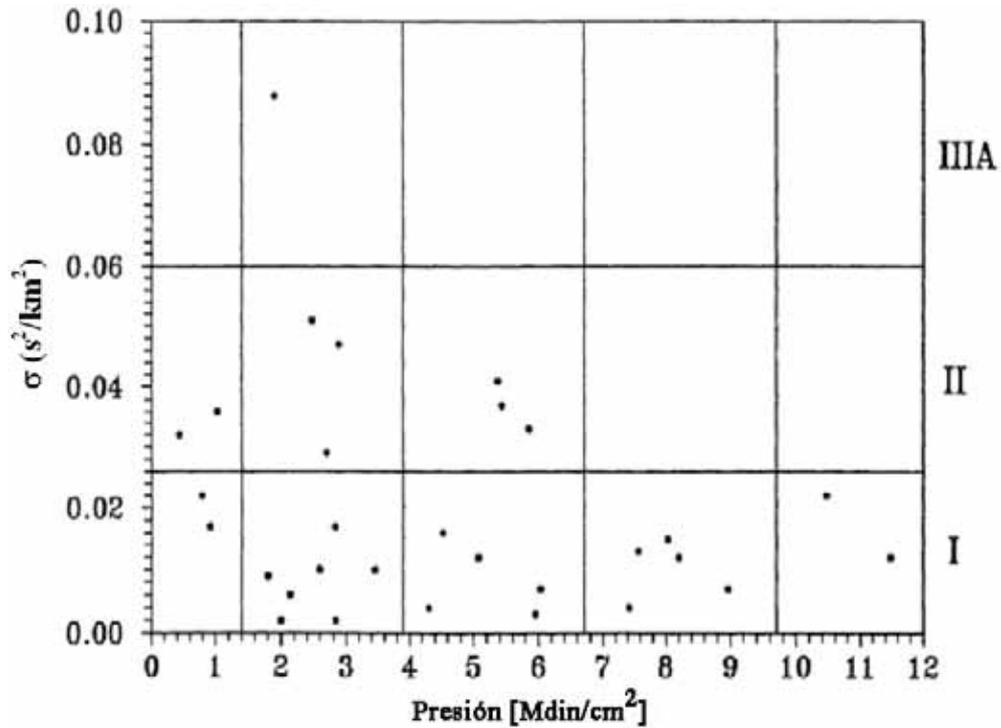


Figura 4.3: Distribución del coeficiente de ablación como función de la presión aerodinámica de fragmentación súbita; el lado derecho de la gráfica muestra los 3 tipos de meteoroides que tienen representación en ésta. (Gráfica de [24]).

4.2.1.2. Preliminares

Como se estableció anteriormente, la observación fotográfica de meteoroides en la atmósfera terrestre ha permitido clasificarlos en los tipos I, II y III. Las proporciones relativas de estas categorías básicas se muestran en la Figura 4.1 como función de sus dimensiones. Despreciando los tipo III como precursores de meteoritos por las razones ya expresadas, las características físicas y porcentajes relativos de las otras dos poblaciones básicas son las siguientes: los meteoroides tipo I muestran una densidad media de $3.7g/cm^3$ y un coeficiente de ablación de $0.017s^2/km^2$, y representan el 25 % del total tipo I +

tipo II; los meteoroides tipo II, por su parte, muestran una densidad de $2.0g/cm^3$, un coeficiente de ablación de $0.041s^2/km^2$, y representan el 75 % de esta misma población, definida en este trabajo como la precursora de meteoritos.

4.2.1.3. Flujo de COs, HEDs, Fe-Ni y Mixtos

En ausencia de la atmósfera terrestre la caída de meteoritos en la superficie de la Tierra sería igual al flujo de meteoroides del mismo tipo en su vecindad. En otras palabras, la presencia de la atmósfera terrestre es la causa de la diferencia de estos dos flujos. En concreto, tal diferencia es consecuencia de la acción combinada de la fragmentación y la ablación durante la interacción de los meteoroides con la atmósfera. Si es así, una aproximación al flujo de meteoroides progenitores de los meteoritos más notables (columna 1, Tabla 4.2) en las colecciones en la Tierra es posible bajo la siguiente suposición:

La fragmentación acentúa la degradación ablativa, reduciendo la probabilidad de que un meteoroides suficientemente grande llegue a la superficie como meteorito.

Si f_i y r_i son la frecuencia de caída y la resistencia mecánica de los meteoritos i , el enunciado anterior permite prever que el flujo F_i de los meteoroides correspondientes debe ser directamente proporcional a f_i e inversamente proporcional a r_i , es decir, $F_i \propto \frac{f_i}{r_i}$. Suponiendo, además, que los meteoroides tipo I se componen solamente de 11 tipos, los cuales corresponden a los 11 tipos de meteoritos

en la columna 1 de la Tabla 4.2, los flujos ponderados F_i de las subpoblaciones meteoroidales tipo i estarían dados por

$$F_i \propto \frac{\frac{1}{r_i} f_i}{\frac{1}{r_1} + \dots + \frac{1}{r_i} + \dots + \frac{1}{r_n}}. \quad (4.1)$$

donde i representa a cada uno de los tipos meteoroidales L, H, LL, FeNi, Euc, How, Dio, EH, Mes, EL y Pal. Así, para el caso particular de meteoroides tipo L

$$F_L \propto \frac{\frac{1}{r_L} f_L}{\frac{1}{r_L} + \dots + \frac{1}{r_i} + \dots + \frac{1}{r_{Pal}}}, \quad (4.2)$$

y así sucesivamente para el resto de las subpoblaciones. Las primeras cuatro columnas de la Tabla 4.2 muestra las propiedades físicas de los meteoritos de mayor interés, que indudablemente son la descendencia de los meteoroides tipo I, dada su densidad y resistencia mecánica sistemáticamente altas, comparadas con las de la población tipo II. Con la información contenida en la Tabla referida y la ecuación 4.1 es posible estimar numéricamente las proporciones de los meteoroides precursores de estos meteoritos. Los resultados se muestran en la columna 5 de la Tabla 4.2. Cada uno de los datos de esta columna se calcularon remplazando $1/r$ por VFR (tasa de fractura por vibración) ya que $VFR \propto 1/r$, como se explica más abajo. La suma de todos los valores de la columna han sido normalizados a 25 %, que es la proporción de los meteoroides tipo I.

Tabla 4.2: Propiedades físicas de los meteoritos más notables y proporción y tipo de los meteoroides tipo I asociados (Tabla resultado de este proyecto).

Tipo de meteorito	f(%)	$\rho(g/cm^3)$	VFR(mm/min)	F(%)
L	40.90	3.35	0.0762	13.63
H	36.71	3.4	0.0107	1.71
LL	8.50	3.2	0.2450	9.11
Fe-Ni	4.52	7.7	0.0043	0.085
Eucritas	2.91	2.86	0.0210	0.26
Howarditas	2.26	3.02	0.0122	0.12
Diogenitas	1.29	3.26	0.0034	0.02
EH	0.86	3.72	0.0034	0.012
Mesosideritas	0.75	4.25	0.0034	0.011
EL	0.75	3.55	0.0034	0.011
Palasitas	0.54	4.76	0.0034	0.008

Datos de Burbine et al. [18]; de Britt y Consolmagno [14] y de Miyamoto et al. [82]. VFR = Vibrational Fracturing Rate; medida de la resistencia mecánica de los meteoritos.

4.2.1.4. Tipos petrológicos de las Subpoblaciones CO

La Figura 4.2 muestra la distribución de las presiones de fragmentación súbita de los meteoroides en la Figura 4.1. Esta muestra que tales objetos se fragmentan para valores discretos preferenciales de este parámetro físico. De acuerdo con [23], los valores de las presiones medias de fragmentación son 0.8, 2.5, 5.3, 8.0 y 11 $Mdin/cm^2$. Esto se interpreta tácitamente como la manifestación de poblaciones subyacentes dentro de las poblaciones tipo I y II.

La Figura 4.3 muestra la distribución de los coeficientes de ablación de la misma muestra de la Figura 4.2 como función de la presión

aerodinámica de fragmentación súbita. Despreciando el único evento tipo III, se puede ver que los cinco valores de las presiones de fragmentación preferenciales en la Figura 4.2 están asociados probablemente con cinco subpoblaciones dentro de la población tipo I, y tres de ellos asociados probablemente con tres subpoblaciones de meteoroides dentro de la población tipo II. En resumen, por lo menos ocho subpoblaciones de meteoroides parecen evidenciarse dentro de la población de meteoroides precursores de meteoritos, las cuales se pueden designar provisionalmente por I1, I2, I3, I4, I5, II1, II2 e II3 de acuerdo a valores crecientes de la presión de fragmentación y atendiendo al tipo al cual pertenecen.

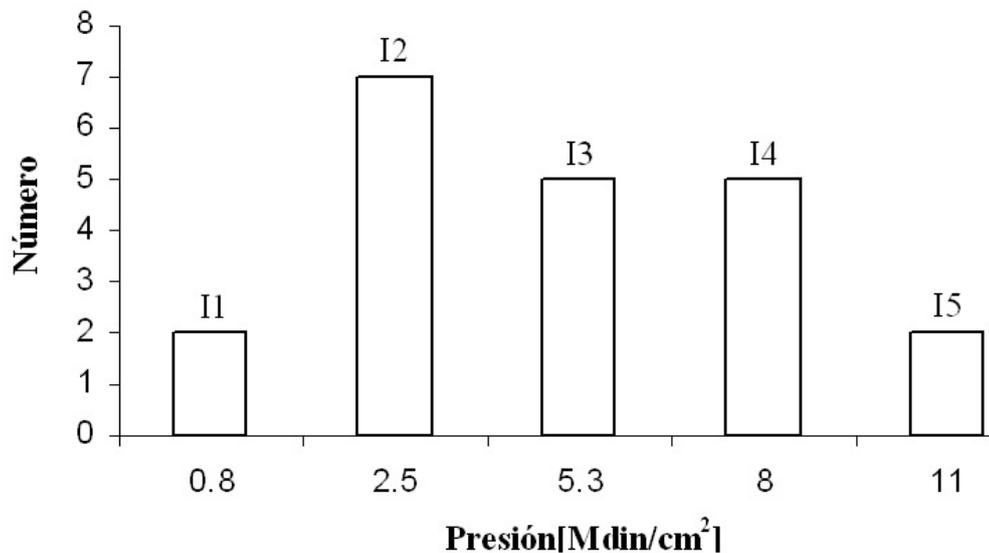


Figura 4.4: Frecuencia relativa de las diferentes clases de meteoroides tipo I, probablemente condritico-ordinarios, como función de su presión de fragmentación. (Gráfica resultado de este proyecto; datos de [24]).

Dada la importancia de los meteoroides tipo I en la Figura 4.3, la

Figura 4.4 muestra la distribución de las presiones de fragmentación de la muestra de meteoroides tipo I de la Figura 4.3.

Tabla 4.3: Tipos de meteoritos condrítico-ordinarios, resistencia mecánica y frecuencia de caída (Tabla resultado de este proyecto).

Tipo de CO	VFR(mm/min)	f(%)
LL5+LL6	0.245	3.36
L6	0.167	25.33
L5	0.021	8.23
L4	0.014	2.53
L3	0.011	1.9
H3+H4+H5	0.01	25.07
L3+L4	0.0086	1.18

Datos de Miyamoto et al. [82]

y de Burbine et al. [18]

La naturaleza de las poblaciones subyacentes se puede inferir del rango de presiones de fragmentación. De acuerdo con [94] y con una lista de seis meteoritos recuperados cuyas caídas fueron registradas ópticamente [8] (Figura 1.1), estas presiones están típicamente asociadas con meteoroides condrítico-ordinarios fundamentalmente. Además, esta observación se ve reforzada por el hecho de que el material condrítico-ordinario es el que tiene la frecuencia de caída más alta y una densidad media que es la más parecida a la de la población tipo I, por lo que probablemente esta población es principalmente condrítico-ordinaria. Si así es, entonces los tipos petrológicos de los meteoroides tipo I se pueden inferir comparando la distribución de sus presiones de fragmentación con la de las condritas ordinarias en las colecciones en tierra. Para este propósito la Tabla 4.3 muestra el

tipo, la resistencia mecánica (VFR) y la frecuencia de caída de las condritas ordinarias.

La técnica denominada Tasa de Fractura por Vibración o VFR fue desarrollada por [40] para medir la resistencia mecánica de los meteoritos. Esta consiste en excavar una superficie plana de una muestra meteorítica de $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ con una varilla de acero de 2mm de diámetro. La tasa de excavación en mm/min proporciona una medida de la resistencia mecánica de la muestra en cuestión de tal manera que, entre más pequeño sea el valor de VFR, mayor es la resistencia mecánica de la muestra y viceversa.

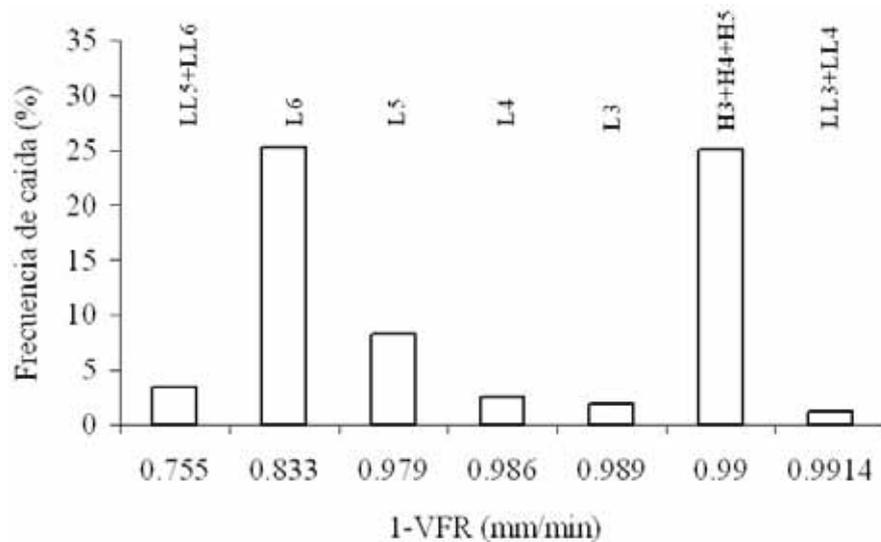


Figura 4.5: Frecuencia relativa de caída de los diferentes tipos de condritas ordinarias como función de su resistencia mecánica de la Tabla 4.3. Se ha graficado $1 - \text{VFR}$ ya que VFR es inversamente proporcional a la resistencia mecánica. (Gráfica resultado de este proyecto).

La Figura 4.5 muestra la frecuencia de caída de los tipos de condritas

ordinarias como función de su resistencia mecánica (1 - VFR), obtenida a partir de la Tabla 4.3. La suposición implícita al comparar las Figuras 4.4 y 4.5 es que los meteoroides condritico-ordinarios mecánicamente más débiles en la atmósfera superior son los precursores de las condritas ordinarias más débiles en la colecciones y viceversa. De esta forma, al comparar las Figuras 4.4 y 4.5 parece haber una correspondencia entre las cinco barras de la Figura 4.4 y las cinco primeras barras de la Figura 4.5. Suponiendo que esta correspondencia es real, esto conduce a la conclusión de que los meteoroides condritico-ordinarios de la Figura 4.4 tienen el mismo tipo petrológico que sus condritas ordinarias correspondientes en la Figura 4.5, es decir, I1 \equiv LL5/LL6, I2 \equiv L6, I3 \equiv L5, I4 \equiv L4, I5 \equiv L3.

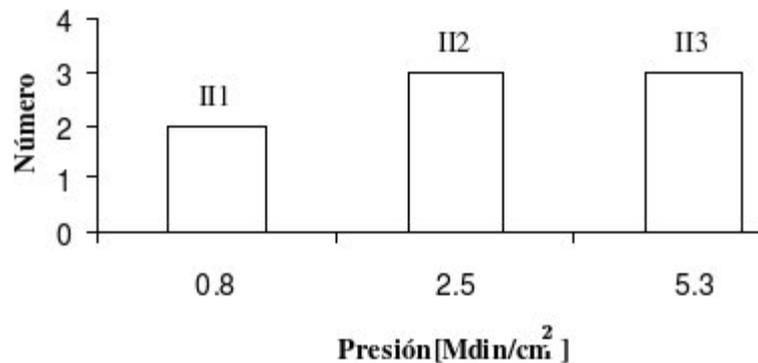


Figura 4.6: Frecuencia relativa de las tres clases de meteoroides tipo II, probablemente condritico-carbonáceos, como función de su presión de fragmentación. (Gráfica resultado de este proyecto; datos de [24]).

4.2.1.5. Subpoblaciones Tipo II

Igual que en el caso de la subpoblación tipo I, la Figura 4.6 muestra que los objetos de la población tipo II presentan una preferencia por las presiones de fragmentación 0.8, 2.5 y 5.3, lo cual se interpreta como evidencia de tres subpoblaciones de meteoroides tipo II. Para identificar la probable clasificación de estos subgrupos basta comparar la densidad media observada para la población tipo II con las densidades medias de las clases meteoríticas en la Tabla 4.1. Esta comparación indica que la población tipo II debe contener tres subpoblaciones mayoritarias condritico-carbonáceas, según su densidad y su coeficiente medio de ablación, y que las dos subpoblaciones con mayor resistencia mecánica deben corresponder a las condritas carbonáceas CI y CM ya que las densidades de estas dos clases de meteoritos, 2.1 y 2.12 g/cm^3 , coinciden satisfactoriamente con la densidad media de la población meteoroidal tipo II, que es de 2 g/cm^3 .

En lo que respecta a sus resistencias mecánicas relativas, aparte de que las condritas CI poseen una densidad sistemáticamente más baja que las CM, la experiencia al manipular muestras de los dos tipos de condritas indica que las CI son más frágiles que las CM. De esta forma se espera que $II2 \Rightarrow CI$ y $II3 \Rightarrow CM$. La clasificación probable de los II1 no es clara, por lo que ha sido designada CX; al parecer son CIs y CMs prefragmentados. En resumen, la Figura 4.7 muestra la clasificación probable de las subpoblaciones de meteoroides de los tipos I y II.

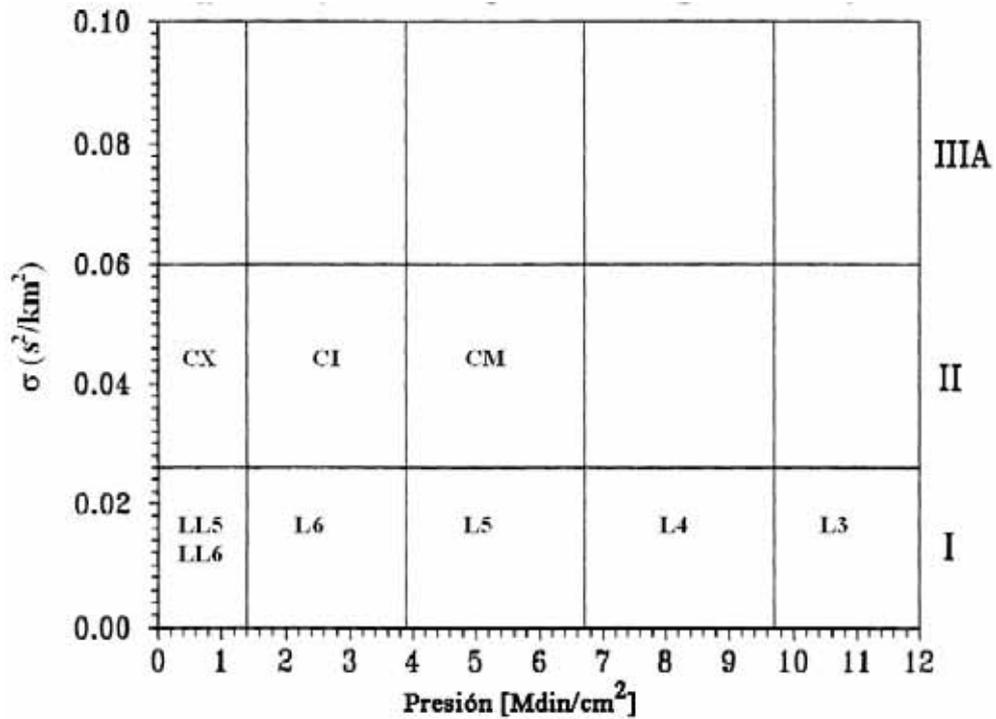


Figura 4.7: Clasificación probable de las subpoblaciones de meteoroides tipo I y tipo II. (Resultados de este proyecto).

4.2.1.6. Flujos de Meteoroides Carbonáceos

Como se observa en la Figura 4.1, los meteoroides tipo II, clasificados como CX, CI y CM, representan el 75 % de la población de meteoroides precursores de meteoritos. Si es así, entonces sus flujos relativos deben ser proporcionales a sus frecuencias respectivas en la Figura 4.6 que son 2, 3 y 3, respectivamente. De esta manera y en el mismo orden, los flujos esperados de meteoroides tipo II, CX, CI y CM, son 18.75 %, 28.125 % y 28.125 %. Un cálculo similar es posible para las subpoblaciones condritico-ordinarias. Sin embargo, la distribución de la Figura 4.4 al parecer está incompleta, por lo que un cálculo análogo es aventurado.

4.2.1.7. Subpoblaciones Tipo III

La población de meteoroides tipo III es fundamentalmente cometaria. Esto se deduce tanto de las propiedades orbitales como de las propiedades físicas observadas de los meteoroides de esta población, como son su baja resistencia mecánica, su baja densidad y su alto coeficiente de ablación. Esta población consta de las dos grandes subpoblaciones IIIA y IIIB (Figura 4.8). La primera está caracterizada por una densidad media de 0.75 g/cm^3 y un coeficiente de ablación de $0.1 \text{ s}^2/\text{km}^2$, y la segunda, por una densidad de 0.27 g/cm^3 y un coeficiente de ablación de $0.21 \text{ s}^2/\text{km}^2$. Debido a esto, al material de la primera subpoblación se le conoce como material cometario regular y al de la segunda, como material cometario suave. La primera subpoblación se subdivide aún más en las subpoblaciones orbitales IIIA, IIIA[C3] y IIIAi, lo cual podría reflejar la contribución de las tres poblaciones orbitales conocidas de cometas que son: los de período corto, o de la Familia de Júpiter; los de período intermedio, o de la Familia de Halley, y los de período largo, o de la Nube de Oort. La subpoblación IIIB es notable por su exceso anómalo entre 10 y 20 metros; probablemente esto evidencia las dimensiones típicas de los bloques estructurales de los núcleos cometarios que les dan origen.

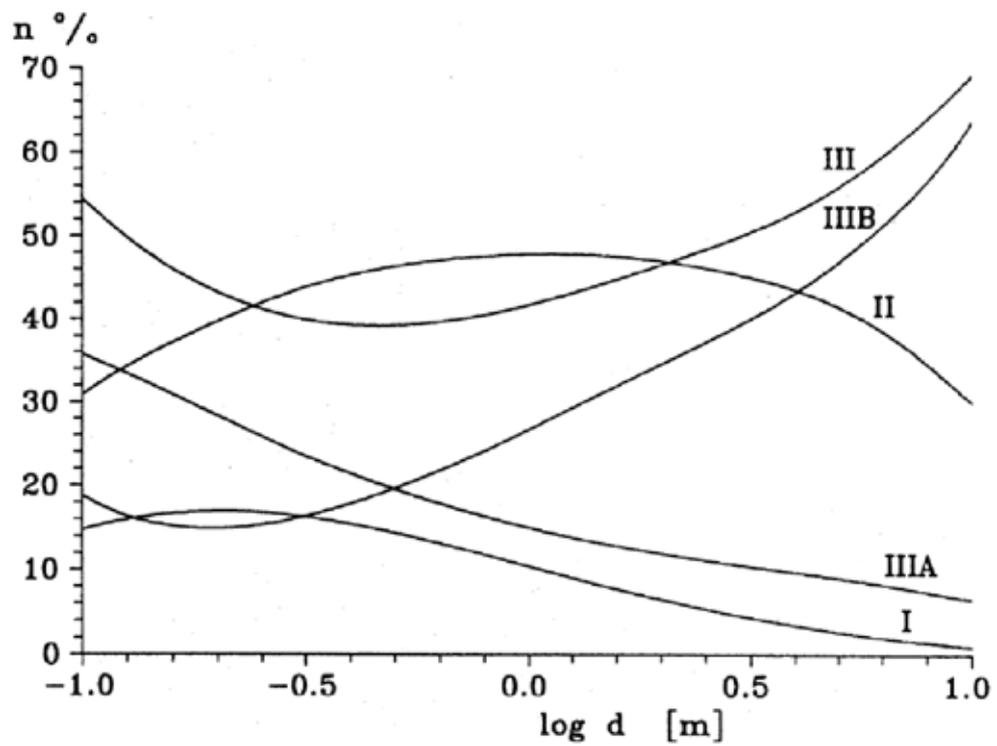


Figura 4.8: Proporciones relativas de meteoroides tipo I, tipo II, tipo IIIA y tipo IIIB como función de sus dimensiones (Gráfica de [23]).

Capítulo 5

Fuentes Probables de Meteoritos

5.1. Introducción

La función básica de las resonancias dentro del Cinturón es la de dispersar fuera del Cinturón todo fragmento asteroidal que circunstancialmente ingrese a ellas. Para mantener un flujo constante de fragmentos asteroidales hacia fuera del Cinturón se requiere de una producción constante de los mismos así como de un mecanismo que estimule su migración hacia las resonancias. Sin descartar la contribución de las colisiones asteroidales esporádicas, el mecanismo contemporáneo más eficiente para producir fragmentos asteroidales es el impactismo.

Con respecto a la alimentación de las resonancias con fragmentos asteroidales, aparte de los fragmentos dispersados por impactos en la vecindad inmediata de ellas, los mecanismos que garantizan un flujo constante de fragmentos hacia ellas son el Efecto Yarkovsky (Apéndice B) y la presión de la radiación solar. Estos mecanismos eminentemente fotométricos se encargan de proveer una fuerza pe-

queña pero constante sobre todos los asteroides y sus fragmentos.

Para un objeto asteroidal esférico de masa m , sección transversa A , radio R y albedo α , el flujo de la radiación solar ϕ ejerce una fuerza radial $F_r \propto (1 + \alpha)\phi$. Si además el objeto rota, la fracción de la radiación absorbida $(1 - \alpha)\phi$ da lugar al efecto Yarkovsky, el cual se traduce en una fuerza $F_y \propto (1 - \alpha)\phi$ perpendicular a su eje de rotación y que se distribuye a lo largo de $\sim 180^\circ$, con máxima intensidad durante su atardecer y mínima durante su amanecer. Así, como la aceleración a sufrida por el objeto es proporcional a A e inversamente proporcional a m , tenemos que $a \propto 1/R$. Es decir, estas fuerzas son más eficientes conforme las dimensiones de los cuerpos afectados son menores, de ahí que los precursores meteoríticos sean empujados con mayor facilidad hacia las resonancias.

Como la fuerza de Yarkovsky F_y es el resultado de la fracción de la radiación absorbida $(1 - \alpha)\phi$, cualquiera que sea su sentido en ningún caso supera la magnitud de la fuerza centrífuga F_r . En consecuencia, la fuerza neta sobre los meteoroides y asteroides afectados es proactiva, ocasionando siempre un incremento secular del semieje mayor de dichos cuerpos.

Sin menospreciar la contribución minoritaria de las resonancias más externas del Cinturón como exportadoras de fragmentos asteroidales, las más eficaces son la 3 : 1 de movimiento medio con Júpiter y la secular ν_6 (Apéndice A), cuyas contribuciones respectivas son del 23 y 37 % [46]. Dada la importancia de estas dos resonancias, es me-

nester identificar los asteroides más grandes en la vecindad de éstas, ya que su cercanía a ellas así como sus dimensiones los convierten en los principales tributarios de fragmentos hacia las mencionadas resonancias y, por lo tanto, en las fuentes más probables de los meteoritos en las colecciones en la Tierra.

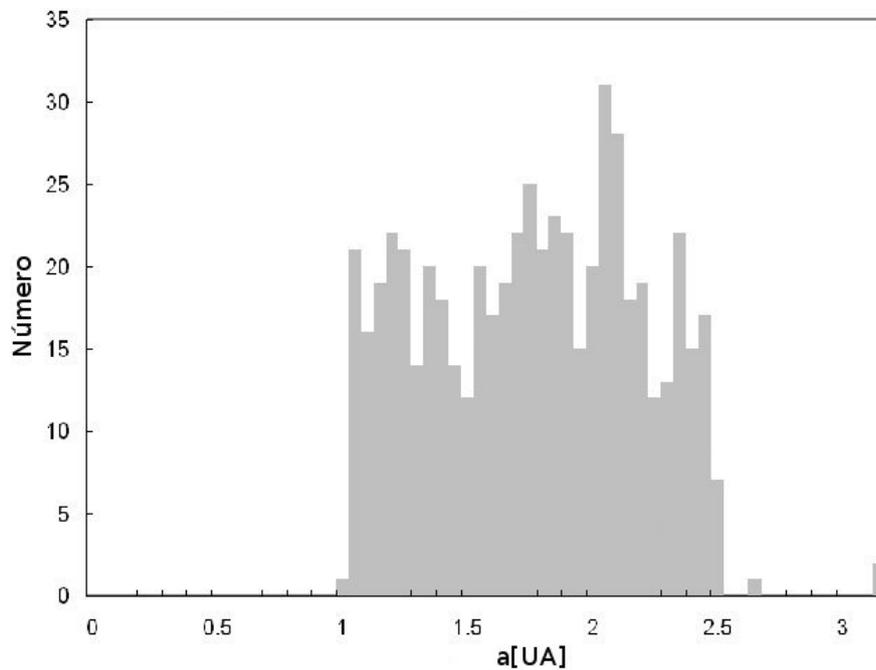


Figura 5.1: Distribución de semiejes mayores de los Meteoroides Asteroidales (Gráfica resultado de este proyecto; datos de Meteoros Fotográficos del IAU.MDC).

Aparte de las resonancias 3:1 y ν_6 , otra de las grandes fuentes de fragmentos asteroidales, tan eficaz como las dos anteriores, es la región ubicada entre Marte y el límite inferior de la resonancia ν_6 . Esta región es alimentada constantemente por esta última resonancia, por las resonancias con Marte, por las resonancias débiles de

orden superior con Júpiter y por otras minoritarias más (Apéndice A); su contribución a la población de fragmentos asteroidales que cruzan la órbita terrestre (NEAs) es del 25 %. Como es de esperarse, debido a la inmediatez y a la posición relativa de la órbita terrestre, esta población de fragmentos asteroidales, conocida como Cruzadores de la órbita de Marte (MCs), emigran naturalmente hacia la órbita terrestre debido a perturbaciones de Marte, convirtiéndose así en cruzadores de la misma o NEAs; Figura 5.2.

La Figura 5.1 muestra la distribución de semiejes mayores de los meteoroides fotográficos del IAU Meteor Data Center (IAU_MDC). En ella se observa que éstos no exceden la posición de la resonancia 3:1 a 2.5 UA, lo cual justifica menospreciar las resonancias exteriores 5:2, 7:3 y la 2:1 a 2.82, 2.95 y 3.27 respectivamente (Apéndice A), como tributarias de material meteorítico y en cambio enfatizar la importancia de la resonancia de movimiento medio con Júpiter 3 : 1, de la resonancia secular ν_6 y de la población MC como tributarias fundamentales de meteoritos.

5.2. Fuentes Asteroidales no Identificadas

5.2.1. La resonancia 3:1

Una de las características más comunes de los asteroides asociados con meteoritos es que están ubicados cerca de alguna de las resonancias de movimiento medio o de las seculares, sobre todo cerca de la resonancia 3:1 (Apéndice A), lo cual sugiere que cualquier asteroide

cerca de estas resonancias es potencialmente exportador de meteoritos, sobre todo los de grandes dimensiones ya que entre mayor es su área, mayor es la tasa de impactos recibidos.

La resonancia 3:1 con Júpiter se ubica a 2.5 UA. Para la minoría de fragmentos asteroidales dentro de esta resonancia que no son lanzados en órbitas hiperbólicas o a colisionar directamente con el Sol, el tiempo medio que les lleva en migrar hacia la órbita terrestre es del orden de 1 Ma, y la vida media en esta región, del orden de 2.2 Ma.

La Tabla 5.1 enlista los nombres (col. 1 y 5), las dimensiones (col. 2 y 6), el tipo (col. 3 y 7) y la tasa anual esperada de impactos (col. 4 y 8), en el mismo orden, para los 52 asteroides del Cinturón con diámetro mayor de 150 km dentro de la resonancia 3:1 con Júpiter, ya que su ubicación y tamaño los convierten en las fuentes más probables de meteoritos de esta región multiasteroidal.

5.2.2. La resonancia secular ν_6

La resonancia secular ν_6 tiene lugar cuando la frecuencia de precesión de la longitud del perihelio de los fragmentos asteroidales es igual a la frecuencia de precesión de la longitud del perihelio de Saturno (Apéndice A). A ésta también se le conoce como la sexta frecuencia secular del Sistema Planetario. Esta resonancia se ubica entre 1.8 y 2.5 UA y afecta a objetos con inclinaciones ente 0 y 10° a 1.8 UA y hasta de entre 15 y 20° a 2.5 UA. El tiempo medio que les toma a los objetos en esta resonancia en convertirse en cruzadores

de la órbita terrestre es de 2 Ma y el tiempo medio como cruzadores de 6.5 Ma.

Como en el caso anterior, la Tabla 5.2 enlista los nombres, las dimensiones, el tipo y la tasa anual esperada de impactos para los 50 asteroides más grandes dentro de esta resonancia ya que, como en el caso anterior, sus características y ubicación los convierten en las fuentes más probables de meteoritos dentro de esta región del Cinturón Principal.

5.2.3. Asteroides que cruzan la órbita de Marte

Aparte de las resonancias 3:1 y ν_6 , otra fuente multiasteroidal de eficiencia comparable es la región ubicada entre 1.3 y 1.8 UA. A los objetos de esta población se les conoce como Cruzadores de la Órbita de Marte. Esta región es alimentada constantemente por la resonancia secular ν_6 así como por las múltiples resonancias de movimiento medio con Marte (Apéndice A). Se estima que esta población es 4 veces más numerosa que la población que constantemente cruza la órbita terrestre [46]. El tiempo medio que les toma a estos objetos cruzar la órbita terrestre es de ~ 60 Ma y la vida media en la región de los objetos que cruzan la órbita terrestre, de ~ 3.75 Ma [46].

Como en los casos precedentes, la Tabla 5.3 enlista los nombres, las dimensiones, el tipo y la tasa anual esperada de impactos para los 50 asteroides más grandes de esta población ya que, como en los dos casos anteriores, sus características y ubicación los convierten

en las fuentes más probables de meteoritos de dicha población.

Los flujos de impactores en Ida, Mathilde y Gaspra, cuyo promedio se utilizó para estimar la razón anual de impactos en las Tablas 5.1, 5.2 y 5.3, fueron calculados por Jeffers y Asher [63] usando el código colisional de Manley, Migliorini y Bailey [73], el cual proporciona la probabilidad de colisión entre dos cuerpos en órbitas arbitrariamente elípticas así como la distribución de probabilidad de las velocidades de impacto. Con respecto a la distribución de impactores, los autores utilizaron la de Durda, Greenberg y Jedicke [36] con 9.7×10^{11} objetos con diámetros de 1m o mayores. Las condiciones iniciales requeridas por el código son el semieje mayor, la excentricidad y la inclinación de cada órbita; al resto de los parámetros les asigna valores promedio.

5.2.4. Asteroides que cruzan la órbita terrestre o NEAs

5.2.4.1. Tasa Media de Impactos entre la Población de NEAs

Los Asteroides que Cruzan la órbita Terrestre, dada su cercanía a la Tierra así como por ser objetos que periódicamente se internan en el Cinturón en donde el flujo de impactos es apreciablemente mayor, se convierten necesariamente en fuentes secundarias de meteoroides y de meteoritos. La observación fotográfica de meteoroides en la atmósfera terrestre pone en evidencia relaciones orbitales entre meteoroides y algunos asteroides de esta población, lo cual confirma la deducción anterior. El cálculo de la tasa media de impactos en esta población asteroidal favorece igualmente esta deducción.

De acuerdo con Neukum et al. [88], durante los últimos mil millones de años (1 Ga) durante los cuales la tasa de impactos en la Luna ha sido aproximadamente constante, la distribución acumulada de cráteres en ésta está dada por

$$\log N = a_0 + a_1 \log D + a_2 (\log D)^2 + \dots + a_{11} (\log D)^{11} \quad (5.1)$$

donde D es el tamaño del cráter en km, N es el número de cráteres por kilómetro cuadrado con diámetro mayor que D , $a_0 = -3.0876$, $a_1 = -3.557528$, $a_2 = 0.781027$, $a_3 = 1.021521$, $a_4 = -0.156012$, $a_5 = -0.444058$, $a_6 = 0.019977$, $a_7 = 0.08685$, $a_8 = -0.005874$, $a_9 = -0.006809$, $a_{10} = 0.000825$, and $a_{11} = 0.0000554$. Si $D = 0.01$ km, la ecuación implica que un área lunar de mil millones de años posee una densidad de cráteres de $N(D > 0.01\text{km}) = 3700/\text{km}^2$. Para el caso de la Luna, la relación entre un cráter de diámetro D hecho por un impactor de diámetro d está dada por

$$d = 9,77 \rho_i^{-0,5356} \rho_m^{0,5952} v_i^{-0,666} D^{1,19} (mks) \quad (5.2)$$

(Melosh [79]), donde $\rho_i = 2200\text{kg}/\text{m}^3$ y $v_i = 10^4\text{m}/\text{s}$ son la densidad media y la velocidad media de impacto de los NEAs con la Luna y $\rho_m = 2400\text{kg}/\text{m}^3$, la densidad media de la Luna, según Jeffers et al.[64]. Reemplazando estos valores en la ecuación anterior se encuentra que un cráter de aproximadamente 500 m de diámetro es hecho por un impactor típico de 50 m, lo cual justifica la aproximación $d = 0.1D$. El último resultado implica que, en la vecindad de la órbita

5.2 Fuentes Asteroidales no Identificadas

terrestre, el flujo de impactores con diámetro $> d$ estaría dado por $n_t = N(D > 0.01 \text{ km})/1 \text{ Ga}$, o

$$n_t(d > 1m) = 3.7 \times 10^{-6} \text{km}^{-2} \text{año}^{-1}. \quad (5.3)$$

Por otro lado, puesto que los NEAs retroceden periódicamente al Cinturón Principal poblado por exceso de fragmentos asteroidales, el flujo de impactos al cual están sujetos dentro del Cinturón es del orden de

$$n_c(d > 1m) = 7.336 \times 10^{-6} \text{km}^{-2} \text{año}^{-1}, \quad (5.4)$$

según lo estimaron Jeffers y Asher [63] para Gaspra, dada la similitud orbital de este asteroide con la mayoría de los asteroides Apolo y Amor. Así, estos últimos están sujetos a un flujo medio de impactos de

$$n(d > 1m) = [n_t(d > 1m) + n_c(d > 1m)]/2 \quad (5.5)$$

o,

$$n(d > 1m) = 5.556 \times 10^{-6} \text{km}^{-2} \text{año}^{-1}. \quad (5.6)$$

Por otro lado y de acuerdo con la Tabla 5.4, el área total estimada para la población de NEAs es de $8.92 \times 10^8 \text{ km}^2$, de donde la razón esperada de impactos en la población completa por objetos de 1 m o más de diámetro sería de 4900 año^{-1} . Esta alta tasa de impactos

en la población de NEAs explica satisfactoriamente la observación de corrientes de fragmentos siguiendo órbitas que son típicas de los Asteroides Cercanos a la Tierra o NEAs.

La Figura 5.3 muestra las órbitas promedio de la Tabla 5.5, seguidas por cinco corrientes de meteoroides de probable origen asteroidal, las cuales serían el resultado de los impactos recibidos, quizá en el último siglo, de acuerdo con la razón de impactos estimada anteriormente.

Indudablemente que la presencia de corrientes de meteoroides con órbitas que se agrupan en torno a órbitas promedio como las que muestra la Figura 5.3 son consecuencia de los impactos aleatorios sobre la población de Asteroides Cercanos a la Tierra, en congruencia con la tasa estimada de impactos para esta población. Sin embargo, la presencia de subcorrientes de meteoroides compuestas comúnmente por 2 y 3 fragmentos siguiendo una órbita común dentro de la estructura de una corriente superan la tasa estimada de impactos aleatorios, dado que estas subcorrientes son en sí mismas evidencia de varios impactos recientes en el mismo cuerpo, quizá de entre 3 y 9 por siglo, según se deduce del mínimo y máximo número de subcorrientes en la Tabla 5.6. La explicación más natural a esta observación es que el asteroide reimpactado ha cruzado cíclicamente una corriente espacial de fragmentos densa, muy probablemente una corriente de fragmentos cometarios. Consecuentemente, por cada impacto recibido, una subcorriente de fragmentos ha sido creada. La Figura 5.4 muestra 11 órbitas meteoroidales dentro de la

corriente S1 (Tabla 5.6), conformando 5 subcorrientes. La corriente S2 muestra 4 subcorriente y la S3 muestra 3.

En cuanto a la identificación de NEAs asociados con las diferentes corrientes de meteoroides, no es una tarea sencilla. Una de las razones es que las dimensiones de los NEAs son relativamente pequeñas, pues solo 11 de ellos exceden los 5 km, teniendo la inmensa mayoría dimensiones abajo de 1 km. Otra de las razones es que, de acuerdo a la Tabla 5.4, la mayor parte del área de los NEAs y, consecuentemente la mayor tasa de impactos, está concentrada en los asteroides de menos de 1 km de diámetro. Por lo tanto, se espera que la mayoría de las corrientes de meteoroides esten asociadas con asteroides pequeños, que por sus reducidas dimensiones no están registrados en las bases de datos, lo cual dificulta identificar dicha asociación. A pesar de estas dificultades, la sociación de los asteroides 2004TG10 (390 - 880 m) y 2002XM35 (70 - 160 m) con la corriente de meteoroides S3 es evidente en la Figura 5.5 y la Tabla 5.5; 2002XM35 muestra ya un ligero desplazamiento en Ω con respecto a S3.

5.2.5. Métodos y criterios

La identificación de corrientes meteoroidales en órbitas típicas de NEAs, algunas de ellas con subcorrientes estructurales, es un hallazgo relevante que ha dado lugar al artículo titulado “Streamlets within meteoroid streams on NEA orbits”, publicado en la revista Geofísica Internacional. El proceso seguido para identificarlas consiste de tres pasos: a) Suponer la existencia de grupos de órbitas

meteoroidales con parámetros orbitales idénticos pero dispersas en la base de datos del IAU_MDC y, por lo tanto, no visibles; b) ordenar todas las órbitas de la base de datos con respecto a los valores de alguno de los parámetros para motivar el agrupamiento de todas las órbitas cuyos parámetros orbitales poseen valores similares, y c) revisar visual y detenidamente toda la base de datos para identificar todas las agrupaciones orbitales así formadas. Una revisión particularizada a las agrupaciones de más de tres órbitas permitirá identificar posibles subagrupaciones o subcorrientes. El fundamento de la eficacia de este método radica en que el patrón visual de las agrupaciones de órbitas concordantes es claramente distinguible del patrón del resto de las orbitas vecinas por ser discordantes. Todas las asociaciones orbitales detectadas por este método cumplen satisfactoriamente con el criterio D' de Drummond [35] de asociación orbital cercana, incluyendo la asociación de los asteroides 2002XM35 y 2004TG10 con la corriente de meteoroides S3. Este criterio, expresado en términos de la diferencia de los parámetros orbitales de las orbitas comparadas, define una relación cercana entre ellas si $D' < 0.105$. Si $e_1, e_2, q_1, q_2, i_1, i_2, \omega_1, \omega_2, \Omega_1$ y Ω_2 son los parámetros orbitales de las órbitas 1 y 2, respectivamente, el criterio D' de Drummond queda expresado por

$$D'^2 = \left(\frac{e_1 - e_2}{e_1 + e_2}\right)^2 + \left(\frac{q_1 - q_2}{q_1 + q_2}\right)^2 + \left(\frac{\psi}{180^\circ}\right)^2 + \left(\frac{e_1 + e_2}{2} \frac{\theta}{180^\circ}\right)^2, \quad (5.7)$$

donde $\psi = \arccos[\cos i_1 \cos i_2 + \sin i_1 \sin i_2 \cos(\Omega_1 - \Omega_2)]$ y $\theta = \arccos[\sin \phi_1 \sin \phi_2 + \cos \phi_1 \cos \phi_2 \cos(\xi_1 - \xi_2)]$; $\phi = \arcsin(\sin i \sin \omega)$ y $\xi = \Omega + \arctan(\cos i \tan \omega)$. Si $90^\circ < \omega < 270^\circ$, ξ se incrementa en

180°.

Para las subasociaciones SS1* de la Tabla 5.6, $D' < 0.029$; para las SS2* de la misma Tabla, $D' < 0.0245$, y para las SS3*, $D' < 0.03$. En lo que respecta a la asociación S1/SS1*, $D' < 0.0365$; para la S2/SS2*, $D' < 0.099$, y para la S3/SS3*, $D' < 0.0462$. Finalmente, para las asociaciones S3/2002XM35 y S3/2004TG10, $D' = 0.016$ y 0.072 , respectivamente.

5.3. Fuentes Asteroidales Identificadas

5.3.1. Introducción

Dado que los asteroides son objetos distantes y de diversas clases y tamaños, no es posible adjudicarle a ninguno categóricamente la paternidad de ningún meteorito. Sin embargo, recurriendo a los métodos de comparación de las propiedades orbitales, fotométricas y espectrales de los asteroides con las de los meteoritos, es posible reunir evidencias que apunten hacia una probable relación genética ya sea entre clases de asteroides y clases de meteoritos, o entre asteroides individuales y grupos de meteoritos o meteoritos individuales.

No todos los asteroides tienen representación meteorítica. Algunos asteroides, notables por su tamaño o número, están subrepresentados o no tienen representación alguna en las colecciones de meteoritos. En otras palabras, la diversidad de asteroides potencialmente exportadores de meteoritos excede la diversidad de meteoritos en las colecciones, ejemplos son 44 Nysa, 349 Dembowska, 113 Amalthea

así como los asteroides S(II), S(VI) y S(VII).

Las siguientes secciones describen las asociaciones meteorítico-asteroidales comunmente citadas en la literatura.

5.3.2. Fuentes probables de condritas ordinarias

Los asteroides S(IV) se han caracterizado por ser similares a las condritas H, L y LL en su composición olivino-piroxeno [57].

Asteroides tipo Q. Los análogos espectrales más cercanos a las condritas ordinarias son los asteroides raros Q cercanos a la tierra que son 1862 Apolo, 2368 Beltrova, 1981 QA y 1980 WF.

433 Eros. Para este asteroide, que es un tipo S típico, los cocientes de las composiciones químicas derivadas Mg/Si, Al/Si y Fe/Si se traslapan con los cocientes medidos para las condritas ordinarias L y LL, por lo que se considera condritico ordinario. Sin embargo, cabe mencionar que las proporciones S:Si de rayos x, y Fe:O y Fe:Si de rayos gama difieren con respecto a las de las condritas ordinarias.

1862 Apolo. Este asteroide muestra una composición superficial idéntica a la de la condrita ordinaria LL4 Soko-Bonja, por lo que es altamente probable que sea su progenitor [71].

Asteroide 6 Hebe. A las condritas H se les asocia persistentemente con 6 Hebe, asteroide del Cinturón Principal de 180 km. Probable-

mente este asteroide es su progenitor [44].

7 Iris. El espectro del asteroide S(IV) 7 Iris es análogo al de la condrita ordinaria Drake Creek.

5.3.3. Fuentes probables de condritas carbonáceas

Asteroides G/B/C/F/K. Aunque los asteroides tipo G/B/C/F como Ceres y Pallas muestran un espectro visible e infrarrojo cercano más plano que las condritas CI, CM y CR, pueden ser sus progenitores. Las diferencias espectrales posiblemente se deben a la pérdida de partículas finas de la superficie de dichos asteroides [56].

Asteroides P. Los asteroides más externos del cinturón, P y D, son oscuros, rojos y muy rojos, generalmente no hidratados y sin estructura espectral; probablemente están formados de material primitivo. No existen meteoritos directamente análogos a los asteroides P; los más citados son las condritas carbonáceas CI, ricas en orgánicos y polvo cósmico.

Los asteroides K parecen ser similares a las condritas CV y CO [57].

El asteroide 2 Pallas tiene un parecido muy cercano a las condritas CR [75].

19 Fortuna y 13 Egeria han sido identificados como probables

progenitores de las condritas CM, en particular de las CM2. Estos asteroides poseen la banda de absorción en 0.7mm, pendiente espectral similar a las condritas CM y la fuerte absorción en $3 \mu\text{m}$. Egeria y Fortuna, clasificados como tipo G poseen diámetros mayores a los 200 km y están ubicados cerca de la resonancia 3:1 [18].

Asteroide 221 Eos. Los datos de este asteroide, comparados con los espectros meteoríticos disponibles, revelan una similaridad con las condritas CV y CO [18]. Las ureilitas tampoco se descartan.

368 Haidea. De los asteroides tipo P y D, que son los mejores candidatos a progenitores del meteorito Tagish-Lake, el asteroide 368 Haidea, que es del tipo D, se ha encontrado ser espectralmente análogo a este meteorito primitivo [58]. Haidea está situado aproximadamente 0.2 UA dentro de la resonancia 2:1 y a 0.114 UA fuera de la resonancia 7:3. Su localización es muy similar a la de Vesta que está, aproximadamente, 0.2 UA dentro de la región de la resonancia 3:1 con Júpiter.

5.3.4. Fuentes probables de condritas de enstatita

Asteroides E. Los asteroides tipos E, como 3103 Eger, son excelentes análogos a las condritas de enstatita; otras posibles son las aubritas [18].

5.3.5. Fuentes probables de acondritas

Asteroides S. Son probablemente los más complejos. Su espectro muestra cantidades similares de olivino y piroxeno, y una componente metálica importante. Sus análogos típicos son las palasitas; otros meteoritos análogos son las ureilitas, braquinitas, siderofiritas y winonaitas.

Asteroides A. La clase rara A de olivino probablemente se derivan de los mantos de cuerpos altamente diferenciados; sus análogos meteoríticos son las braquinitas, extremadamente raras. Otros meteoritos sugeridos como análogos son las palasitas [18].

Marte. Las características espectrales de las acondritas Shergottitas, Nakhlaitas y Chassignitas (SNC) son consistentes con las de la superficie de Marte [74], en particular las de la región de Olympus Mons.

Vesta. La mejor concordancia entre asteroides y meteoritos son los tipo V con las acondritas basálticas HED [76], en particular con la eucrita Jonsac; otros meteoritos sugerido como análogos son las palasitas, posiblemente también las mesosideritas y ureilitas. Existe un asteroide tipo V cercano a la Tierra que es 1986 DA.

5.3.6. Fuentes probables de meteoritos metálicos

Asteroides M. La clase M muestra características espectrales de casi puro fierro-níquel; algunos cruzan la órbita terrestre. Dos de

ellos muestran minerales hidratados en su superficie; es muy probable que sean los progenitores de los meteoritos metálicos [18].

5.3.7. Fuentes probables de meteoritos mixtos

Estos incluyen las palasitas y las mesosideritas. Las palasitas provienen de la transición manto-núcleo de cuerpos diferenciados y se clasifican en tres grupos distintos: Grupo Principal, Eagle Station y Grupo de Piroxeno. Las mesosideritas son mezclas de metal y silicatos, resultado del impacto de un fragmento metálico en la superficie de un asteroide basáltico. Su composición isotópica de oxígeno es indistinguible de la de los HED [18].

5.4. Fuentes Planetarias

5.4.1. Introducción

En esta sección se denominan fuentes planetarias a los planetas terrestres y a la Luna, ya que todos estos tienen una probabilidad no despreciable de ser el origen de alguno o algunos de los meteoritos en las colecciones.

5.4.2. Los planetas terrestres

De acuerdo con [47], la eficiencia con la que los meteoritos marcianos son enviados a la Tierra es de 7.5 %, y como en las colecciones actualmente el número de meteoritos lunares es similar a los marcianos (31 y 37), se concluye que las eficiencias de ambos cuerpos

deben ser similares, por lo que provisionalmente es posible asignarle a la Luna la misma eficiencia de Marte de 7.5 %. En el caso de Mercurio, su eficiencia es del orden de 0.5 %. Si además, suponemos que el flujo de impactores es el mismo [47] para todos los planetas terrestres, el número esperado de meteoritos mercurianos debe ser 6.7 % del número de los marcianos. Es decir, si actualmente se conocen del orden de 40 meteoritos marcianos, el número de mercurianos debe ser entre 2 y 3. Por otro lado, de acuerdo a las simulaciones de [47] se espera que la Tierra acrete con mayor eficiencia su propio material que el de Venus, por lo que es de esperarse un mayor número de meteoritos terrestres que venusinos; los mejores candidatos son las rocas anómalas encontradas en los hielos de la Antártida.

Por otro lado, de acuerdo a las simulaciones de [78], el material salido de Mercurio en su mayoría es acretado por el planeta mismo o degradado en el espacio por colisiones con meteoroides menores, por lo que muy poco logra cruzar las órbitas de otros planetas. En cuanto al material venusino, en su mayoría es reacretado por el planeta, aproximadamente 30 % cae a la Tierra en un tiempo mediano de 12 Ma, del resto, un porcentaje mínimo cae en Marte y $\sim 20\%$ es lanzado del Sistema Solar por Júpiter [78]. También el material terrestre en su mayoría es acretado por la Tierra, un 30 % cae en Venus en ~ 15 Ma y 5 % cae en Marte en aproximadamente 150 Ma. Como en el caso anterior, cerca del 20 % de esta material es lanzado del Sistema Solar por Júpiter [78].

Por otro lado, de acuerdo a las integraciones numéricas y los re-

sultados de [45], se estima que de 2 - 5 % del material mercuriano expulsado a alta velocidad es acregado por la Tierra en aproximadamente 30 Ma, esto es, aproximadamente un orden de magnitud más de lo estimado por [47], y con una eficiencia de casi la mitad de la de Marte. Los meteoroides candidatos son los que ingresan a la atmósfera terrestre preferencialmente por la mañana y con velocidades entre 15 - 30 km/s. Las angritas son considerados como probables meteoritos mercurianos.

Con respecto a la asociación meteorítico-asteroidal, la Tabla 5.7, reproducida de la original de Burbine et al. [18], presenta uno de los mejores resúmenes de la mencionada asociación.

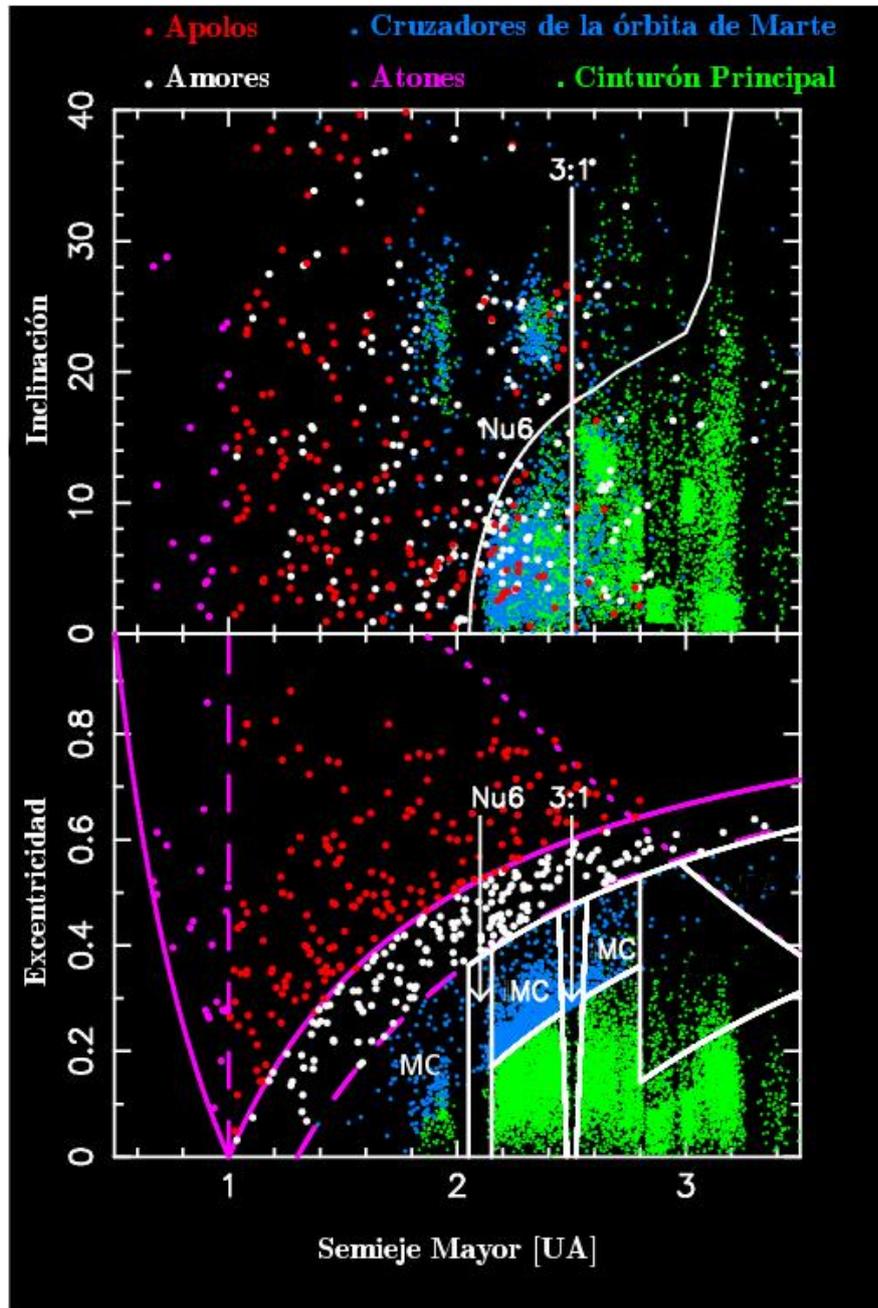


Figura 5.2: La figura muestra la ubicación de las principales fuentes multias-
teroidales que son: la población de asteroides que cruzan la órbita de Marte o
MC, la resonancia secular ν_6 y la de movimiento medio con Júpiter 3:1. (Gráfica:
www.oca.eu/morby/ESA/neo_aeai.png).

5.4 Fuentes Planetarias

Tabla 5.1: Los 52 asteroides más grandes dentro de la resonancia 3:1 cuya ubicación y razón de impactos los convierten en los principales exportadores potenciales de meteoritos dentro de esta región.

Nombre	D(km)	Clase	Imp/año	Nombre	D(km)	Clase	Imp/año
Hebe	185.2	S	0.646	Julia	151.5	S	0.432
Nemausa	147.9	G	0.412	Melpomene	140.6	S	0.372
Zelinda	127.4	C	0.305	Artemis	119.1	C	0.267
Athamantis	109.0	S	0.223	Tercidina	94.1	S	0.166
Tamara	93.0	C	0.162	Klio	79.2	G	0.118
Svea	77.8	C	0.114	Phocaea	75.1	S	0.106
Olga	67.9	C	0.086	Nephtys	67.6	S	0.086
Baucis	62.4	S	0.073	Backlunda	52.0	C	0.050
Celuta	50.0	S	0.047	Bella	48.2	S	0.043
Roma	47.3	S	0.042	Pythia	46.9	S	0.041
Athor	44.2	M	0.036	Chimaera	44.1	XC	0.036
Barbara	43.8	S	0.036	Crescentia	42.2	S	0.033
Austria	40.1	M	0.030	Nora	40.0	C	0.030
Ulula	39.2	S	0.028	Clorinde	39.0	BFU	0.028
Westphalia	36.5	Ch	0.025	Brucia	35.8	S	0.024
Ilse	34.8	?	0.022	Ludovica	31.9	S	0.019
Granada	30.0	?	0.016	Atropos	29.3	SCTU	0.016
Moskva	27.4	?	0.014	Nansenia	27	XD	0.013
Sakuntala	24.7	?	0.011	Buda	24.4	L	0.011
Otthild	24.4	S	0.011	Tarkovskij	24.2	C	0.011
Delores	23.6	?	0.010	Tiflis	23.6	S	0.010
Taurinensis	23.1	S	0.010	Wladinela	22.8	?	0.009
Thais	22.3	T	0.009	Lysistrata	21.9	S	0.009
Mundleria	21.5	?	0.008	Baize	21.5	?	0.008
Lomonosowa	21.0	?	0.008	Fukushima	20.4	?	0.007
Tea	20.2	S	0.007	Lola	20.0	X	0.007

La identificación de los asteroides y el cálculo de la tasa de impactos son resultado de este proyecto. Para calcular la tasa de impactos se utilizó el flujo medio de impactos en Gaspra, Ida y Mathilde calculados por [63].

D es el diámetro asteroidal.

5.4 Fuentes Planetarias

Tabla 5.2: Los 50 asteroides más grandes dentro de la resonancia secular ν_6 cuya ubicación y razón de impactos los convierten en los principales exportadores potenciales de meteoritos dentro de esta región.

Nombre	D(km)	Clase	Imp/año	Nombre	D(km)	Clase	Imp/año
Ceres	848.4	G	13.56	Pallas	498.1	m	4.67
Vesta	468.3	V	4.13	Hygiea	407.1	C	3.12
Davida	326.1	C	2.00	Interamnia	316.6	F	1.88
Sylvia	260.9	PC	1.28	Euphrosyne	255.9	C	1.23
Eunomia	255.3	S	1.22	Psyche	253.2	M	1.20
Cybele	237.3	C	1.06	Juno	233.9	S	1.03
Bambergia	229.4	CP	0.99	Patientia	225	C	0.95
Camilla	222.6	C	0.93	Herculina	222.2	S	0.93
Eugenia	214.6	C	0.86	Hermione	209.0	C	0.82
Egeria	207.6	G	0.81	Aurora	204.9	C	0.79
Thisbe	200.6	CF	0.75	Iris	199.8	S	0.75
Alauda	194.7	C	0.71	Nemesis	188.2	C	0.66
Hebe	185.2	S	0.64	Bertha	184.9	C	0.64
Freia	183.7	CP	0.63	Elektra	182.3	G	0.62
Kalliope	181.0	M	0.61	Aletheia	178.6	CP	0.60
Lachesis	174.1	C	0.57	Daphne	174.0	C	0.57
Winchester	171.7	PC	0.55	Hilda	170.6	C	0.54
Aegle	169.9	T	0.54	Germania	168.9	C	0.53
Prokne	168.4	C	0.53	Stereoskopia	168.2	C	0.53
Agamenon	166.7	?	0.52	Alexandra	165.8	C	0.51
Siegena	165.0	C	0.51	Aspasia	161.6	CX	0.49
Dido	159.9	C	0.48	Eunike	157.5	C	0.46
Hispania	157.2	C	0.46	Juewa	156.6	CP	0.46
Chicago	155.8	C	0.45	Eleonora	155.2	S	0.45
Loreley	155.2	CD	0.45	Io	154.8	C	0.45

La identificación de los asteroides y el cálculo de la tasa de impactos son resultado de este proyecto. Para calcular la tasa de impactos se utilizó el flujo medio de impactos en Gaspra, Ida y Mathilde calculados por [63].

D es el diámetro asteroidal.

5.4 Fuentes Planetarias

Tabla 5.3: Los 50 asteroides más grandes dentro de la población de los Cruzadores de la Orbita de Marte (MC) cuya ubicación y razón de impactos los convierten en los principales exportadores potenciales de meteoritos dentro de esta región.

Nombre	D(km)	Clase	Imp/año	Nombre	D(km)	Clase	Imp/año
Ino	154.1	C	0.44	Parthenope	153.3	S	0.44
Julia	151.5	S	0.43	Merapi	151.4	C	0.43
Berbericia	151.2	C	0.43	Adeona	151.1	C	0.43
Nuwa	151.1	CX	0.43	Kreusa	150.1	C	0.42
Laetitia	149.5	S	0.42	Lomnia	148.7	C	0.41
Hypatia	148.5	C	0.41	Sybilla	148.4	C	0.41
Emma	148.1	X	0.41	Nemausa	147.9	G	0.41
Dione	146.6	G	0.40	Messalia	145.5	S	0.39
Meliboea	145.4	C	0.39	Isolda	143.2	C	0.38
Aneas	142.8	DP	0.38	Princetonia	142.3	C	0.38
Helio	141.9	FCB	0.37	Vibilia	141.8	C	0.37
Bononia	141.7	D	0.37	Minerva	141.0	CU	0.37
Patroclus	140.9	P	0.37	Polyxo	140.7	T	0.37
Melpomene	140.6	S	0.37	Adorea	139.9	FC	0.36
Dembowska	139.8	R	0.36	Hesperia	138.1	M	0.35
Pulcova	137.1	CF	0.35	Philomela	136.3	S	0.35
Medea	136.1	DCX	0.34	Arethusa	136.0	C	0.34
Flora	135.9	S	0.34	Wratislavia	135.0	CPF	0.34
Ate	134.6	C	0.34	Eukrate	134.4	CP	0.34
Papagena	134.2	S	0.33	Desiderata	132.2	C	0.32
Liguria	131.1	C	0.32	Lamberta	131.2	C	0.32
Lumen	131.0	CPF	0.32	Aurelia	129.0	F	0.31
Dynamene	128.4	C	0.31	Boliviana	127.6	C	0.30
Zelinda	127.4	C	0.30	Hippo	127.1	F	0.30
Aglaja	127.0	C	0.30	Undina	126.4	M	0.30

La identificación de los asteroides y el cálculo de la tasa de impactos son resultado de este proyecto. Para calcular la tasa de impactos se utilizó el flujo de impactos en Gaspra calculado por [63]. D es el diámetro asteroidal.

5.4 Fuentes Planetarias

Tabla 5.4: Número de NEAs por intervalo de diámetro, diámetro promedio, área por intervalo de diámetro y área total.

Rango de diámetros (km)	N	$D(km)$	$A(km^2)$
0.001- 0.01	5.47×10^{10}	0.005	8.59×10^8
0.01 - 0.07	2.5×10^8	0.04	3.14×10^7
0.07 - 3.5	2.75×10^5	1.785	1.54×10^6
3.5 - 40	30		9.77×10^3
Área total promedio de la población de NEAs			8.92×10^8

N es el número de asteroides; D , el diámetro medio y A , el área. El cálculo de las áreas es resultado de este proyecto, con datos de [63] para $D < 3.5$ km y de [72] para $D > 3.5$ km. Por simplicidad, para calcular las áreas se utilizó el diámetro medio del intervalo.

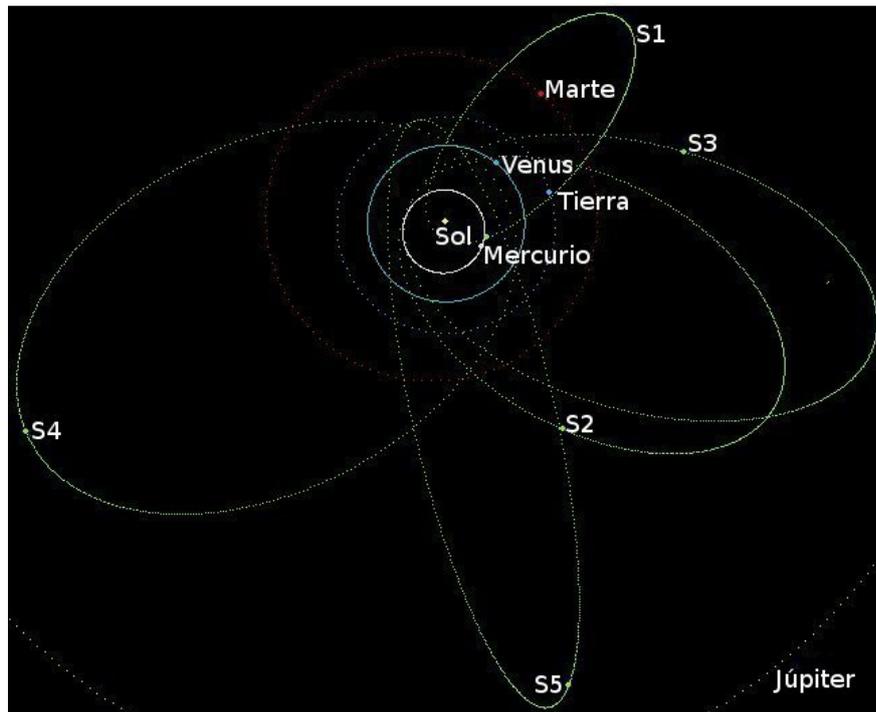


Figura 5.3: Órbitas de las cinco corrientes de meteoroides S1, S2, S3, S4 y S5, probablemente asteroidales (Gráfica resultado de este proyecto).

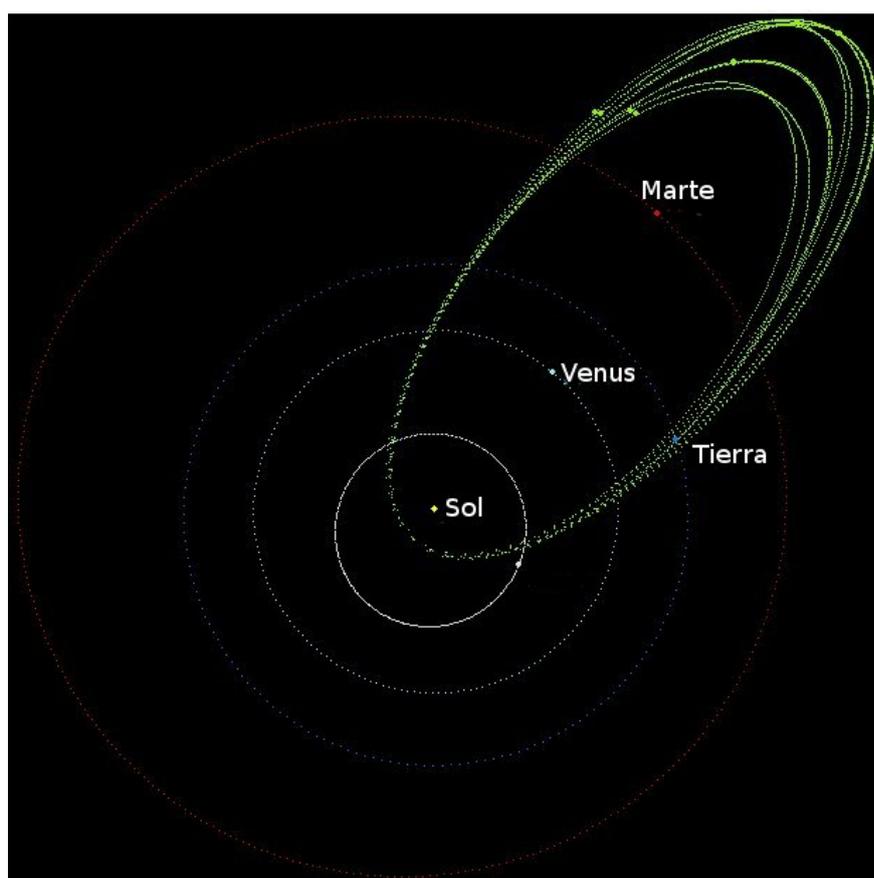


Figura 5.4: La figura muestra cinco de la nueve subcorrientes de meteoroides dentro de la corriente S1. Las subcorrientes son las agrupaciones de dos o tres órbitas meteoroidales (Gráfica resultado de este proyecto).

Tabla 5.5: Coordenadas de 5 de las 9 corrientes de meteoroides de probable origen asteroidal y de los asteroides cercanos 2004 TG10 y 2002 XM35.

Corriente/Ast	$a(UA)$	$q(UA)$	e	$Q(UA)$	i°	w°	Ω°
S1	1.350	0.141	0.895	2.56	23.17	324.30	261.89
S2	1.929	0.379	0.802	3.47	4.76	112.84	37.60
S3	2.230	0.363	0.835	4.09	2.982	292.83	231.46
S4	2.462	0.581	0.760	4.34	6.426	257.18	130.70
S5	2.793	0.980	0.648	4.60	71.92	173.01	283.3
2004 TG10	2.242	0.315	0.859	4.169	3.697	310.014	212.318
2002 XM35	2.331	0.375	0.838	4.323	3.074	312.753	229.886

a , semieje mayor; q , distancia al perihelio; e , excentricidad; Q , distancia al afelio; i , inclinación; w , argumento del perihelio y Ω , nodo ascendente. La identificación de las 5 corrientes y de los 2 asteroides es resultado de este proyecto, de acuerdo con los métodos y criterios de la sección 5.2.4.2.

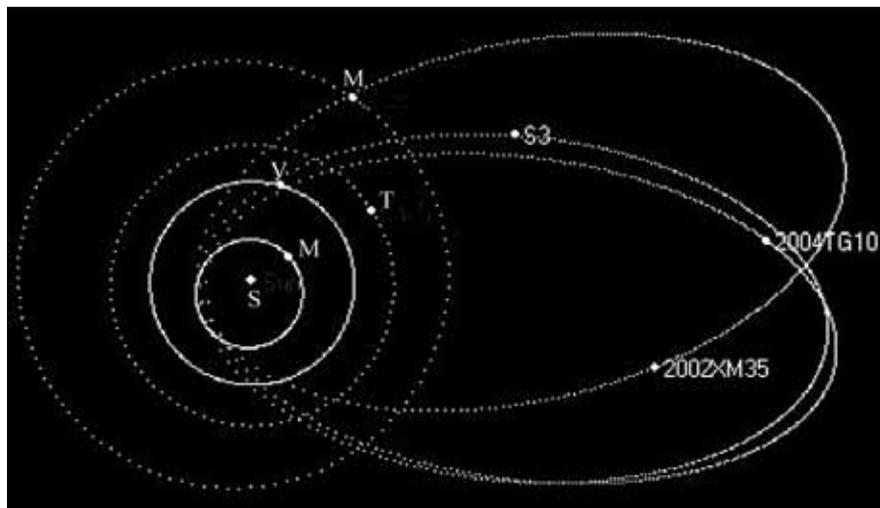


Figura 5.5: Asteroides 2004TG10 y 2002XM35 asociados con la corriente de meteoroides S3; 2002XM35 muestra un ligero desplazamiento en Ω con respecto a S3 (Gráfica y resultados del proyecto).

5.4 Fuentes Planetarias

Tabla 5.6: Coordenadas de las subcorrientes dentro de las corrientes de meteoroides asteroidales S1, S2 y S3. (Tabla resultado de este proyecto).

Corriente	Subcorriente	$a(UA)$	$q(UA)$	e	$Q(UA)$	$i(^{\circ})$	$w(^{\circ})$	$\Omega(^{\circ})$
S1	SS1a	1.337	0.139	0.896	2.55	23.6	324.7	261.4
		1.343	0.141	0.895	2.55	23.1	324.4	262.4
		1.337	0.139	0.896	2.55	24.2	324.7	258.2
		1.34	0.138	0.897	2.55	23.1	324.8	261.8
		1.347	0.136	0.899	2.55	24	325.1	262
		1.337	0.139	0.896	2.55	23.6	324.7	262.1
		1.343	0.145	0.892	2.55	20.6	323.9	262.7
	SS1b	1.308	0.14	0.893	2.47	23.3	325	261.6
		1.311	0.139	0.894	2.47	23.7	325.1	261.7
		1.301	0.134	0.897	2.47	23.2	325.8	263.2
	SS1c	1.312	0.143	0.891	2.48	23.7	324.5	261.9
		1.308	0.14	0.893	2.48	24	325	261.5
		1.315	0.142	0.892	2.48	25.8	324.6	261.8
	SS1d	1.343	0.141	0.895	2.55	23.4	324.4	261.8
		1.346	0.14	0.896	2.55	23.4	324.6	261.9
		1.346	0.14	0.896	2.55	22.3	324.6	261.7
		1.346	0.144	0.893	2.55	23	324.1	261.8
	SS1e	1.356	0.141	0.896	2.58	23.1	324.3	261.7
		1.356	0.141	0.896	2.58	22.9	324.3	261.8
		1.356	0.141	0.896	2.58	23.2	324.3	261.9
	SS1f	1.163	0.143	0.877	2.18	24.8	326	262.3
1.163		0.15	0.871	2.18	21.2	325.1	262.3	
SS1g	1.241	0.144	0.884	2.35	23.7	324.9	262.1	
	1.241	0.144	0.884	2.35	25.2	324.9	261.8	
SS1h	1.324	0.135	0.898	2.5	24.3	325.6	262.1	
	1.324	0.135	0.898	2.5	24.7	325.5	262.9	
SS1i	1.352	0.142	0.895	2.57	22.9	324.2	262.8	
	1.352	0.142	0.895	2.57	23.2	324.2	262.8	
S2	SS2a	2.653	0.321	0.879	4.98	4.1	116.5	36.4
		2.284	0.322	0.859	4.24	5.9	117.6	38.9
		2.439	0.322	0.868	4.54	5.3	117	38.8
	SS2b	2.384	0.348	0.854	4.42	3.9	114.2	40.7
		2.128	0.349	0.836	3.92	1.6	115.1	44.3
		2.374	0.349	0.853	4.4	5.2	114.1	42.9
	SS2c	2.011	0.35	0.826	3.67	6.1	115.6	34.3
		2.059	0.35	0.83	3.78	5.8	115.4	28.6
		2.574	0.35	0.864	4.82	5.6	113.3	43.3
	SS2d	1.823	0.33	0.819	3.3	7.1	119	33.4
		1.844	0.33	0.821	3.35	5.2	118.8	35.8
	S3	SS3a	2.086	0.338	0.838	3.84	3.1	296.2
2.253			0.338	0.85	4.17	2.5	295.7	224.6
2.284			0.338	0.852	4.24	6.4	295.5	239.1
SS3b		2	0.346	0.827	3.66	4.1	295.5	279.1
		2.403	0.346	0.856	4.46	3	294.4	214.6
		2.298	0.347	0.849	4.24	2.1	294.5	224.6
SS3c		1.898	0.336	0.823	3.46	2.2	297.7	221.6
		2.625	0.336	0.872	4.89	2.8	294.8	226.8

a , semieje mayor; q , distancia al perihelio; e , la excentricidad; Q , distancia al afelio; i , la inclinación; w , argumento del perihelio y Ω , el nodo ascendente. La identificación de las corrientes y subcorrientes se hizo de acuerdo con los métodos y criterios de la sección 5.2.4.2.

5.4 Fuentes Planetarias

Tabla 5.7: Resumen de las asociaciones meteorítico-asteroidales, según Burbine et al. [18].

Meteorito	Caída (%)	Progenitor
L	38.0	Asteroides S(IV)
H	34.1	6 Hebe [S(IV)]
LL	7.9	Asteroides S(IV)
Fe-Ni	4.2	Asteroides M
Eucritas	2.7	4 Vesta
Howarditas	2.1	4 Vesta
CM	1.7	19 Fortuna
Diogenitas	1.2	4 Vesta
Aubritas	1.0	3103 Eger
EH	0.8	Asteroides M
EL	0.7	Asteroides M
Mesosideritas	0.7	Asteroides M
CV	0.6	Asteroides K
CI	0.5	Asteroides C
CO	0.5	221 Eos
Palasitas	0.5	Asteroides A
Ureilitas	0.5	Asteroides S
Marcianos	0.4	Marte
CR	0.3	Asteroides C
CK	0.3	Asteroides C
Acapulcoitas	0.1	Asteroides S
Angritas	0.1	Asteroides S
Lodranitas	0.1	Asteroides S
R	0.1	Asteroides A o S
Winonaitas	0.1	Asteroides S
Tagish-Lake	0.1	Asteroides D
Braquinitas	hallazgos	Asteroides A
CH	hallazgos	Asteroides C o M
Lunar	hallazgos	La Luna

Capítulo 6

Discusión

Es notable que a pesar de la multiplicidad de evidencias de la naturaleza preferencialmente asteroidal de los meteoritos, solo el caso de la asociación Howarditas-Eucritas-Diogenitas (HED) con el asteroide Vesta es satisfactoria, quedando en diferentes grados de incertidumbre el origen de la abrumadora mayoría de los tipos meteoríticos, a pesar de la cantidad y la multiplicidad de las fuentes asteroidales potenciales. Esta última observación es elocuente: no todos los asteroides tienen la misma posibilidad de exportar fragmentos a la vecindad terrestre, siendo los factores decisivos y selectivos las resonancias de movimiento medio con Júpiter y las secular ν_6 , según las evidencias acumuladas de los últimos años.

Con respecto a los asteroides progenitores de las condritas ordinarias cuya frecuencia de caídas es del 80 %, los asteroides raros Tipo Q, de los cuáles se conocen muy pocos y se localizan preferentemente en la región interna del Cinturón de Asteroides, son los únicos que se han identificado decisivamente como condrítico-ordinarios. Sin embargo, el contraste de su rareza con la abrumadora presen-

cia de condritas ordinarias indica que las fuentes principales de este tipo de meteoritos deben ser otro tipo de asteroides cuya presencia sea tan notable como la de este tipo de condritas, o cuya localización en la vecindad de las resonancias favorezca la exportación de fragmentos a la vecindad terrestre. Los asteroides que satisfactoriamente cumplen con ambas condiciones son los Tipo S. Sin embargo, se ha encontrado que un porcentaje importante de ellos son diferenciados, lo cual los descartaría como progenitores de las condritas ordinarias. Afortunadamente la subclasificación S(IV) de este tipo de asteroides se ha encontrado ser condrítico-ordinaria, destacándose por su tamaño (180 km) el asteroide Hebe del Cinturón Principal. El hallazgo anterior parece abrir la posibilidad de resolver satisfactoriamente el enigma de los progenitores de las condritas ordinarias.

Con respecto a los asteroides Tipo V, a pesar de ser un grupo reducido, indudablemente son los responsables de la mayoría de las acondritas conocidas que son las Howarditas - Eucritas - Diogenitas o HEDs. Esta aparente contradicción no es más que el resultado de la posición circunstancialmente favorable del asteroide Vesta cerca de la resonancia más eficiente con Júpiter, que es la 3:1 a 2.5 UA del Sol.

En lo que respecta al meteorito Tagish-Lake, que cayó el 18 de enero del 2000 en Canadá, es el meteorito más frágil y poroso hasta el momento. Está compuesto de carbón y otros materiales primitivos, característicos de los asteroides más externos del Cinturón como son los tipo P y D así como de los núcleos cometarios, de ahí la pecu-

liaridad de este meteorito. De este tipo de asteroides, 368 Haidea es el que tiene la máxima concordancia espectral con este meteorito. Haidea está situado aproximadamente 0.2 UA dentro de la resonancia 2:1 y a 0.114 UA fuera de la resonancia 7:3, cuyos fragmentos están sujetos a la influencia determinante de Júpiter quien se encarga de impedir su migración a la región de los planetas terrestres; de aquí que, de provenir de un asteroide D, su caída puede considerarse afortunada y sorpresiva.

Con respecto a las corrientes de meteoroides en la vecindad terrestre, que tradicionalmente se les asocia con el paso de cometas, durante el desarrollo de este proyecto hemos identificado cinco corrientes de meteoroides siguiendo órbitas que son propias de los asteroides que cruzan la órbita terrestre o NEAs, con lo cual su origen asteroidal no deja lugar a dudas y es congruente, además, con lo esperado de acuerdo con la razón estimada de casi 5000 impactos por año sobre la población de NEAs. Lo anterior conduce a la conclusión de que, aparte de las resonancias con Júpiter y las seculares, la población de NEAs también tiene una participación importante en la caída de meteoritos a la superficie terrestre.

El resultado anterior no ha sido el único hallazgo: durante el mismo proceso se ha logrado identificar la presencia de subcorrientes de meteoroides dentro de 3 de las 5 corrientes, compuestas comúnmente por 2 a 3 fragmentos siguiendo una órbita común dentro de la estructura de las corrientes mencionadas. Lo anterior no es resultado de la razón estimada de impactos, pues estas subcorrientes

son en sí mismas evidencia de varios impactos recientes en el mismo cuerpo, quizá de entre 3 y 7 por siglo, según el mínimo y máximo de subcorrientes identificadas dentro de corrientes individuales. La explicación más natural a esta observación es que el asteroide reiteradamente impactado circunstancialmente ha cruzado cíclicamente una corriente espacial de fragmentos densa, muy probablemente una corriente de fragmentos cometarios. Consecuentemente, por cada impacto recibido, una subcorriente de fragmentos ha sido creada, de ahí la presencia de varias subcorrientes dentro de corrientes individuales de fragmentos.

En cuanto a la identificación de los asteroides 2004 TG10 y 2002 XM 35 asociados con una de las corrientes de meteoroides, éste ha sido un resultado afortunado, pues no solo reitera la asociación de corrientes de meteoroides con asteroides cercanos a la Tierra sino que además corrobora la importancia de estos últimos como precursores de meteoritos.

En cuanto a la diferencia entre la amplia diversidad de tipos asteroidales con la comparativamente reducida diversidad de meteoritos, ésta tiene casos extremos, pues algunos tipos asteroidales, notables por su tamaño o número, están subrepresentados o no tienen representación alguna en las colecciones de meteoritos. Ejemplos de los primeros son los asteroides 44 Nysa, 349 Dembowska y 113 Amalthea, y de los segundos, los subtipos S(II), S(VI) y S(VII).

Los asteroides más grandes de la población, Ceres y Palas, que por

sus dimensiones se esperaría que fueran los progenitores de un alto porcentaje de los meteoritos, solo especulativamente son los progenitores de las condritas CI, CM y CR. La razón de esta aparente incongruencia es la ausencia de una posición orbital privilegiada con respecto a las resonancias favorables del Cinturón de Asteroides.

Con respecto a la población meteoroidal dominante, es menester hacer notar que, a pesar de la presencia abrumadora de meteoroides cometarios en la vecindad terrestre con dimensiones del orden de metros, su alta fragilidad y alta propensión al desgaste ablativo son determinantes para que su trayecto dentro de la atmósfera terrestre sea el más corto de todos los tipos de meteoroides, al igual que sus posibilidades de alcanzar la superficie terrestre como meteoritos. Al respecto cabe mencionar que una parte de los meteoroides de origen cometario son del mismo material que las condritas carbonáceas. Sin embargo, las masas de los más grandes de ellos no exceden algunos gramos por lo que, a pesar de ser mecánicamente más resistentes que los de grandes dimensiones, su limitada masa es reducida rápidamente a polvo en la atmósfera superior. A pesar de todas estas desventajas, estadísticamente es posible esperar que algún fragmento cometario de material carbonáceo tenga la masa suficiente para sobrevivir al proceso ablativo y precipitarse a la superficie como meteorito; sin embargo, podría ser indistinguible de los de origen asteroidal.

Con respecto a las fuerzas impulsoras de meteoroides y asteroides pequeños hacia las resonancias, recurrentemente se menciona la que

resulta del efecto Yarkovsky como causa principal, ignorando que ésta es solo un efecto secundario de la radiación incidente sobre los cuerpos meteoroidales y asteroidales afectados, siendo necesariamente mayor e instantánea la que resulta de la presión de la radiación solar incidente. De esta forma, la fuerza neta que impulsa los meteoroides y asteroides pequeños es la resultante de la de Yarkovsky y la causada por la presión de la radiación. Así, como ésta última es mayor, la resultante es siempre proactiva, ocasionando siempre un incremento secular constante de los semiejes mayores de dichos cuerpos.

Capítulo 7

Resultados y Conclusiones

Los porcentajes relativos de los meteoroides precursores de meteoritos son: los tipo I representan el 25 % y los tipo II el 75 %.

Las proporciones de las subpoblaciones tipo I, precursores de los meteoritos más notables, son: condritico-ordinarios, 24.45 %; metálicos, 0.085 %; Howarditas-Eucritas-Diogenitas, 0.4 %; de enstatita, 0.023 % y mixtos, 0.019 %.

Si las distribuciones de las presiones de fragmentación de los meteoroides condritico-ordinarios y las de las condritas ordinarias están correlacionadas, la conclusión es que los meteoroides condritico-ordinarios tienen los mismos tipos petrológicos que sus condritas ordinarias correspondientes; es decir, I1 \Rightarrow LL5+LL6, I2 \Rightarrow L6, I3 \Rightarrow L5, I4 \Rightarrow L4, I5 \Rightarrow L3.

La probable clasificación de las subpoblaciones II1, II2 y II3 son: II2 \Rightarrow CI y II3 \Rightarrow CM. La clasificación II1 \Rightarrow CX indica que no corresponden ni a los CI ni a los CM; al parecer son CIs y CMs prefragmentados.

Los flujos relativos las subpoblaciones tipo II, CX, CI y CM, son 18.75 %, 28.125 % y 28.125 %, en el mismo orden.

Las subpoblaciones orbitales IIIA, IIIA[C3] y IIIAi de la población cometaria IIIA podrían reflejar la contribución de las tres poblaciones cometarias fundamentales que son los cometas de período corto, o de la Familia de Júpiter; los de período intermedio, o de la Familia de Halley, y los de período largo, o de la Nube de Oort. La población cometaria IIIB, notable por su exceso anómalo entre 10 y 20 metros, probablemente evidencia las dimensiones típicas de los bloques estructurales de los núcleos cometarios que les dan origen.

El hecho de que la distribución de semiejes mayores de los meteoroides fotográficos no exceda la posición de la resonancia 3:1 a 2.5 UA, evidencia la importancia de esta resonancia, la de la secular ν_6 y la de la región de los asteroides cruzadores de la órbita de Marte como fuentes tributarias fundamentales de meteoritos.

Los nombres, las dimensiones, el tipo, la razón anual esperada de impactos y posiciones de los asteroides dentro de la resonancia 3:1, de la secular ν_6 y de la región MC se han tabulado ya que estas características los convierten en las fuentes más probables de meteoritos dentro de estas regiones multiasteroidales.

El conteo de cráteres lunares con diámetros de 10 m o más en áreas con edades de $\sim 1\text{Ga}$ indica que el número de ellos es de 3700. Si

los diámetros de los impactores causantes son de 1 m o más, entonces el flujo esperado de ellos en la vecindad terrestre está dado por $n_t(d > 1 \text{ m}) = 3.7 \times 10^{-6} \text{ km}^{-2} \text{ año}^{-1}$.

El flujo medio de impactores de 1 m o mayores sobre la población Apolo - Amor es de $n(d > 1 \text{ m}) = 5.556 \times 10^{-6} \text{ km}^{-2} \text{ año}^{-1}$.

El área total estimada para la población de NEAs es de $8.92 \times 10^8 \text{ km}^2$, y la razón esperada de impactos en esta población por objetos de 1 m o más de diámetro sería de 4900 año^{-1} , considerando un flujo medio de impactores de $5.556 \times 10^{-6} \text{ km}^{-2} \text{ año}^{-1}$.

La tasa anterior de impactos en la población de NEAs explica la observación de corrientes de fragmentos siguiendo órbitas típicas de Asteroides Cercanos a la Tierra.

En cuanto a las cinco corrientes de meteoroides identificadas, éstas son de probable origen asteroidal, y serían el resultado de los impactos recibidos, quizá en el último siglo, de acuerdo a la tasa de impactos aleatorios estimada para la población de NEAs.

Con respecto a las subcorrientes dentro de las corrientes S1, S2 y S3, la explicación más natural a esta observación es que el asteroide reiteradamente impactado circunstancialmente ha cruzado cíclicamente una corriente de fragmentos cometarios densa, de tal manera que por cada impacto suficientemente energético recibido, una subcorriente de fragmentos es creada.

La corriente S1 muestra 9 subcorriente, S2 muestra 4 y S3 muestra 3.

Las coordenadas de los Asteroides Cercanos a la Tierra 2004TG10 (390 - 880 m) y 2002XM35 (70 - 160 m) indican asociación de éstos con la corriente de meteoroides S3; 2002XM35 muestra ya un ligero desplazamiento en Ω con respecto a S3.

Otros asteroides de características similares se espera que estén asociados con las corrientes S1, S2, S4 y S5, y otras corrientes con otros asteroides, sobre todo con los más grandes.

La fuerza neta que impulsa los meteoroides y asteroides pequeños hacia las resonancias es la resultante de la de Yarkovsky y la radial centrífuga, consecuencia esta última de la presión de la radiación solar sobre los cuerpos afectados. La resultante es siempre proactiva, ocasionando un incremento secular constante de los semiejes mayores de dichos cuerpos.

Apéndice A

Resonancias

A.1. La Resonancia Secular ν_6

La resonancia secular ν_6 ocurre cuando la frecuencia de precesión de la longitud del perihelio de un asteroide es igual a la sexta frecuencia secular del Sistema Planetario, la cual coincide con la frecuencia media de precesión de la longitud del perihelio de Saturno; también es relevante la influencia de la oscilación secular de la excentricidad de Júpiter. Como se muestra en la Figura A.1, la resonancia secular ν_6 marca el borde interno del Cinturón Principal. El efecto de la resonancia decae rápidamente con la distancia a la curva que la representa. A lo largo de millones de años la resonancia secular cambia la excentricidad y la inclinación de los cuerpos menores hasta que se convierten en cruzadores de la órbita de Marte; eventualmente son forzados a cruzar la órbita terrestre tras un encuentro cercano con el planeta. El tiempo mediano que le toma a un fragmento asteroidal en convertirse en NEO, empezando en una órbita cuasicircular, es

de 0.5 Ma, y la vida media en este espacio es de 6.5 Ma, cuyos finales típicos son: colisión con el Sol (80%), ser lanzado en una órbita hiperbólica (12%) o colisión con algún planeta terrestre (8%) [46]; la probabilidad media de colisión con la Tierra durante su estancia en el espacio de los NEOs es de $\sim 10^{-2}$ [83].

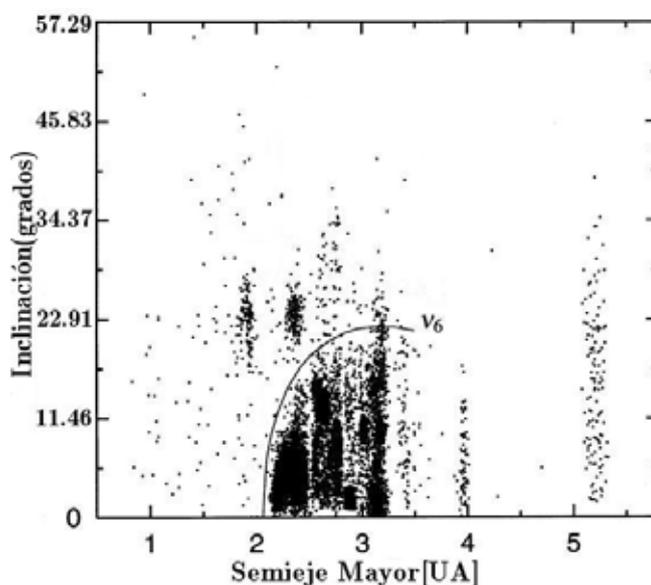


Figura A.1: La figura ilustra el efecto de la Resonancias Secular ν_6 (Gráfica de [85]).

Aparte de la resonancia secular ν_6 , otros de los mecanismos de despoblamiento selectivo del Cinturón de Asteroides son las Resonancias de Movimiento Medio con Júpiter. La operación básica de estas resonancias es como sigue: los objetos asteroidales dentro de ellas son los que tienen períodos orbitales que son fracciones simples del período orbital de Júpiter; es decir, están en resonancia con el planeta. Esto significa que este asteroide o asteroides sufrirán interac-

ciones gravitatorias periódicas con el planeta, siempre en el mismo lugar de sus órbitas. Esto los obligará a cambiar de órbita después de algunos encuentros con el planeta. Este tipo de resonancias, también llamadas principales, que son las que dan origen a los Vacíos de Kirkwood y que espacialmente coinciden con ellos, son: la 4:1 a 2.06 UA; la 3:1 a 2.5 UA; la 5:2 a 2.82 UA; la 7:3 a 2.95 UA, y la 2:1 a 3.27 UA (Figura A.2).

A.2. La Resonancia 3:1

La resonancia 3:1 de movimiento medio con Júpiter ocurre a 2.5 UA. El tiempo mediano que le toma a un objeto en esta resonancia en cruzar la órbita terrestre es de 1 Ma y el tiempo medio en el espacio de los NEOs es de 2.2 Ma [11]; los finales típicos son: colisión con el Sol (70%), ser lanzado en una órbita hiperbólica (28%) o colisión con un planeta terrestre (2%) [46]; la probabilidad media de colisión con la Tierra durante su estancia en el espacio de los NEOs es de 2×10^{-3} [82].

A.3. La Resonancia 5:2

La resonancia 5:2 de movimiento medio con Júpiter está localizada a 2.8 UA. Esta resonancia es la que aumenta las excentricidades de los fragmentos asteroidales, comparativamente, en el menor tiempo. El tiempo mediano que le toma a un fragmentos asteroidal cruzar

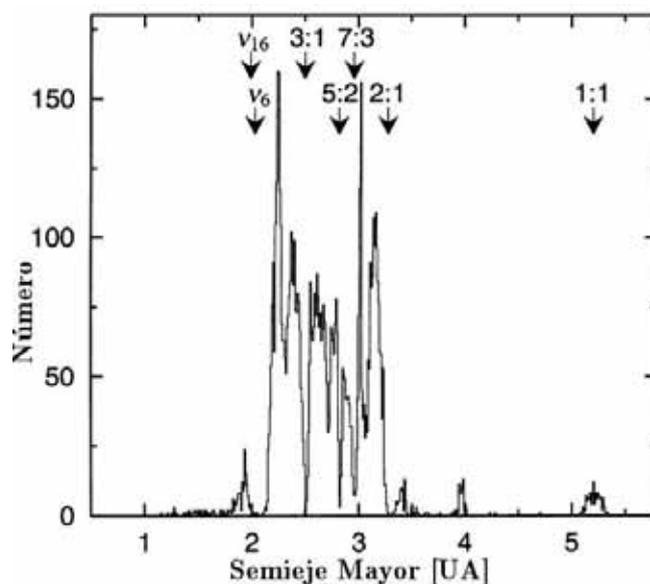


Figura A.2: La figura ilustra el efecto de las Resonancias de Movimiento Medio con Júpiter (Gráfica de [85]).

la órbita terrestre es de 0.3 Ma y la vida media en el espacio de los NEOs es de 0.4 Ma. Debido a la cercanía de esta resonancia con Júpiter, comparada con las anteriores, el lanzamiento de los objetos resonantes en órbitas hperbólicas es el fin más común y es de $\sim 92\%$, mientras que las colisiones con el Sol son de $\sim 8\%$. La probabilidad de colisión con la tierra durante su estancia en el espacio de los NEOs es de 2.5×10^{-4} [84].

A.4. La Resonancia 2:1

A pesar de que esta resonancia está localizada a 3.28 UA y está asociada con uno de los vacíos de Kirkwood más profundos, no hay un

mecanismo capaz de desestabilizar el movimiento de los objetos resonantes en tiempos cortos, comparados con los de las resonancias anteriores. En el centro de la resonancia y a excentricidades moderadas, hay grandes regiones en las que los tiempos dinámicos de los objetos en ella son del orden de la edad del Sistema Solar. Además, una vez en el espacio de los NEOs, su tiempo dinámico dentro de él es de solo 0.1 Ma, debido a que son lanzados rápidamente por Júpiter en órbitas hiperbólicas. La probabilidad media de colisión de estos objetos con la Tierra durante su estancia en el espacio de los NEOs es de 5×10^{-5} [82].

A.5. Resonancias Difusoras

Además de las resonancias principales de movimiento medio con Júpiter, el Cinturón de Asteroides está poblado por cientos de resonancias estrechas: las de movimiento medio con Júpiter de orden superior, las resonancias de tres cuerpos con Júpiter y Saturno y las resonancias de movimiento medio con Marte. El tiempo que les toma a los cuerpos en estas resonancias en cruzar la órbita de Marte (y posteriormente la de la Tierra) es de 10^7 años a miles de millones de años, dependiendo de la resonancia y la excentricidad inicial [83].

Apéndice B

Efecto Yarkovsky

B.1. Efecto Yarkovsky Diurno

La operación del efecto Yarkovsky es como sigue: Supongamos que el eje de un meteoróide esférico en rotación es normal al plano orbital. Así, la insolación calienta la cara que transitoriamente está frente al Sol. Esta energía absorbida comenzará a ser radiada nuevamente al espacio con máxima intensidad cuando la rotación ha alejado la cara de la posición de máxima insolación debido a la inercia térmica. La radiación al espacio continuará mientras la cara rota opuesta al Sol, pero cada vez con menor intensidad. Esta asimetría en la emisión de fotones dará lugar a que el cuerpo menor obtenga una ganancia neta de momento en la dirección opuesta a la dirección de máxima radiación (Figura B.1 (a)). Para el caso de un meteoróide con rotación prógrada, el referido momento ocasionará un incremento secular en el semieje mayor; por el contrario, si la rotación es retrógrada, el momento ocasionará una reducción secular del semieje mayor [9,

11].

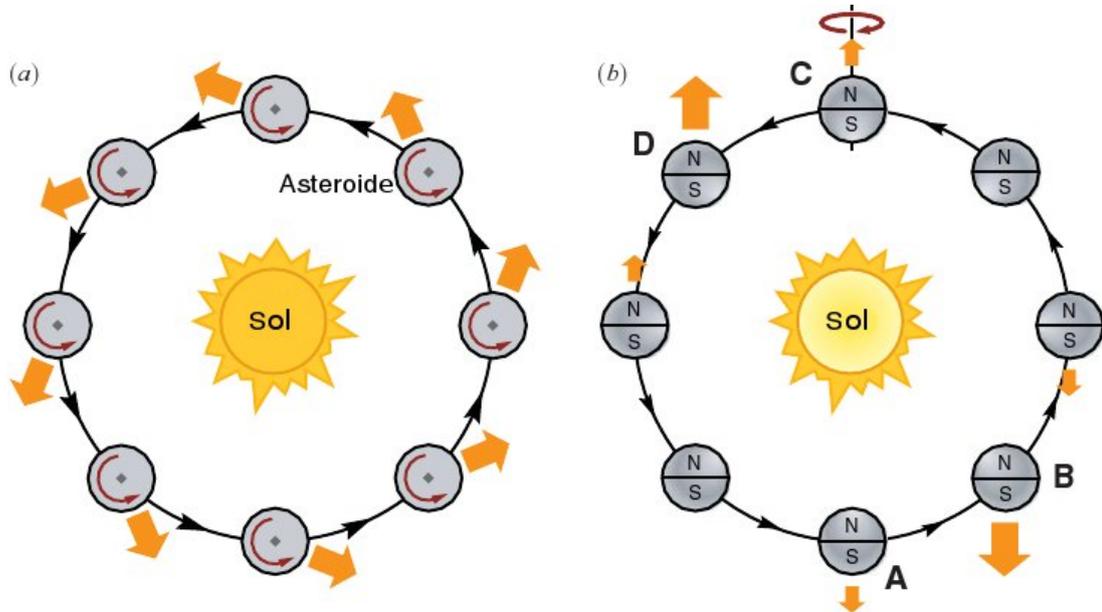


Figura B.1: (a) Efecto Yarkovsky Diurno; (b) Efecto Yarkovsky Estacional (Gráfica de [9]).

B.2. Efecto Yarkovsky Estacional

Como en el caso anterior, supongamos un meteoroide esférico en una órbita circular en torno al Sol; pero en este caso el eje de rotación está en el plano orbital. En este caso, es la componente de la fuerza en la dirección del eje de rotación la que da lugar al efecto estacional. Cuando el meteoroide está en la posición A en la Figura B.1 (b), la insolación es máxima en su hemisferio norte; sin embargo, debido a la inercia térmica, este hemisferio alcanza temperatura e

irradiación máxima en B, dando lugar a un impulso en la dirección norte-sur. De igual manera, la insolación es máxima en el hemisferio sur en C, pero este hemisferio alcanza máxima temperatura e irradiación en D, lo cual redundará en un momento en la dirección sur-norte. Para excentricidades bajas, esta fuerza de origen térmico es siempre opuesta al movimiento del meteoróide, lo cual ocasiona un decaimiento secular de su órbita [9, 11].

Referencias

- [1] Babadzhanov P. B.: *Meteor Showers Associated with the Near-Earth Asteroid 2101 Adonis*, Astron. Astrophys. Volume 397 (2003), 319 - 323.
- [2] Babadzhanov P. B. and Obrubov Y. U.: *Secular Perturbations of Apollo, Amor and Aten Asteroid Orbits and Theoretical Radiants of Meteor Showers, Probably Associated with them*, en Asteroids, Comets, Meteoroids, Uppsala University 1983: Uppsala University, Reprocentralen, 411 - 417.
- [3] Binzel R. et al.: *Physical Properties of Near-Earth Objects*, en Asteroids III, Tucson, Arizona, 2002: Tucson, University of Arizona Press, 255-271.
- [4] Binzel R. P., Bus S. J. and Burbine T. H.: *Size Dependence of Asteroid Spectral Properties: SMASS Results for Near-Earth and Main-Belt Asteroids*, Lunar and Planetary Science XXIX (1998), abstract # 1222.
- [5] Binzel R. P. et al.: *Asteroid Rotation Rates: Distributions and Statistics*, en Asteroids II, Tucson, Arizona, 1988: Tucson, University of Arizona Press, 416 - 441.

- [6] Birlan, Barucci M. A. and Fulchignoni M.: *G-mode Analysis of the Reflection Spectra of 84 Asteroids*, Astronomy and Astrophysics, Volume 305, p984.
- [7] Bland P. A. and Artemieva N. A.: *Efficient Disruption of Small Asteroids by Earth's Atmosphere*, Nature, Volume 424 (2003), 288 - 291.
- [8] Borovicka J. and Kalenda P.: *The Morávka meteorite fall: Meteoroid dynamics and fragmentation en the atmosphere*, Meteoritics and Planetary Science Volume 38, Issue 7 (2003), 1023-1043.
- [9] Bottke W. F. Jr. et al.: *The Yarkovsky and YORP Effects: Implications for Asteroid Dynamics*, Annu. Rev. Earth Planet. Sci., Volume 34 (2006), 157-191.
- [10] Bottke W. F. Jr. et al.: *The fossilized size distribution of the main asteroid belt*, Icarus, Volume 175 (2005), 111-140.
- [11] Bottke W. F. Jr. et al.: *The effect of Yarkovsky thermal forces on the dynamical evolution of asteroids and meteoroids*, en Asteroids III, Tucson, Arizona, 2002: Tucson, University of Arizona Press, 395-408.
- [12] Bottke W. F. Jr. et al.: *Origin of the Spacewatch Small Earth-Approaching Asteroids*, Icarus, Volume 122 (1996), 406 - 427.
- [13] Bottke W. F. Jr. Nolan M. C. and Greenberg R.: *Collision Lifetimes and Impact Statistics of Near-Earth Asteroids*, en Hazards due to comets and asteroids, Tucson, Arizona, 1994: Tucson, University of Arizona Press, p.337.

- [14] Britt D. T. and Consolmagno S. J.: *Stony meteorite porosities and densities: A review of the data through 2001*, Meteoritics and Planetary Science Volume 38, Issue 8 (2003), 1161-1180.
- [15] Britt D. T. and Lebofsky L. A.: *The Asteroid Belt: Meteorite Parent Bodies*, en The Van Nostrand Reinhold Encyclopedia of Planetary Sciences, London, U. K., 1994: London, Chapman & Hall, 486-488.
- [16] Brown P. G. et al.: *An Entry Model for the Tagish Lake Fireball using Seismic, Satellite and Infrasonic Records*, Meteoritics and Planetary Science Volume 37 (2002), 661-675.
- [17] Brown P. G. et al.: *The Influx of Small Near-Earth Objects Colliding with The Earth*, Science Volume 420 (2002), 294 - 296.
- [18] Burbine T. H. et al.: *Meteoritic Parent Bodies: Their Number and Identification*, en Asteroids III, Tucson, Arizona, 2002: Tucson, University of Arizona Press, 653-667.
- [19] Bus S. J. and Binzel R. P.: *Phase II of the Small Main-belt Asteroid Spectroscopy Survey: A feature-based taxonomy*, Icarus, Volume 158 (2002), 146.
- [20] Cellino S., Bus J. and Lazzaro D.: *Spectroscopic Properties of Asteroid Families*, en Asteroids III, Tucson, Arizona, 2002: Tucson, University of Arizona Press, 633-643.
- [21] Cellino A.: *Asteroids as Origin of Meteoritic Materials*, Memories of the Società Astronomica Italiana Volume 72, Issue 2 (2001), 391-401.

- [22] Ceplecha Z.: *Earth's Influx of Different Populations of Sporadic Meteoroids from Photographic and Television Data*, Bull. Astron. Inst. Czechosl. Volume 39 (1998), 221 - 236.
- [23] Ceplecha Z.: *Impacts of Meteoroids Larger than 1 m Into de Earth's Atmosphere* , Astron. Astrophys. Volume 286 (1994), 967 - 970.
- [24] Ceplecha Z.: *Meteoroid Properties From Photographic Records*, en Asteroids, Comets and Meteors, Belgirate, Italy, 1993: Dordrecht, Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 343 - 356.
- [25] Ceplecha Z., Spurný P. and Keclíková J.: *Atmospheric Fragmentation of Meteoroids*, Astron. Astrophys. Volume 279 (1993), 615 - 626.
- [26] Ceplecha Z.: *Influx of Interplanetary Bodies onto Earth*, Astron. Astrophys., Volume 263 (1992), 361 - 366.
- [27] Ceplecha Z. and McKrosky R. E.: *Fireball End Hights: A Diagnostic for the Structure of Meteoric Material*, Journal of Geophysical Research, Volume 81 (1976), 6257 - 6275.
- [28] Ceplecha Z.: *Observational and Theoretical Aspects of Fireballs*, en Solid Particles in the Solar System, Ottawa, Canada, 1979: Dordrecht, Reidel Publishing Co., 1980, 171 - 183.
- [29] Chapman C. et al.: *Asteroid Families: Physical Properties and Evolution*, en Asteroids III, Tucson, Arizona, 2002: Tucson, University of Arizona Press, 386-2002.

- [30] Chapman C. et al.: *Asteroid Families: Physical Properties and Evolution*, en Asteroids II, Tucson, Arizona, 1988: Tucson, University of Arizona Press, 386 - 415.
- [31] Clark B. E. et al.: *Asteroid Space Weathering and Regolith Evolution*, en Asteroids III, Tucson, Arizona, 2002: Tucson, University of Arizona Press, 585-599.
- [32] Coutis E. A. and Hudson P.: *Reflectance Spectra of Ureilites: Nature of the Mafic Silicate Absorption Features*, Lunar and Planetary Science Conference XXXV (2004), abstract # 1257.
- [33] Davis D. R. et al.: *Collisional Evolution of Small-Body Population*, en Asteroids III, Tucson, Arizona, 2002: Tucson, University of Arizona Press, 545 - 559.
- [34] Davis D. R.: *The Collisional History of Asteroid 253 Mathilde, Icarus*, Volume 140 (1999), 49 - 52.
- [35] Drummond J. D.: *A test of comet and meteor shower associations*, ICARUS Volume 45 (1981), 545-553.
- [36] Durda D. D., Greenberg R. and Jedicke R.: *Collisional Models and Scaling Laws: A New Interpretation of the Shape of the Main-Belt Asteroid Size Distribution*, Icarus, Volume 135 (1998), 431- 440.
- [37] Edward R. and Scott D.: *Meteorite Constraints on Collision Rates in the Primordial Asteroid Belt and its Origin*, Lunar and Planetary Science XXXV (2004), abstract # 1990.

- [38] Foschini L. et al.: *Long-Term Dynamics of Bright Bolides*, *Astron. Astrophys.*, Volume 353 (2000), 797 - 812.
- [39] Foschini L.: *On the Atmospheric Fragmentation of Small Asteroids*, *Astron. Astrophys.*, Volume # (2000) xxx - xxx.
- [40] Fujii N. et al.: *Vibrational Fracturing Rate: A New Strength Measure for Chondrites*, en *Lunar and Planetary Science XII* (1981), abstract, 312-314.
- [41] Gaffey M. J. et al.: *Mineralogy of Asteroids*, en *Asteroids III*, Tucson, Arizona, 2002: Tucson, University of Arizona Press, 183 - 204.
- [42] Gaffey M. J.: *Identifying asteroidal parent bodies of the meteorites: the last lap*, *Lunar and Planetary Science XXXI* (2000), abstract # 1092.
- [43] Gaffey J. and Gilbert S. L.: *Asteroid 6 Hebe: The probable parent body of H-type ordinary chondrites and IIE iron meteorites*, *Meteoritics and Planetary Science*, Volume 33 (1998), 1281-1295.
- [44] Gaffey J., Bell J. F. and Cruikshank D. P.: *Reflectance Spectroscopy and Asteroid Surface Mineralogy*, in *Asteroid II*, Tucson, Arizona, 1988: Tucson, University of Arizona Press, 1989, 98-127.
- [45] Gladman B. and Coffey J.: *Mercurian Impact Ejecta: Meteorites and Mantle*, *Meteoritics and Planetary Science* (Recently submitted), 2008.

- [46] Gladman B. J. et al.: *Dynamical Lifetime of Objects Injected into Main Belt Resonances*, Science Volume 277 (1997), 197-201.
- [47] Gladman B. J. et al.: *The Exchange of Ejecta Between Terrestrial Planets*, Science Volume 271 (1996), 1387-1392.
- [48] Golubeva L. F. and Shestopalov D. I.: *Concerning the Pyroxene-Olivine Ratio on S-Asteroid Surfaces*, Lunar and Planetary Science XXXIII (2002), abstract # 1003.
- [49] Gradie J., Chapman C. and Tedesco E.: *Distribution of Taxonomic Classes and the Compositional Structure of the Asteroid Belt*, en Asteroids II, Tucson, Arizona, 1988: Tucson, University of Arizona Press, 1989, 316-335.
- [50] Grady M. M.: *Catalogue of Meteorites*, Quinta edición, Cambridge, 2000: Cambridge University Press.
- [51] Greenberg R. and Nolan M. C.: *Delivery of Asteroids and Meteorites to the inner Solar System*, en Asteroid II, Tucson, Arizona, 1988: Tucson, University of Arizona Press, 1989, 801-804.
- [52] Halliday I.: *The detection of a meteorite stream: Observations of a second meteorite fall from the orbit of the Innisfree chondrite*, Icarus Volume 69 (1987), 550-556.
- [53] Hardersen P. S. and Gaffey M. J.: *Unraveling the Thermal Structure of the asteroid Belt from Meteoritic and Asteroidal Evidence*, Lunar and Planetary Science XXXII (2001), abstract # 1103.

- [54] Harris A. W. et al.: *Recommendations to ESA by the Near-Earth Object Mission Advisory Panel (NEOMAP)*, Reporte Técnico, Julio del 2004.
- [55] Harris A. W.: *Can we Defend against Impacts by Comets and Small Asteroids?*, Mercury, Volume 13 (1996), xx - xx.
- [56] Hasegawa I. et al.: *Predictions of the Meteor Radiant Point Associated with an Earth-Approaching Minor Planet*, Publ. Astron. Soc. Japan, Volume 44 (1992), 45 - 54.
- [57] Hiroi T.: *Searching for the parent bodies of meteorites through reflectance spectroscopy: current state*, en Evolution of the solar system materials: a new perspective from antarctic meteorites (2003), 38 - 39.
- [58] Hiroi T., Zolensky M. E. and Pieters C. M.: *Discovery of the first D-Asteroid Spectral Counterpart: Tagish Lake Meteorite*, Lunar and Planetary Science XXXII (2001), abstract # 1776.
- [59] Hiroi T., Zolensky M. E. and Lipschutz M. E.: *Possible Meteorite Analogs for Asteroid 1989ML, Target of MUSES-C Asteroid Sample Return Mission*, Antarctic Meteorites XXV (2000), 14-15.
- [60] Hoffmeister C.: *Die Meteore*, Leipzig, 1937: Akademische Verlagsgesellschaft.
- [61] Hughes D. W.: *Meteoroids—An Overview*, en Meteoroids and their Parent Bodies, Bratislava, Slovenia, 1993: Bratislava, Astronomical Institute, Slovak Academy of Sciences, 15 - 28.

- [62] Imae N. and Zolensky M. E.: *Mineralogy and Petrology of PRE 95404: a Rumuruti Chondrite that Includes a Large Unequilibrated Clast*, Meteoritics and Planetary Science Supplement, Volume 38 (2003), abstract # 5176.
- [63] Jeffers S. V. and Asher D. J.: *Theoretical calculation of the cratering on Ida, Mathilde, Eros and Gaspra*, Mon. Not. R. Astron. Soc. Volume 343 (2003), 56-66.
- [64] Jeffers S. V. et al.: *Near-Earth Object Velocity Distribution and Consequences for the Chicxulub Impactor*, Mon. Not. R. Astron. Soc. Volume 327 (2001), 126 - 132.
- [65] Jopek T. et al.: *Asteroid Meteoroid Streams*, en Asteroids III, Tucson, Arizona, 2002: Tucson, University of Arizona Press, 645.
- [66] Kostolansky E.: *On asteroidal meteoroid stream detection*, Contrib. Astron. Obs. Skalant Pleso Volume 28 (1998), 22-30.
- [67] Kramer.: E. N. et al.: *On the Probability of Collision with the Earth, and Orbital Life -Time of Bodies of Asteroidal and Cometary Origin*, en Solid Particles in the Solar System, Ottawa, Canada, 1979: Dordrecht, Reidel Publishing Co., 1980, 199 - 204.
- [68] Kresak L. and Stohl J.: *Genetic Relationship between Comets, Asteroids and Meteors* en Asteroids, Comets, Meteoroids, Uppsala University 1983: Uppsala University, Reprocentralen, 379 - 388.

- [69] Langbroek M.: *The November-December δ Arietids and Asteroids 1990 HA: On the Trail of a Meteoroid Stream with meterite-sized Members*, WGN, J IMO, Volume 31, 177 - 182.
- [70] Lindblad B. A. et al.: *IAU Meteor Database of Photographic Orbits, Version 2003*, Earth, Moon and Planets, Volume 93 (2003), 249-260.
- [71] Lipschutz et al.: *Meteorite parent bodies: nature, number, size and relation to present-day asteroids*, in Asteroids II, Tucson, Arizona, 1989: Tucson, University of Arizona Press, 740-777.
- [72] Lupishko D. F. and Di Martino M.: *Physical properties of near-Earth asteroids*, Planet. Space Sci. Volume 46 No. 1 (1998), 47-74.
- [73] Manley S. P., Migliorini F. and Bailey M. E.: *An algorithm for determining collision probabilities between small solar system bodies*, Astron. and Astrophys. Suppl. Volume 133 (1998), 437-444.
- [74] Marti K. and Graf T.: *Cosmic-Ray Exposure History of Ordinary Chondrites*, Ann. Rev. Earth Planet. Science, Volume 20 (1992), 221 - 243.
- [75] McCrosky R. E. and Ceplecha Z.: *Photographic Networks for Fireballs*, xxx, Volume # (1968).
- [76] McSween H. Y.: *Meteorites and their parent planets*, Segunda edición, Cambridge, 1999: Cambridge University Press.

- [77] Melosh H. J.: *Exchange of Meteorites (and life) Between Stellar Systems*, *Astrobiology*, Volume 3 # 1 (2003), 207 - 215.
- [78] Melosh H. J. and Tonks W. B.: *Swapping Rocks: Ejection and Exchange of Surface Material Among the Terrestrial Planets*, *Meteoritics*, Volume 28 (1993), 398-398.
- [79] Melosh H. J.: *Impact Cratering: A Geologic Process*, New York, 1989: New York, Oxford University Press.
- [80] Michael P., Benz W., and Richardson D. C.: *Catastrophic Disruption of Pre-shattered Parent Bodies*, *Icarus*, Volume 168 (2004), 420 - 432.
- [81] Michael P., Benz W. and Richardson D. C.: *Disruption of Fragmented Parent Bodies as the Origin of Asteroid Families*, *Nature*, Volume 421 (2003), 608-611.
- [82] Miyamoto M. et al.: *Mass Spectra, Shape Distributions and VFR Measurements of Antarctic Meteorites*, en *Lunar and Planetary Science XIV* (1983), abstract, 507-508.
- [83] Morbidelli A. et al.: *Origin and Evolution of Near - Earth Objects*, en *Asteroids III*, Tucson, Arizona, 2002: Tucson, University of Arizona Press.
- [84] Morbidelli A. and Gladman B.: *Orbital and Temporal Distributions of Meteorites Originating in the Asteroid Belt*, *Meteoritics and Planetary Science*, Volume 33 (1998), 999 - 1016.
- [85] Nagasawa M., Tanaka H. and Ida S.: *Orbital Evolution of Aste-*

- roids During Depletion of the Solar Nebula*, The Astronomical Journal, Volume 119 (2000), 1480 - 1497.
- [86] Nemtchinov I. V. et al.: *Historical Evidence of Recent Impacts on the Earth*, Lunar and Planetary Science, Volume 27 (1996), 951 - 969.
- [87] Nesvorný D. et al.: *The Recent Break up of an Asteroid in the Main-belt Region*, Nature, Volume 417 (2002), 720-771.
- [88] Neukum G., Ivanov B. A. and Hartmann W. K.: *Cratering records in the Inner Solar System in Relation to the Lunar Reference System*, Chronology and Evolution of Mars Volume 96 (2001), 55-86.
- [89] Neukum G., Ivanov B. A. : *Crater Size Distribution and Impact Probabilities on Earth from Lunar, Terrestrial-planet, and Asteroid Cratering Data*, en Hazards due to comets and asteroids, Tucson, AZ., 1994: Tucson, University of Arizona Press, 360 - 416.
- [90] O'Brian D. P. and Greenberg R.: *The Main Belt and NEA Size Distributions: Linked Collisional and Dynamical Evolution*, Lunar and Planetary Science XXXIV (2003), abstract # 2018.
- [91] Olivier C. P.: *Meteors*, Baltimore.
- [92] Olson-Steel D. I.: *Meteoroid Orbits*, Space Science Reviews, Volume 78 (1996), 507 - 553.
- [93] Olson-Steel D. I.: *Identification of Meteoroid Streams from Apo-*

- llo Asteroids in the Adelaide Radar Orbit Surveys*, Icarus, Volume 75 (1988), 64 - 96.
- [94] Petrovic J. J.: *Mechanical Properties of Meteorites and their Constituents*, Journal of Materials Science, Volume 36 (2001), 1579-1583.
- [95] Popova O. P. and Nemtchinov I. V.: *Strength of large meteoroids entering the Earth atmosphere*, en Asteroids, Comets and Meteors, Berlin, Germany, 2002: Noordwijk, Netherlands, ESA Publications Division, 281-284.
- [96] Porubcan V., Kornos L. and Williams I. P. *Associations Between Asteroids and Meteoroid Streams*, Earth, Moon, and Planets, Volume 95 (2004), 697-711.
- [97] ReVelle D. O. and Ceplecha Z.: *Analisis of Identified Iron Meteoroids: Possible Relation with M-type Earth Crossing Asteroids*, Astron. Astrophys., Volume 292 (1994), 330 - 336.
- [98] Richardson D. C. et al.: *Gravitational Aggregates: Evidence and Evolution*, en Asteroids III, Tucson, Arizona, 2002: Tucson, University of Arizona Press, 501 - 515.
- [99] Rivkin A. S. et al.: *Hydrated Mineral on Asteroids: The Astronomical Record*, en Asteroids III, Tucson, Arizona, 2002: Tucson, University of Arizona Press, 235 - 253.
- [100] Ryabova G.: *Asteroid 1620 Geographos as a Possible Parent Body for a Meteoroid Stream*, en Meteoroids 2001, ESA SP-495 2002: Noordwijk, 63 - 69.

- [101] Sánchez-Rubio G. et al.: *Las Meteoritas de México*, Primera Edición, Ciudad Universitaria, México, D. F., 2001: Instituto de Geología, UNAM.
- [102] Sekanina Z.: *Statistical Model of Meteor Streams. IV. A Study of Radio Streams from the Synoptic Year*, Icarus, Volume 27 (1976), 265 - 321.
- [103] Sekanina Z.: *Statistical Model of Meteor Streams. III. Stream Search among 10303 Radio Meteors*, Icarus, Volume 18 (1973), 253 - 284.
- [104] Spurný P., Oberst, J. and Heinlein, D.: *Photographic observations of Neuschwanstein, a second meteorite from the orbit of the Pribram chondrite*, Nature, Volume 423 (2003), 151-153.
- [105] Starczewski S. and Jopek T. J.: *Dynamical Relation of Meteoroids to Comets and Asteroids*, Earth, Moon, and Planets, Volume 95 (2004), 41-47.
- [106] Sykes V. and Vilas F.: *Closing in on HED Meteorite Sources*, Earth and Planets Space, Volume 53, 1077-2001.
- [107] Terentjeva A. and Barabanov S.: *The Fireball Stream of the Tagish-Lake Meteorite*, WGN, J IMO, Volume 32 (2004), 60 - 62.
- [108] Tholen D. J.: *Asteroid taxonomic classifications*, en Asteroids II, Tucson, Arizona, 1988: Tucson, University of Arizona Press, 1139-1150.

- [109] Tholen D. J. and Barucci M. A.: *Asteroid Taxonomy*, en Asteroids II, Tucson, Arizona, 1988: Tucson, University of Arizona Press, 298-315.
- [110] Trombka J. L. et al.: *The Chemical Composition of Asteroid 433 Eros: Preliminary Results of the Near-Shoemaker X-Ray/Gamma-Ray Spectrometer*, Meteoritics & Planetary Science Supplement, Volume 35, 2000, p.A159.
- [111] Valsecchi G. B. et al.: *Identification of Asteroid Dynamical Families*, en Asteroid II, Tucson, Arizona, 1988: Tucson, University of Arizona Press, 1989, 368-385.
- [112] Vedder J. D.: *Main Belt Collision Probabilities and Impact Velocities*, Icarus, Volume 131 (1998), 283 - 290.
- [113] Veeder G. J. et al.: *Asteroid Results from the IRAS Survey*, en Asteroids II, Tucson, Arizona, 1989: Tucson, University of Arizona Press, 282-289.
- [114] Wetherill G. W. and ReVelle D. O.: *Which Fireballs are Meteorites? A Study of the Prairie Network Photographic Meteor Data*, Icarus, Volume 48 (1981), 308 - 328.
- [115] Wilkison S. L. and Robinson M. S.: *Bulk Density of Ordinary Chondrite Meteorites and Implications for Asteroidal Internal Structure*, Meteoritics and Planetary Science, Volume 35, (2000), 1203 - 1213.
- [116] Natural History Museum: *Introduction to meteoritics*, en The Meteorite Catalogue, <http://internt.nhm.ac.uk/jdsml/research-curation/projects/metcat/bigintro.dsml>.