

**DETERMINACIÓN DE MOLÉCULAS PREBIÓTIAS EN LA
NEBULOSA SOLAR POR MEDIOS ESPECTROSCÓPICOS**

HEIDY MAYERLY QUITIÁN LARA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE QUÍMICA

BUCARAMANGA

2013

**DETERMINACIÓN DE MOLÉCULAS PREBIÓTIAS EN LA
NEBULOSA SOLAR POR MEDIOS ESPECTROSCÓPICOS**

HEIDY MAYERLY QUITIÁN LARA

**Trabajo de grado para optar el título de
QUÍMICA**

Director: MSc. Rafael Cabanzo Hernández

Codirectores: PhD. Enrique Mejía Ospino

PhD. Edgar Fabián Mendoza

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE QUÍMICA

BUCARAMANGA

2013

A Alejandro, por enseñarme a que los sueños pueden hacerse realidad, que solo es cuestión de intentarlo.

A mi abuelita y a mi madre, por su confianza y apoyo.

A mi padre...

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Rafael Cabanzo Hernández, profesor de la escuela de Física de la Universidad Industrial de Santander y director de la tesis, por su paciencia y valiosas orientaciones.

Enrique Mejía Ospino, profesor de la escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander, por aceptar la codirección del proyecto y por su voto de confianza.

Edgar Mendoza, Observatorio de Valongo, Universidad Federal de Rio de Janeiro, por aceptar la codirección del proyecto, por sus orientaciones y valiosa ayuda.

A mi familia, por su incondicional apoyo.

A todos aquellos que de alguna u otra forma contribuyeron en el desarrollo de esta tesis y a mi proceso de formación.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	15
1.1. OBJETIVO GENERAL	15
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	16
2.1. ELEMENTOS Y MOLÉCULAS PREBIÓTICAS	16
2.2. NUCLEOSÍNTESIS ESTELAR.....	20
2.3. PROCESOS R Y L DE CAPTURA DE NEUTRONES	25
2.4. NEBULOSA SOLAR - NUBE DE OORT	27
2.5. ASTEROIDES	29
2.5.1. CLASIFICACIÓN ESPECTRAL DE LOS ASTEROIDES	30
2.6. COMETAS	31
3. BASES DE DATOS Y SOFTWARE	34
3.1. BASES DE DATOS.....	34
3.1.1. United States Geological Survey Spectroscopy Laboratory (USGS Speclab)	34
3.1.2. Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey (SMASS).....	34
3.2. SOFTWARE UTILIZADO	35
3.2.1. SPLAT - Herramienta de análisis espectral.....	35
4. IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA Y RANGO ESPECTRAL	36
4.1. ESPECTROSCOÍA DE REFLECTANCIA	37
4.2. ASTEROIDES	38
4.3. SATÉLITES.....	39

4.4. PLANETAS	40
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	42
5.1. ESPECTROS DE ASTEROIDES	42
5.2. ESPECTROS DE SATÉLITES.....	49
5.2.1. Satélite Calisto.....	49
5.2.2. Satélite Europa	51
5.2.3. Satélite Ganimedes	55
5.3. ESPECTROS DE PLANETAS	59
5.3.1. Anillos del Planeta Saturno.....	59
5.3.2. Planeta Marte	62
5.4. ESPECTROS DE COMETAS	63
6. MECANISMOS POSIBLES DE FORMACIÓN MOLECULAR.....	67
6.1. Reacciones ion-molécula:	67
6.2. Reacciones en la superficie de granos de polvo interestelar	69
6.3. Reacciones de química neutra.....	70
7. CONCLUSIONES	72
8. RECOMENDACIONES	74
BIBLIOGRAFÍA.....	75
ANEXOS	79

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. MOLÉCULAS IDENTIFICADAS EN EL MEDIO INTERESTELAR Y MEDIO CIRCUMESTELAR RESPECTO AL NÚMERO DE ÁTOMOS QUE LAS COMPONEN.....	17
TABLA 2. CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL MEDIO INTERESTELAR.	19
TABLA 3. ASTEROIDES RELEVANTES PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO [22].....	39
TABLA 4. SATÉLITES RELEVANTES PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO [23]	40
TABLA 5. PLANETAS RELEVANTES PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO [24].....	41
TABLA 6. IDENTIFICACIÓN DE LAS BANDAS ESPECTRALES EN MM DEL ASTEROIDE ÁSTRAEA Y EL MINERAL FERRIHIDRITA. [28].....	43
TABLA 7. IDENTIFICACIÓN DE LAS BANDAS ESPECTRALES EN MM DEL ASTEROIDE KUMAKIRI Y EL MINERAL ANTOFILITA [28].....	47
TABLA 8. IDENTIFICACIÓN DE LAS BANDAS ESPECTRALES EN MM DEL SATÉLITE CALISTO Y EL MINERAL SINGENITA. [28].....	51
TABLA 9. IDENTIFICACIÓN DE LAS BANDAS ESPECTRALES EN MM DEL SATÉLITE EUROPA Y EL MINERAL AGUA. [28].....	52
TABLA 10. IDENTIFICACIÓN DE LAS BANDAS ESPECTRALES EN MM DEL SATÉLITE EUROPA Y EL MINERAL EPSOMITA. [28]	54
TABLA 11. IDENTIFICACIÓN DE LAS BANDAS ESPECTRALES EN MM DEL SATÉLITE GANIMEDES Y EL MINERAL MIRABILITA. [28]	57
TABLA 12. ENERGÍAS DE ENLACE Y LONGITUDES DE ONDA QUE FAVORECEN LA FOTÓLISIS [43].....	71

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. ESTRUCTURAS CÍCLICAS EXISTENTES EN EL MEDIO INTERESTELAR	18
FIGURA 2. DIAGRAMA DE HERTZPRUNG-RUSSELL (H-R).....	22
FIGURA 3. CADENA PROTÓN-PROTÓN.....	23
FIGURA 4. CICLO CNO	24
FIGURA 5. RUTAS L-R DE CAPTURA DE NEUTRONES.....	26
FIGURA 6. ABUNDANCIAS DE ELEMENTOS QUÍMICOS EN EL SISTEMA SOLAR VRS SU NÚMERO MÁSCO	27
FIGURA 7. NUBE DE OORT Y CINTURÓN DE KUIPER	28
FIGURA 8. BUS-DEMEO TAXONOMY.....	31
FIGURA 9. MORFOLOGÍA DE LOS COMETAS.....	32
FIGURA 10. EMISIÓN TÉRMICA Y FLUJO SOLAR REFLEJADO.....	38
FIGURA 11. ASTEROIDE ASTRAEA - MINERAL FERRIHIDRITA	44
FIGURA 12. ASTEROIDE URANIA - MINERAL JAROSITA.....	45
FIGURA 13. ASTEROIDE KUMAKIRI- MINERAL ANTOFILITA	46
FIGURA 14. ASTEROIDE ANTÍOPE – MINERAL KAINITA	48
FIGURA 15. SATÉLITE CALISTO – MINERAL SINGENITA.....	50
FIGURA 16. SATÉLITE EUROPA – MINERAL AGUA	53
FIGURA 17. SATÉLITE EUROPA – MINERAL EPSOMITA.....	54
FIGURA 18. SATÉLITE GANIMEDES – MINERAL MIRABILITA.....	56
FIGURA 19. SATÉLITE GANIMEDES – MINERAL KAINITA	58
FIGURA 20. ANILLOS DEL PLANETA SATURNO – MINERAL AGUA.....	60
FIGURA 21. ANILLOS DEL PLANETA SATURNO – CLORURO DE AMONIO	61
FIGURA 22. PLANETA MARTE – MINERAL POLIHALITA.....	63
FIGURA 23. COMETA C/1999 S4 LINEAR	64
FIGURA 24. COMETA HYAKUTAKE C/1996 B2.....	65
FIGURA 25. REACCIONES QUÍMICAS EN GRANOS DE POLVO INTERESTELAR.....	69

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A	79
ANEXO B	81
ANEXO C	82

Título: DETERMINACIÓN DE MOLÉCULAS PREBIÓTIAS EN LA NEBULOSA SOLAR POR MEDIOS ESPECTROSCÓPICOS*

Autor: Heidy Mayerly Quitián Lara**

Palabras claves: Nebulosa Solar, moléculas prebióticas, espectroscopia, asteroides, cometas, satélites.

Contenido

La espectroscopia aplicada al estudio de elementos y moléculas existentes fuera de la atmosfera terrestre se ha convertido en una enorme herramienta de apoyo para el desarrollo de nuevas e innovadoras técnicas, las cuales permiten la exploración de nuestro entorno espacial con una gran precisión, con el fin de ampliar nuestro conocimiento sobre la química, la física y la biología que formaron parte inicial de nuestro desarrollo como organismos y como sistema planetario. Actualmente, los diferentes telescopios espaciales permiten la observación de una gran cantidad de estructuras moleculares simples (prebióticas), presentes en los diferentes cuerpos que orbitan al Sol en el Sistema Solar y a su vez, permiten la exploración de lugares externos a él, dentro y fuera de la Vía Láctea, con la posibilidad de hacer un barrido por las diferentes longitudes de onda, dando así una vasta cantidad de datos, algunos de acceso libre, para ser procesados y analizados en los diferentes campos de la ciencia relacionados a la astronomía. En este trabajo, se emplearon los datos procedentes de la base de datos de *Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey* (SMASS) y *United States Geological Survey Spectroscopy Laboratory* (USGS Speclab) con el fin de realizar un estudio sobre la existencia de moléculas prebióticas en algunos de los diferentes cuerpos que orbitan en el Sistema Solar (asteroides, satélites, cometas) hasta los límites de la Nube de Oort conocida como Nebulosa Solar, obteniendo como resultado la identificación de algunos minerales con contenido molecular prebiótico de importancia biológica como H₂O, SO₄, NH₄ entre otros.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ciencias Escuela de Química. Director: MSc. Rafael Cabanzo Hernández. Codirectores: Enrique Mejia Ospino, Edgar Mendoza.

Title: DETERMINATION OF PREBIOTICS MOLECULES IN SOLAR NEBULA BY SPECTROSCOPIC MEANS *

Author: Heidy Mayerly Quitián Lara **

Keywords: Solar Nebula, prebiotics molecules, spectroscopy, asteroids, comets, satellites

Content

The Spectroscopy applied to the study of elements and molecules existing outside the Earth's atmosphere has become a great support tool for the development of new and innovative techniques, which allow the exploration of our space environment with great precision, in order to expand our knowledge of chemistry, physics and biology, which formed the initial part of our development as organisms and a planetary system. Currently, the space telescopes allow the observation of a large number of (prebiotics) simple molecular structures, present in the different bodies that orbit the Sun in the Solar System and at the same time, they allow the exploring places external to it, inside and outside of the Milky Way, with the possibility of a sweep by the different wavelengths thus giving a vast amount of data, some of free access, to be processed and analyzed in the different fields of science related to astronomy. In this work, the data from the database of Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey (SMASS) and United States Geological Survey Spectroscopy Laboratory (USGS Speclab) were used in order to carry out a study on prebiotic molecules in some of the different bodies that orbit in the Solar system (asteroids, satellites, comets) up to the limits of the Oort Cloud known as the Solar Nebula, resulting in the identification of some minerals with molecular Prebiotic content with biological importance as H₂O, SO₄, NH₄, among others.

* Degree work

** Science Faculty, Chemistry school. Director: MSc. Rafael Cabanzo Hernández. Co-directors: Enrique Mejía Ospino, Edgar Mendoza.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la composición química de los astros y del Medio Interestelar, se ha convertido a lo largo de los últimos 30 años en una ciencia creciente y de actualidad denominada Astroquímica. Esta ciencia, se encarga de la identificación y el debido estudio del material atómico y molecular presente en el Universo, por medio de la implementación de sondas espaciales y telescopios, los cuales realizan un barrido por las diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, capturando información por medio de los fenómenos de radiación intrínsecos del objeto o la región analizada. Estos instrumentos de adquisición, proporcionan una serie de datos que pueden ser analizados por técnicas fotométricas o espectroscópicas, todo sujeto al tipo de información que desea obtenerse y el grado de precisión que se espera de los mismos.

En este trabajo, se utilizan los datos espectroscópicos obtenidos de las bases de datos *Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey (SMASS)* y *United States Geological Survey Spectroscopy Laboratory (USGS Speclab)*, en las longitudes de onda del Infrarrojo Cercano (IRC) y Visible (Vis), de una muestra aleatoria de asteroides, cometas, satélites y planetas, pertenecientes a la Nebulosa Solar, con el propósito de realizar la identificación de las moléculas prebióticas existentes en este tipo de cuerpos. Con el desarrollo del mismo, se obtiene la identificación de algunos minerales con el contenido molecular esperado y se parte de ellos como base para inferir los diferentes mecanismos de formación de este tipo de estructuras moleculares en el ambiente fisicoquímico que implica el espacio exterior.

La temática del proyecto se explica en este documento por medio de capítulos, donde cada uno de ellos proporciona la información necesaria para la debida interpretación de los resultados expuestos al final del mismo bajo el título de conclusiones. Además se incluye una sección de anexos, en donde se hace una descripción detallada de los cuerpos celestes utilizados en este trabajo.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la presencia de moléculas prebióticas conformadas principalmente por C, H, N, O y S, por medios espectroscópicos en asteroides, cometas, lunas y/o planetas de la Nebulosa Solar.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Búsqueda y selección de los objetos celestes y sus respectivos espectros teniendo en cuenta las longitudes de onda requeridas para el desarrollo del proyecto.
- Identificar objetos presentes en la Nebulosa Solar ricos en C, H, N, O y S por medio de espectroscopia Visible (Vis) – Infrarroja (IR)
- Analizar por medios espectroscópicos en las longitudes de onda Vis-IR la presencia de moléculas prebióticas en los objetos anteriormente seleccionados
- Comparar los resultados con espectros de referencias tomados de bases de datos para establecer diferencias y similitudes
- Inferir posibles mecanismos de formación de este tipo de estructuras teniendo en cuenta las condiciones del medio

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. ELEMENTOS Y MOLÉCULAS PREBIÓTICAS

Elementos químicos como el Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno y Azufre denominados biogénicos, por ser los elementos constituyentes de estructuras moleculares de importancia biológica, son componentes característicos de moléculas orgánicas e inorgánicas tipo aminoácido, carbohidratos, minerales, etc., presentes en los diferentes ecosistemas terrestres. En las últimas décadas, se han identificado moléculas compuestas por estos elementos, con estructuras simples, en objetos del Sistema Solar, el Medio Interestelar¹ y Medio circumestelar², como las enunciadas en la tabla 1.

¹Medio tenue entre las estrellas

²Ambiente alrededor de una estrella que tiene química impulsada por un campo de flujo o radiación de fotones

Tabla 1. Moléculas identificadas en el medio interestelar y medio circumestelar respecto al número de átomos que las componen.

NÚMERO DE ÁTOMOS										
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13
H ₂	C ₃	c-C ₃ H	C ₅	C ₅ H	C ₆ H	CH ₃ C ₃ N	CH ₃ C ₄ H	(CH ₃) ₂ CO	HC ₉ N	HC ₁₁ N
AlF	C ₂ H	l-C ₃ H	C ₄ H	l-H ₂ C ₄	CH ₂ CHCN	HCOOCH ₃	CH ₃ CH ₂ CN			
AlCl	C ₂ O	C ₃ N	C ₄ Si	C ₂ H ₄	CH ₃ C ₂ H	CH ₃ COOH	(CH ₃) ₂ O			
C ₂	C ₂ S	C ₃ O	l-C ₃ H ₂	CH ₃ CN	HC ₅ N	C ₇ H	CH ₃ CH ₂ OH			
CH	CH ₂	C ₃ S	c-C ₃ H ₂	CH ₃ NC	HCOCH ₃	H ₂ C ₆	HC ₇ N			
CH ⁺	HCN	C ₂ H ₂	CH ₂ CN	CH ₃ OH	NH ₂ CH ₃		C ₈ H			
CN	HCO	HCCN	CH ₄	CH ₃ SH	c-C ₂ H ₄ O					
CO	HCO ⁺	HCNH ⁺	HC ₃ N	HC ₃ NH ⁺						
CO ⁺	HCS ⁺	HNCO	HC ₂ NC	HC ₂ CHO						
CP	HOC ⁺	HNCS	HCOOH	NH ₂ CHO						
CSi	H ₂ O	HOCO ⁺	H ₂ CHN	C ₅ N						
HCl	H ₂ S	H ₂ CO	H ₂ C ₂ O							
KCl	HNC	H ₂ CN	H ₂ NCN							
NH	HNO	H ₂ CS	HNC ₃							
NO	MgCN	H ₃ O ⁺	SiH ₄							
NS	MgNC	NH ₃	H ₂ COH ⁺							
NaCl	N ₂ H ⁺	SiC ₃								
OH	N ₂ O									
PN	NaCN									
SO	OCS									
SO ⁺	SO ₂									
SiN	c-SiC ₂									

Fuente (Shaw Andrew)

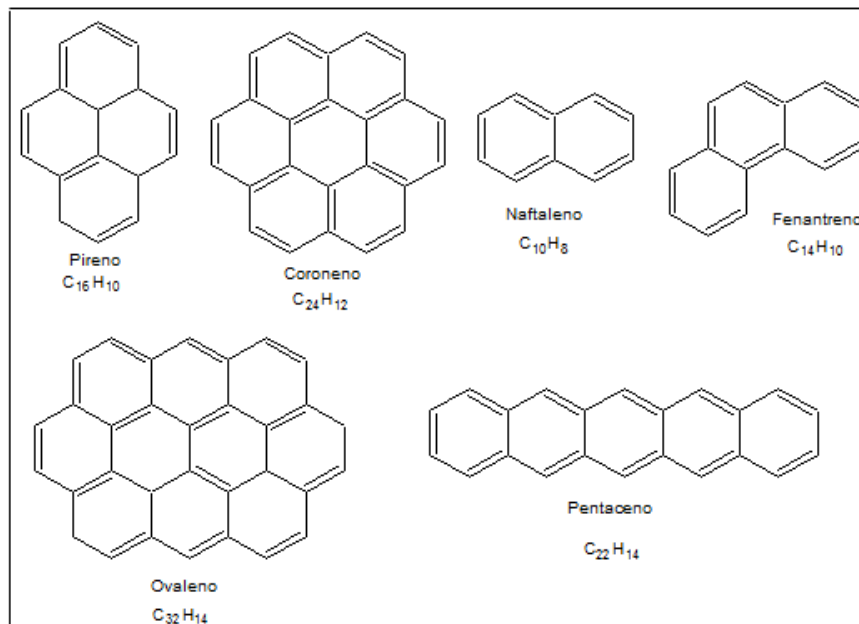
La letra c minúscula presente antes de la fórmula condensada representa la existencia de estructuras cíclicas

Estas estructuras, en mayor o menor cantidad fueron detectadas en el Medio Interestelar, siendo parte de la naturaleza química de diferentes objetos rocosos como planetas, satélites, asteroides u objetos gaseosos como planetas, nubes moleculares, etc. [1]

Estas moléculas, además de servir de base para la formación de moléculas más complejas, ya sean conformadas por cadenas lineales, ramificadas o presentar estructuras cíclicas como las mostradas en la figura 1, dan información sobre la

evolución química del material que constituyó la Nebulosa Solar¹ en sus primeras etapas de formación [2]

Figura 1. Estructuras cíclicas existentes en el Medio Interestelar



Fuente: Elaboración propia

Estructuras como el Monóxido de Carbono, Acetileno, Amoníaco, Ácido Fórmico, son los indicadores de la efectividad de los procesos de síntesis que se llevan a cabo en lugares tan remotos y con condiciones fisicoquímica no aptas para la supervivencia de especies superiores como los humanos, pero favorables para el

¹Nebulosa que dio origen al Sistema Solar

desarrollo de estructuras moleculares prebióticas y posiblemente cuna de moléculas de tipo aminoácido como la Glicina [3]. En la tabla 2, se muestran algunas de las características fisicoquímicas del MI, identificando las regiones que lo componen.

Tabla 2. Características fisicoquímicas del Medio Interestelar.

Regiones	D	T	M	Ds
	$n_0\text{cm}^{-3}$	K	$10^9 M_{\odot}$	$M_{\odot}\text{Pc}^{-2}$
Tibias-Medio Neutro	0,5	8000	2,8	1,5
Tibias-Medio Ionizado	0,1	8000	1,0	1,1
Frías-Medios Neutros	50	80	2,2	2,3
Nubes Moleculares	>200	10	1,3	1,0

Fuente: (Tielens A.)

D: Densidad (partículas por centímetro cúbico), T: temperatura (grados absolutos), M: masa total en Masas Solar es (M_{\odot}), Ds: densidad de superficie en la vecindad Solar.

2.2. NUCLEOSÍNTESIS ESTELAR

El proceso de síntesis de los primeros veintiséis elementos de la tabla periódica se denomina nucleosíntesis estelar, esto debido a que se realiza principalmente en el núcleo de las estrellas y se origina a partir de los choques realizados por protones o Hidrógeno ionizado.

El *An Introduction to Modern Astrophysics* de B. Carroll and D. Ostlie [4] explica que, dependiendo de la masa que tenga la estrella, esta poseerá ciertas características que definirán su paso por el universo, por lo tanto, se describe cómo influyen propiedades físicas como la masa, medida en masas solares (M_{\odot}) y temperatura, medida en unidades absolutas (K) en la efectividad de los procesos de nucleosíntesis estelar. Las características físicas anteriormente mencionadas fueron estudiadas en conjunto por *Ejnar Hertzsprung* (1911) y *Henry Norris Russell* (1913), quienes mostraron la relación entre la luminosidad¹ y el tipo espectral² de cada estrella en un diagrama conocido como diagrama Hertzsprung-Russell (diagrama H-R).

En la figura 2, se ilustra el diagrama H-R con sus regiones características, en el, se observan las diferentes agrupaciones estelares dependiendo del grado de evolución.

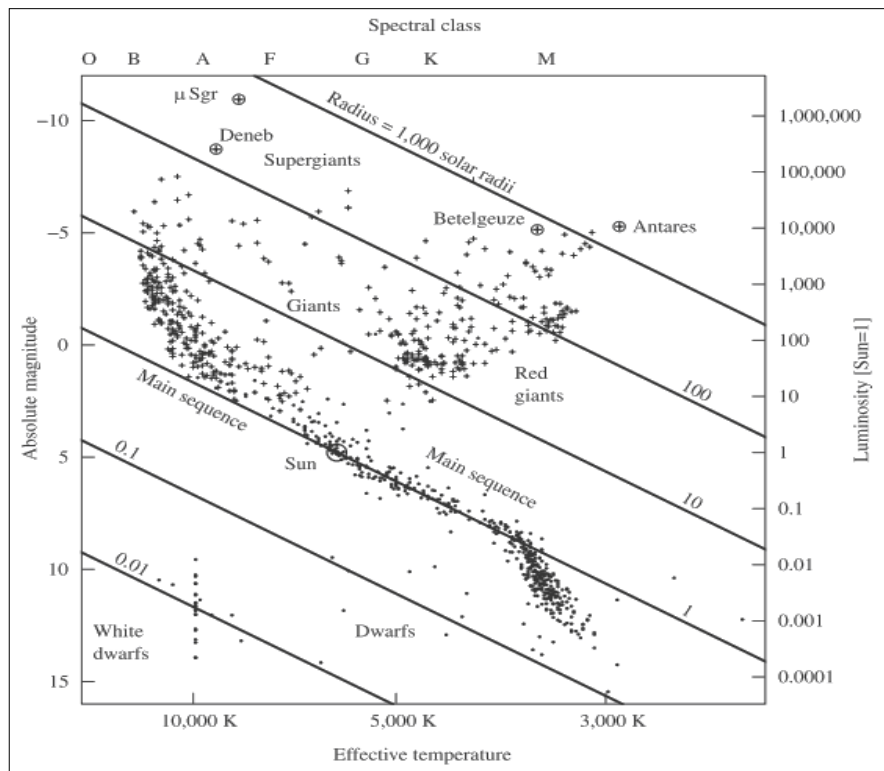
¹Cantidad de radiación emitida por la estrella en Watts

²Clasificación estelar realizada teniendo en cuenta la temperatura superficial y las líneas de absorción de la estrella

La nucleosíntesis estelar es definida como una serie de reacciones termonucleares gobernadas por el fenómeno de fusión nuclear [5], se presenta gracias a las elevadas temperaturas y presiones existentes en el núcleo de las estrellas, las cuales según su ubicación en el diagrama H-R, serán capaces de sintetizar elementos como el Helio (todas las estrellas que se encuentran en la secuencia principal), Carbono (para estrellas de masas $\approx M_{\odot}$), Neón (para estrellas de masas $\approx 8 M_{\odot}$) y por último Hierro para estrellas de alta masa ($\approx 25 M_{\odot}$) [6].

En estrellas con una masa equivalente a la masa del Sol, los fenómenos de fusión son llevados a cabo principalmente por un proceso denominado cadena protón-protón (figura 3), este proceso tiene como punto de partida un núcleo de Hidrógeno (protón) [7], el cual debido a las condiciones estelares choca de manera efectiva y consecutiva con núcleos similares para dar paso a la formación de núcleos de Helio; a su vez, este núcleo podrá chocar con otras especies atómicas dando paso a la formación de elementos cada vez más pesados.

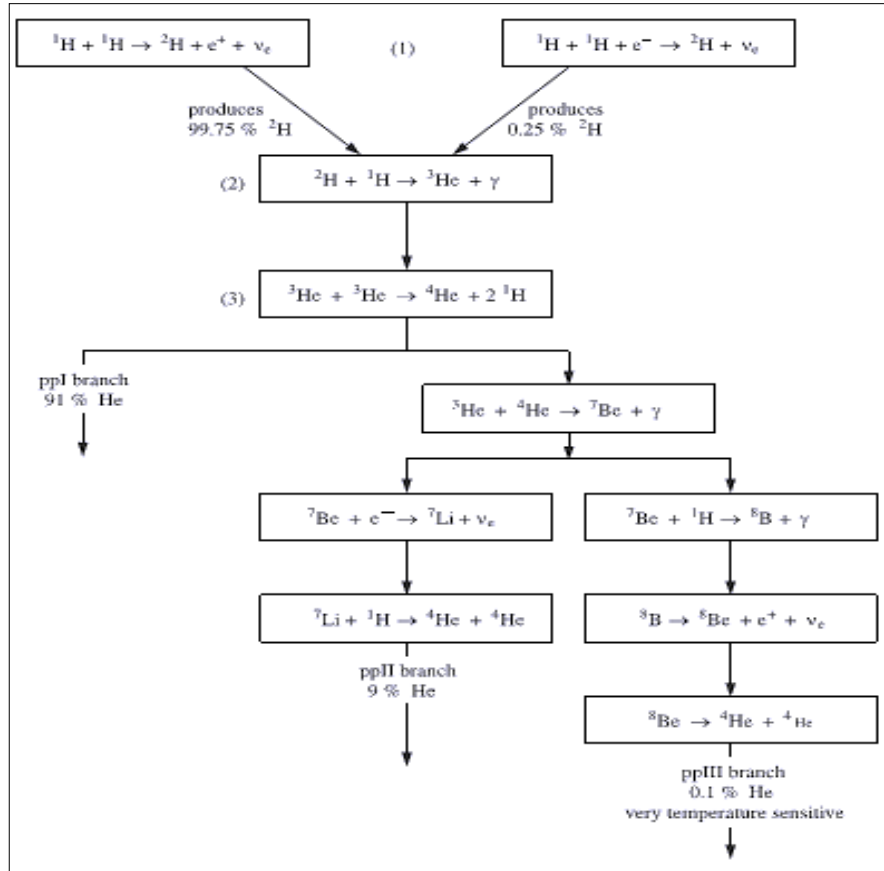
Figura 2. Diagrama de Hertzsprung-Russell (H-R)



Fuente: (Karttunen, Kröger, Oja)

Para estrellas de masa superior ($>8 M_{\odot}$), el proceso que rige el fenómeno de fusión es llamado ciclo CNO (Carbono, Nitrógeno, Oxígeno), el cual sigue el mismo mecanismo de choques efectivos que la cadena protón-protón solo que en el ciclo CNO intervienen átomos más pesados, en la figura 4 se ilustra la secuencia que se lleva a cabo en el ciclo CNO.

Figura 3. Cadena protón-protón

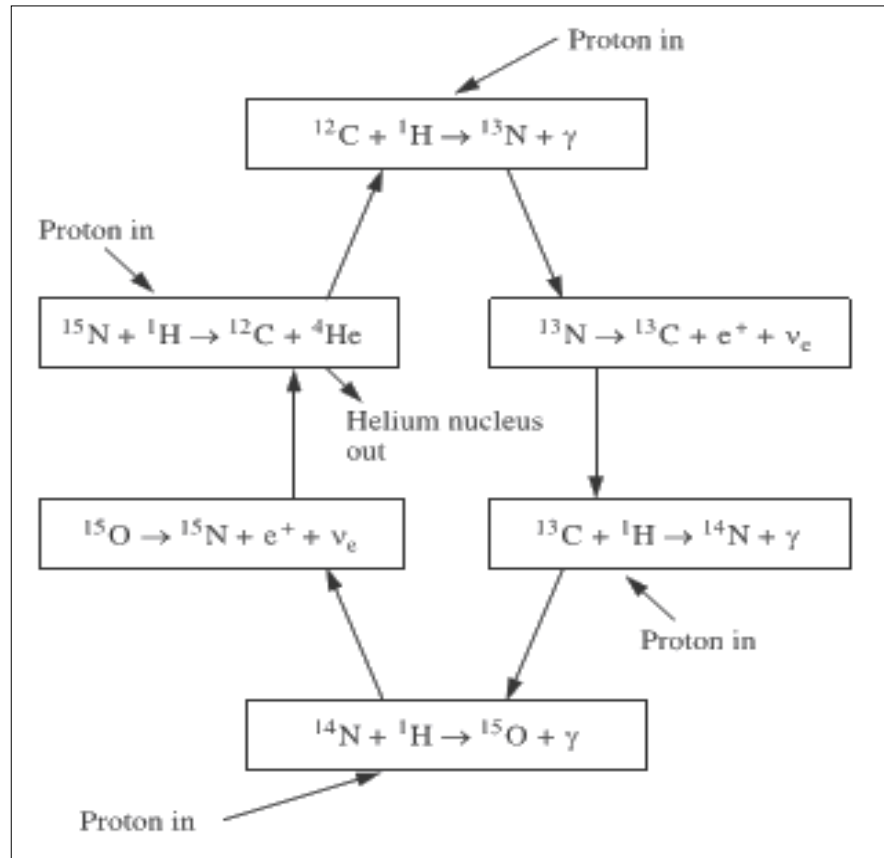


Fuente: (Karttunen, Kröger,Oja)

De esta manera las estrellas sintetizan los elementos del Universo (siendo el 99% Hidrógeno y el restante repartido principalmente en helio y el resto de los elementos en trazas hasta el hierro). Cuando las estrellas llegan al fin de sus vidas (dependiendo de su masa colapsan gravitacionalmente), las estrellas con masas $>8 M_{\odot}$ explotarán en un proceso conocido como Súper Novas (SN), estas explosiones liberan al Medio Interestelar el material atómico contenido en la

estrella [8] y a su vez, estimulan en este medio la formación de nuevos átomos y agregados moleculares, gracias a la inyección de grandes cantidades de energía.

Figura 4. Ciclo CNO



Fuente: (Karttunen, Kröger, Oja)

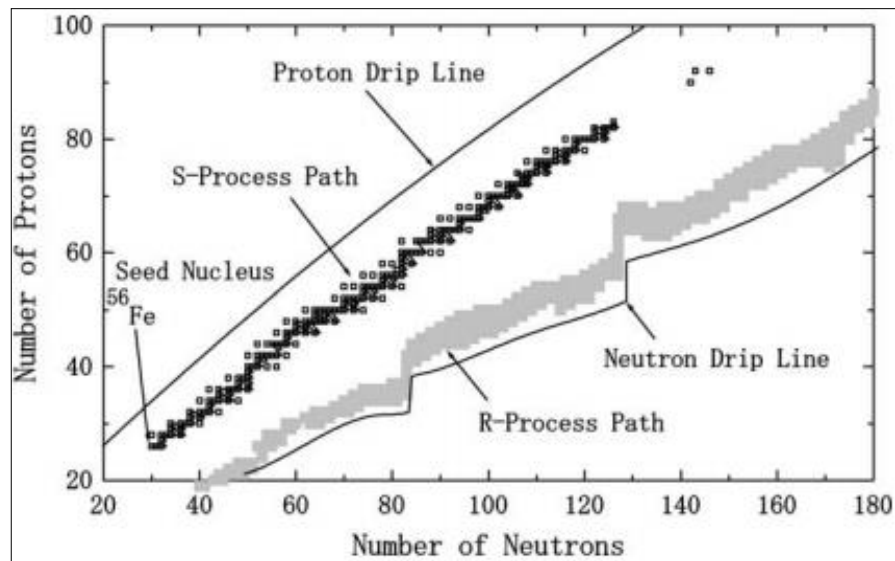
2.3. PROCESOS R Y L DE CAPTURA DE NEUTRONES

Se denominan proceso de captura de neutrones rápido (R) o lento (L), a los fenómenos de captura de neutrones que ocurren en las diferentes etapas de la síntesis de elementos en el universo. Esta división (lentos o rápidos) se realiza teniendo en cuenta la tasa media de desintegración de núcleos atómicos inestables o decaimiento β^1 .

M. Igashira y T. Ohsaki [9] explican que el proceso L se encuentra en la misma dirección que los procesos que formaron los núcleos del Sistema Solar (figura 5), siendo dominada por los procesos que implican la cadena protón-protón, además identifican a la síntesis de elementos en estrellas de la secuencia principal como la segunda nucleosíntesis del universo, siendo la primera, la ocurrida en el Big-Bang¹, por lo tanto, los procesos L son identificados como los procesos de nucleosíntesis que se llevan a cabo en las estrellas que están en la secuencia principal y los procesos R aquellos en los que interviene la muerte de estrellas masivas o cualquier tipo de súper novae, siendo este caso el medio más favorable para la captura de neutrones (figura 5). Cada uno de los procesos anteriormente descritos sigue rutas específicas de síntesis, las cuales definen la efectividad y el tipo de átomo que se sintetiza y su abundancia. En la figura 6 se muestra la abundancia de los diferentes núcleos atómicos, dando muestra que, la nucleosíntesis favorece a ciertos núcleos por encima de otros, aunque el 99% del material existente en el Universo es constituido por átomos de Hidrógeno.

¹ L.L. Goldin y G.I. Nóvikova, Introducción a la Física Cuántica

Figura 5. Rutas L-R de captura de neutrones



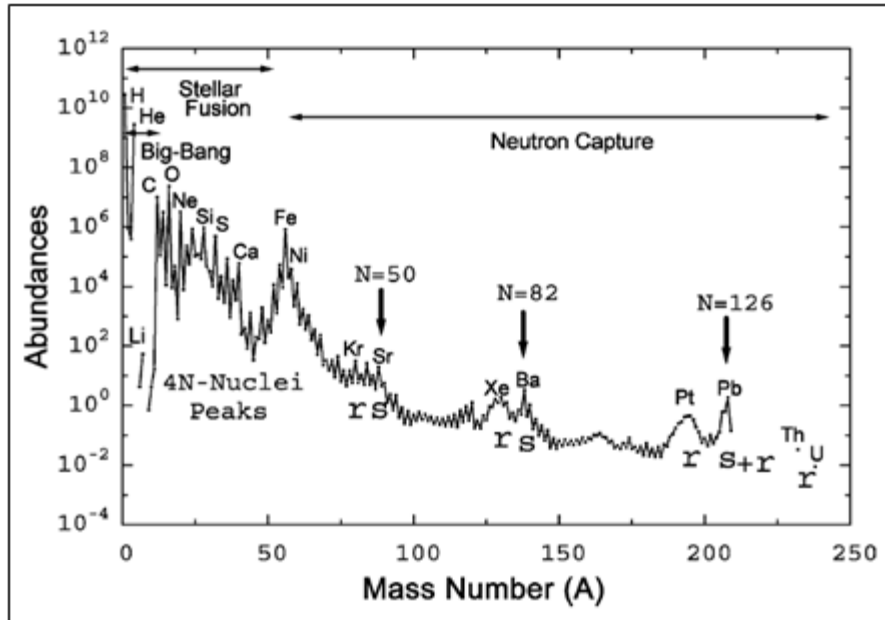
Fuente: (M. Igashira, T. Ohsaki)

En la figura: Procesos lentos (S: Slow), procesos rápidos (R: Rapid)

El proceso de síntesis en el Medio Interestelar, es explicado por A.G.G.M. Tielens en el *The physics and chemistry of the interstellar médium*; En él se muestra que la síntesis de nuevos núcleos atómicos pesados y algunas estructuras moleculares simples ocurren gracias a la inyección de energía y materia al Medio Interestelar por medio de las explosiones SN, por lo tanto, se favorece la formación de nubes moleculares ya sean densas o difusas a causa de los choques ejercidos por los frentes de onda [10]

¹ Modelo cosmológico que describe los inicios del Universo

Figura 6. Abundancias de elementos químicos en el Sistema Solar vrs su número másico



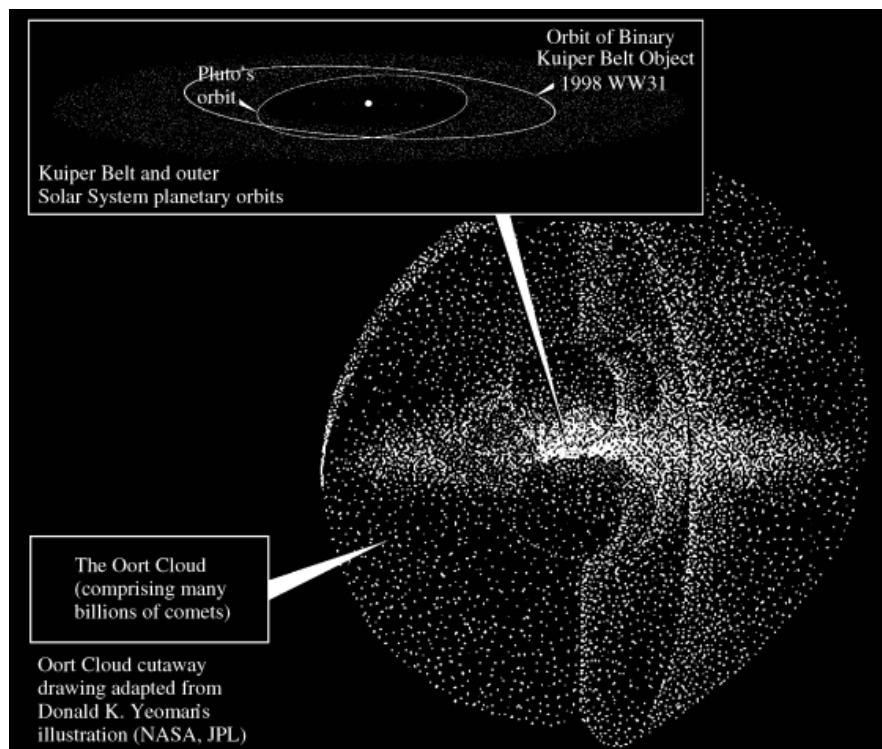
Fuente: (M. Igashira, T. Ohsaki)

2.4. NEBULOSA SOLAR - NUBE DE OORT

Las Nebulosas son una masa de gas y polvo en donde se favorece la formación de estrellas y sistemas planetarios como el Sistema Solar. La Nebulosa que dio origen este sistema planetario se le conoce como Nebulosa Solar. Casi todo el material atómico y molecular encontrado en el Sistema Solar hasta los límites de la Nube de Oort, se encuentra mayoritariamente en el Sol (cuerpo con mayor masa del Sistema Solar) y el resto, se encuentra distribuido entre los planetas (teniendo en cuenta ordenes de masa) lunas, cometas, asteroides y Medio Interestelar [11]. La Nube de Oort (figura 7), es considerado el límite externo de la Nebulosa Solar. Esta región, es considerada la cuna de los cometas de largo

periodo (periodos orbitales superiores a 200 años) que visitan el Sistema Solar, se estima que se encuentra alrededor de 50×10^3 unidades astronómicas¹ (UA), además, se estima que esta nube podría contener algunos miles de millones de cometas, los cuales recogen a su paso el material químico presente en el Medio Interestelar y lo transportan consigo a lo largo de su trayectoria. [12].

Figura 7. Nube de Oort y cinturón de Kuiper



Fuente: (JPL/NASA)

¹Unidad Astronómica (UA) equivale a la distancia media de la Tierra al Sol y su valor es calculado en 149.597.870.700 m.

El cinturón de Kuiper, es una nube en forma de disco compuesta por cuerpos congelados, dentro del Halo de la Nube de Oort, estos cuerpos principalmente asteroides, orbitan alrededor del Sol a una distancia promedio de 65 UA (1.028×10^{-3} años luz), debido a la distancia a la que se encuentran son comúnmente denominados objetos transneptunianos¹. Por otra parte, en el cinturón de Kuiper también son localizados algunos cometas denominados de periodo intermedio o corto (periodos orbitales inferiores a 200 años), cuyos diámetros han sido calculados entre los 100 y los 1000 km. [12].

2.5. ASTEROIDES

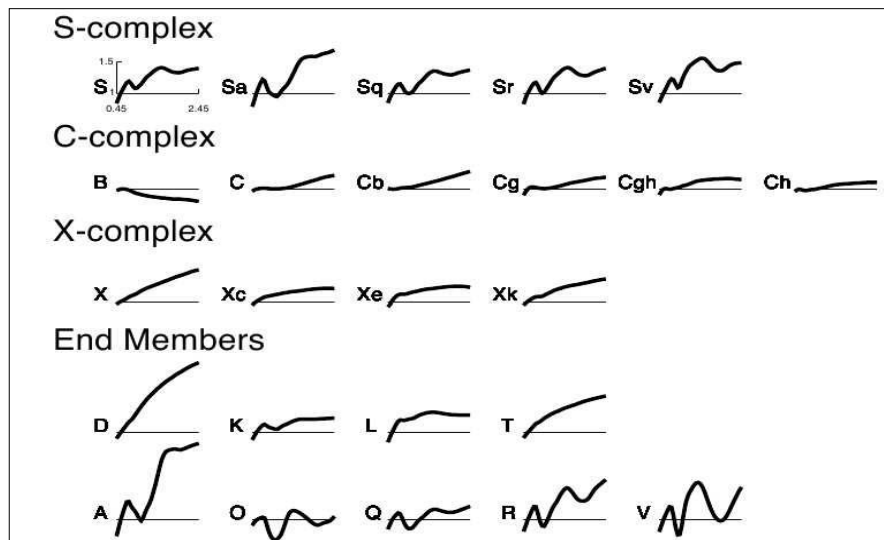
Los asteroides, son cuerpos rocosos que orbitan alrededor del Sol con órbitas regularmente definidas, aunque muchos de ellos aún no han sido clasificados debido a la dificultad para ser observados, se estima que existen en grandes grupos distribuidos en dos regiones específicas del Sistema Solar: El cinturón de asteroides y el cinturón de Kuiper.

²Objetos del Sistema Solar localizados más allá de la órbita de Neptuno

2.5.1. CLASIFICACIÓN ESPECTRAL DE LOS ASTEROIDES

Basados en la información procedente del espectro de reflectancia, color, y albedo, se han realizado clasificaciones taxonómicas a los asteroides por medio de la información obtenida por los diferentes observatorios, iniciando con el trabajo realizado por Clark R. Chapman, David Morrison y Ben Zellner en 1975, quienes, basados en la separación de las bandas de color, dividen los asteroides en dos clases denominadas **s** (*stony*) ricos en Silicatos y **c** (*carbonaceos*) ricos en Carbono. Dicha clasificación, ampliada por David J. Tholen en 1984 y posteriormente por Barucci et al. En 1987, proporcionan la base principal para los estudios realizados a este tipo de objetos en el Sistema Solar [13]. En la actualidad, la SMASS realizó una clasificación más detallada de este tipo de objetos bajo el nombre de Bus-DeMeo taxonomy [14], la cual cuenta con 24 clases taxonómicas (figura 8), basadas en el análisis de los datos espectrales tomados en las longitudes de onda Vis-IRC (0,45 a 2,45 micras), esta clasificación identifica tres grandes grupos denominados S, C y X donde siguiendo el mismo sistema de Tholen para los clase s y c, se incluye la clase X, identificada como un grupo mixto a la que pertenecen los asteroides que no pueden ser clasificados dentro de las dos clases principales, cuya diferencias radican principalmente en composición y albedo [15].

Figura 8. Bus-DeMeo taxonomy



Fuente: (SMASS)

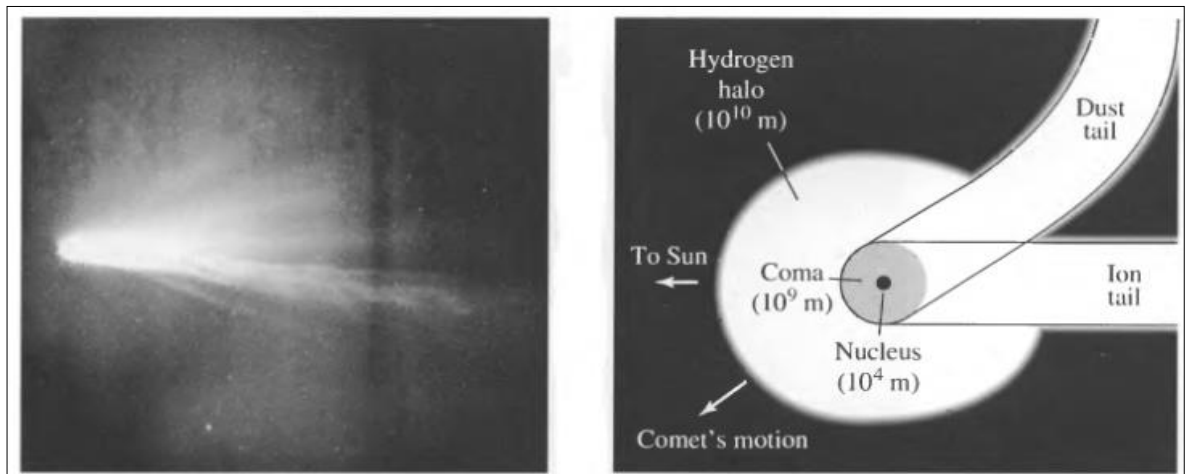
2.6. COMETAS

Los cometas son cuerpos de forma irregular compuestos principalmente por un núcleo rocoso y una superficie congelada que varía entre agua y metano. Los cometas orbitan alrededor del Sol en la Nube de Oort y en el cinturón de Kuiper y se mueven en órbitas elípticas inclinadas al azar con respecto al plano de la eclíptica¹.

¹Línea curva por donde se observa el paso del Sol alrededor de la Tierra

Cuando la órbita de un cometa se acerca al Sol (figura 9), el calor de este, evapora la superficie de hielo (no necesariamente de H₂O), por lo tanto, los gases emanados regularmente forman cráteres por donde se expulsan chorros brillantes y calientes de material gaseoso formando una luminosa bola llamada coma. Al ser empujados por el viento Solar, estos gases luminosos forman una larga y brillante cola, convirtiéndolos así en uno de los cuerpos más llamativos que pueden observarse a simple vista. Químicamente los cometas están constituidos principalmente por silicatos y Carbono, aunque poseen gran variedad de elementos y moléculas, las cuales son un registro del tipo de materia que nos rodea en esta parte de la galaxia [12]

Figura 9. Morfología de los cometas.



Fuente: (B. Carroll and D. Ostlie)

Izquierda: fotografía del cometa Halley tomada por el *Michigan Schmidt telescope at Cerro Tololo Interamerican Observatory* en Abril 12, 1986, se observa la cola de iones (recta) y la cola de polvo (curva). Derecha: Morfología de un cometa

La composición química de los cometas, asteroides, satélites y planetas que componen el Sistema Solar, muestra el grado de evolución cronológico en el que se encuentra el mismo, sabiendo que los elementos que nos conforman provienen de una nube molecular común [16], y teniendo en cuenta que se han identificado cerca de 130 especies moleculares en el Medio Interestelar, la mayoría de estas de carácter orgánico (NH_3 , H_2CO , CH_3OH , NH_2CHO , entre otras), es de esperar la existencia de moléculas con un contenido atómico similar al del planeta Tierra y con un grado de estructuración molecular acorde a las condiciones fisicoquímicas propias del entorno espacial de nuestro sistema planetario [17].

3. BASES DE DATOS Y SOFTWARE

3.1. BASES DE DATOS

3.1.1. United States Geological Survey Spectroscopy Laboratory (USGS Speclab)

La USGS es una organización científica que proporciona información imparcial sobre la salud de los ecosistemas y el medio ambiente, además cuenta con una base de datos de acceso libre con una gran variedad de herramientas de identificación y mapeo terrestre, espectroscopia de imágenes e imágenes hiper-espectrales aplicadas a objetos del Sistema Solar, y una sección de datos dedicada, que permite la identificación de especies minerales [18]. En la dirección web del sitio, se encuentran clasificados algunos espectros de reflectancia, cuyo método de muestreo se realiza en la longitud de onda del Infrarrojo cercano (IRC) en la franja de los 0,65 a los 2,5 micrómetros [19].

3.1.2. Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey (SMASS)

La SMASS, se inició con el objetivo de obtener espectros de reflectancia en la región de longitud de onda visible e infrarroja cercana, para un número importante de pequeños asteroides (diámetros inferiores a 20 km), localizados en la región comprendida entre Marte y Júpiter. Las observaciones se realizan principalmente con el telescopio *Hiltner* de 2,4 m, situado en el Observatorio *Michigan Dartmouth*

MIT (MDM) de la cresta suroeste de *Kitt Peak*, en Arizona. Se utilizó para la adquisición de datos el espectrógrafo Marck III, equipado con una CCD (*Charge Coupled Device*) TI (*Texas Instrument*) 4849 (398 × 598 píxeles) o Tektronix (1024 × 1024). La reducción de los datos se realizó por medio de la herramienta *Image Reduction and Analysis Facility* (IRAF), desarrollado por el *National Optical Astronomical Observatories*, en la página web del sitio [20] se realiza una descripción más amplia de los diferentes elementos utilizados en la toma y procesamiento de los datos espectrales.

3.2. SOFTWARE UTILIZADO

3.2.1. SPLAT - Herramienta de análisis espectral

SPLAT es una herramienta gráfica de uso libre, para la visualización, comparación, modificación y análisis de espectros astronómicos almacenados en FDN, FITS y archivos de texto, y forma parte de la colección STARJAVASLAT. Esta herramienta software permite leer varios espectros al mismo tiempo y visualizarlos por medio de una ventana gráfica. Cada ventana mostrada en pantalla puede ser interactiva, permite el uso de zoom y desplazamientos centrados en alguna longitud de onda específica, además de proporcionar opciones como lectura de coordenadas entre otras [21].

4. IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA Y RANGO ESPECTRAL

El conocimiento de la composición química de la superficie de los objetos celestes pertenecientes a la Nube de Oort puede inferirse a través de la espectroscopia. La luz Solar reflejada en estos objetos contiene información fundamental acerca de las propiedades ópticas de los átomos y moléculas encontradas en la superficie de los mismos [13]. Para el desarrollo de este proyecto se seleccionaron 22 espectros de asteroides de la base de datos SMASS, 6 satélites y 5 planetas de la base de datos USGS, con el fin de ser analizados respecto a su contenido químico para así, determinar la presencia de moléculas prebióticas en su superficie. Los espectros de referencia utilizados en este proyecto también pertenecen a la USGS. Todos los espectros analizados en este trabajo, se encuentran comprendidos en el rango del espectro visible e infrarrojo cercano (0,2- 3,0 μm), por lo tanto, las características que se pueden observar en este tipo de datos son esenciales para discriminar entre las diferentes estructuras químicas presentes, los cuales en el caso de los asteroides, están compuestos principalmente por minerales a base de silicatos. El proceso de identificación de este tipo de componentes en asteroides, se basa en la presencia de bandas alrededor de 1 y 2 μm . Estas bandas son debidas esencialmente a la presencia de olivino y piroxeno (o mezclas) en la superficie de los mismos [13], aunque es necesario tener en cuenta que el objetivo principal del proyecto es la identificación de moléculas prebióticas, por lo tanto, los objetos que no presenten este tipo de estructuras no serán tenidos en cuenta para este proyecto. En los espectros pertenecientes a satélites y planetas, las bandas más fuertes son debidas principalmente a la presencia de agua en forma de hielo en la superficie de estos cuerpos.

4.1. ESPECTROSCOÍA DE REFLECTANCIA

El flujo de luz proveniente del Sol que incide en la superficie de los diferentes objetos del Sistema Solar, para unos con más intensidad que en otros, es dividido en dos contribuciones (figura 10), la radiación Solar reflejada pasivamente por el material de la superficie y la radiación Solar que ha sido absorbida por el objeto y posteriormente convertida en calor, la cual es devuelta o reemitida como radiación térmica al medio; en la figura 10 se observa un análisis de este fenómeno [13], donde gracias a los registros espectroscópicos realizados por los observatorios terrestres, se pueden distinguir los componentes de la radiación recibida por 1km^2 en la zona denominada marea lunar¹, esta región se caracteriza por tener un albedo² de 0,06. Para este análisis se tuvo en cuenta la distancia media entre la Tierra y la luna, el ángulo de fase 0 y la temperatura $T = 395\text{K}$.

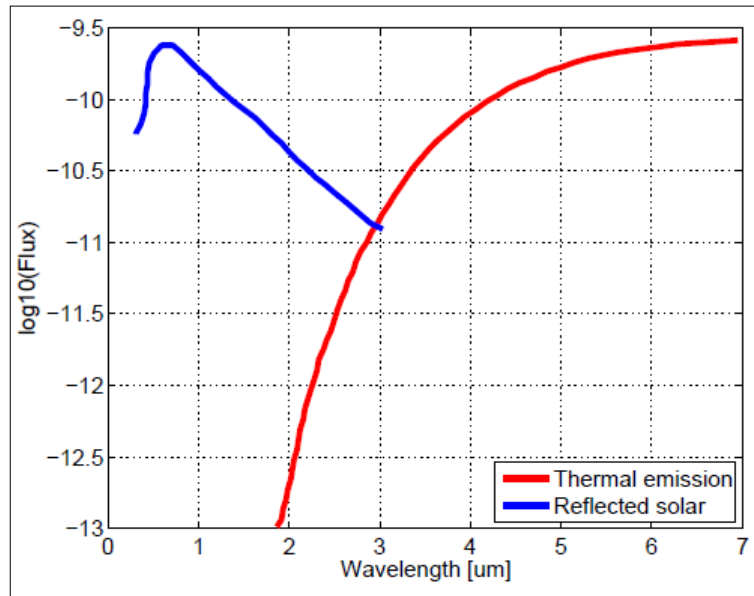
En los resultados expresados en la figura 10, es apreciable que en la región espectral Vis-IRC (0,40 - 2,50 μm , para la mayoría de los espectros analizados en este trabajo), la emisión térmica de los objetos se puede despreciar en comparación con la radiación reflejada.

¹Llanura basáltica oscura en luna formada por antiguas erupciones volcánicas

² Porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma

Así, los datos obtenidos en esta región espectral, brindan información suficiente para la identificación de especies químicas, haciendo uso de los espectros encontrados en las bases de datos mencionadas anteriormente [13].

Figura 10. Emisión térmica y Flujo Solar reflejado



Fuente: (Popescu M.)

4.2. ASTEROIDES

En la tabla 3 se describen de manera general los asteroides más importantes para la realización de este estudio. En el anexo A, se incluye una descripción completa y más detallada de todos los asteroides utilizados.

Tabla 3. Asteroides relevantes para el desarrollo del proyecto [22]

Número de identificación serial	Nombre	Clase taxonómica	Semi eje mayor de la órbita (UA)	Albedo	Espectro Disponible en SMASS
5	ASTRAEA	s	2,575	0,2268	Vis-IRC
7472	KUMAKIRI	v	3,012	-----	IRC
30	URANIA	s	2,36	0,1714	Vis
90	ANTIOPE	c	3,16	0,0603	Vis

4.3. SATÉLITES

En la tabla 4 se describen de manera general los satélites más importantes empleados para el desarrollo de este trabajo, cabe añadir que los tres satélites pertenecen al planeta Júpiter y son conocidas como las lunas Galileanas¹, en el anexo B, se encuentra la información completa de todos los satélites utilizados como objetos de estudio.

¹ En honor a su descubridor Galileo Galilei

Tabla 4. Satélites relevantes para el desarrollo del proyecto [23]

Nombre	Radio orbital medio (Km)	Temperatura superficial (k)	Albedo	Espectro disponible en USGS
Calisto	$1,883 \times 10^6$	80-165	0,22	IRC
Ganimedes	$1,07 \times 10^6$	113	0,43	IRC
Europa	$0,67 \times 10^6$	50-125	0,67	IRC

4.4. PLANETAS

Los planetas más importantes para la realización de este estudio son Marte y Saturno (tabla 5), aunque es necesario aclarar que, en el caso de Saturno, los espectros utilizados pertenecen a los anillos más no al planeta como tal. En el anexo C, se encuentra la información completa de todos los planetas utilizados como objeto de estudio.

Tabla 5. Planetas relevantes para el desarrollo del proyecto [24]

Nombre	Radio orbital medio (UA)	Temperatura superficial (K)	Albedo	Espectro disponible en USGS
Marte	1,52	186-268	0,15	IRC
Saturno	9,54	82-93	0,47	IRC

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los espectros mostrados en este capítulo presentan corrimientos en las bandas características, aunque fueron normalizados dependiendo de la longitud de onda espectral. Las condiciones de adquisición del espectro (factores ambientales), tiempos de toma y la diferencia de los instrumentos utilizados hacen que se presente este corrimiento aunque se hayan aplicado las correcciones necesarias para su debida interpretación.

5.1. ESPECTROS DE ASTEROIDES

Haciendo uso de la herramienta gráfica SPLAT, se realizó la superposición de las imágenes espectrales de los asteroides y de algunos minerales de referencia (espectros tomados de la base de datos USGS) [25], con el fin de determinar la similitud de los espectros y de esta manera proceder a la debida identificación del contenido químico del objeto analizado. Los resultados fueron aceptables para cuatro objetos, teniendo en cuenta la baja resolución espectral y la falta de señales o bandas significativas en el mismo. El análisis se basa principalmente en la visualización de las bandas más significativas del espectro, y en la similitud del comportamiento completo de la señal, gracias a ello, se determinó que cada uno de los espectros de los asteroides seleccionados corresponden a un mineral con contenido prebiótico.

Los minerales identificados respecto a cada asteroide son:

Ferrihidrita: ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) Mineral de tipo óxido, poco cristalino (trigonal) constituido principalmente por FeO_4 y FeO_6 . Su formación en la corteza terrestre se debe principalmente a la oxidación e hidrólisis de otros minerales constituidos por el mismo elemento [26]. Los datos espectroscópicos en el rango Vis-IRC tomados por la USGS muestran la presencia de H_2O [27]. La fuerte similitud del espectro de la Ferrihidrita (figura 11, línea roja) con el espectro del asteroide *Astraea* (figura 11, línea negra), es uno de los resultados más reconocibles a simple vista. En este espectro se destacan tres pequeñas bandas con la siguiente asignación (tabla 6):

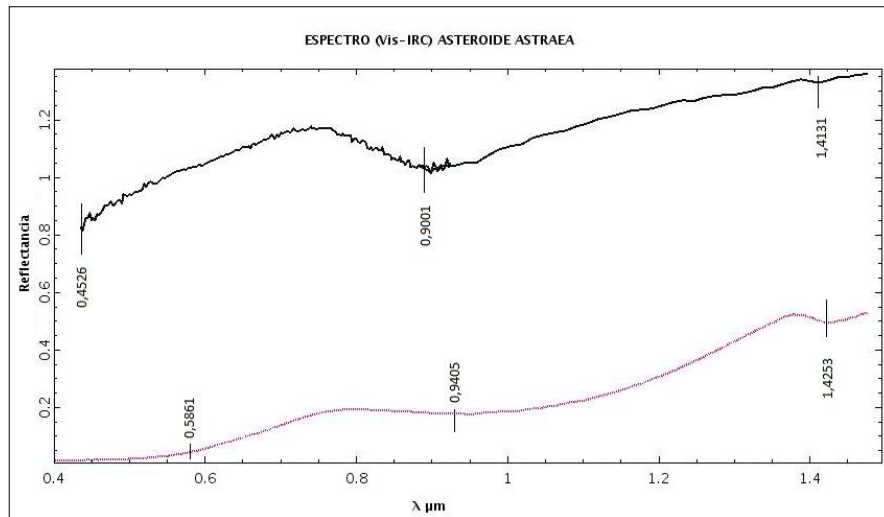
Tabla 6. Identificación de las bandas espectrales en μm del asteroide *Astraea* y el mineral Ferrihidrita. [28]

	B1	B2	B3
Ferrihidrita	0,5861 Fe IV	0,9405 Fe I	1,4253 OI
Asteroide <i>Astraea</i>	0,4526	0,9001	1,4131

La identificación de las señales espectrales se realiza a través de los datos encontrados en la *Atomic Spectra Database Lines Data* (ASD), de la *National Institute of Standards and Technology* (NIST) [28], como se aprecia en el resultado, las señales (tabla 6) corresponden al Hierro atómico y al hierro ionizado, elemento más abundante en este tipo de mineral, aunque la Ferrihidrita muestra

una notoria señal producida por el oxígeno a la altura de 1,4 μm , resultado satisfactorio ya que concuerda con lo esperado en la estructura de un mineral de óxido de hierro hidratado y por lo tanto con presencia de oxígeno.

Figura 11. Asteroide Astraea - Mineral Ferrihidrita

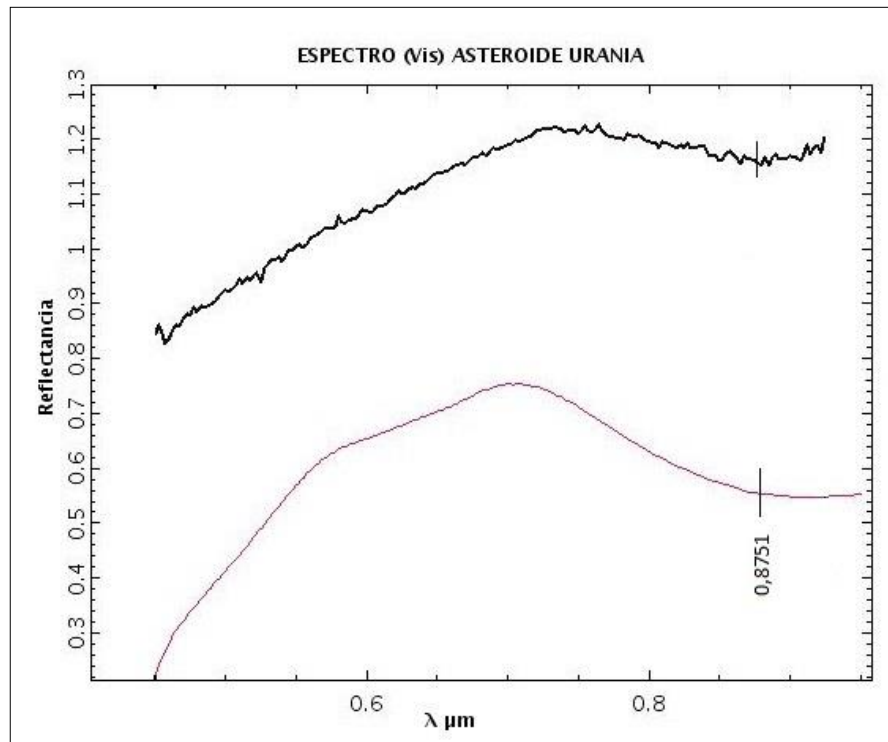


Fuente: Elaboración propia

En la imagen: Asteroide Astraea (línea negra), Mineral Ferrihidrita (línea roja), se señalan los datos espectrales (valles) más significativos, se observa un corrimiento hacia las longitudes más cortas por parte del espectro del asteroide comparado con el espectro del mineral de referencia.

Jarosita: $(\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6)$ Mineral de tipo sulfato, con una estructura trigonal [26]. El espectro de este mineral (figura 12, línea roja) es ligeramente comparable con el espectro Vis del asteroide Urania (figura 12, línea negra), su asignación respecto al mineral se realiza principalmente teniendo en cuenta la forma espectral del asteroide, debido a la poca significancia en las señales espectrales, se hace uso de la característica más significativa de ambos espectros (el punto máximo del espectro en forma de colina presente alrededor de los 0,9 μm).

Figura 12. Asteroide Urania - Mineral Jarosita



Fuente: Elaboración propia

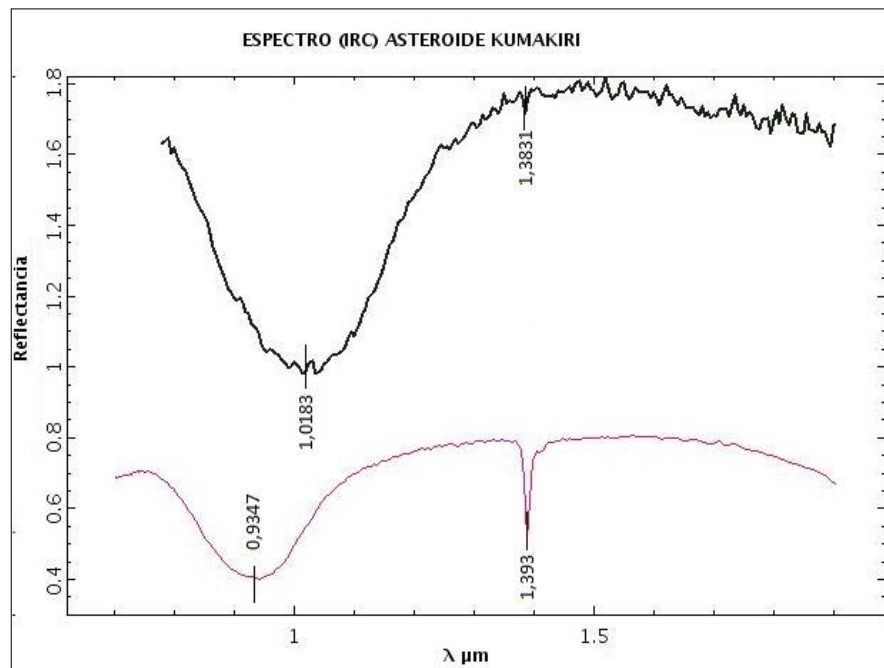
En la imagen: Asteroide Urania (línea negra), Mineral Jarosita (línea roja), se señala el dato espectral más significativo.

La identificación de la única señal espectral que presenta este asteroide, se realiza a través de los datos encontrados en la ASD-NIST [28], de igual manera se hace la búsqueda de referencia atómica respecto a la señal del mineral (0,8751 μm), la cual correspondiente con la señal emitida por el Fe I o hierro atómico, elemento presente en la Jarosita.

Antofilita:(-Si₈O₂₂(OH)₂) Mineral constituido principalmente por silicatos de magnesio, aunque se caracterizan por presentar variedad de elementos

constituyentes (Fe, Ca, K, Na, entre otros) en su estructura [26], presenta un sistema cristalino ortorrómbico y su color varía entre las tonalidades blancas y grisáceas. La similitud en la línea espectral que presenta el asteroide Kumakiri con este mineral es bastante apreciable a simple vista, los dos espectros poseen una gran banda alrededor de $1\mu\text{m}$ y una señal puntiaguda a la altura de $1,4\mu\text{m}$. Estas señales como se muestran en la tabla 7 corresponden con la presencia de hierro atómico, elemento característico de este mineral.

Figura 13. Asteroide Kumakiri- Mineral Antofilita



Fuente: Elaboración propia

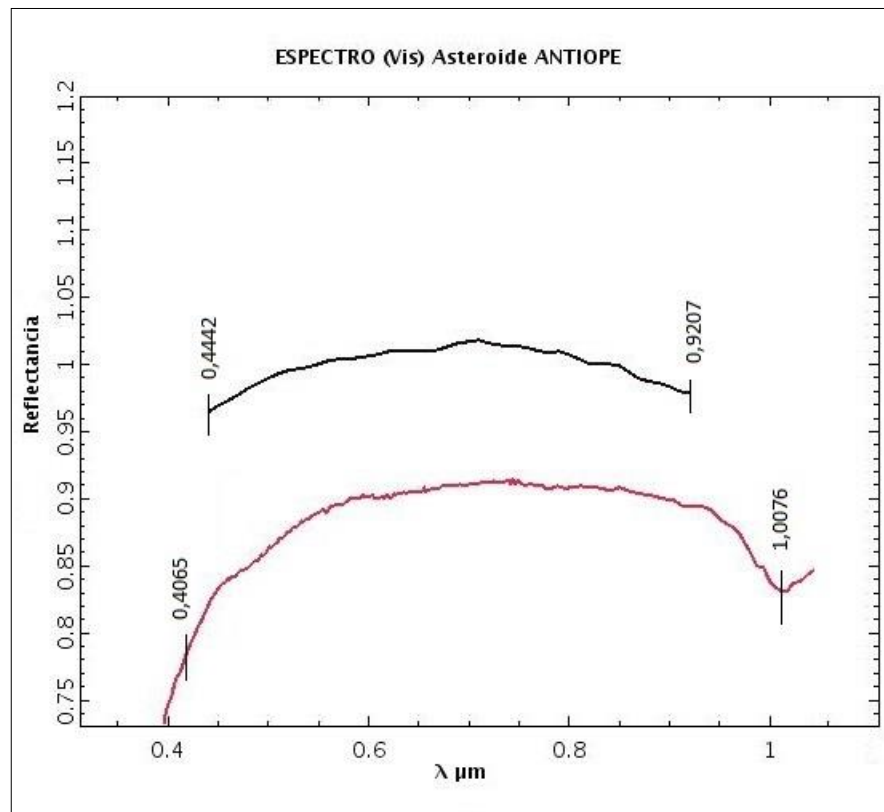
En la imagen: Asteroide Kumakiri (línea negra), Mineral Antofilita (línea roja), se destaca la banda localizada a la altura de $1\mu\text{m}$ como aspecto más significativo en la similitud de ambos espectros.

Tabla 7. Identificación de las bandas espectrales en μm del asteroide Kumakiri y el mineral Antofilita [28]

	B1	B2
Asteroide Kumakiri	1,0183	1,3831
Mineral Antofilita	0,9347 (Fe I)	1,392 (Fe I)

Kainita: $(\text{KMg}(\text{SO}_4)\text{Cl}\cdot 3\text{H}_2\text{O})$ Mineral de tipo sulfato, presenta una estructura cristalina de tipo monoclinico, cuando se encuentra hidratado frecuentemente presenta grupos hidróxido, hidroxilo y/o halógenos como constituyentes de su estructura [26]. El resultado obtenido al comparar este mineral con el espectro Vis del asteroide Antiope muestra concordancia en la forma de la señal, aunque esta carece por completo de bandas, valles o cualquier signo apreciable, solo puede compararse mediante la similitud de la forma. Debido a ello se asignan dos señales al final de cada curva, estas corresponden en su totalidad al oxígeno en su forma atómica e ionizada. El limitado margen de datos del espectro del asteroide Antiope no ofrece mucha información, pero se acepta como fuente de una posible formación de estructuras prebióticas al tratarse de un asteroide tipo c con una leve similitud espectral con un mineral de tipo sulfato.

Figura 14. Asteroide Antíope – Mineral Kainita



Fuente: Elaboración propia

En la imagen: Asteroide Antíope (línea negra), Mineral Kainita (línea roja). Se observa similitud en el comportamiento de las líneas espectrales aunque en el espectro de Antíope se observa una completa inexistencia de bandas en esta longitud de onda.

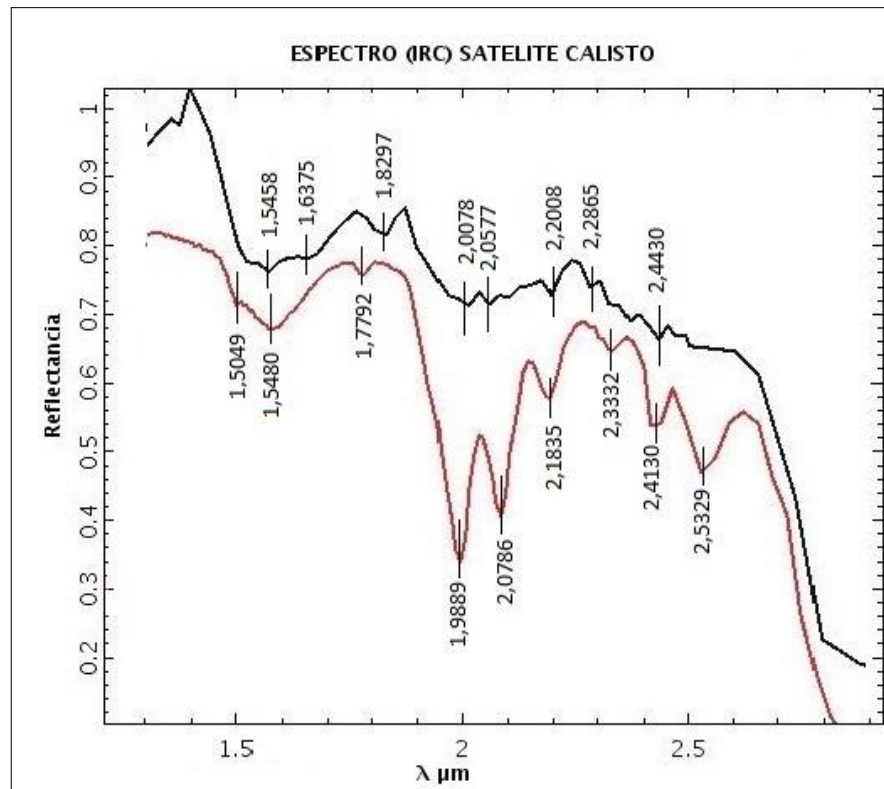
5.2. ESPECTROS DE SATÉLITES

Haciendo uso de la herramienta gráfica SPLAT, se realizó la superposición de las imágenes espectrales de los diferentes satélites (anexo B) y de algunos minerales de referencia (espectros tomados de la base de datos USGS) [25], con el fin de determinar la similitud de los espectros y de esta manera proceder a la debida identificación del contenido químico del objeto analizado. Los resultados fueron aceptables para tres satélites, siendo que algunos de ellos muestran similitud espectral con más de un mineral. El análisis se basa principalmente en la visualización de las bandas más profundas del espectro, y de la similitud en el comportamiento completo de la señal.

5.2.1. Satélite Calisto

Singenita: ($K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$) Mineral de tipo sulfato de calcio y potasio, presenta un sistema cristalino monoclinico y su color natural varía en tonalidades blanco lechoso y amarillentas [26]. La identificación de este mineral en el satélite Galileano Calisto se debe a la gran similitud en la línea espectral (figura 15), aunque es apreciable que, debido a la baja resolución espectral del satélite, solo se observan pequeñas declinaciones en lugar de bandas profundas como las presentadas por la Singenita. En la tabla 8 se muestra la identificación elemental de las bandas más importantes, realizada por medio de la base de datos ADS-NIST [28].

Figura 15. Satélite Calisto – Mineral Singenita



Fuente: Elaboración Propia

En la imagen: Satélite Calisto (línea negra), Mineral Singenita (línea roja). Se observa similitud en el comportamiento de las líneas espectrales y gran similitud en la posición de las bandas características en ambos espectros.

Tabla 8. Identificación de las bandas espectrales en μm del satélite Calisto y el mineral Singenita. [28]

	B3	B4	B5	B6	B7	B8
Calisto	1,8297	2,0078	2,0577	2,2008	2,2865	2,4430
Singenita	1,7792 O II	1,9889 S II	2,0786 S I	2,1835 S I	2,3332 O I	2,413 S II

Los resultados obtenidos con el espectro de este satélite, muestran la presencia de elementos prebióticos como Azufre, Hidrógeno, oxígeno, este resultado concuerda con estudios anteriores realizados a la superficie de Calisto, en donde se hace evidencia la fuerte presencia de CO_2 y SO_2 como moléculas predominantes en la superficie de este satélite Galileano [29].

5.2.2. Satélite Europa

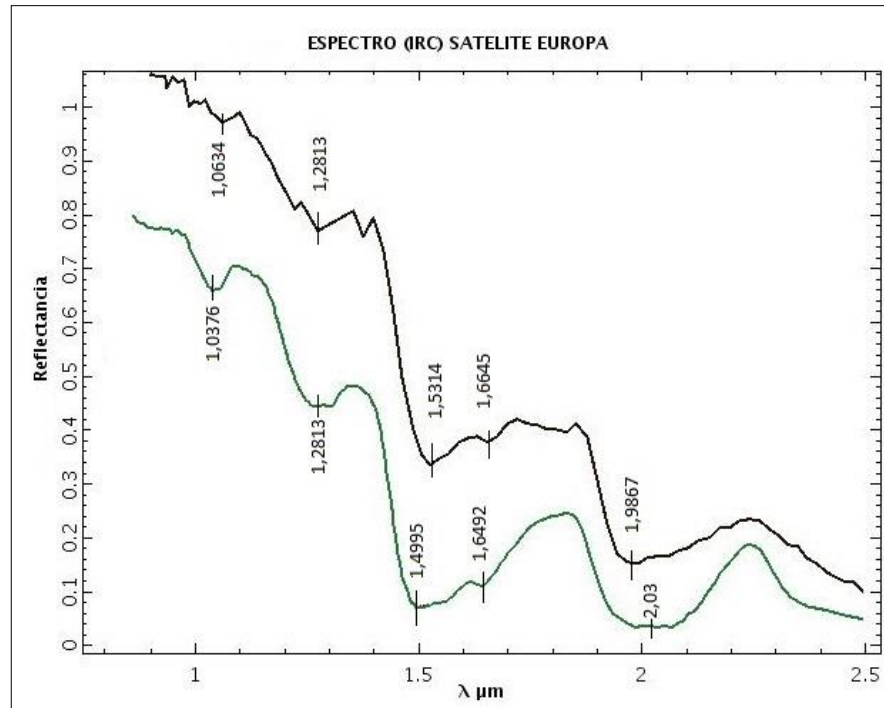
Agua: (H_2O) Es considerado el mineral más importante en cuanto al desarrollo de especies y su existencia en estado líquido es una de las bases fundamentales para el desarrollo de la vida en el planeta, en estado líquido permite el transporte de los productos químicos dentro y fuera de las células y aunque en estado sólido no cumple con este requerimiento importante, su detección en objetos fuera del planeta Tierra se ha convertido en objetivo fundamental de algunas exploraciones

espaciales [30]. La identificación de este mineral en el satélite Europa (figura 16) se basa en la coincidencia de sus líneas espectrales, el espectro del agua es caracterizado por presentar bandas anchas a la altura de 1,4 μm , banda muy marcada en el espectro del satélite [31]. En la tabla 9 se muestra la identificación de las líneas atómicas más importantes en los espectros, en ella se señala la correspondencia de las señales a la altura de 1,280 μm y 1,64 μm pertenecen a la presencia de Hidrógeno y deuterio.

Tabla 9. Identificación de las bandas espectrales en μm del satélite Europa y el mineral Agua. [28]

	B1	B2	B3	B4
Europa	1,0634	1,2813	1,5314	1,6645
Agua	1,0376	1,2813	1,4995	1,6492
	O III	H I - D I	O II	H I - D I

Figura 16. Satélite Europa – Mineral Agua

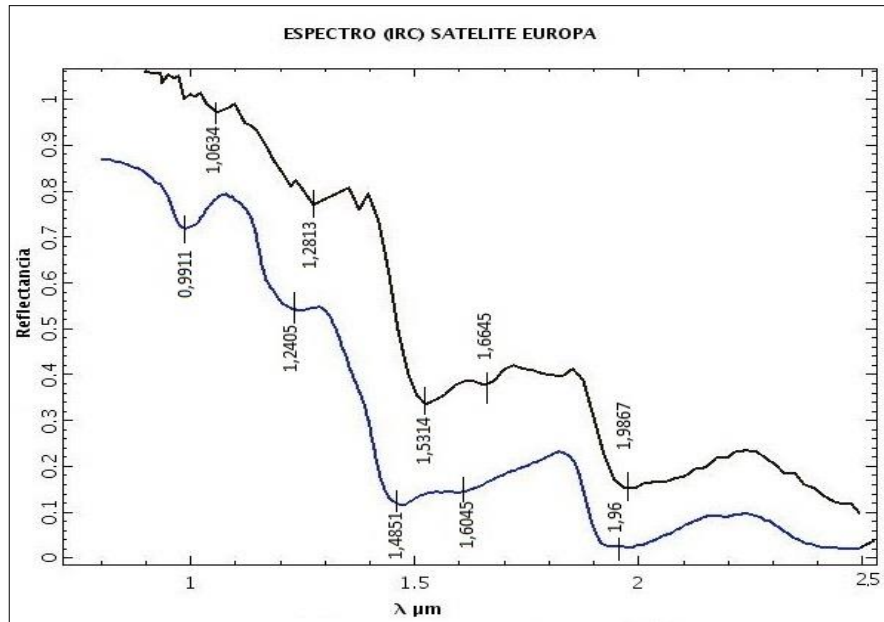


Fuente: Elaboración Propia

En la imagen: Satélite Europa (línea negra), Agua (línea Verde). Se observa similitud en el comportamiento de las líneas espectrales y gran coincidencia en la posición de las bandas características en ambos espectros.

Epsomita: ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) Mineral de tipo sulfato, presenta un sistema cristalino ortorrómbico y su color varía en diferentes tonalidades debido a la presencia de impurezas en su estructura [26]. El espectro de este mineral comparado con el espectro del satélite Europa (figura 17) muestra la banda característica del agua a la altura de 1,4 μm , acorde con la existencia de esta molécula en la estructura del mineral, también se identifican líneas atómicas características del Azúfre a la altura de 1,2405 μm (tabla 10), elemento característico de este mineral.

Figura 17. Satélite Europa – Mineral Epsomita



Fuente: Elaboración Propia

En la imagen: Satélite Europa (línea negra), Epsomita (línea azul). Se observa similitud en el comportamiento de las líneas espectrales y gran coincidencia en la posición de las bandas características en ambos espectros.

Tabla 10. Identificación de las bandas espectrales en μm del satélite Europa y el mineral Epsomita. [28]

	B1	B2	B3	B4
Europa	1,0634	1,2813	1,5314	1,6645
Epsomita	0,9911 O III	1,2405 S IV	1,4851 O II	1,6045 MG IX

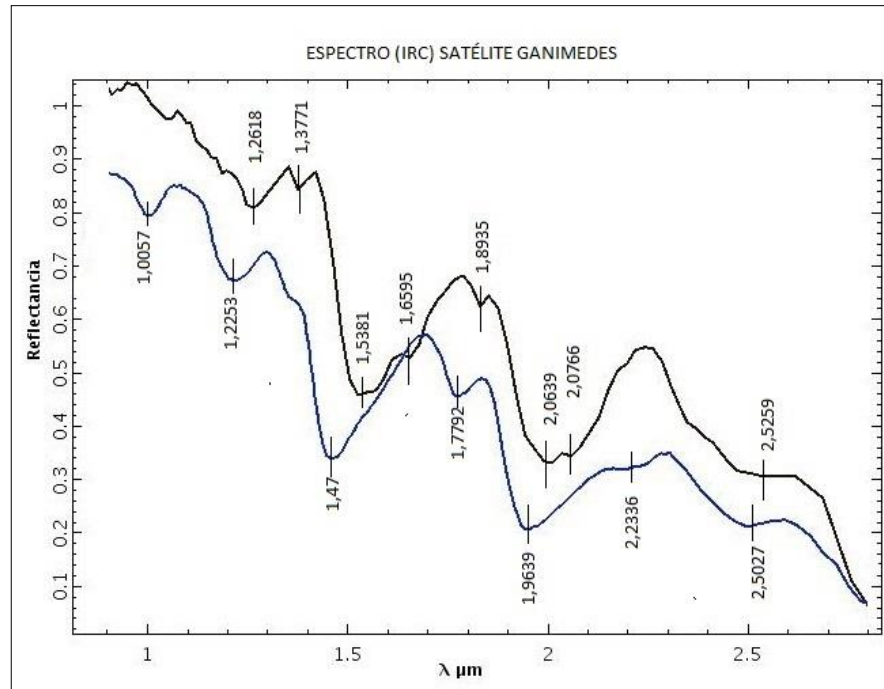
Los espectros del satélite Europa correspondientes a las figuras 16 y 17, muestran similitud con dos tipos de minerales (Agua, Epsomita), cuyas bandas características se complementan entre sí, para dar lugar al espectro de Europa el cual, se acepta para este trabajo como el espectro correspondiente a una mezcla. Este análisis determina la presencia de elementos prebióticos en la superficie del satélite Europa, como parte de la estructura de los minerales analizados. Este resultado concuerda con resultados anteriormente publicados [32], donde se estima que gran parte de la superficie de esta luna Joviana¹ está compuesta por agua en estado sólido. Satélite Ganímedes.

5.2.3. Satélite Ganímedes

Mirabilita: ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) Mineral tipo sulfato, presenta un sistema cristalino monoclinico y su color varía típicamente entre las tonalidades blanquecinas [26], la similitud del espectro del satélite Ganímedes muestran la banda característica del agua a la altura de $1,4 \mu\text{m}$ y la banda localizada en $1,2253 \mu\text{m}$ característica del sodio, en la tabla 11 se muestra la identificación de las bandas más significativas de este espectro.

¹Que pertenece al planeta Júpiter

Figura 18. Satélite Ganímedes – Mineral Mirabilita



Fuente: Elaboración Propia

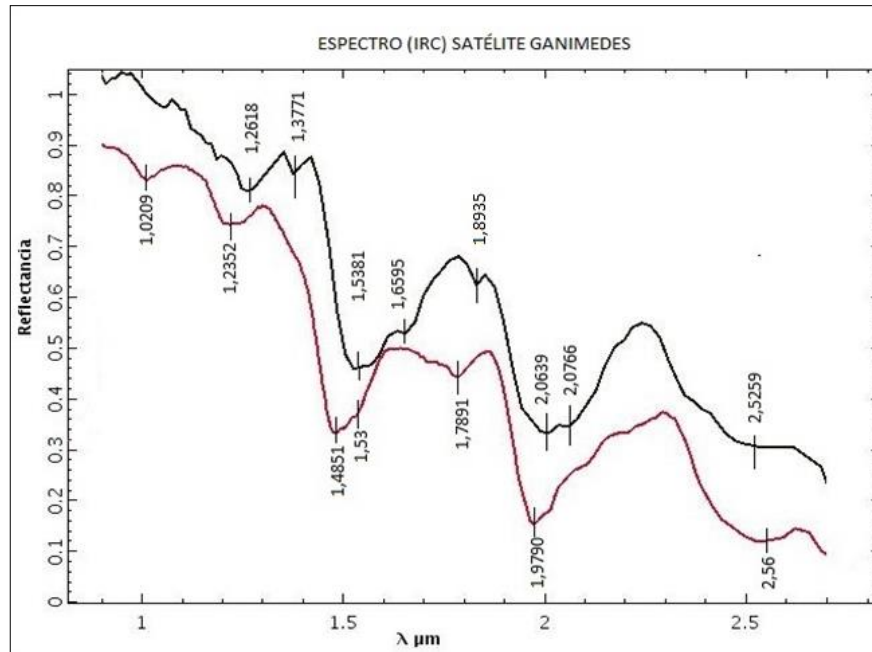
En la imagen: Satélite Ganímedes (línea negra), Mirabilita (línea azul). Se observa similitud en el comportamiento de las líneas espectrales aunque se aprecia corrimiento en la banda característica del agua a la altura de 1,4 μm en el espectro de la Mirabilita.

Tabla 11. Identificación de las bandas espectrales en μm del satélite Ganimedes y el mineral Mirabilita. [28]

	B1	B2	B3
Ganimedes	1,2618	1,5381	1,8935
Mirabilita	1,2253 Na VI	1,47 S II	1,7792 O II

Kainita: $(\text{KMg}(\text{SO}_4)\text{Cl}\cdot 3\text{H}_2\text{O})$, como se había descrito anteriormente, la Kainita es un mineral tipo sulfato, presenta una estructura cristalina de tipo monoclinico, en estado hidratado frecuentemente presenta grupos hidróxido, hidroxilo y/o halógenos como constituyentes de su estructura [26], la similitud del espectro del satélite Ganimedes con este mineral corresponde principalmente a las bandas encontradas a la altura de $1,4 \mu\text{m}$ correspondiente a la presencia de agua en la estructura y a la banda presente a la altura de $1,9790 \mu\text{m}$, la cual se debe a la presencia de Cloro, propio de la composición química de este mineral.

Figura 19. Satélite Ganímedes – Mineral Kainita



Fuente: Elaboración Propia

En la imagen: Satélite Ganímedes (línea negra), Kainita (línea roja). Se observa similitud en el comportamiento de las líneas espectrales aunque se aprecia corrimiento en la banda característica del agua a la altura de 1,4 μm en el espectro de la Kainita.

Estudios realizados anteriormente muestran la presencia de rastros de magma en la superficie de Ganímedes, cuya composición química se basa principalmente en Azufre, Hierro y Silicio, además de poseer agua en estado sólido, estudios realizados por la Sonda espacial Cassini muestran que luna puede contener NH_3 y CO_2 , CO , SO_2 como parte de la composición química del magma solidificado que yace bajo su superficie [33] El resultado obtenido con el análisis espectral de Ganímedes es complementario con los espectros de la Mirabilita y Kainita, minerales compuestos principalmente por sulfatos, resultado acorde con los datos encontrados en la literatura.

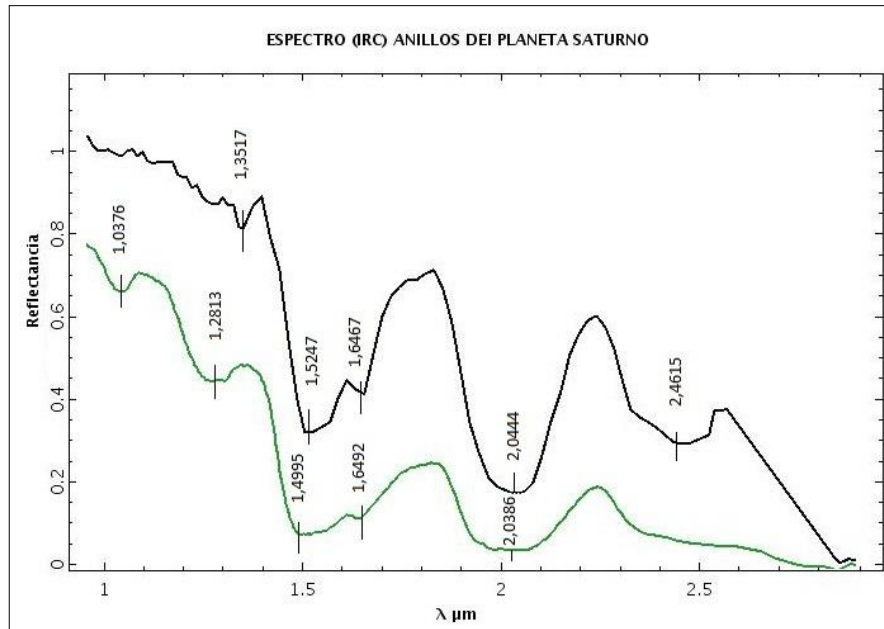
5.3. ESPECTROS DE PLANETAS

Haciendo uso de la herramienta gráfica SPLAT, se realizó la superposición de las imágenes espectrales de algunos de los diferentes planetas del Sistema Solar (anexo C) y de algunos minerales de referencia (espectros tomados de la base de datos USGS) [25], con el fin de determinar la similitud de los espectros y de esta manera proceder a la debida identificación del contenido químico del objeto analizado. Los resultados fueron aceptables para dos planetas, Marte y anillos de Saturno. El análisis de los espectros de estos objetos se basa principalmente en la visualización de las bandas más profundas del espectro, y de la similitud en el comportamiento completo de la señal.

5.3.1. Anillos del Planeta Saturno

Agua: El espectro tomado a los anillos de Saturno muestra una fuerte relación con las bandas características de este mineral (figura 20) a la altura de 1,4 μm (banda más importante en el espectro del agua), de igual forma, existen bandas de reflectancia a la altura de 1,25 y 2,0 micras, coincidentes con la línea espectral de los anillos de Saturno [34].

Figura 20. Anillos del Planeta Saturno – Mineral Agua

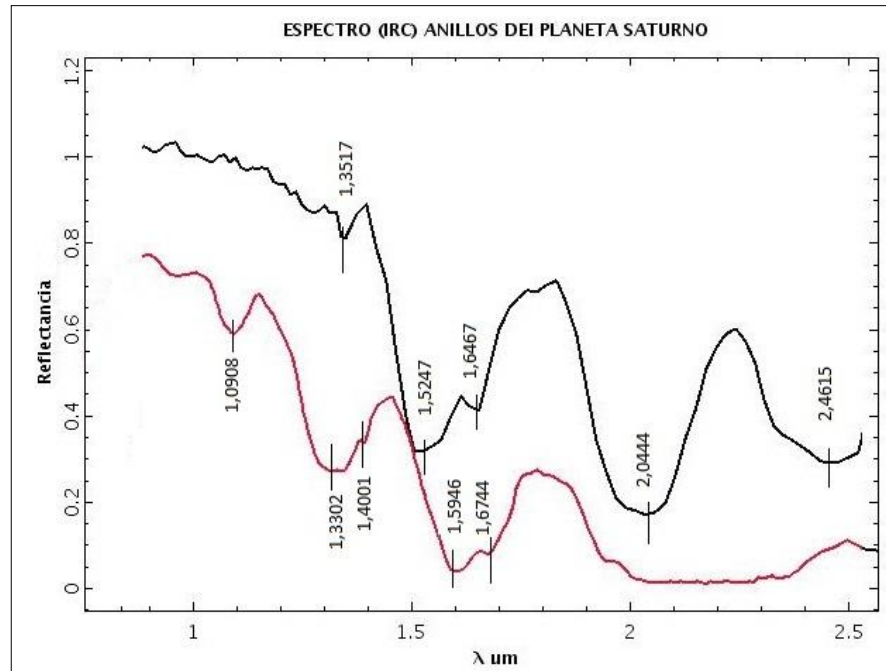


Fuente: Elaboración Propia

En la imagen: Anillos del Planeta Saturno (línea negra), Agua (línea verde). Se observa similitud en la localización y forma de las bandas más características del espectro

Cloruro de amonio: (NH_4Cl) o sal amoniacal, forma cristales en un sistema isométrico y presenta tonalidades blanquecinas [26]. La existencia de Nitrógeno como elemento prebiótico es de suma importancia para la posible existencia de estructuras tipo aminoácido, aunque actualmente se indaga sobre la existencia de estas estructuras, existen estudios que indican que es posible la existencia de este tipo de estructuras de importancia biológica en ambientes externos al planeta Tierra [35]. En el espectro (figura 21) se observa relación con la banda característica del agua, aunque es necesario tener en cuenta que las bandas localizadas a la altura de 1,3 y 2,4 son características de la presencia de Nitrógeno en la estructura molecular del objeto [28].

Figura 21. Anillos del Planeta Saturno – Cloruro de amonio



Fuente: Elaboración Propia

En la imagen: Anillos del Planeta Saturno (línea negra), Cloruro de amonio (línea roja). Se observa similitud en la forma de las bandas más características del espectro, con un leve corrimiento hacia longitudes de onda más cortas por parte del espectro del objeto.

Los anillos de Saturno están compuestos por centenares de millones de piezas de hielo, polvo y rocas de tamaños variados, posiblemente como evidencia de cometas, asteroides o lunas, las cuales fueron destruidas por acción de la fuerte gravedad del planeta Saturno, antes de que alguno de ellos pudiera hacer impacto directo sobre el planeta¹. Actualmente el material presente en estos anillos es examinado por medio de diferentes instrumentos, como la Cassini cosmic dust analyser (CDA) la cual, permite la adquisición de datos referentes a la composición del mismo, determinando la existencia predominantemente de hielo, con menores contribuciones de posibles combinaciones de silicatos,

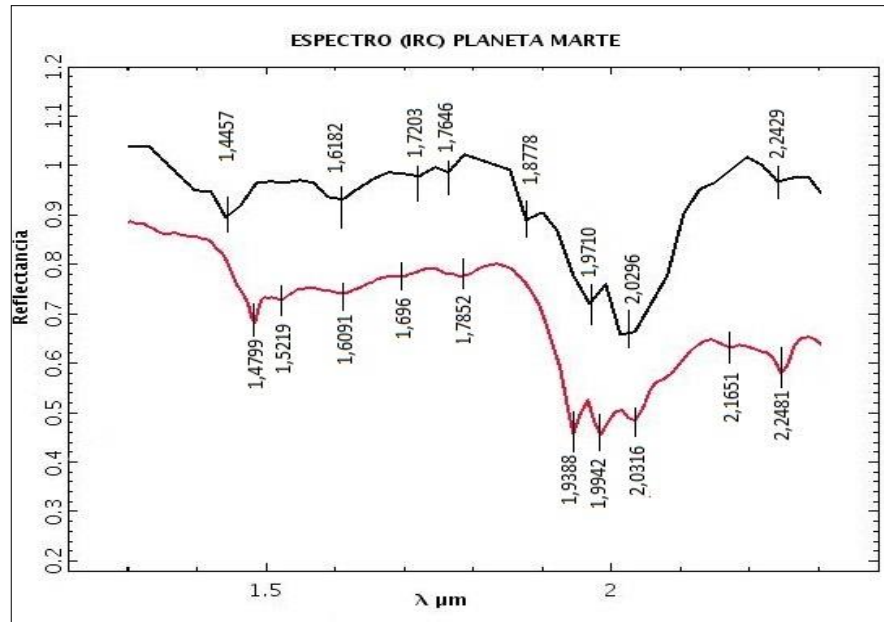
Hidrocarburos, Dióxido de Carbono, Amoníaco, Nitrógeno Molecular y Monóxido de Carbono [36] estos resultados concuerdan con los resultados obtenidos en el análisis espectral (figuras 20-21) respecto a los minerales Agua y Cloruro de Amonio.

5.3.2. Planeta Marte

Polihalita: $(K_2Ca_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O)$ Mineral de tipo sulfato de potasio, calcio y magnesio. Presenta un sistema cristalino triclinico y se caracteriza por presentar tonalidades blanquecinas y rosas [26]. La similitud de las bandas espectrales del planeta Marte con este mineral (figura 22) son bastante coincidentes. Las bandas más significativas de este espectro son las que se muestran a la altura de 1,44 μm correspondiente a la señal del Mg I y las bandas localizadas a la altura de 1,93 μm correspondiente al mismo elemento, las bandas que indican la presencia de Azufre se encuentran localizadas en 1,7 y 1,99 μm .

¹<http://legacy.spitzer.caltech.edu/>

Figura 22. Planeta Marte – Mineral Polihalita



Fuente: Elaboración Propia

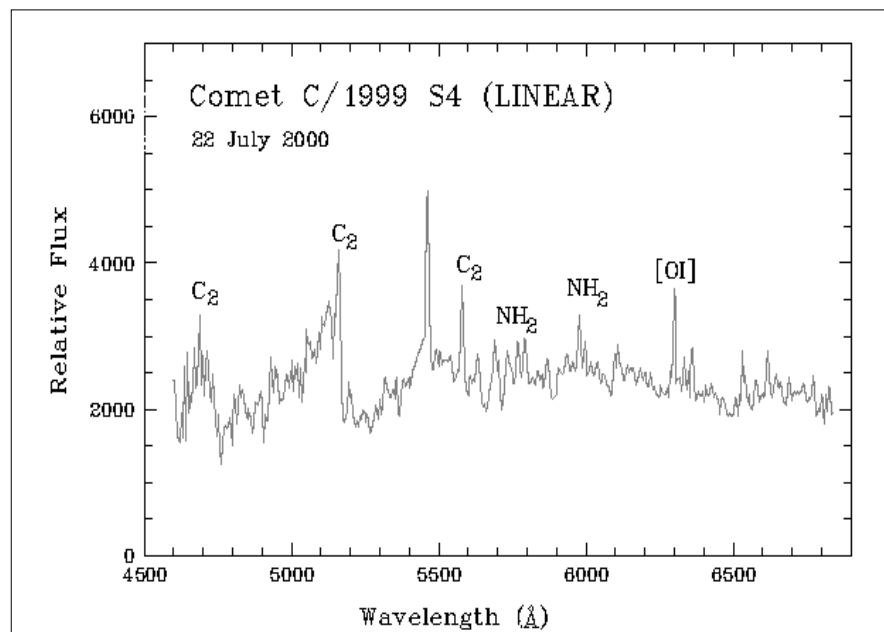
En la imagen: Marte (línea negra), Polihalita (línea roja). Se observa similitud en la forma de las bandas más características del espectro y en la localización de las mismas, siendo las bandas más significativas (1,47, 1,9 μm) las que muestran presencia de Mg y S en la estructura.

5.4. ESPECTROS DE COMETAS

Como objetos que hacen parte importante de la Nube de Oort, los cometas son cuerpos antiguos de hielo congelado y polvo, formados más allá de la órbita de Neptuno. Se espera que estos objetos contengan materiales que muestren rastros de la Nebulosa Solar conservados en hielo durante miles de millones de años además, los cometas recogen muestras del material químico que encuentran a su paso en el Sistema Solar y lo transportan consigo dando así, la posibilidad de

estudiarlos en las cercanías del planeta Tierra [12]. Debido a la difícil adquisición de datos espectrales, se hace uso de espectros previamente analizados, con imágenes de acceso público como complemento a este trabajo. Los espectros tomados pertenecen al cometa C/1999 S4 Linear (figura 23), tomado por Jesús Rodríguez y Carlos Guirao en el Observatorio Europeo del Sur (ESO) en Garching (Munich) el 22 julio de 2000 [37], y al cometa Hyakutake (figura 24) obtenido en la ESO (Observatorio La Silla, Santiago de Chile) en marzo de 1996 [38].

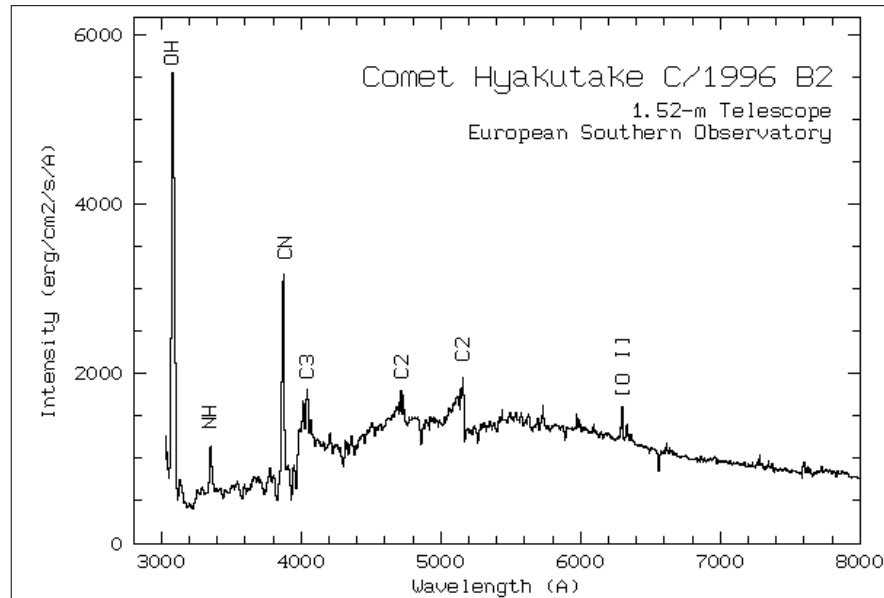
Figura 23. Cometa C/1999 S4 LINEAR



Fuente: (ESO)

En el espectro se muestran las señales pertenecientes a la presencia de Carbono molecular (C₂), Nitrógeno como grupo amino (NH₂) y oxígeno atómico (OI), elementos y moléculas prebióticas importantes para la formación de especies químicas de importancia biológica.

Figura 24. Cometa Hyakutake C/1996 B2



Fuente: (ESO)

En el espectro se muestran las señales pertenecientes a la presencia de Carbono molecular (C_2), Nitrógeno como grupo amino (NH), oxígeno atómico (OI) y una señal muy pronunciada perteneciente al grupo hidróxido (OH), registros importantes de la existencia de un ambiente con el material químico adecuado para la formación de especies químicas de importancia biológica.

Otro estudio importante se realizó por medio de la sonda espacial Stardust, lanzada por la NASA en 1999, cuyo objetivo principal era recolectar muestras del cometa Wild 2 y regresar a la Tierra para su posterior análisis de laboratorio, el resultado mostró el hallazgo del aminoácido glicina [39], resultado reportado por un equipo de científicos del Centro de Vuelo Espacial Goddard en 2009.

“Por medio del análisis isotópico se comprobó que, las partículas de glicina no eran un contaminante propio del planeta Tierra”

De este hecho, los científicos de esta organización aseguran por medio de la publicación realizada por el Dr. Don Brownlee en 2009 que

“La importancia de este hallazgo presenta la posibilidad de que los cometas entregaran al menos un aminoácido en el planeta” [40].

Resultados como este muestran la importancia de realizar estos estudios en los diferentes objetos del Sistema Solar, y bajo diferentes rangos espectrales, con el fin de encontrar en otros objetos, estructuras moleculares prebióticas como muestra de la similitud química que compartimos a pesar de las condiciones fisicoquímicas del espacio exterior, además es importante tener en cuenta que las estructuras moleculares identificadas presentan como parte de su composición química los elementos más abundantes en nuestra galaxia (C, Fe, S), debido a que su formación es de las más estables respecto a los otros elementos químicos conocidos [41].

6. MECANISMOS POSIBLES DE FORMACIÓN MOLECULAR

En nuestro planeta, debido a las condiciones de presión, temperatura y baja radiación destructora, la materia se encuentra formando moléculas de gran tamaño cuyas estructuras están fuertemente enlazadas y en su mayoría con niveles de empaquetamiento o cristalización definidos. En el espacio exterior, las densidades son mucho menores entonces, la formación de moléculas a través de los mecanismos terrestres es casi nula y la existencia de poderosos campos de radiación como los rayos x, gamma y cósmicos atentan contra la estructura de las mismas, destruyéndolas o impidiendo su formación [40].

Debido a estas diferencias, es necesario buscar otros mecanismos para explicar la formación de moléculas interestelares, para este caso, se tienen en cuenta tres mecanismos básicos: Reacciones ion-molécula, reacciones en la superficie de granos de polvo interestelar y reacciones de química neutra [42].

6.1. Reacciones ion-molécula:

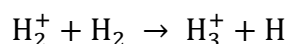
Teniendo en cuenta que en el medio interestelar existen fuertes campos de radiación, los cuales además de disociar las pocas moléculas que fueron formadas en el interior de las estrellas, también se encargan de ionizar diversas especies químicas poniendo en marcha cadenas de reacciones.

Posterior a la formación de los iones, las reacciones ion-molécula son una forma efectiva de crear nuevas especies moleculares a partir de otras preexistentes. Un ejemplo típico es la reacción de los iones del oxígeno con Hidrógeno molecular. Proceso de gran importancia debido a la recurrencia de este mecanismo, pues su interacción puede darse a distancias grandes debido a la atracción de origen

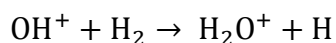
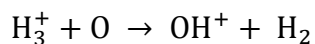
eléctrico que se origina entre las dos especies [42]. Considerando la reacción que se produce cuando el Hidrógeno molecular del medio es bombardeado por rayos cósmicos, dando así la primera formación de iones H_2^+ por medio de la siguiente reacción



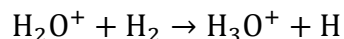
Este ión a su vez, reacciona con otra molécula neutra dando origen a una nueva especie iónica



La formación de H_3^+ concluye con la secuencia de formación iónica del Hidrógeno, este ión no reacciona fácilmente con otras especies del mismo tipo, razón por la cual tiene a acumularse en el medio, donde su presencia es muy abundante [42] así mismo, este ión reacciona con otras especies moleculares diferentes dando origen a nuevas especies como las mostradas al inicio de este trabajo en la tabla 1, algunas de tipo prebiótico como la formación de iones OH^+ , precursor de la formación de agua ionizada en el medio interestelar [42].



Otro posible mecanismo es el que inicia con la formación de hidrónio, en esta reacción interviene una molécula de agua ionizada y una de Hidrógeno

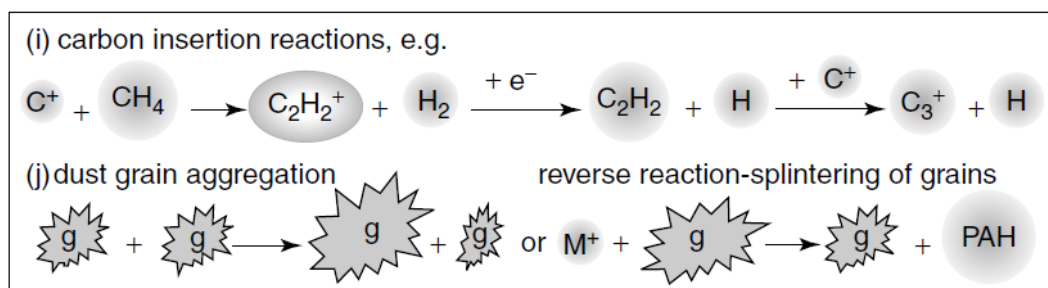


La molécula de hidrónio formada en esta reacción es inestable, razón por la que reacciona con un electrón libre para formar una variedad de nuevas especies químicas, más estables como agua, Hidrógeno atómico, molecular y oxígeno [42]

6.2. Reacciones en la superficie de granos de polvo interestelar

Muchas regiones del medio interestelar presentan un medio adecuado para la existencia de partículas sólidas constituidas básicamente por grafito y silicatos, estas partículas proporcionan un medio adecuado de soporte para la formación de finas capas moleculares con un rico contenido químico. Los mecanismos de formación molecular que dependen de factores como temperatura, composición química del medio y propiedades estructurales de las superficies de los granos, además de las posibles fuentes de radiación presentes en el medio. Esta posible reacción (figura 25) proporciona la posibilidad de incorporar los hidrocarburos de baja masa en la superficie de los granos de polvo generando así nuevas reacciones superficiales con bajas energías de la activación, posiblemente favorecidas por el continuo bombardeo de rayos cósmicos o fotoquímica [43]

Figura 25. Reacciones químicas en granos de polvo interestelar



Fuente (A. Shaw)

En la figura: PAH (Hidrocarburos aromáticos policíclicos)

Este tipo de factores (figura 25) explicaría la existencia de hidrocarburos lineales y aromáticos en el MI, estructuras que proporcionan una base química para la futura formación de especies como alcoholes, ácidos, cetonas entre otros.

6.3. Reacciones de química neutra

Este tipo de reacciones se encuentran restringidas en muchos casos debido a la barrera energética conocida como energía de activación, por lo tanto este tipo de reacciones pueden ocurrir en lapsos de tiempo muy largos, aunque la existencia de este factor no limita la formación de moléculas debido a que se estima que el tiempo de vida media de una nube molecular es de alrededor de 1×10^6 años [43].

Otros factores que favorecen la formación de especies moleculares por medio de las reacciones de química neutra se basan en la presencia del campo de radiación de una estrella local, debido a ello, las moléculas pueden absorber un fotón que proporcione la energía suficiente para romper el enlace químico, originando productos de fotólisis y nuevas especies reactivas, en la tabla 12 se muestran algunas de las energías de fotodisociación necesarias para la formación de especies nuevas partiendo de especies moleculares saturadas o con presencia de insaturaciones [43].

Tabla 12. Energías de enlace y longitudes de onda que favorecen la fotólisis [43]

Chemical bond and bond order ^a	Bond energy (kJ mol ⁻¹)	Wavelength (nm)
C≡O (t)	1075	105
N≡N (t)	943	120
C≡N (t)	754	149
C≡C (t)	838	134
C=C (d)	612	184
C-C (s)	348	323
C-H (s)	415	271
H-H (s)	436	274

Fuente (A. Shaw)

Existen muchos otros mecanismos que describen diferentes medios que favorecen la formación de especies químicas en el medio interestelar, pero aún no han sido validadas por completo, por esta razón solo se tomaron en cuenta los mecanismos anteriormente descritos como posibles rutas de formación para las diferentes moléculas prebióticas identificadas en los espectros analizados en este trabajo.

7. CONCLUSIONES

Los espectros de reflectancia utilizados en este trabajo permitieron la identificación de señales atómicas características de los elementos prebióticos relevantes (O, H, N, S), la identificación de cada señal permitió a su vez la identificación de estructuras minerales, cuyo contenido molecular más abundante es el que presenta sulfatos como parte de su estructura.

Las estructuras moleculares presentes en los minerales identificados en este trabajo muestran mayor presencia de elementos como C, N, S y Fe, los cuales constituyen los elementos más abundantes en la Vía Láctea, por lo tanto son un resultado satisfactorio, en la búsqueda del material prebiótico presente en los diferentes objetos de la Nebulosa Solar.

Los objetos seleccionados pertenecen en su totalidad a la Nube de Oort, por lo tanto la identificación del material químico encontrado da una muestra de la abundancia de elementos prebióticos (O, H, N, S, Mg, y Fe) a lo largo de toda su extensión. Siendo este resultado acorde con la literatura existente sobre este tema.

La identificación de minerales como el cloruro de amonio en los anillos de Saturno da una muestra de la posible formación de estructuras de importancia biológica en ambientes externos a los presentes en el planeta Tierra.

En los espectros de asteroides se observa abundancia de Fe, O y S, elementos presentes en todos los objetos sin importar su clasificación taxonómica, a diferencia de los espectros en satélites y planetas donde la banda más predominante es la banda a la altura de 1,4 μm característica de objetos con presencia de agua en su superficie.

Los análisis realizados del contenido químico en cometas muestran información sobre la existencia de moléculas que datan desde los inicios de formación del Sistema Solar, estos datos proporcionan a este trabajo una fuerte evidencia de la existencia de material prebiótico en los diferentes ambientes de la Nube de Oort, teniendo en cuenta que los cometas interactúan con los diferentes planetas, satélites y objetos presentes a lo largo de su recorrido por el Sistema Solar.

La difícil adquisición de datos disponibles con los requerimientos especificados para la realización de este trabajo, limitaron la posibilidad de realizar una discriminación respecto a la resolución de los espectros empleados.

Los diferentes mecanismos de formación molecular muestran que parte importante de la formación de estas especies ocurre por medio de las reacciones ión molécula, aunque existen en el medio estructuras neutras, las diferentes fuentes de radiación favorecen la formación de especies iónicas que desencadenan la formación de nuevas especies importantes para el desarrollo de sistemas moleculares como los minerales identificados en este trabajo.

8. RECOMENDACIONES

La selección de los espectros con mayor resolución es fundamental para una posible cuantificación de las abundancias químicas presentes en cada uno de los objetos analizados.

Debido a que el estudio de la química en ambientes externos al planeta Tierra, es una rama de la ciencia que se encuentra en plena exploración, se recomienda revisar posteriormente los resultados mostrados en este trabajo utilizando nuevos espectros, adquiridos por medio de técnicas espectroscópicas de nueva generación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. M. Shaw, *Astrochemistry from astronomy to Astrobiology*. John Wiley and Sons, Ltd, 2004, p. 10,12.
- [2] D. Newton, *Chemistry of Space*. Facts On File, 2009, p. 23,27.
- [3] M. Esguerra, E. E. Daza, and L. Villaveces, "Formación de Glicina en el Medio Interestelar; Un Estudio Teórico," pp. 1–25, 2003.
- [4] B. W. Carroll and D. A. Ostlie, *An Introduction to Modern Astrophysics*, Second Edi. Pearson, 2007, p. 202,230.
- [5] H. Karttunen, P. Kröger, and H. Oja, *Fundamental Astronomy*, Fifth Edit. Springer, 2007, p. 234,237.
- [6] F. H. Shu, *The Physical Universe An Introduction to Astronomy*. University Science Books, 1982, p. 144,157.
- [7] B. Carroll and D. Ostlie, "An Introduction to Modern astrophysics," p. 309.
- [8] A. G. G. M. Tielens, *The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005, p. 266,287.
- [9] M. Igashira and T. Ohsaki, "Neutron capture nucleosynthesis in the universe," *Science and Technology of Advanced Materials*, vol. 567, pp. 2–9, 2004.
- [10] A. G. G. M. Tielens, "The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium," p. 396,416.
- [11] H. Karttunen, P. Kröger, and H. Oja, "Fundamental Astronomy," p. 186,196.
- [12] D. Newton, *Chemistry of Space*. Facts On File, 2007, p. 171,216.

- [13] M. Popescu, "Techniques for asteroid spectroscopy," UNIVERSITATEA POLITENICA BUCURESTI, 2012.
- [14] SMASS, "Asteroid spectrum classification using Bus-DeMeo taxonomy," 2012. [Online]. Available: <http://smass.mit.edu/busdemeoclass.html#REFERENCES>.
- [15] E. S. Howell, E. Merényi, and L. a. Lebofsky, "Classification of asteroid spectra using a neural network," *Journal of Geophysical Research*, vol. 99, no. E5, p. 10847, 1994.
- [16] S. Charnley and S. Rodgers, "Biomolecules in the interstellar medium and in comets," *Advances in Space ...*, 2002.
- [17] Y. Kuan and H. Huang, "Prebiologically Important Interstellar Molecules," ... 2002: *Life Among ...*, 2004.
- [18] R. N. Clark, T. V. V. King, M. Klejwa, G. A. Swayze, and N. Vergo, "High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals," *Journal of Geophysical Research*, vol. 95, no. B8, 1990.
- [19] USGS, "United States Geological Survey Spectroscopy Laboratory," 2012. [Online]. Available: <http://speclab.cr.usgs.gov/planetary.spectra/planetary-sp.html>.
- [20] SMASS, "Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey," 2012. [Online]. Available: <http://smass.mit.edu/smssbgnd.html>.
- [21] "SPLAT - Spectral Analysis Tool," 2012. [Online]. Available: <http://star-www.dur.ac.uk/~pdraper/splat/splat.html>.
- [22] "SMASS," 2012. [Online]. Available: <http://smass.mit.edu/data/smss/Bus.Taxonomy.txt>.
- [23] D. Newton, "Chemistry of Space," 2007, pp. 143–151.
- [24] D. Newton, "Chemistry of space," 2007, pp. 90–142.

- [25] USGS, "United States Geological Survey Spectroscopy Laboratory (USGS) base de datos de minerales," 2012. [Online]. Available: <ftp://ftpext.cr.usgs.gov/pub/cr/co/denver/specclab/pub/spectral.library/splib04.library/ASCII.FILES>.
- [26] "Mindat.org," 2013. [Online]. Available: http://www.mindat.org/advanced_search.php.
- [27] USGS, "No Title," 2012. [Online]. Available: <ftp://ftpext.cr.usgs.gov/pub/cr/co/denver/specclab/pub/spectral.library/splib04.library/ASCII.FILES/ferrihyd.txt>.
- [28] "ASD-NIST," 2013. [Online]. Available: http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html.
- [29] C. A. Hibbitts, T. B. McCord, and G. B. Hansen, "DISTRIBUTIONS OF CO₂ AND SO₂ ON THE SURFACE OF CALLISTO.," *31st Annual Lunar and Planetary Science Conference*, vol. abstract n. Houston, Texas, 2000.
- [30] NASA, "Phoenix Mars Mission," 2013. [Online]. Available: http://phoenix.lpl.arizona.edu/pdf/water_and_life.pdf.
- [31] L. V. Starukhina, "3- μ m light absorption by hydroxyl of solar wind origin and the prospects for water detection on asteroids with NIR spectroscopy," *ESA Publications Division*, pp. 513 – 516, 2002.
- [32] A. M. Shaw, "Astrochemistry from Astronomy to Astrobiology," Wiley Library, 2004, pp. 195– 226.
- [33] L. Wilson and J. W. Head, "Ganymede Cryovolcanism: Ascent and Eruption of Magma and Its Role in Resurfacing," *29th Annual Lunar and Planetary Science Conference*, 1998.
- [34] M. M. Hedmana, P. D. Nicholsona, J. N. Cuzzib, R. N. Clarkc, G. Filacchioned, F. Capaccionid, and M. Ciarniellod, "Connections between Spectra and Structure in

- Saturn's Main Rings Based on Cassini VIMS Data," *Icarus*, vol. 223, pp. 105–130, 2013.
- [35] R. Shantanu, "Interstellar Biomolecules and Infrared Astronomy," *Bulletin of the Astronomical Society of India*, 1999.
- [36] J. K. Hillier, S. F. Green, N. McBride, J. P. Schwanethal, F. Postberg, R. Srama, S. Kempf, G. Moragas-Klostermeyer, J. a. M. McDonnell, and E. Grun, "The composition of Saturn's E ring," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 377, no. 4, pp. 1588–1596, Jun. 2007.
- [37] J. Rodriguez and C. Guirao, "Comet C/1999 S4 (LINEAR)'s spectrum observed from Garching," 2000. [Online]. Available: <http://www.eso.org/projects/caos/results/LINEAR/linear.html>.
- [38] ESO, "Espectro del cometa Hyakutake (3000-8000 A)," 1996. [Online]. Available: <http://www.eso.org/public/news/eso9620/>.
- [39] J. E. Elsila, D. P. Glavin, and J. P. Dworkin, "Astrobiology Science Conference 2010 (2010) Astrobiology Science Conference 2010 (2010)," *Astrobiology Science Conference 2010*, vol. 1538, no. Evolution and Life: Surviving Catastrophes and Extremes on Earth and Beyond, p. 5105, 2010.
- [40] D. Brownlee, "Stardust: A Mission With Many Scientific Surprises," 2013. [Online]. Available: <http://stardust.jpl.nasa.gov/news/news116.html>.
- [41] F. Calura, A. Pipino, and F. Matteucci, "The cycle of interstellar dust in galaxies of different morphological types," *Astronomy and Astrophysics*, vol. 685, pp. 669–685, 2008.
- [42] D. Newton, "Chemistry of Space," Facts On File, 2007, pp. 35–39.
- [43] A. M. Shaw, "Astrochemistry from Astronomy to Astrobiology," 2004, pp. 130–135.

ANEXO A

Identificación de los asteroides utilizados en la realización de este trabajo [21]

Número de identificación serial	Nombre	Clase taxonómica	Semi eje mayor de la órbita (UA)	Albedo	Espectro Disponible en SMASS
5	ASTRAEA	s	2,575	0,2268	Vis-IRC
7472	KUMAKIRI	v	3,012	-----	IRC
30	URANIA	s	2,36	0,1714	Vis
90	ANTIOPE	c	3,16	0,0603	Vis
19	FORTUNA	ch	2,44	0,04	Vis-IRC
42	ISIS	l	2,440,1712		IRC
3	JUNO	s	2,6716	0,2383	IRC
2	PALLAS	b	2,7729	0,1587	Vis-IRC
4	VESTA	v	2,3616	0,4228	IRC
76	FREIA	x	3,41	0,0362	Vis-IRC
68	LETO	-----	2,78	0,2283	IRC
103	HERA	s	2,7	0,1833	Vis-IRC

Continuación del Anexo A

Número de identificación serial	Nombre	Clase taxonómica	Semi eje mayor de la órbita (UA)	Albedo	Espectro Disponible en SMASS
354	ELEONORA	s	2,8	0,1948	Vis-IRC
1126	OTERO	-----	2,606	0,1786	Vis-IRC
41	DAPHNE	c	2,76	0,083	Vis
23	THALIA	s	2,627	-----	Vis
17	THETIS	s	2,47	0,17	Vis
81	TERPSICHORE	c	2,86	0,05	Vis
190	ISMENE	x	3,98	0,066	Vis
216	KLEOPATRA	x	2,8	0,1164	Vis
263	DRESDA	-----	2,89	0,2263	Vis
339	DOROTHEA	k	3,01	0,2431	Vis

ANEXO B

Identificación de los satélites utilizados en el desarrollo de este trabajo [22]

Nombre	Radio orbital medio (Km)	Temperatura superficial (k)	Albedo	Espectro disponible en USGS
Calisto	$1,883 \times 10^6$	80-165	0,22	IRC
Ganimedes	$1,07 \times 10^6$	113	0,43	IRC
Europa	$0,67 \times 10^6$	50-125	0,67	IRC
Rea	$5,27 \times 10^6$	-----	0,95	IRC
Io	$0,421 \times 10^6$	130	0,61	IRC
Mar de la serenidad (Luna)	$0,384 \times 10^6$	40-396	0,12	IRC

ANEXO C

Identificación de los espectros planetas utilizados en este trabajo [23]

Nombre	Radio orbital medio (UA)	Temperatura superficial (K)	Albedo	Espectro disponible en USGS
Marte	1,52	186-268	0,15	IRC
Saturno	9,54	82-93	0,47	IRC
Ceres	2,76	167	0,09	IRC
Mercurio	0,387	663-700	0,11	IRC
Júpiter	5,20	110-198	0,52	IRC