



Universidad Nacional Autónoma de México

Posgrado en Ciencias de la Tierra

Instituto de Geofísica

Análisis de los perfiles térmicos en los anillos principales de Saturno

Tesis

que para optar por el grado de:
Maestría en Ciencia de la Tierra

Presenta:

Ángel Manuel García Reyes

Tutor:

Dr. José Alberto Flandes Mendoza
Instituto de Geofísica UNAM

México, Ciudad de México, Julio 2017.



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Resumen

Los Anillos de Saturno, han sido estudiados por la misión Cassini-Huygens (2004-2017; NASA/ESA/ASI) en los cuales ha podido observar características específicas algunas ya conocidas y muchas otras que no se conocían. El objetivo de este trabajo es reproducir sintéticamente, los perfiles de temperatura observados por esta nave en cada uno de los anillos principales de Saturno.

Para tal propósito, se seleccionaron datos de los espectrómetros CIRS y UVIS de la sonda Cassini que sirvieron de fundamento para la creación de regiones específicas simuladas de los anillos principales en base a sus características físicas y dinámicas.

Las características generales de las regiones sintéticas se basan en un modelo analítico basado en las observaciones y las partículas dentro de las regiones tienen tamaños que siguen una ley de potencias para las masas y una distribución normal o Gaussiana y uniforme para sus posiciones verticales. El método rivaliza con el modelado de n-cuerpos que se aplica normalmente y que requiere mucho mayor poder de cómputo.

Las temperaturas de las regiones sintéticas se obtienen primero, haciendo un análisis fotométrico basado en la técnica llamada Ray-Tracing que puede reproducir las propiedades ópticas de las partículas con un alto grado de realismo; y segundo, aplicando un modelo térmico de balance de energía suponiendo cuatro fuentes de energía: la radiación solar directa y reflejada en la atmósfera de Saturno, y la radiación infrarroja de Saturno y de las partículas mismas.

Objetivos:

- Generar arreglos de partículas que simulen regiones específicas de los anillos A, CD, B y C.
- Reproducir los perfiles de temperatura observados por el espectrómetro CIRS de Cassini.
- Determinar propiedades dinámicas, de estructura y de composición (en la medida de lo posible) de los anillos principales de Saturno con base en los datos de profundidad óptica obtenidos con el espectrógrafo UVIS y el espectrómetro CIRS de Cassini.

Agradecimientos

Por el apoyo constante de mis sinodales y tutor, agradezco al Dr. Alberto Flandes, Dr. Leonardo Sánchez, Dra. Patricia Goldstein, Dr. Hector Durand y al Dr. José García, por supervisar mis avances y permitir cuestionarme el camino correcto para cumplir mis metas.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, al Posgrado de Ciencias de la Tierra y a CONACYT, el permitirme crecer en esta grandiosa institución al brindarme un lugar y apoyo para mi aprendizaje.

Agradezco a la Dra. Linda Spilker, manager científico de la Misión Cassini (JPL), por facilitar los datos usados en este trabajo.

Agradezco a mi familia y seres queridos por su apoyo, compañía y cuidado, gracias a ustedes me fue posible ser quien soy ahora.

Índice general

1. Anillos principales de Saturno	6
1.1. Estructura y propiedades generales	6
1.2. Descripción general de los anillos principales	7
2. Misión Cassini-Huygens	9
2.1. CIRS: Espectrómetro Compuesto Infrarrojo de Cassini	10
2.1.1. Descripción del instrumento	11
2.2. Espectrógrafo de imágenes en el ultravioleta (UVIS)	12
2.2.1. Descripción del instrumento	13
2.3. Fin de la misión	13
3. Conceptos Físicos	16
3.1. Conceptos Físicos relevantes I	16
3.1.1. Radiación de cuerpo negro y Temperatura de brillo	16
3.1.2. Albedo	18
3.1.3. Inercia térmica	18
3.2. Conceptos Físicos relevantes II	19
3.2.1. Profundidad óptica	19
4. Regiones de estudio de los anillos	22
4.1. Anillo C y División de Cassini	24
4.2. Anillo B	25
4.3. Anillo A	26
5. Propiedades dinámicas de los anillos de Saturno	28
5.1. Modelos previos (dinámicos)	28
5.1.1. Wakes gravitacionales	29
5.2. Propiedades en equilibrio dinámico local	33
5.3. Grosor aproximado	33
5.3.1. Radio de Hill	34
5.3.2. Autogravedad vertical	34
5.3.3. Extensión vertical máxima	35
5.4. Interacciones gravitacionales de los anillos y satélites de Saturno	36

6. Balance de energía de los anillos	38
6.1. Modelo de flujo energético	38
6.2. Función de sombra - C	40
7. Modelo computacional	42
7.1. Variables de entrada	43
7.1.1. Parámetros de wakes	44
7.2. Distribución de masas	44
7.2.1. Ley de potencias para la masa	45
7.3. Arreglo sintético - Posiciones espaciales	46
7.3.1. Ajuste de grosor vertical por masas	46
7.4. Ray-Tracing	47
7.4.1. Implementación	48
8. Resultados de la simulación	51
8.1. Outputs - Función C simulada	53
8.1.1. Anillo C y División de Cassini.	53
8.1.2. Anillo B	54
8.1.3. Anillo A	55
8.1.4. Análisis acumulado de función sombra - C	55
8.2. Temperaturas sintéticas.	56
8.2.1. Anillo C y División de Cassini.	57
8.2.2. Anillo B	58
8.2.3. Anillo A	59
8.2.4. Análisis de Temperaturas.	59
8.3. Comparación de Temperatura simuladas con los datos de CIRS.	61
9. Conclusiones.	64
10. Apéndice	65

Capítulo 1

Anillos principales de Saturno

Ningún otro planeta en nuestro Sistema solar tiene anillos tan espléndidos como los de Saturno, son extensos y brillantes, lo que favoreció su descubrimiento. Galileo Galilei fue la primera persona en ver el cielo nocturno a través de un telescopio, observó en 1610 las cuatro lunas más grandes de Júpiter y siluetas que posteriormente fueron reconocidos como los anillos de Saturno por Huygens.

En los más de 400 años transcurridos desde el descubrimiento de Galileo, los anillos se convirtieron en la característica reveladora de Saturno y son quizás la más reconocida de cualquier planeta en nuestro sistema solar. La misión Cassini ha pasado más de una década examinándolos más cerca que cualquier otra nave espacial.

1.1. Estructura y propiedades generales

Junto con Saturno y sus lunas, los anillos son uno de los tres componentes primarios del sistema de Saturno. Tienen aproximadamente entre $\sim 1m - 30m$ de espesor y están casi completamente compuestos por una multitud de partículas de hielo y roca con dimensiones que van desde los nanómetros hasta unas cuantas decenas de metro. Los anillos se encuentran dentro del límite de Roche de Saturno, que se define como la distancia en la cual las fuerzas de marea gravitacional evitan la formación de cuerpos masivos.

En el sistema de anillos principales de Saturno los distintos anillos se llaman como A, CD, B, C y D como se muestra en la Figura 1.1. Cada uno puede distinguirse por sus diferencias en profundidad óptica o transparencia, τ , su grosor H y albedo A , entre otras (Dougherty et al., 2009). El sistema de anillos de Saturno cuenta además con anillos de partículas de polvo que se encuentran más allá del límite de Roche o región donde las fuerzas de marea dominan (p.e., F, G, E y el anillo de Febe)

Los anillos tenues mostrados en la Figura 1.1, están compuestos por polvo muy fino de radio aproximado $\sim 100\mu m$, los cuales tienen muy baja profundidad óptica, casi no presentan colisiones y se ven muy poco afectados por las fuerzas gravitacionales por lo que presentan una dinámica muy diferente. El anillo F es pequeño pero muy activo debido a los satélites

Pandora y Prometeo, se les denomina pastores debido a que mantienen el material de este anillo confinado en una región. El anillo G y el E son muy tenues y deben a su formación al material liberado por los satélites Egaeón y Encelado. Encelado libera gran cantidad de material ya que presenta criovulcanismo en su polo sur. Este material termina formando al anillo E que es muy extenso y poco denso. Estos anillos no serán estudiados por este trabajo.

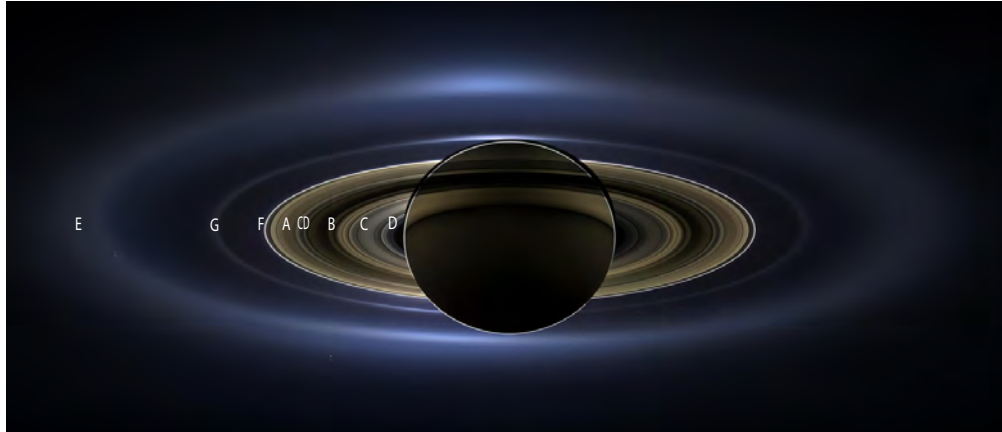


Figura 1.1: Distribución de los anillos principales (A, CD, B, C y D) dentro del sistema de Saturno [NASA/JPL]

1.2. Descripción general de los anillos principales

Cada anillo tiene sus propias características como se muestra en la Figura 1.2. Están a diferentes distancias de Saturno, tienen una extensión horizontal y vertical definida por su dinámica y perturbaciones gravitacionales. La naturaleza y origen de los anillos principales no se conoce del todo (Canup, 2010). Tradicionalmente, se han utilizado simulaciones de n-cuerpos para su estudio (Salo and Karjalainen, 2003). Flandes et al. (2010) han desarrollado simulaciones térmicas para describir sus cualidades estructurales.

El anillo C es muy tenue, tiene una anchura de 17,342 km y un grosor muy pequeño ~ 5 m, se le puede considerar con poca colisión entre partículas y muy baja actividad dinámica. En características es muy similar a la División de Cassini que se encuentra entre los anillos A y B, tiene una anchura muy pequeña de 4,637 km, y tiene un grosor tan muy pequeño como una sola partícula de máximo tamaño (~ 1 m). En particular, el anillo C presenta saltos en profundidad óptica que permanecen relativamente constantes en la dirección radial, a éstos les llaman mesetas o *plateaus* y son relevantes porque presentan condiciones similares en toda su extensión facilitando la selección de regiones. Con observaciones es posible ver muchas más de sus características, así mismo cuantificar las variaciones en sus condiciones a lo largo del tiempo en función de la temperatura y en diferentes geometrías de observación.

La División de Cassini tiene poco material comparativamente, debido a que, principalmente, las perturbaciones gravitacionales o resonancias debidas a la corrotación que presenta

Tabla 1.1: Características de los anillos de Saturno. Distancia y extensión radial desde Saturno, profundidad óptica τ , % polvo, exponente Q de ley de potencias para las masas y notas (Esposito, 2014)

Anillo	Ubicación [km]	τ	% Polvo	Q	Notas
C	74,490 - 91,983	0.05 - 0.5	< 3	3.1	Algunas acumulaciones aisladas
B	91,983 - 117,516	≤ 2.5	< 3	2.75	Estructuras abundantes
CD	117,516 - 122,053	0.05 - 0.15	< 3	\sim	Muchas planicies
A	122,053 - 136,774	0.65	< 3	2.70 - 2.90	Perturbaciones de densidad

con la luna Mimas.

Proporcionalmente, los anillos A y B tienen la mayor masa de todos los anillos de Saturno y presentan los mayores grosores verticales $\sim 5 - 30$ m. Las rocas que lo componen están muy juntas entre sí y presentan muchos impactos mutuos. Ésto fomenta una constante renovación del material más pequeño que posteriormente puede establecerse en las superficies de las partículas más grandes. El anillo B también presenta un pequeño grado de perturbaciones en forma de pequeñas ondulaciones, conocidas como *estelas* o *wakes* provocadas por los efectos gravitacionales locales. En adelante, utilizaremos el término en inglés *wakes* para referirnos a estas estructuras (se tratarán con más detalle en la Sección 5.1.1). En la Tabla 1.1, se listan algunas características de cada anillo.

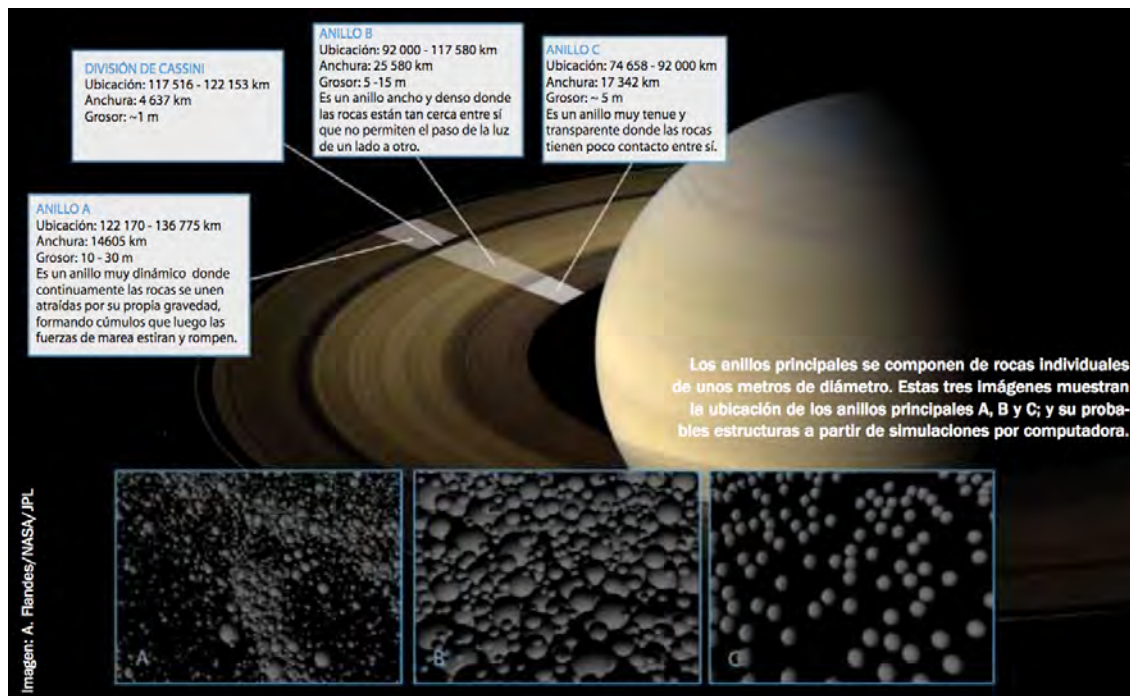


Figura 1.2: Diagrama de los anillos principales de Saturno con simulaciones de su distribución de partículas aproximado (Flandes, 2012).

Capítulo 2

Misión Cassini-Huygens

La misión Cassini-Huygens de la NASA y la ESA (Agencia Espacial Europea) y la ASI (Agencia Espacial Italiana), está compuesta de un orbitador (Cassini) que lleva instrumentos de detección óptica, de partículas, campos y microondas; y un aterrizador (Huygens) que llegó a la superficie de Titán, la luna con mayor tamaño de Saturno. Huygens mandó información 72 minutos después de su aterrizaje.

Las observaciones fueron realizadas considerando varios parámetros angulares para definir diferentes geometrías, como se ve en la Figura 2.1. Se define la elevación solar B' , la elevación de la nave B (con respecto al plano de los anillos), el ángulo de fase α y la hora local ψ . Que permiten la caracterización de los datos a lo largo de este trabajo.

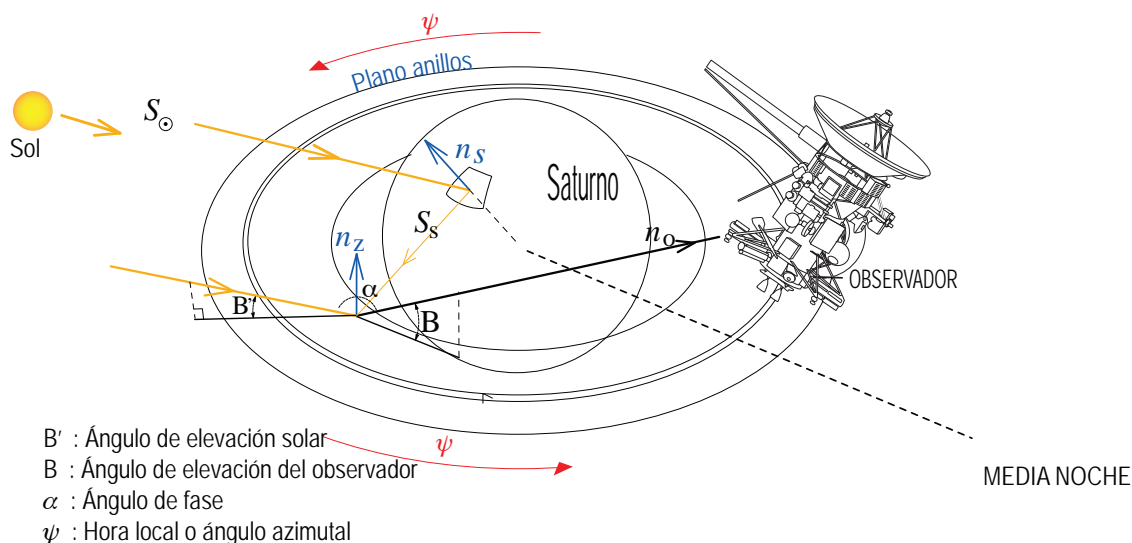


Figura 2.1: Geometría básica de las observaciones de la misión Cassini. [Flandes A. JPL, 2017].

La nave fue lanzada hace más de 19 años y lleva orbitando Saturno casi por 15 años. Algunos de los instrumentos a bordo que son de importancia para este trabajo son CIRS y

UVIS que aportan la información inicial de los anillos principales de Saturno, pues nos dan información de la cantidad de material que tienen y de su temperatura principalmente.

2.1. CIRS: Espectrómetro Compuesto Infrarrojo de Cassini

Todos los cuerpos emiten naturalmente radiación en función de su temperatura como nuestro Sol y otras estrellas. Los cuerpos a menor temperatura lo hacen a longitudes de onda más grandes y viceversa. Por ejemplo, las nubes, los anillos y las lunas de Saturno que tienen temperaturas de $\sim 100K$ emiten ondas en el infrarrojo.

Los espectrómetros utilizan espejos y lentes para descomponer la luz en sus diferentes longitudes de onda (Figura 2.2), similar a como las gotas de lluvia separan la luz del Sol en un arcoiris. El espectrómetro infrarrojo de Cassini realiza el mismo proceso, pero en longitudes de onda infrarrojas y no en el espectro visible.

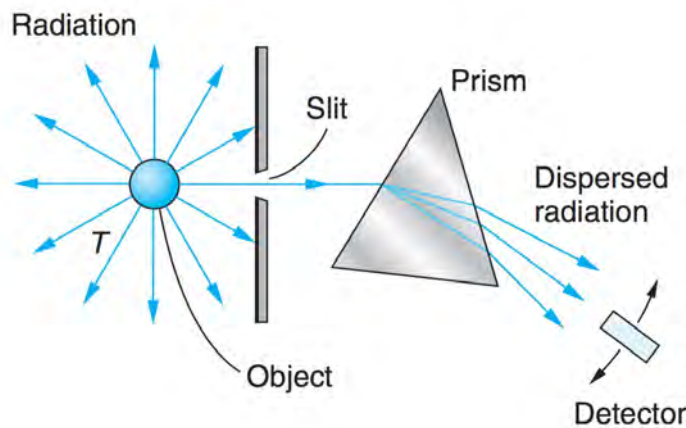


Figura 2.2: Funcionamiento aproximado de un espectrómetro, en la detección de temperaturas de brillo aparente (Tipler and Llewellyn, 1987).

CIRS mide la radiación térmica infrarroja emitida por la atmósfera de Saturno, los anillos y sus satélites suponiendo que éstos se comportan como cuerpos negros (ver Capítulo 3). Con sus datos se pueden determinar las temperaturas de los objetos observados. También da indicios de la composición química al mostrar las líneas espectrales de absorción y emisión a diferentes longitudes de onda, características de cada elemento. Por ejemplo, cuando se apunta hacia la atmósfera de Saturno, un espectrómetro revelaría una serie de líneas brillantes que indican detección de gas metano. CIRS también ha ayudado a descifrar el misterio del material criovolcánico expulsado por el satélite Encelado de Saturno. Cassini capturó imágenes que mostraban la expulsión de agua en la región polar sur de la luna a través de grietas superficiales. Éstas fueron vistas por las cámaras de Cassini y se demostró que las grietas son mucho más calientes que los alrededores.

Cassini ha medido la temperatura de los anillos por casi dos décadas en busca de aprender acerca de su composición y estructura. Cassini presenció el breve período del equinoccio de Saturno, cuando la iluminación solar sobre los anillos pasó del lado sur al norte (Flandes et al., 2010). El instrumento CIRS es un dispositivo es muy útil para medir la temperatura en los anillos principales de Saturno en diferentes a lo largo de un año Saturnino como se muestra en la Figura 2.4, considerando que su temperatura es del orden de 100 K y es posible a partir de sus datos, describir sus características dinámicas, de composición y distribución espacial. Los datos obtenidos por CIRS hasta el momento del equinoccio en Saturno sirven de base para este proyecto.

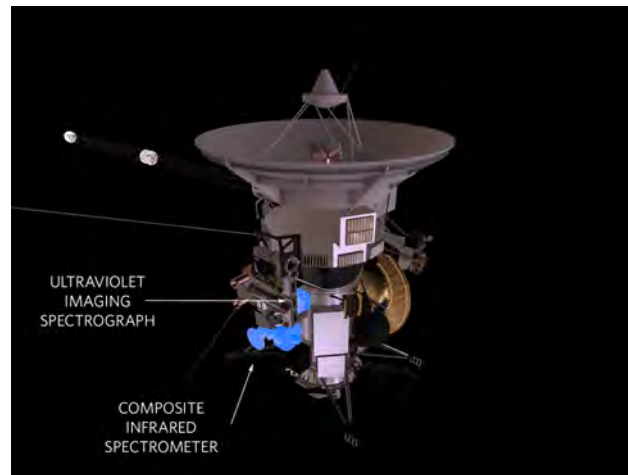


Figura 2.3: Diagrama del orbitador Cassini, mostrando la ubicación de los dispositivos CIRS y UVIS en la nave Cassini [NASA/JPL/Space Science Institute].

2.1.1. Descripción del instrumento

El dispositivo CIRS consiste en dos espectrómetros infrarrojos de Fourier (FTS, Fourier Transform Spectrometer) como se muestra en la Figura 2.5, comparten el mismo telescopio y mecanismo de escaneo. Pueden medir las emisiones térmicas en el infrarrojo lejano (es decir, $7\mu\text{m} - 1\text{mm}$, con bandas espectrales o la resolución espectral del sensor entre $10 - 600\text{ cm}^{-1}$) y en el intermedio (en el rango, $7\mu\text{m} - 17\mu\text{m}$, $600 - 1400\text{ cm}^{-1}$). CIRS realiza mediciones con una resolución espectral entre 0.5 a 15.5 cm^{-1} con lo que puede realizar un mapeo de las características y composición de los satélites y anillos de Saturno.

El infrarrojo lejano es medido por un interferómetro de polarización, y dos detectores de termopila en el plano focal con un campo de visión (plano perpendicular al eje óptico que contiene al punto focal, en adelante FOV) de 3.9 mrad (miliradianes) por pixel. En el infrarrojo medio se usa un interferómetro convencional Michaelson con dos planos focales con diez detectores de Hg-Cd-Te, con un FOV de 0.273 mrad por pixel (Flasar et al., 2004), el espectro también se obtiene usando una transformada de Fourier. Las características de cada espectrómetro se describen en la Tabla 2.1.

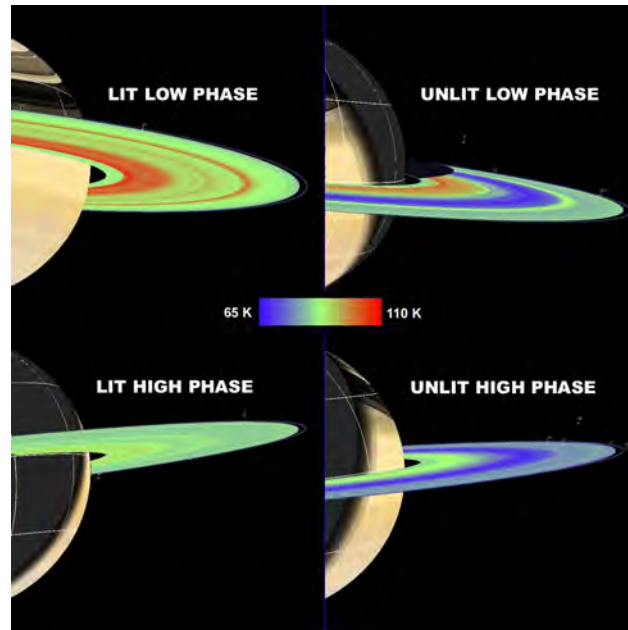


Figura 2.4: Cambios de temperatura en los anillos de Saturno medidos por CIRS, se muestran con el cambio de color al tener diferentes grados de incidencia luminosa [Goddard Space Flight Center].

2.2. Espectrógrafo de imágenes en el ultravioleta (UVIS)

El espectrógrafo UVIS (Ultraviolet Imaging Spectrography) observa en la ventana del espectro ultravioleta, en la cual algunos gases emiten. Este instrumento se ha utilizado para estudiar la composición de la atmósfera superior de Saturno y Titán, y ayudó a determinar la presencia de una pluma criovolcánica emitida por el polo sur de Encelado, con composición en gran parte de agua. En otras partes del sistema de Saturno, el instrumento ha observado acetileno, etano, hidrógeno, metano y oxígeno, entre otras moléculas.

UVIS ha sido utilizado para medir la transparencia de los anillos a partir de experimentos de ocultación en los cuales se miden las variaciones de brillo de una estrella dada al ser bloqueada por los anillos. La Figura 2.6 muestra una superposición de imágenes, en falso color, del anillo A de Saturno generada a partir de ocultaciones estelares con el espectrógrafo UVIS cuando la nave estaba a 6.3 millones de kilómetros orbitando Saturno. Las áreas brillantes indican las regiones más densas de los anillos.

La técnica de ocultación ha permitido al equipo de espectrógrafo discriminar rasgos en los anillos de Saturno que son 10 veces más pequeños de lo que las cámaras de luz visible de Cassini pueden ver. Para esta tesis los datos de UVIS permitieron refinar nuestro conocimiento de los grados de transparencia o profundidad óptica de los anillos principales de Saturno así como el tamaño de las partículas que los componen.

Tabla 2.1: Características del instrumento CIRS (Flasar et al., 2004).

Diámetro del telescopio	50.8 cm		
Temperatura del instrumento	170 K		
Interferómetros	Far - IR	Mid - IR	
Rango espectral	10 - 600 cm^{-1}	600 - 1400 cm^{-1}	
Rango espectral	17 - 1000 μm	7 - 17 μm	
Resolución espectral	0.5 - 15.5 cm^{-1}	0.5 - 15.5 cm^{-1}	
Planos focales	FP1	FP2	FP3
Temperatura de los planos focales	75 - 90 K		
Tipo de detector	Termopila	PC HgCdTe	PV HgCdTe
FOV por pixel	3.9 mrad	0.273 mrad	0.273 mrad

2.2.1. Descripción del instrumento

El espectrógrafo UVIS se encuentra cercano a CIRS como se muestra en la Figura 2.3. Entre otras muchas observaciones, El UVIS ha hecho mediciones de la transparencia de los anillos principales por ocultación estelar en tres canales. El fotómetro de alta velocidad (High Speed Photometer, HSP) es usado para realizar medidas en el espectro de intensidad luminosa entre 110 y 190 nm con un tiempo de captura de 1 - 8 ms. Cuenta con un espectrómetro para el ultravioleta lejano (Far Ultraviolet Spectrograph, FUV) que funciona en el mismo rango que el HSP, pero con una resolución de 1024 pixeles en 64 separaciones a lo largo de la apertura. Realiza la integración de estos elementos en 64 espectros distintos, por lo que el tiempo de proceso es mucho mayor. Sus capacidades para generar imágenes permiten realizar medidas de brillo simultaneas en la misma región de estudio del HSP.

La integración de estos diferentes dispositivos y sus espectros asociados sirve como herramienta al evaluar la profundidad óptica de los sistemas anulares de Saturno. Se ajustan respecto al ángulo de observación para que la intensidad de brillo observada corresponda a una profundidad óptica normalizada. Así datos obtenidos por UVIS son fácilmente comparables ya que no dependen de la posición en la que la nave realizó observaciones y se aplica para cualquier geometría de los arreglos simulados.

2.3. Fin de la misión

Después de casi 20 años en el espacio, la sonda espacial Cassini de la NASA comienza el capítulo final de su extraordinaria historia de exploración. Entre abril y septiembre de 2017, Cassini emprenderá un atrevido conjunto de órbitas en una última misión. Tras un último vuelo de la luna de Saturno Titán, Cassini cruzará los anillos del planeta comenzando 22 acercamientos, como se muestra en la Figura 2.7 [Cassini Science Communications Team at NASA's Jet Propulsion Laboratory].

A veces, la nave espacial bordeará el límite interior de los anillos; En otras ocasiones, rozará los bordes exteriores de la atmósfera. Finalmente, el 15 de septiembre, ingresará en la atmósfera de Saturno.

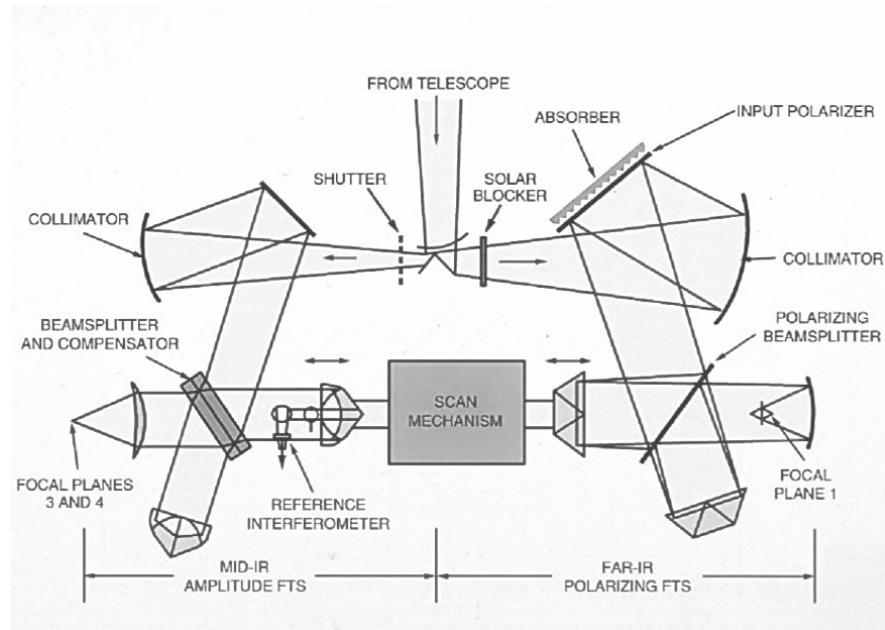


Figura 2.5: Disposición de componentes del dispositivo CIRS [NASA/JPL/Space Science Institute].

Si bien el equipo de la misión está seguro de que los riesgos están bajo control, todavía podría haber sorpresas. Algunos de los objetivos finales de la misión son:

- Realizar mapas detallados de la gravedad de Saturno y sus campos magnéticos, revelando cómo el planeta está dispuesto internamente, y posiblemente ayudando a resolver el misterio de su rotación precisa.
- Cruces a través de los anillos principales que se espera mejoren enormemente nuestro conocimiento de cuánto material hay en los anillos, acercándonos a entender sus orígenes.
- Los detectores de Cassini medirán directamente las partículas de polvo cargadas de los anillos principales que son canalizadas a la atmósfera por el campo magnético de Saturno.
- Sus cámaras tomarán imágenes muy cercanas de los anillos y de las nubes de Saturno.

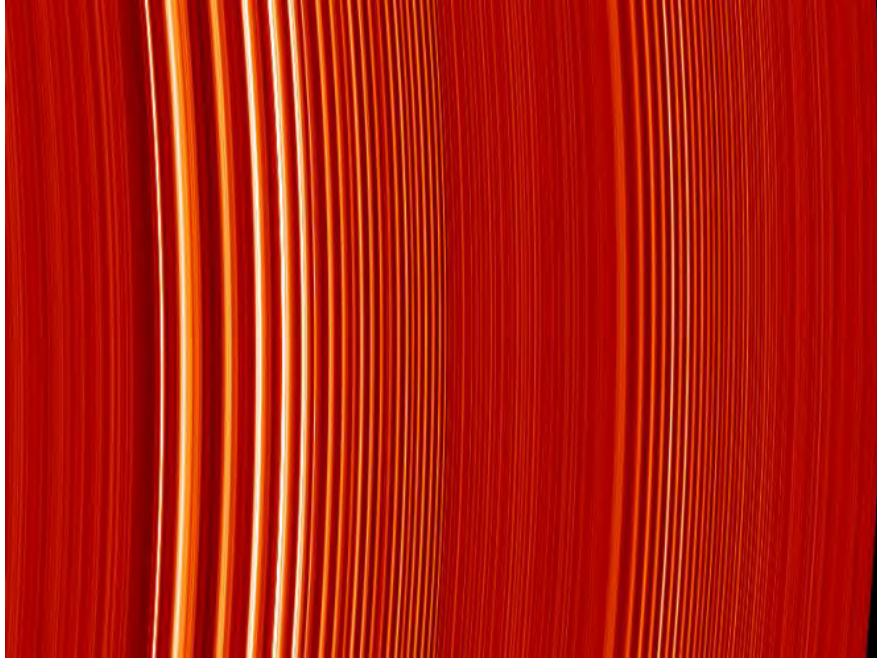


Figura 2.6: Imagen del anillo A de densidades de partículas en espectro ultravioleta [NASA/JPL/Space Science Institute].

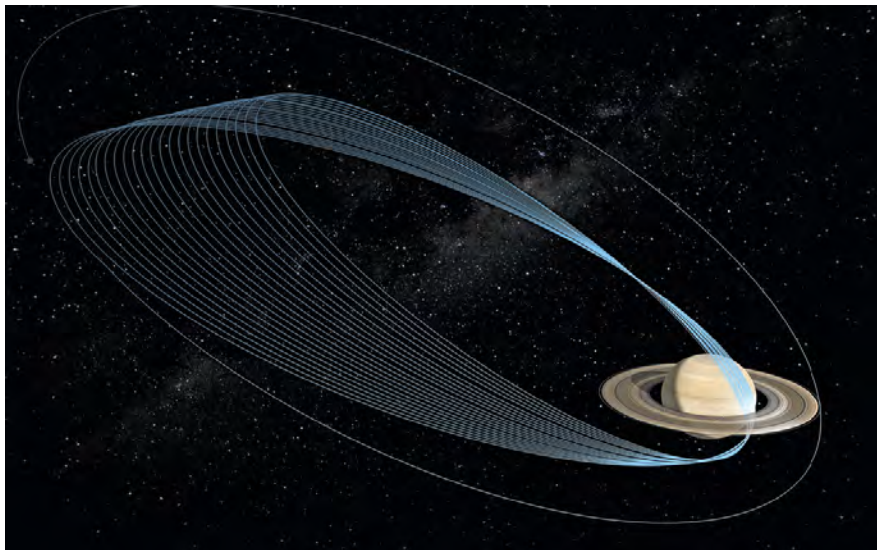


Figura 2.7: Imagen de las órbitas finales de la sonda Cassini [NASA/JPL/Space Science Institute].

Capítulo 3

Conceptos Físicos

3.1. Conceptos Físicos relevantes I

Es necesario explicar la física de los datos obtenidos por la nave Cassini, cómo es que se evalúan y qué implicaciones tienen en el comportamiento del material que compone a los anillos principales. De estos principios, surge la base del trabajo desarrollado.

Por ejemplo, en nuestro caso, la temperatura se infiere a partir de observaciones del dispositivo CIRS que estima una temperatura de brillo para los anillos.

3.1.1. Radiación de cuerpo negro y Temperatura de brillo

La radiación absorbida por un cuerpo aumenta la energía cinética de los átomos que lo componen, los cuales oscilan en sus posiciones de equilibrio y causa que la temperatura aumente. Como los átomos contienen electrones que son partículas cargadas, al ser acelerados por las oscilaciones, emiten radiación electromagnética. Esto reduce las oscilaciones y la temperatura del cuerpo. Cuando la tasa de absorción iguala a la tasa de emisión, se llega a una temperatura de equilibrio. Se puede decir, entonces, que el cuerpo se encuentra en equilibrio termodinámico con su entorno (Tipler and Llewellyn, 1987).

La radiación electromagnética emitida en estas circunstancias es llamada radiación térmica. La cantidad F de energía irradiada por unidad de área por unidad de tiempo por un cuerpo negro en todas las frecuencias es el flujo de energía total que por la Ley de Stefan-Boltzmann es:

$$F = \sigma T^4 \tag{3.1}$$

Donde σ es la constante de proporcionalidad de Stefan-Boltzmann, con un valor constante $\sigma = 5.6703 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$. La Ecuación 3.1 es de gran utilidad al establecer temperaturas en sistemas físicos con equilibrio térmico.

Los objetos que no son cuerpos negros ideales (o cuerpos grises) a la misma temperatura, irradian energía por unidad de área a una tasa menor que un cuerpo negro. Para estos objetos se tienen propiedades adicionales que considerar, como el color y composición de la superficie. Los efectos combinados dependen del factor llamado emisividad ϵ , el cual multiplica

la ecuación y da como resultado $F = \epsilon\sigma T^4$ con $\epsilon \leq 1$. Resaltamos que si $\epsilon < 1$, hablamos, entonces, de un cuerpo gris.

Considerando el flujo energético total F para un cuerpo negro que emite radiación como se muestra en la Figura 3.1, se encuentra empíricamente que solo depende de la temperatura absoluta T . Experimentalmente se determina que una distribución del espectro electromagnético tendrá una longitud de onda con máxima intensidad que varía de manera inversa con la temperatura: El producto de $\lambda_{max} \times T$ es una constante, se le denomina a esta relación la ley de desplazamiento de Wien (Tipler and Llewellyn, 1987):

$$\lambda_{max}T = constante = 2.898 \times 10^{-3}mK \quad (3.2)$$

La temperatura de brillo calculada de esta forma corresponde a la aproximación de cuerpo negro, para un conjunto de mediciones del espectro captado con el dispositivo CIRS suponen que las partículas de los anillos se comportan como cuerpos negros. Usando la ley de desplazamiento de Wien se pueden saber la longitud máxima de emisión, por ende, la temperatura de brillo como se muestra en la Figura 3.1 se cuantifica en un cuerpo negro que irradia siguiendo la Ley de Planck para distintas frecuencias como:

$$F(\lambda) = \frac{8\pi hc\lambda^{-5}}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (3.3)$$

Con c la velocidad de la luz en el vacío, h la constante de Planck y k la constante de Boltzmann (Tipler and Llewellyn, 1987), las temperaturas finalmente dependerán de la composición superficial de los cuerpos.

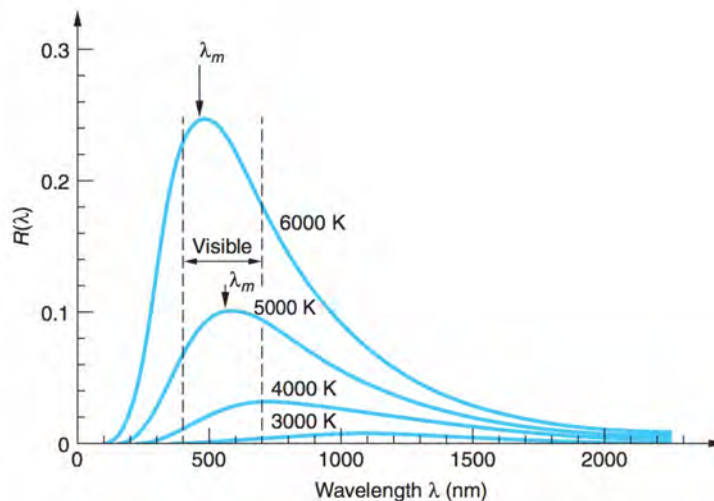


Figura 3.1: Perfiles de brillo para un cuerpo negro ideal con longitud de onda máximo λ_{max} para cada temperatura T (Tipler and Llewellyn, 1987).

3.1.2. Albedo

El albedo es la razón de radiación reflejada por la superficie de un cuerpo con respecto a la que incide sobre él. Las superficies claras como los espejos o la nieve tienen mayor albedo, lo que implica una temperatura mucho menor ya que poca radiación es usada para elevar su temperatura interna. Un caso extremo son los cuerpos blancos con superficie ásperas que reflejan toda la radiación incidente en todas las direcciones, cuyo albedo es 1. Por el contrario los cuerpos con superficies oscuras de bajo albedo como el carbón serán más calientes.

Es importante entender también las características del material iluminado, por lo que el albedo es importante ya que éste depende, en gran medida de la composición y estructura superficial de las partículas y, por tanto, modula en gran manera la reflexión y absorción del flujo energético recibido y las mediciones de temperatura

El albedo nos da una idea del posible origen del material en la superficie de las partículas que componen a los anillos principales de Saturno, donde su composición superficial en general de hielo con pequeñas contaminaciones (rocosas) externas, puede cambiar al ser renovada por colisiones entre partículas cercanas y contaminado por el material proveniente de lunetas pequeñas y satélites rocosos cuyo material fue liberado por microimpactos a su superficie, oscureciendo y afectando la temperatura de brillo observada.

Un anillo altamente dinámico favorece frecuentes colisiones entre cuerpos causando renovación de material y un elevado albedo, sucede lo contrario cuando se tienen pocas colisiones el material oscuro no es retirado constantemente lo que provoca un bajo albedo, finalmente afectando las mediciones para temperatura de brillo aparente.

Para este trabajo es de gran importancia encontrar de investigaciones previas valores aproximados del albedo en cada región de los anillos, pues sirven de base para realizar posteriores ajustes que permiten tener temperaturas simuladas que se aproximen a lo observado por la nave Cassini.

Estas son las herramientas teóricas necesarias para implementar un algoritmo computacional que genere arreglos sintéticos con comportamiento similar a regiones específicas de los anillos de Saturno. Nos da los lineamientos para las condiciones iniciales y máximas en nuestros arreglos de estudio al usar el método de flujos energéticos y permite confirmar el trabajo desarrollado con las observaciones.

3.1.3. Inercia térmica

La inercia térmica, I , define la transferencia de energía en el sistema ya que relaciona las propiedades que el material presenta al conducir el calor y su capacidad calorífica. Se puede asociar a la velocidad en que la energía entra y sale de un cuerpo en función de su composición, altos valores de inercia térmica implica que un cuerpo tardará más tiempo en encontrar un equilibrio térmico.

La inercia térmica I de un material se define como $I = \sqrt{\kappa\rho c_v}$, con κ como la conductividad térmica [$Wm^{-1}K^{-1}$], ρ la densidad volumétrica del material [kgm^{-3}], c_v como la capacidad térmica (a volumen constante) [$Jkg^{-1}K^{-1}$] del mismo.

La temperatura de un material con baja inercia térmica cambia significativamente cuando se ve iluminado, mientras que la temperatura de un material con alta inercia térmica no cambia drásticamente. Derivar y comprender la inercia térmica de la superficie puede ayudar a reconocer las características a pequeña escala del material que lo compone. En combinación con otros datos, la inercia térmica puede ayudar a caracterizar los materiales superficiales (p.e. los aspectos relativos a su composición) y los procesos geológicos responsables en la formación de estos materiales.

Se observa que la composición de las partículas de los anillos es esencialmente de hielo de agua por lo que su inercia térmica es relativamente baja (Flandes et al., 2010), sin embargo, las partículas se ven bombardeadas constantemente por flujos provenientes de distintas fuentes (Flandes et al., 2010), y sus superficies se contaminan disminuyendo sus albedos (Dougherty et al., 2009).

Los instrumentos de la sonda Cassini (CIRS y UVIS) presentan un tiempo de respuesta muy corto entre cada medición, por lo que, al considerar lo anterior, podemos decir que observa un equilibrio térmico local en cada una de las partículas.

3.2. Conceptos Físicos relevantes II

3.2.1. Profundidad óptica

Para el modelo anular clasico, la profundidad óptica normal τ , es definida como:

$$\tau(\lambda) = \int_0^L \pi a^2 \kappa(a, \lambda) da \quad (3.4)$$

Donde $\kappa(a, \lambda)$ es el coeficiente de absorción de una partícula esférica de radio a , con λ la longitud de onda de la radiación.

Se define la profundidad óptica de un medio, capa o placa de grosor dado, como la razón de la intensidad luminosa que incide sobre y que emerge por el lado opuesto. Si la reducción en intensidad observada se da en un factor de $e(= 2.718)$, se dice que la profundidad óptica es de 1. También la profundidad óptica normal (o normalizada) es la que se corrige por el ángulo de visión y se ajusta como si fuera obtenida de una observación vertical. En el campo de los anillos planetarios, las diferentes profundidades ópticas son, a veces, usados indistintamente dependiendo la geometría de estudio y el método evaluado (Miner et al., 2005). En este trabajo se usan los valores de profundidad óptica observados en ocultaciones estelares como los mostrados en la Figura 3.2. La profundidad óptica observada en las ocultaciones depende de qué cantidad de material está presente en el anillo como al mismo tiempo del camino libre medio de los rayos de luz al cruzar el mismo, como de la orientación geométrica del plano donde se encuentran las barras o perturbaciones gravitacionales. La manera de estimar

la profundidad óptica en función de las intensidades observadas y atenuadas con un factor posterior de normalización ajustado al ángulo de visión es:

$$I = I_0 e^{-\tau} \quad (3.5)$$

Para el caso de las ocultaciones estelares,

$$I - b = I_0 e^{-\tau/\mu} \quad (3.6)$$

El ajuste normalizado de la profundidad óptica, al integrar tenemos $\frac{dI}{I} = -d\tau$ para expresar:

$$\tau_\eta = \mu \ln\left(\frac{I_0}{I - b}\right) \quad (3.7)$$

Donde I es la intensidad luminosa medida en la ocultación, I_0 es la intensidad sin ocultar, b es la señal de fondo y $\mu = |\sin(B)|$. Aunque este método no incluye los efectos de las perturbaciones gravitacionales, provee un medio para presentar los perfiles de ocultación para diferentes secciones estudiadas del anillo.

La profundidad óptica dinámica es la razón del área observada y la sección ocupada por materia, para $\tau \sim 1$ las secciones transversales de las partículas presentes sumaran el total de las dimensiones del plano la caja de estudio, igual al área de observación sobre el plano del anillo. Por lo que, para $\tau > 1$, todas las secciones efectivas de las partículas que van a conformar la malla simulada computacionalmente van a sumar τ veces el área de la superficie de la sección sobre el plano del anillo estudiado. Esto sirve de guía para colocar aleatoriamente masas dentro de la simulación, que cumplen una distribución que sigue una ley de potencias para las masas como se infiere de algunos estudios de los anillos principales (Salo, 1995).

Se usa la siguiente expresión matemática para estimar la cantidad de partículas en función de la profundidad óptica dinámica τ_{dyn} como en el trabajos previos Salo and Karjalainen (2003):

$$\tau_{dyn} = \frac{\sum_i \pi s_i^2}{L_x L_y} \quad (3.8)$$

s_i será el radio de la partícula i donde el término $\sum_i \pi s_i^2$ nos define el volumen a color en la simulación, en función de las dimensiones establecidas por sus ejes L_x y L_y . La profundidad óptica puede ayudar en determinar las características de la superficie de las partículas que componen al anillo y nos da indicios de su distribución. Debido a que la cantidad de luz que refleja una sección del anillo depende directamente de cuanto material está presente y de su composición superficial.

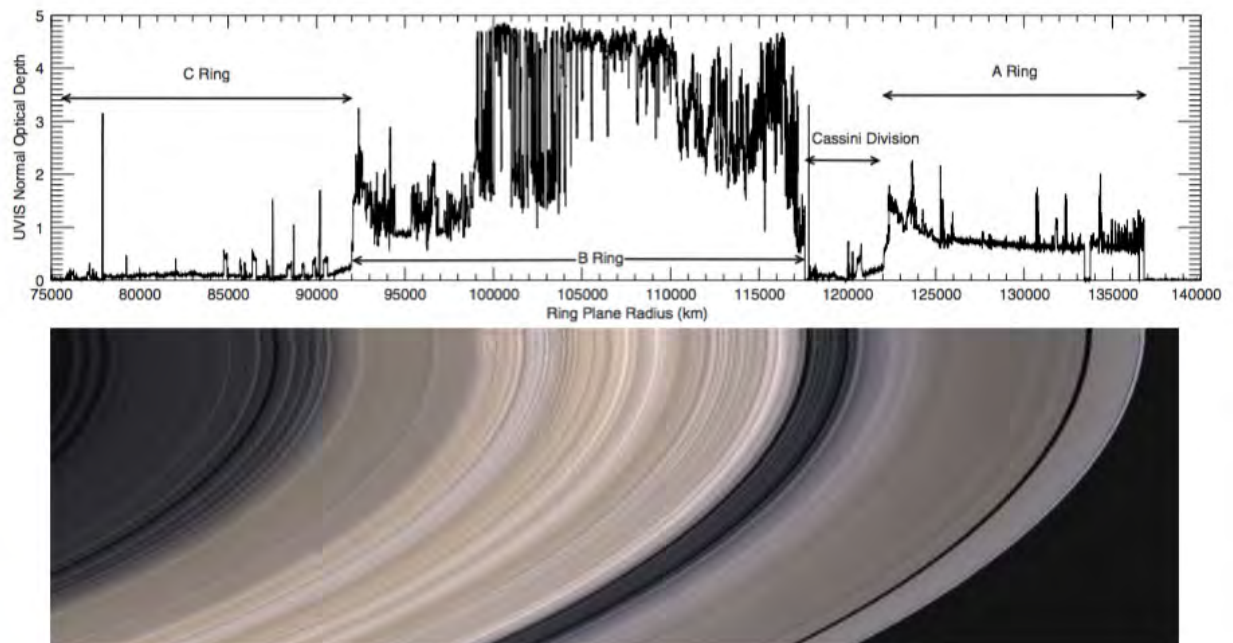


Figura 3.2: Mosaico de los anillos principales de Saturno. Profundidad óptica τ con datos de ocultación estelar por UVIS (arriba). Imagen en el visible de los anillos principales de Saturno (abajo) [NASA/JPL/Space Science Institute].

Capítulo 4

Regiones de estudio de los anillos

En trabajos previos, como el de Flandes et al. (2010), se compara la profundidad óptica y las temperaturas evaluadas por la nave Cassini (como se muestra en la Figura 4.1) con el dispositivo CIRS y datos de la sonda Voyager. Se comparan, además, las tendencias de temperatura como función del ángulo de elevación solar, B' , con los datos disponibles de los anillos principales donde se observa claramente una relación entre estructura y la temperatura en los anillos de Saturno (Figura 4.1).

Las fuentes principales de energía para los anillos son el Sol y Saturno. En el caso del Sol, no resulta importante la variación de distancia entre cada uno de los anillos ya que por su lejanía la aportación será constante, al contrario, Saturno se encuentra muy cerca a los anillos y su variación en los diferentes anillos sí es importante, lo cual se refleja en sus diferentes temperaturas de brillo. Como pasa en los máximos de temperatura observados en el anillo C y la División de Cassini, aún con una profundidad óptica similar ($\tau \sim 0.1$) tienen una diferencia de temperatura $\sim 5K$ (véase Tabla 8.3), debido principalmente a su diferente distancia a Saturno.

Mostramos las variaciones de temperatura en función del ángulo de elevación solar B' en la Figura 4.1, se puede notar una tendencia inversa entre la profundidad óptica y la temperatura. Por ejemplo, el anillo C, con bajo τ y poco material, presenta una estructura simple que dificulta la ocultación entre partículas y muestra temperaturas comparativamente altas debido a que la sección iluminada de las partículas individuales es comparativamente grande (en muchos casos, un hemisferio completo). En contraste el anillo B que tiene un valor de $\tau > 2$, muestra una extensión vertical considerable y una estructura mucho más compacta, por lo que sólo las partículas más superficiales alcanzan a ser iluminadas y, en algunos casos, sólo en pequeñas secciones de su superficie, por lo que su temperatura será comparativamente menor.

Para este estudio, se seleccionaron doce regiones en los anillos A, B, C y una sección de la División de Cassini, cuyos valores promedio de profundidad óptica fueran característicos (ver Figura 4.2). No se considera al anillo D, porque, al estar muy cerca de Saturno, los datos de temperatura de CIRS muestran contaminación debido a su atmósfera.

Las regiones anteriores y sus temperaturas son la base de este trabajo de tesis. Uno de

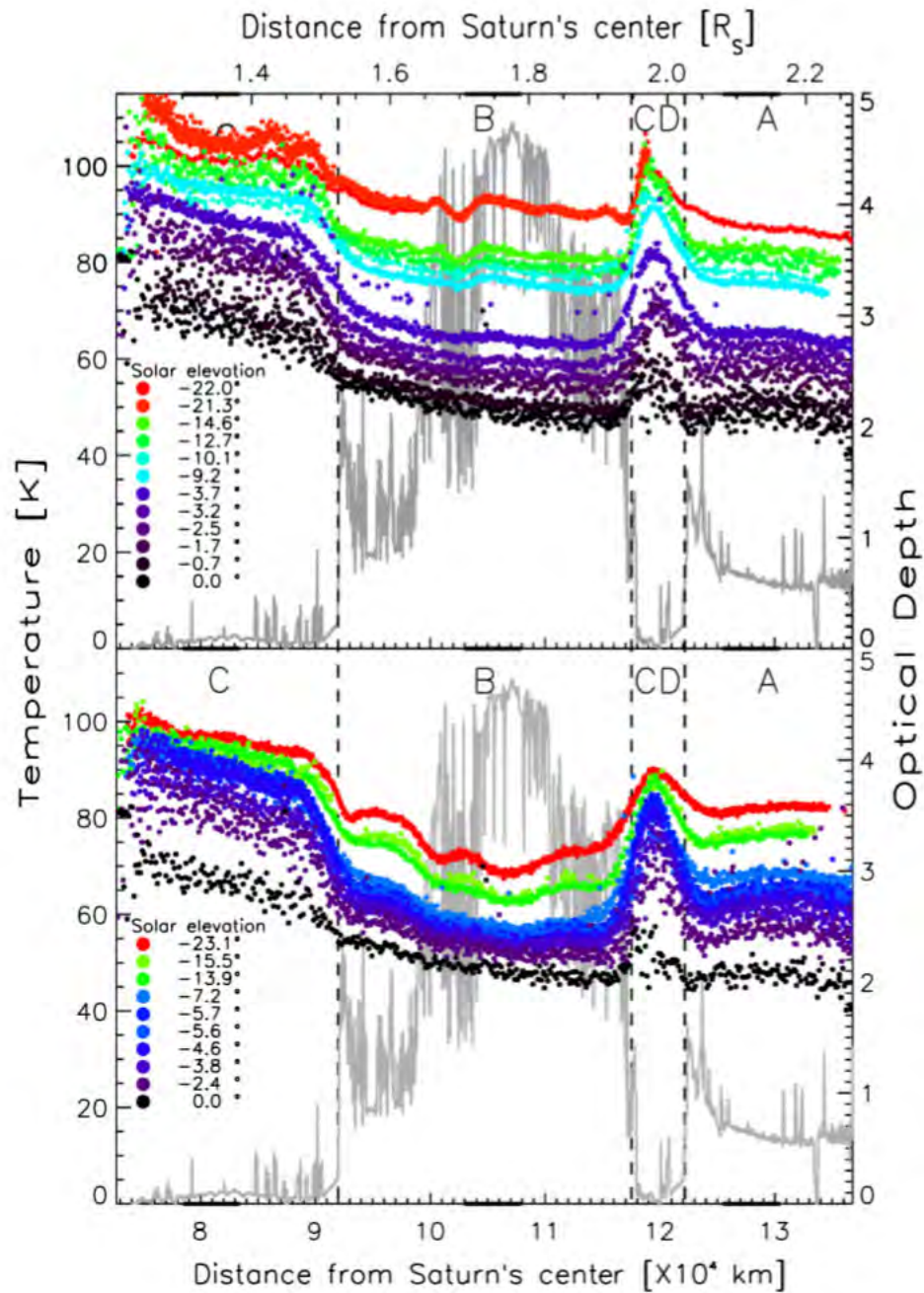


Figura 4.1: Escaneos radiales de temperaturas de brillo con CIRS de los anillos principales de Saturno (T vs D_{sat}) a diferentes elevaciones solares B' (a colores). El cuadro superior corresponde a observaciones con la nave colocada en la parte iluminada de los anillos en el intervalo 14 abril de 2005 a 12 agosto de 2009. El cuadro inferior corresponde a observaciones de la nave de la parte oscura de los anillos en el intervalo 14 diciembre de 2004 al 12 agosto de 2009 (Flandes et al., 2010). Como referencia se agregaron las profundidades ópticas (τ vs D_{sat}) (gris) usadas por Colwell (Dougherty et al., 2009).

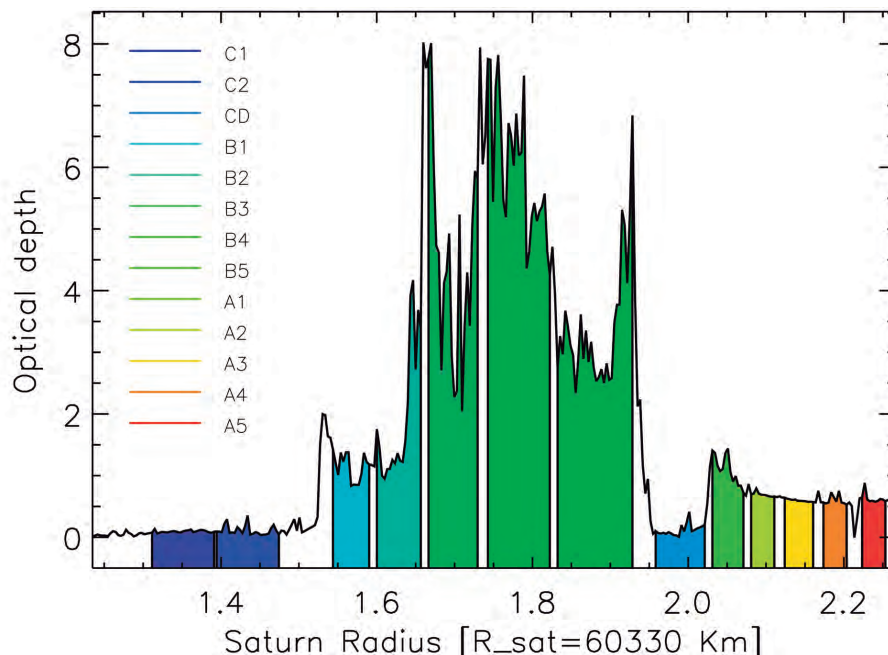


Figura 4.2: Selección de todas las regiones con datos de UVIS en profundidad óptica τ , datos de Colwell (Dougherty et al., 2009). Selección por región a color como se muestra en la leyenda.

los objetivos será simular cada una de estas regiones y derivar una temperatura sintética que pueda compararse con las observaciones del instrumento CIRS.

A continuación se describen cada una de las regiones.

4.1. Anillo C y División de Cassini

Para el anillo C se seleccionaron sólo dos regiones ya que este anillo tiene características y estructura más o menos uniforme. De la División de Cassini sólo se considera una porción, en la Tabla 4.1 se tienen las dimensiones horizontales de estas regiones, así como el valor promedio de la profundidad óptica obtenido por el dispositivo UVIS. Las selecciones para cada uno se muestran en las Figuras 4.3 y 4.4.

Tabla 4.1: Valores de las regiones del anillo C y División de Cassini.

Región	C1	C2	CD
D mínimo [km]	79000	84000	118000
D máximo [km]	84000	89000	122000
τ	0.09	0.11	0.11

Se puede notar que estas regiones son similares en profundidad óptica y, básicamente, se les puede considerar sistemas monocapa ya que su extensión vertical no es muy grande ($H \lesssim 4m$).

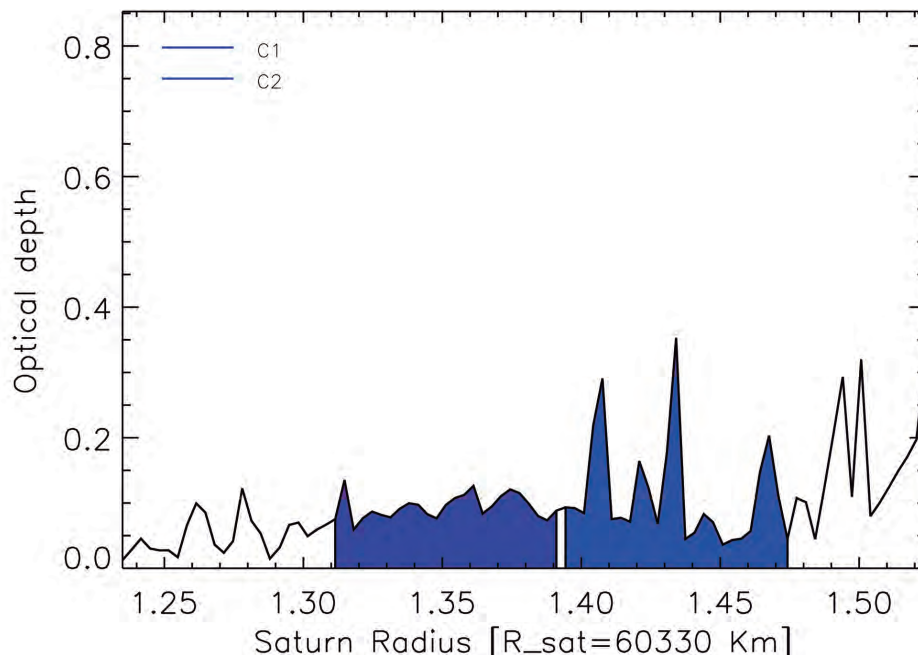


Figura 4.3: Regiones de estudio del Anillo C en profundidad óptica τ .

Presentan, además, una baja cantidad de material, ya que en promedio su profundidad es $\tau \sim 0.1$.

4.2. Anillo B

Al anillo B, debido a su extensión y grandes variaciones en la profundidad óptica, se le dividió en cinco regiones (véase Tabla 4.2). Para incluir la mayor parte del anillo, se buscó que el promedio de profundidad óptica, en cada región, cumpliera con condiciones, como no tener saltos abruptos y que, de acuerdo a trabajos previos (como el de Colwell et al. (2007)), fue posible caracterizar sus perturbaciones gravitacionales, en un estado de equilibrio dinámico local (se muestra la selección en la Figura 4.5). Estas regiones tienen una estructura con espesor grande y el ancho de las wakes que presentan son función de la distancia a Saturno como de la interacción del anillo y la atracción gravitacional de los satélites (más detalle en la Sección 7.1.1).

Tabla 4.2: Valores de las regiones del anillo B.

Región	B1	B2	B3	B4	B5
D mínimo [Km]	93000	96500	100500	105000	110500
D máximo [Km]	96000	100000	104500	110000	116500
τ	1.15	1.93	4.52	1.94	3.41

Para reproducir este anillo fue necesario asignarle mayor cantidad de material en las simulaciones. Esto implica un gran reto para el poder de cómputo requerido, en particular al

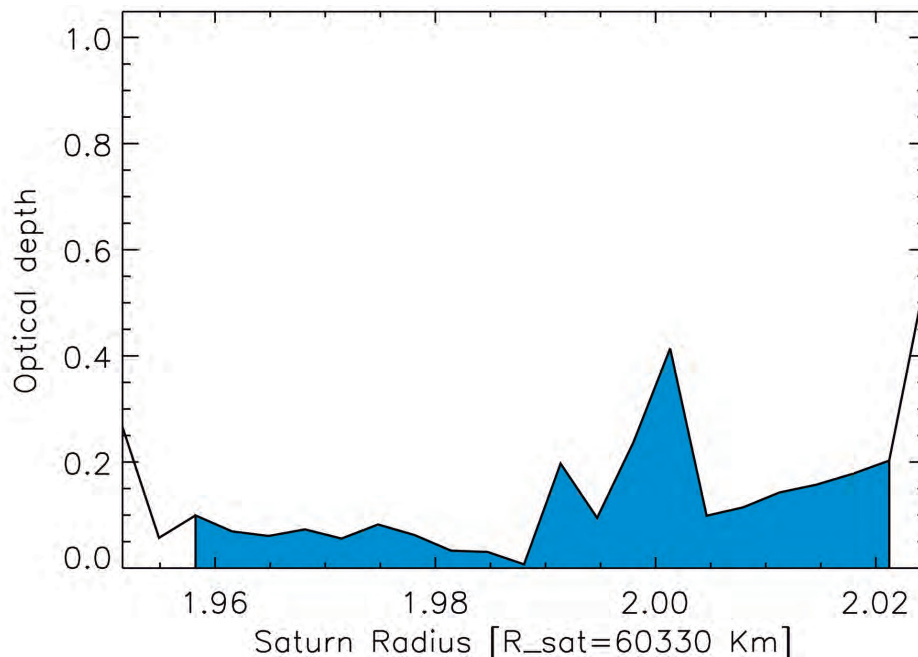


Figura 4.4: Región de estudio en la División de Cassini en profundidad óptica τ .

reproducir sus propiedades fotométricas.

4.3. Anillo A

El anillo A es el más dinámico. Se seleccionaron cinco regiones de este anillo cuyas dimensiones y profundidad óptica están enunciadas en la Tabla 4.3 (se muestran en la Figura 4.6). Aunque el anillo A tiene una profundidad óptica grande ($\tau \sim 1$), presenta grandes perturbaciones gravitacionales que dominan su estructura, por ejemplo, presenta muchas wakes y sus perfiles térmicos son muy peculiares.

Tabla 4.3: Valores de las regiones del anillo A.

Región	A1	A2	A3	A4	A5
D mínimo [km]	122500	125500	128000	131000	134000
D máximo [km]	125000	127500	130500	133000	136000
τ	1.09	0.69	0.59	0.60	0.63

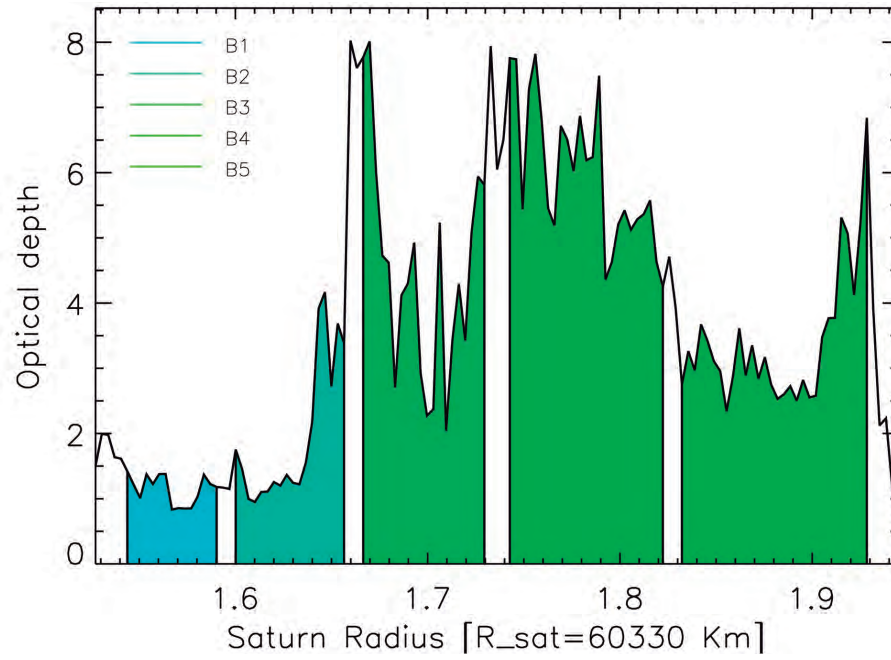


Figura 4.5: Regiones de estudio del anillo B.

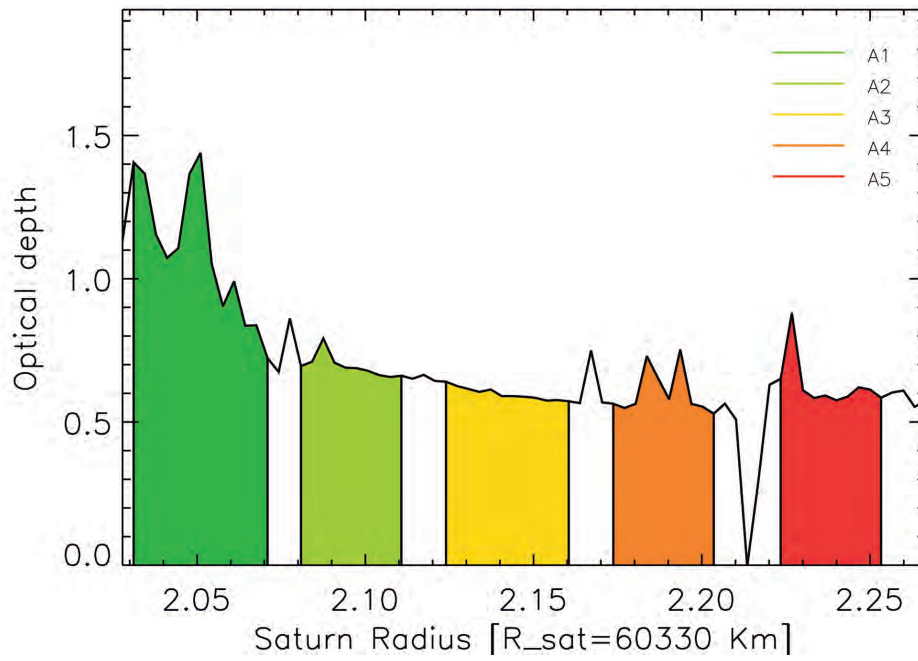


Figura 4.6: Regiones de estudio del anillo A.

Capítulo 5

Propiedades dinámicas de los anillos de Saturno

Anteriormente se ha buscado caracterizar la distribución general de las partículas que conforman a los anillos principales de Saturno en una escala de cientos de miles de metros. Los datos de las observaciones nos muestran sólo características generales en esas dimensiones, por ejemplo, la resolución actual de las observaciones no permite distinguir cuerpos de algunos metros, que es, probablemente, el orden de tamaño típico de las partículas.

5.1. Modelos previos (dinámicos)

Las simulaciones de n-cuerpos, como es el caso de Salo (1995), simulan a los anillos como una serie de conjuntos de partículas idénticas o con masas variables. Muestran que existe un equilibrio en el campo de velocidades que se establece rápidamente y que es independiente de las condiciones iniciales del conjunto. Para un caso más realista, el promedio final de velocidad de dispersión de las partículas depende del coeficiente de restitución en las colisiones. También muestran que las partículas de menor tamaño tienen una velocidad relativa y una extensión vertical mayor en comparación a las más grandes. A pesar de éso, las pequeñas masas no contienen la totalidad de energía en el sistema, de hecho, tienen entre 2% – 20% de los valores predichos para la simulación completa.

Las simulaciones de n-cuerpos (Salo and Karjalainen, 2003) generalmente asumen impactos instantáneos entre esferas rígidas cuyo momento lineal y angular se conserva. La naturaleza de la colisión se maneja reduciendo la velocidad relativa después de la colisión en función de su factor de restitución para el material seleccionado. En algunos casos, se consideran las partículas ligeramente no esféricas, así como la fricción entre superficies que en conjunto realizan un modelado más complejo. En la Figura 5.2 se muestran ejemplos de simulaciones obtenidos por Salo (1995) para diferentes condiciones iniciales.

Uno de los problemas más grandes para las simulaciones de n-cuerpos es determinar qué partículas del anillo chocan realmente. Hacer esto rápidamente es esencial para la velocidad del cálculo global que determina el número máximo de partículas, N , y que se pueden conside-

rar dentro de un arreglo. La velocidad de simulación depende principalmente de la búsqueda eficiente de los cuerpos en colisión. Un método es encontrar el siguiente impacto, actualizar los movimientos, y luego repetir. Un método más rápido es encontrar todas las colisiones en el siguiente tiempo de simulación. Actualmente, Salo and Karjalainen (2003) utilizan un polinomio de Taylor de segundo grado para identificar las colisiones, comprobando solamente aquellos pares que cumplen con una *condición umbral de colisión* que correspondería a las partículas que se encuentran en algún momento a una distancia de su radio más el radio de cualquier otra condición que define el inicio de una colisión.

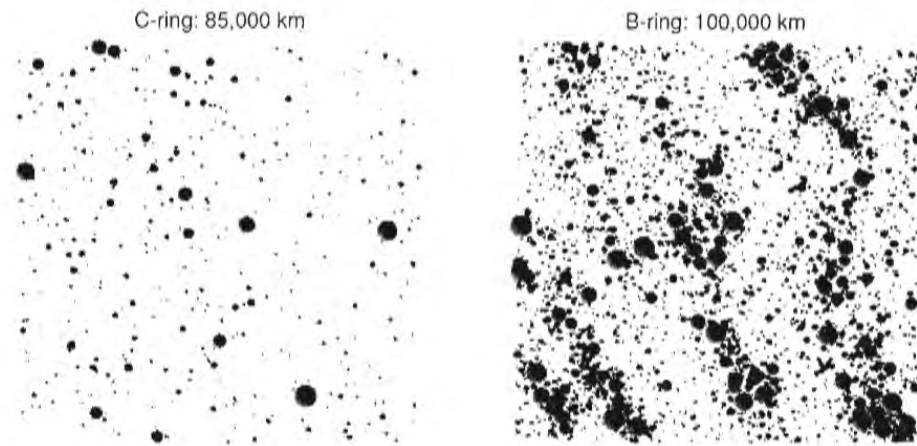


Figura 5.1: Simulación de los anillos C y B con método de n-cuerpos después de 10 rotaciones orbitales, considerando distribución de masas por ley de potencia $Q \sim 3$, con partículas entre $50\text{cm} < r < 5\text{m}$ y $\rho = 0.9\text{gcm}^{-3}$ (Salo, 1992). Izquierda anillo C a 85,000 km, derecha anillo B a 100,000 km

Los trabajos computacionales anteriores son referencia para el funcionamiento y selección de restricciones en nuestro trabajo para la creación de un modelo aleatorio. En la Figura 5.3 se muestra un ejemplo entre el trabajo realizado por Salo y el de esta tesis, que buscará conseguir resultados similares con distribuciones espaciales uniformes o normalizadas.

5.1.1. Wakes gravitacionales

Considerar autogravedad en las simulaciones tiene un efecto significativo, que demuestra la imposibilidad de ignorar la gravedad propia de las partículas individuales de los anillos, por ejemplo, las partes externas de los anillos principales de Saturno presentan irregularidades locales en su distribución de partículas y, por ende, también variaciones de brillo (p.e., en el anillo A y B), que pueden ser atribuidas a la agregación gravitacional de partículas en estructuras transitorias compactas en forma de barras denominadas *wakes*. Esta es una característica importante, ya que modifica, tanto la distribución física, como la manera en que las partículas reciben flujo energético y, por ende, se refleja en su temperatura de brillo.

Argumentos teóricos (Dougherty et al., 2009) sugieren que las wakes pueden ocurrir en los anillos A y B (ver la Figura 5.1). Los criterios que rigen a estas inestabilidades dependen

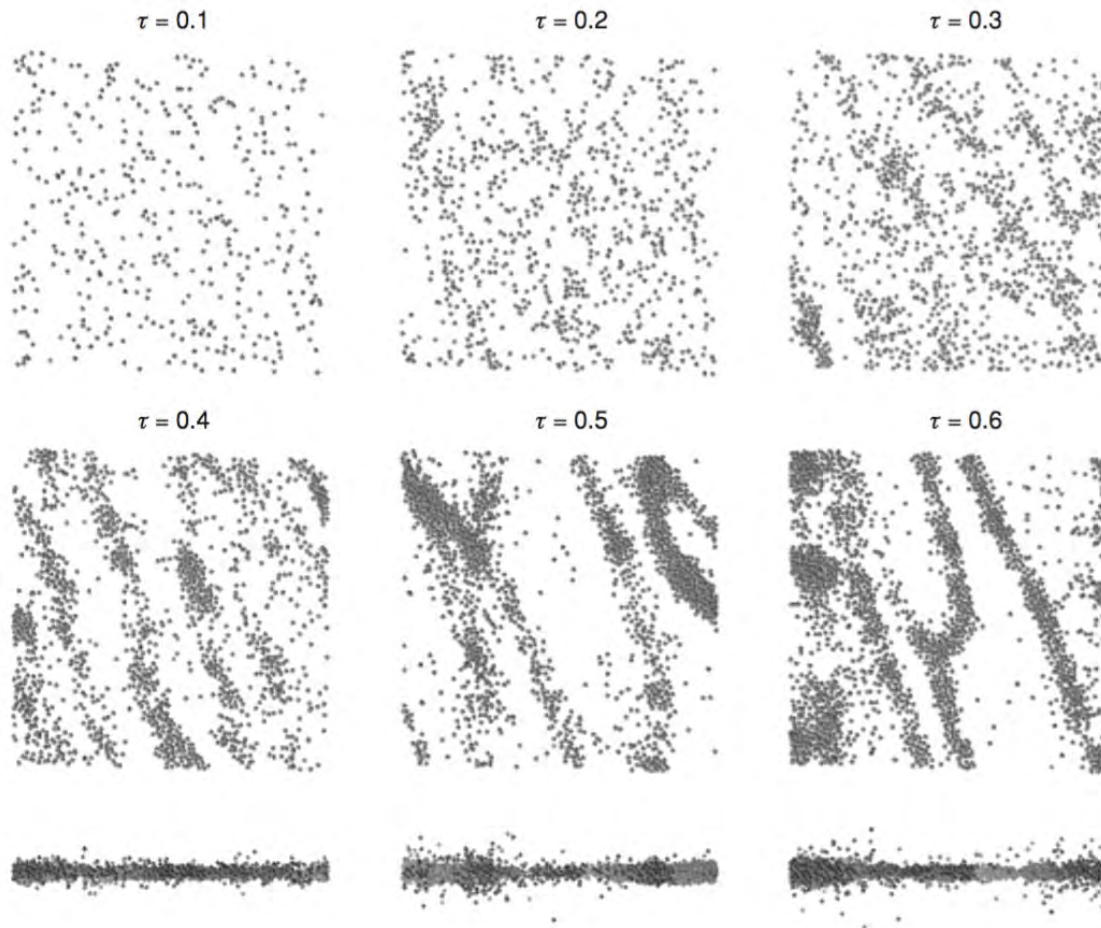


Figura 5.2: Mosaico para las posiciones de partículas (vistas en diferentes planos) al finalizar las simulaciones de n-cuerpos para diferentes valores de profundidad óptica τ , por lo que contiene diferente número de partículas, N (Salo, 1995). Conforme aumenta τ presenta mayor acumulación en barras, característica distintiva del anillo A.

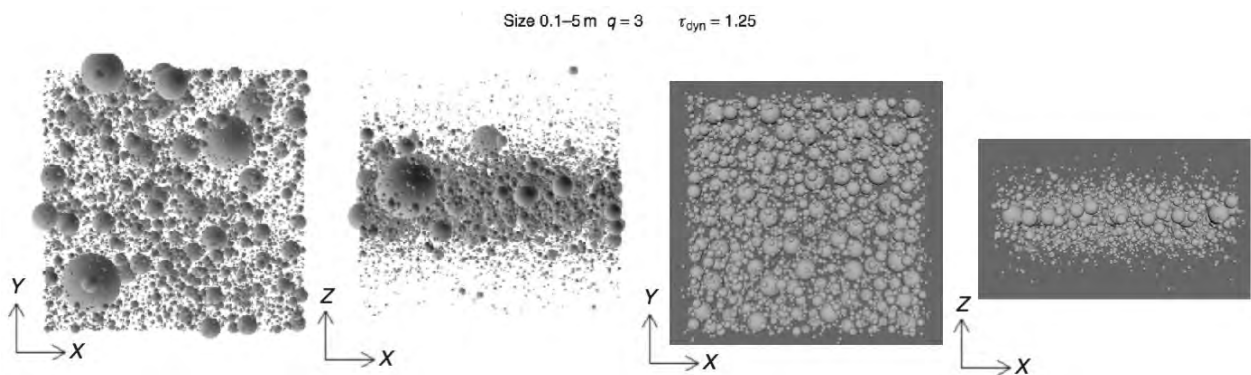


Figura 5.3: Comparación de planos para simulaciones. Izquierda (fondo blanco) simulaciones de n-cuerpos (dimensiones $x,y=100m$ $z=40m$) (Salo, 1995), Derecha (fondo gris) simulaciones aleatorias de este trabajo (dimensiones: $x=200m$, $y=200m$ y $z=60m$).

de la velocidad de dispersión en las partículas, la velocidad orbital y la densidad de masa.

Estos últimos se derivan de la dinámica gravitacional de un cuerpo anular fino de partículas similares. En el anillo C no se encuentran estas inestabilidades (ver la Figura 5.1), por lo que se puede idealizar como si se tratara de un anillo delgado y monocapa de una sola partícula de grosor (Salo, 1995).

De acuerdo con las Leyes de Kepler, las partículas de un anillo, también rotan más despacio cuando están más lejos del cuerpo central y más masivo. En algunas circunstancias, este movimiento relativo puede estabilizar el anillo y, al mismo tiempo, las partículas tienden a separarse más rápido de lo que se acumulan por su atracción gravitacional mutua. El sistema de anillos es estable si la densidad es suficientemente baja o la velocidad de rotación es suficientemente alta. Por ejemplo, en las simulaciones más recientes de Salo and Karjalainen (2003) (como se muestra en la Figura 5.2), las wakes tienen una duración de unos cuantos períodos (en el anillo A de Saturno, esto equivale a un día o dos) antes de disiparse. Sin embargo, las wakes se forman y desaparecen continuamente.

Algunos modelos donde las colisiones son más elásticas conducen a una mayor velocidad relativa de partículas en el anillo y suprimen la formación de barras. La influencia de una luna cercana también puede perturbar el anillo, dando lugar a mayores velocidades de partículas (esto también desestabiliza y dispersa las barras). Es probable que estas características expliquen el hecho de que el anillo A de Saturno es ligeramente más brillante en algunos cuadrantes.

Las wakes se ven en todas las regiones del anillo B que no sean opacas, esto explica la variación observada en la profundidad óptica del anillo B ya que la cantidad de espacio relativamente vacío permite el paso de la luz. Las separaciones entre wakes son más estrechas en regiones donde la profundidad óptica es alta y tienen una extensión mayor a las encontradas en regiones de τ menor. La profundidad óptica normal de las perturbaciones gravitacionales entre las barras es típicamente inferior a $\tau < 0.5$ y no muestra correlación con la posición o profundidad óptica global en el anillo.

Las primeras observaciones de este fenómeno fueron realizadas con la sonda Voyager, a través de experimentos de ocultación estelar en las que se medían las variaciones de alguna estrella al ser atenuada por las diferentes secciones de los anillos. Estas revelaron grandes diferencias en densidad superficial con escalas características de hasta 150m (Salo, 1995).

Por ejemplo, en la Figura 5.1 se muestra una simulación que explica este fenómeno. Argumentos teóricos sugieren que existen inestabilidades locales en los anillos A y B, que dependen de la velocidad de dispersión de las partículas que los componen, de sus velocidades orbitales y la densidad de masa del anillo.

Para las características morfológicas en la creación de arreglos simulados, el trabajo previo desarrollado por Colwell et al. (2006) y Colwell et al. (2007) en el cual analiza ocultaciones estelares en los anillos de Saturno observadas con el dispositivo UVIS, encontró grandes variaciones en la profundidad óptica aparente para diferentes ángulos de visión en el anillo B y A. Colwell et al. (2007) normaliza la profundidad óptica para todo ángulo de visión del plano,

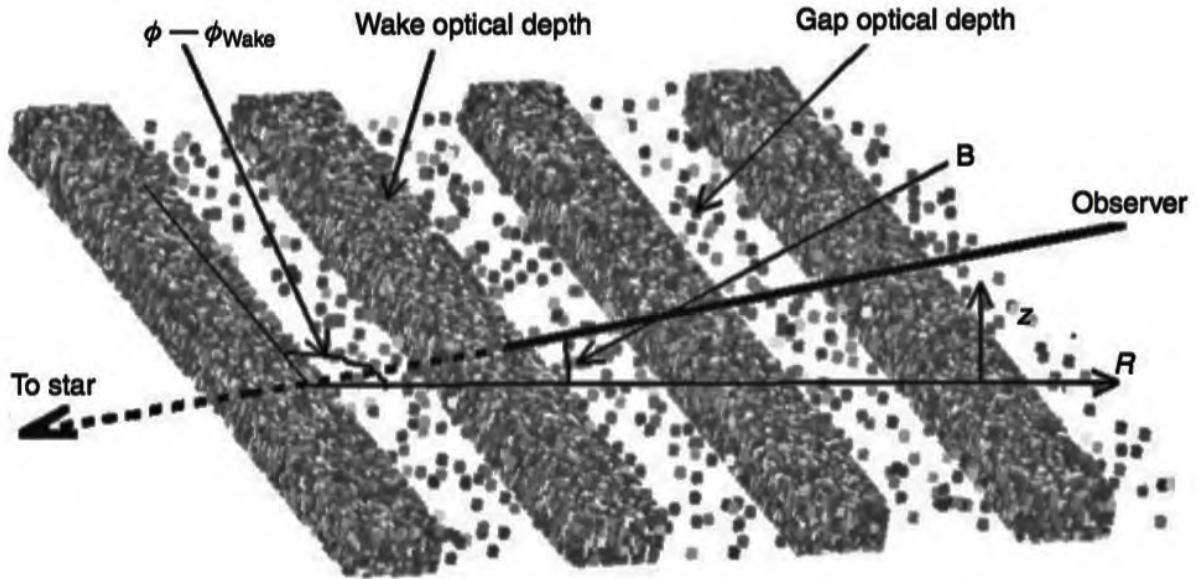


Figura 5.4: Modelo geométrico de wakes autogravitantes en los anillos de Saturno de acuerdo a Colwell et al. (2006), la figura especifica los parámetros que afectan la medición de opacidad. Con B ángulo de observación (o elevación de la nave) y $\phi - \phi_{wake}$ ángulo de observación con respecto a la alineación de las barras, medido sobre el plano del anillo.

por lo que se tiene una profundidad óptica independiente de su trayectoria y de la geometría de observación. Esto sugiere que los anillos están compuesto de *grumos* virtualmente opacos separados por huecos casi transparentes con dependencia en la profundidad óptica observada.

Con base en los datos observacionales y, buscando simplificar su descripción, Colwell et al. (2006) proponen que las wakes se pueden considerar como una serie de barras compactas compuestas de una multitud de partículas, un modelo que algunos bautizaron como *barras de granola* (Figura 5.4). Este modelo supone una geometría específica y define varios de sus parámetros en función de su geometría y orientación con respecto al plano de los anillos. Se definen, así a las wakes en términos de parámetros específicos como la profundidad óptica observada dentro de las mismas τ_{wake} , su orientación medida desde la dirección local radial ϕ , la relación entre la extensión vertical de la wake o altura, H , y la extensión horizontal o ancho, W (H/W) de la barra no perturbada gravitacionalmente y por último el ancho de la separación y su grosor vertical S/W . Lo anterior define la transparencia de la wake como:

$$T_{transp} = \exp(-\tau_{\eta}/\mu) = \frac{[S/W - H/W |\sin(\phi - \phi_{wake})| \cot(B)]}{S/W + 1} \exp(-\tau_{wake}/\mu) \quad (5.1)$$

Esta ecuación será nuestra referencia para definir la geometría básica de las regiones del anillo A y B (ver Capítulo 7).

5.2. Propiedades en equilibrio dinámico local

Es pertinente resaltar que esta tesis no tiene como objetivo una aproximación dinámica, sino obtener o generar estructuras o arreglos de partículas que simulen una región específica de los anillos en un instante tal que puedan considerarse como el estado promedio de la misma, aunque basadas en los resultados de las simulaciones dinámicas de n-cuerpos.

La evolución dinámica para los componentes anulares principales de Saturno es gobernada por frecuentes impactos entre partículas de hielo sucio del que están compuestos. El estado de equilibrio dinámico local se logra con el balance de energías, con disipación en colisiones y el calentamiento viscoso del medio, afectando el campo de velocidades del sistema Salo (1995) Daisaka et al. (2001).

Las propiedades finales para las partículas se ven reflejadas en el estado a equilibrio dinámico local del anillo, que provoca diferencias cualitativas en las propiedades del sistema. Si se tienen anillos dinámicamente activos con una profundidad óptica alta, se presentará una reducción en la velocidad de dispersión vertical para sus componentes que resultará el estado de equilibrio dinámico local del que hablamos, básicamente porque la pérdida de energía en un medio viscoso lo vuelve menos activo al reducirse el camino libre medio entre partículas y aumentando la probabilidad de colisiones.

En los casos donde la profundidad óptica es mayor, los sistemas no gravitacionales con viscosidad presentan propiedades dominadas por los efectos de las partículas mayores y son prácticamente independientes de un modelo elástico. En realidad los sistemas en equilibrio dinámico parecen presentar una distribución espacial de partículas característica, cuya velocidad de dispersión para cuerpos pequeños excede, en gran medida, a las velocidades de los cuerpos de mayor tamaño, implicando un grosor vertical mayor, por lo que se puede esperar que las partículas más pequeñas se alejen del plano central y las más masivas se concentren en el plano del anillo.

Este concepto es de gran importancia al generar mallas sintéticas que buscan cumplir con las características reales, como se menciona en la Sección 7.3. Las condiciones extremas posibles nos son de importancia ya que sientan los rangos en cada región de estudio como lo revisaremos a continuación.

5.3. Grosor aproximado

Las propiedades cuasiestáticas locales en el plano del anillo planetario son resultado de un balance de energía por calentamiento viscoso y la disipación en colisiones que suceden de manera aleatoria, también consideran las propiedades de transformación en la composición de las mismas partículas del anillo, todo junto modifica la dinámica local dependiendo de la masa y distancia al centro del planeta.

A bajas profundidades ópticas, los efectos colectivos de autogravedad pueden ser omitidos,

dominando los encuentros simples entre dos partículas ligadas, pero para mayores profundidades ópticas este efecto se vuelve relevante e inclusive comparable a la fuerza central, causando una disminución en el grosor del anillo (Cuzzi et al., 1979).

Dependiendo de la distancia al planeta, es posible que un anillo sea susceptible a inestabilidades gravitacionales y manifieste perturbaciones como las wakes. Si las fuerzas de marea se vuelven menores, será posible la agregación de partículas lo que facilita la acreción de lunetas o masas más grandes (Dougherty et al., 2009).

5.3.1. Radio de Hill

El radio de Hill es un parámetro que caracteriza la autogravedad relativa contra la fuerza disruptiva de las mareas, como la que presentan mutuamente dos partículas y sus radios de Hill que expresan la distancia cuando las partículas dejan de sentir atracción mutua (Daisaka et al., 2001), se expresa en función de la masa, tamaño y densidad de las partículas como también las características del planeta al que orbitan, se expresa de la siguiente forma:

$$r_h = \frac{R_{hill}}{R_1 + R_2} = \left(\frac{\rho_0}{3\rho_{sat}}\right)^{1/3} \left(\frac{a}{r_{sat}}\right) \frac{(1 + \mu)^{1/3}}{1 + \mu^{1/3}} \quad (5.2)$$

Donde a es el semieje mayor o distancia promedio a Saturno, R_{hill} el radio de Hill de las partículas respecto al planeta ($R_{hill} = a((m_1 + m_2)/3M_{sat})^{1/3}$) y $\mu = m_1/m_2$ con $m = (4\pi\rho_0/3)R^3$ es la masa de cualquier partícula de radio R , con densidad ρ_0 , donde para Saturno se tiene su masa M_{sat} , radio R_{sat} y su densidad ρ_{sat} . Usando este parámetro r_h para partículas idénticas $R_i \equiv R_0, m_i \equiv m_0$ de la forma:

$$r_h = 0.82 \left(\frac{M_{sat}}{5.69 * 10_{26}kg}\right)^{-1/3} \left(\frac{\rho_0}{900kgm^{-3}}\right)^{1/3} \left(\frac{a}{100,000km}\right) \quad (5.3)$$

Para los anillos principales de Saturno se obtienen un radio de Hill entre partículas $r_h = 0.6 - 1.1$ para la parte inicial del anillo C a la parte exterior del A respectivamente (Salo, 1995). Estos datos de r_h para cada región simulada son necesarios para evaluar su extensión vertical máxima.

5.3.2. Autogravedad vertical

En sistemas densos con profundidad óptica alta los efectos colectivos de la autogravedad se hacen notar significativamente, ya que la fuerza vertical autogravitacional F_z puede exceder en magnitud central $F_c = \Omega^2 z$ (con Ω la velocidad angular). Por simplicidad se considera una capa homogénea de partículas similares con un grosor H y densidad ρ , la ecuación de Poisson aplicada a autogravedad vertical da:

$$F_z(z) = -4\pi G \int_0^{|z|} \rho(z)' dz' = -\frac{4\pi G \sigma z}{H} \quad (5.4)$$

Con G la constante de gravitación universal y σ la sección transversal de la partícula. Al relacionar las fuerzas de autogravedad con las centrales se tiene:

$$\frac{F_z}{F_c} = \frac{4\pi G\sigma}{H\Omega^2} = 48\tau r_h^3 \frac{R_0}{H} \quad (5.5)$$

Asumiendo una distribución Gaussiana para las masas, la autogravedad vertical cerca del plano ecuatorial es un factor de $\sqrt{6/\pi}$ mayor si F_z/F_c esta parametrizado en términos del grosor H definido antes. De manera análoga se puede definir el grosor $H_{fz} = H$ del sistema en el que las fuerzas centrales y de auto-gravitación se aproximan $F_z \sim F_c$:

$$\frac{H_{fz}}{R_0} = 65\tau r_h^3 \quad (5.6)$$

Para valores típicos de los anillos B de Saturno $r_h \sim 0.8$, $\tau \sim 1.5$, la autogravedad excede a la componente central, a menos que la relación $H/R_0 > 50$. Se tienen otras simulaciones como la de Wisdom and Tremaine (1988) y de Salo (1995) (Salo and Karjalainen, 2003) donde la extrema fuerza vertical reduce el ancho H debido a disipación por la viscosidad del sistema (Dougherty et al., 2009). Por lo que es necesario para el desarrollo del trabajo restringir una cota máxima en el grosor vertical al generar simulaciones.

5.3.3. Extensión vertical máxima

La evolución dinámica de los principales anillos de Saturno está controlada por los impactos frecuentes entre las partículas microscópicas de hielo sucio, hasta llegar a un estado de equilibrio dinámico. Algunos experimentos de laboratorio indican que las colisiones inelásticas presentes tienen un coeficiente de restitución muy bajo como $\epsilon < 0.5$, por lo que, simulaciones puramente colisionales, predicen una pequeña velocidad de dispersión en el estado de equilibrio, por lo que el espesor del anillo debe ser de unas pocas veces el tamaño de la partícula más grande del sistema (Salo, 1995).

Trabajos previos como el de Salo (1995), que generan simulaciones de n-cuerpos, nos sirven de referencia para restringir el grosor máximo de cualquier región, en función de las partículas con mayor tamaño. Su código limita el grosor vertical efectivo a $H = \sqrt{12\langle r^2 \rangle}$ veces el radio promedio de las partículas en esa región. Considerando el radio máximo de las partículas, decidimos acotar $H_{max} \approx 12 \times r_{max}$. Será esta la cota máxima posible para todas las partículas, pero debido a que la elevación tendrá una distribución normal, es imposible que las partículas de mayor tamaño se encuentren verticalmente lejos al plano del anillo.

Este método funciona correctamente para secciones con profundidad óptica mayor ($\tau > 1$). Al mismo tiempo, se evalúa para toda región, la autogravedad vertical como se revisa en la Sección 5.3.2, que al tener baja profundidad óptica $\tau < 1$, no tiene un extensión vertical mayor al grosor máximo, por lo que se usa ese como límite H_{max} (Salo and Karjalainen, 2003).

5.4. Interacciones gravitacionales de los anillos y satélites de Saturno

Saturno tiene más satélites que cualquier otro planeta del Sistema Solar. Muchos de estos satélites interactúan gravitacionalmente con el sistema de anillos de Saturno. En la Figura 5.5, se muestra la disposición radial, con respecto a los anillos, de los satélites Mimas, Encelado, Tetis, Dione, Rea, Titán, Hiperión y Japetus. Algunos satélites descubiertos por la misión Cassini son: Pan, Atlas, Prometeo, Pandora, Jano, Epimeteo, Telesto, Calipso y Elena. Los últimos tres se encuentran en sincronía orbital con Tetis y Dione, por lo que sus efectos gravitacionales se equilibran. Pero, por ejemplo, Hiperión es muy pequeño y distante como para producir efectos sobre los anillos de Saturno (Miner et al., 2005).

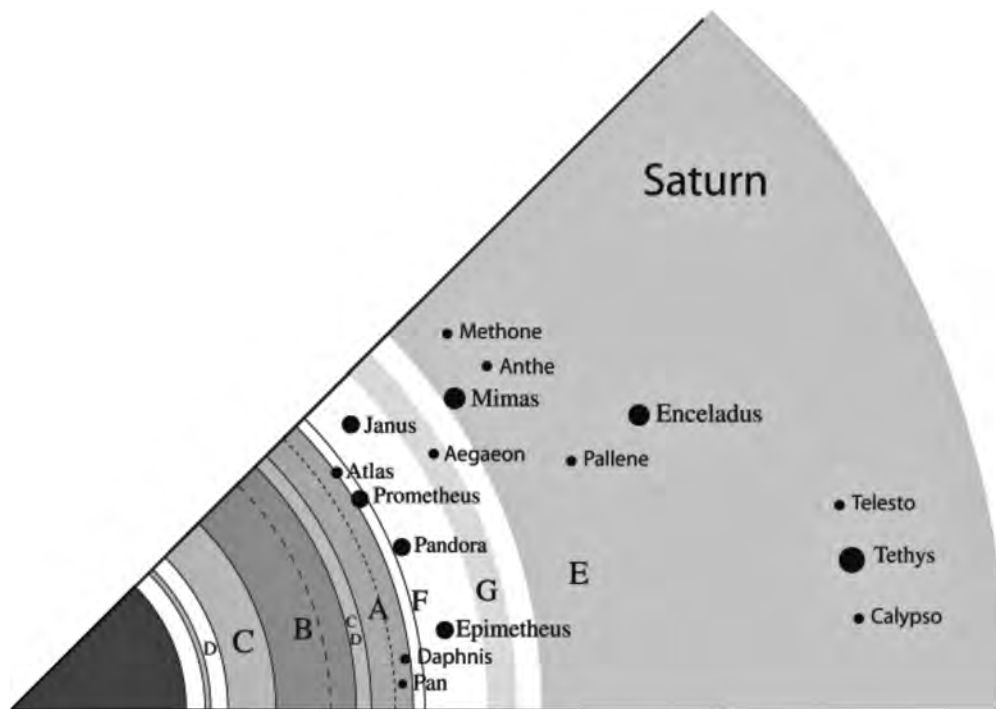


Figura 5.5: Comparación del sistema de satélites y anillos de Saturno. En escala al radio del planeta. La densidad de los anillos se representa con la intensidad de sombreado relativa a la profundidad óptica. Órbitas sincrónicas se indican por la línea de rallas, el límite de Roche para el agua 1gcm^{-3} por una línea de rallas pequeñas (Esposito, 2014).

Principalmente son trece, los satélites que tienen una influencia en la estructura de los anillos de Saturno (A y B). Con algunas excepciones en el cambio de sus órbitas, los satélites tienen periodos estables, igual que las partículas de los anillos. Los efectos de los satélites en los anillos dependen de la distancia, del satélite, al centro del planeta. Cuando el periodo orbital de los anillos es una fracción simple de la del satélite (p.e., $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{2}{4}$, $\frac{3}{4}$, etc), las partículas del anillo son repetidamente atraídas hacia el satélite. A esto se le llama resonancia gravitacional. Con el tiempo, estos efectos, alteran las órbitas de los anillos. Principalmente, las vuelve más elípticas, lo cual genera más colisiones. En segundo lugar, se da un subsecuente

vacío en determinadas órbitas.

Algunos efectos de las colisiones, como el que las partículas se junten, generando cúmulos más grandes y poco acretados o pilas de escombros que, sucesivamente, al colisionar se rompen en componentes más pequeños. Si, además, se consideran las colisiones como elásticas, tanto las direcciones como sus velocidades se ven alteradas. A estos efectos combinados se les puede agrupar en función de la viscosidad, ya que el sistema se comportará como un líquido viscoso. Esto es muy útil, ya que es imposible seguir a cada partícula de manera precisa, pero sí pueden estudiarse los cambios de apariencia resultantes en los anillos.

Al aplicar conocimientos de este fenómeno a nuestro modelo computacional nos encontramos con la capacidad de acercarnos más a relaciones de distribución para partículas que cumplan con lo observado en distintas regiones de los anillos principales de Saturno como se verá en el Capítulo 7.

Capítulo 6

Balance de energía de los anillos

Uno de los objetivos de este trabajo es desarrollar mallas sintéticas que puedan generarse de forma menos demandante y exhaustiva, adicionalmente se implementan métodos fotométricos que permiten obtener la temperatura de brillo que los modelos dinámicos aún no implementan.

Para cada región simulada de los anillos se obtienen imágenes en una geometría específica usando la técnica de Ray-Tracing, que permite obtener capturas del arreglo, los llamaremos en adelante *renders*. Los renders nos permiten definir la porción iluminada efectiva de las partículas como función del ángulo de elevación solar. La relación entre la porción iluminada total de las partículas y el ángulo de elevación solar define la llamada *función de sombra* C , que es la base para estimar la temperatura de brillo de los anillos en el espectro visible. Tenemos un ejemplo del proceso para la captura de imágenes para una malla sintética en la Figura 6.1.

El método usado en esta tesis para la estimación de temperaturas en los anillos principales consta de tres partes:

- Un modelo térmico de balance de energías (descrito en este capítulo).
- Un modelo que establece las condiciones básicas de la estructura (descrito en la Sección 7.3).
- Un modelo fotométrico basado en el método de Ray-Tracing (descrito en la Sección 6.2).

6.1. Modelo de flujo energético

Las fuentes de energía más importantes para los anillos principales y con las que se modula su energía son la radiación solar directa F_{sol} y la radiación térmica de Saturno F_{th} . También se toma en cuenta la energía solar reflejada por la atmósfera de Saturno F_{refs} , así como la aportación de energía reflejada F_{refp} por las partículas cercanas (Flandes et al., 2010).

Las funciones explícitas para cada flujo energético son:

$$F_{sol} = (1 - A_v)C \frac{S_{\odot}}{r_{sat}^2} \quad (6.1)$$

$$F_{th} = \sigma T_S^4 \frac{\Omega}{\pi} \quad (6.2)$$

$$F_{refs} = A_s(1 - A_v) \frac{S_{\odot}}{r^2} \frac{\Omega}{2\pi} L \quad (6.3)$$

$$F_{refp} = A_v(1 - A_v)C \frac{S_{\odot}}{r^2} \frac{\Omega_p}{4\pi} \quad (6.4)$$

Donde el balance de energías es:

$$\sum_i F_i = f\epsilon\sigma T_p^4 \left(1 - \frac{\Omega_p}{4\pi}\right) \quad (6.5)$$

En la Ecuación 6.5 se incluye la transferencia térmica entre partículas, con el flujo energético S_{\odot} recibido del Sol (a 1 UA = 1370 Wm^2) ajustado a la distancia de Saturno al Sol. Los albedos son: para Saturno $A_s \approx 0.34$ (Atreya, 1986), para el material en los anillos A_v , la temperatura de Saturno $T_S \sim 95K$ y la que se espera descubrir para las partículas T_p . Donde r es la distancia promedio entre Saturno y el Sol, σ la constante de Stefan-Boltzmann, la emisividad térmica $\epsilon \sim 1$.

El flujo de energía que recibe cada partícula está modulada por los posibles eclipsamientos mutuos entre las partículas vecinas debidos, principalmente a la cercanía y disposición de las partículas en una región dada y, por lo tanto, de la profundidad óptica. De acuerdo a lo anterior, se define la fracción iluminada de una partícula o de un conjunto de partículas en función del ángulo de elevación solar con la llamada función sombra C . Se consideran para la aportación térmica F_{th} , Ω , como el ángulo sólido de la sección iluminada de Saturno visto por las partículas de los anillos. Ω_p representa el ángulo sólido de las ocho partículas más cercanas como $\Omega_p = 6[1 - \exp(-\tau)]$ (Ferrari et al., 2005). f es la tasa de rotación para las partículas que puede ser $f = 4$ si rotan rápidamente y para este trabajo se usó $f = 2$ como partículas de lenta rotación, o que sólo radian en un solo hemisferio.

Los arreglos de partículas que se consideran cumplen con las siguientes suposiciones básicas:

1. En todos los casos, las partículas que componen a los anillos principales son representadas como esféricas, ya que para un gran conjunto de partículas sus diferencias tienden a ser estadísticamente uniformes.
2. Las superficies de las partículas son lambertianas (las cuales permiten el reflejo de luz difusa o en todas direcciones). Se considera que las partículas reales, debido a sus superficies rugosas también dispersan la luz de forma difusa.
3. Se considera que las partículas de los anillos rotan lentamente (lo cual se denota con $f = 2$ en la Ecuación 6.5), por lo que la sección iluminada en las imágenes del modelado computacional en 3D, de cada partícula será la única en reflejar la luz de las diversas fuentes.

La llamada hora local o ángulo azimutal medido sobre los anillos ($12h$ apunta hacia el Sol o mediodía y $0h$, al lado opuesto) tiene un pequeño aporte y está incluido en $L = 0.5[1 + \cos(\psi + \pi)]$ con ψ importante para estimar la dependencia de la energía reflejada por la atmósfera de Saturno que las partículas reciben. Para este trabajo L tiene poca variación y se calcula ~ 1 debido a la geometría seleccionada por lo que este término de ajuste no es necesario y presenta muy poca aportación al método.

Si queremos determinar la temperatura de una partícula o un conjunto de partículas de los anillos, despejamos la Ecuación 6.5 como $T_p^4 = \sum_i F_i / c_0$, con $c_0 = f\epsilon\sigma(1 - \frac{\Omega_p}{4\pi})$. Si escribimos el término explícito de $\sum_i F_i$ usando las ecuaciones 6.1-6.4 y agrupando las constantes obtenemos términos simplificados: $c_1 = S_\odot c_0^{-1}$, $c_2 = \Omega_P / 4\pi$, $c_3 = As\Omega / (2\pi)LS_\odot c_0^{-1}$, $c_4 = \sigma T_S^4 (\Omega / \pi) c_0^{-1}$, la temperatura se puede reescribir como:

$$T = \sqrt[4]{(1 - Av)[c_1 C(1 + c_2 Av) + c_3] \frac{1}{r^2} + c_4} \quad (6.6)$$

La Ecuación 6.6 será usada para obtener las temperaturas de las regiones generadas, que dependerá de la estimación previa de la función de sombra C .

6.2. Función de sombra - C

La función de sombra, $C = C(B', \tau)$, es una función que describe cómo varían las zonas iluminadas y no iluminadas (o ensombrecidas) en una partícula o en conjuntos de partículas, por ejemplo, como función de la elevación solar. La función C depende estrechamente de la profundidad óptica.

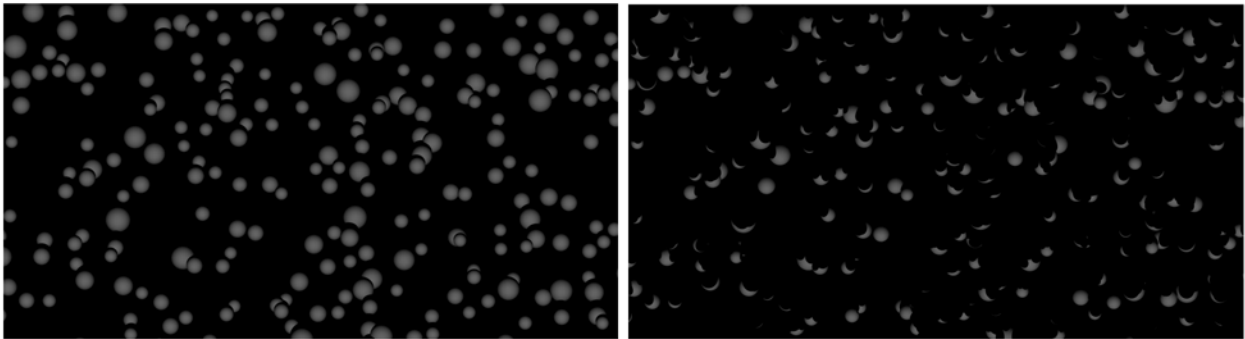


Figura 6.1: Esquemización de diferentes geometrías de iluminación para una región del anillo C. Derecha elevación solar $B' = 18^\circ$, izquierda elevación solar $B' = -2^\circ$ (fuente luminosa).

Es posible obtener estas funciones de sombra, C , directamente en nuestros arreglos sintéticos. para tal propósito, se define una fuente de luz en una posición dada y se obtiene unas imágenes del arreglo. En estas imágenes se evalúan los valores de los pixeles. El valor de cada pixel de una imagen en una geometría específica se traduce como el grado de iluminación de

puntos específicos sobre la superficie o varias partículas dadas. Se detalla este método en el siguiente capítulo (ver Capítulo 7).

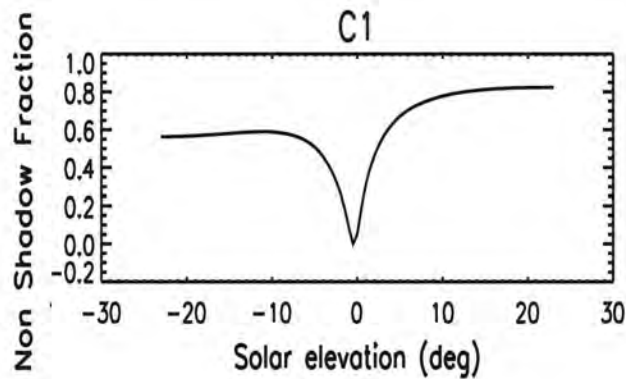


Figura 6.2: Curva de C contra elevación solar (fuente de luz) para la región C1 del anillo principal C. Donde a valores cercanos a 1 las partículas reciben el máximo de iluminación y valores cercanos a 0 son ensombrecidas por las partículas que les anteceden.

Ya que no existen imágenes con resolución angular suficiente para realizar estudios discretos y más detallados de la estructura de los anillos principales, por lo que esta aproximación simulada tiene como base trabajos previos (Ferrari et al., 2005) (Flandes et al., 2010), que fueron realizados de manera analítica con la finalidad de determinar los perfiles térmicos y comparados con algunas observaciones.

Las mediciones de iluminación están en función de la intensidad luminosa de cada pixel en las imágenes y nos permiten comparar entre conjuntos de renders y diferentes geometrías de iluminación en las simulaciones. La imagen con más pixeles iluminados sirve de referencia para evaluar un máximo correspondiente a la presencia de partículas. Es necesario definir un valor mínimo en intensidad de pixel para cada conjunto de renders, este será la referencia máxima y mínima para realizar un ajuste entre presencia de material y ausencia. Una vez realizada esa distinción se puede normalizar la curva C .

Es importante notar que en observaciones por Cassini, las temperaturas de brillo obtenidas dependen en gran medida de la forma que se observan los anillos, contemplado en el desarrollo del código computacional con resultados parecidos a la realidad.

Capítulo 7

Modelo computacional

En este capítulo se describe el método desarrollado con la finalidad de generar nuestras regiones de estudio sintéticas. Las regiones se pueden ver como cajas de partículas esféricas con superficies lambertianas cuyos tamaños siguen una ley de potencias según la región de la que trate. Las partículas llenan las cajas siguiendo dos condiciones básicas, la primera es que deben cumplir la profundidad óptica dinámica específica y la segunda es que debe concentrarse la mayor masa en, o cerca, del plano central. Para comprender la metodología computacional aplicada ver la Figura 7.1.

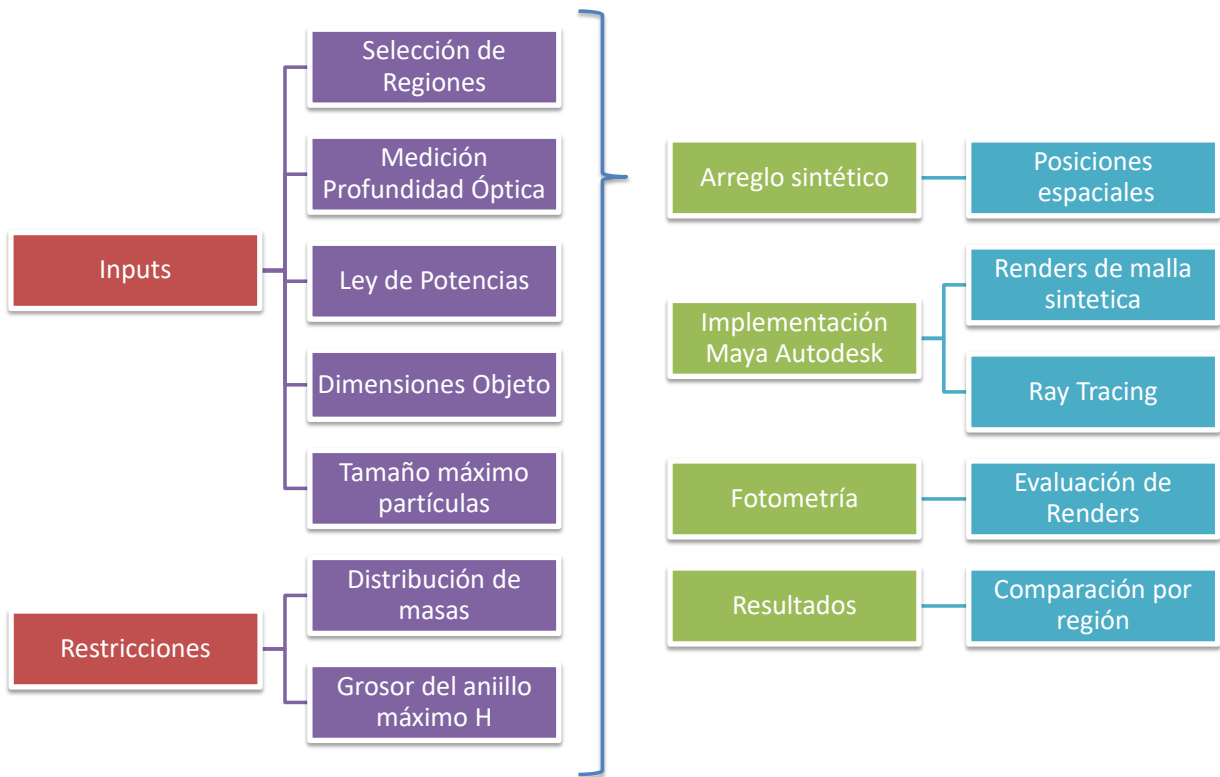


Figura 7.1: Diagrama de flujo para la metodología.

7.1. Variables de entrada

Los parámetros de entrada en este trabajo son los siguientes:

- τ - Profundidad óptica dinámica.
- Q - Exponente Q ley de potencia (distribución de masa).
- R_{max} - Radio máximo de las partículas.
- D_{Sat} - Distancia radial al centro de Saturno.

Algunos se pueden obtener directamente de los datos de Cassini y otros se inferen de los mismos.

Los parámetros anteriores permiten en el código seleccionar propiedades base en las mallas simuladas, que buscan definir las características que restringen el objeto simulado aleatoriamente con las variables secundarias como:

- Lx, Ly - Dimensiones sobre el plano del anillo (ejes X,Y).
- H_{max} - Grosor máximo del anillo (eje Z).
- M_T - Masa total a distribuir dentro de la malla.
- B_{max} - Ángulo máximo de la nave.
- B'_{max} - Ángulo máximo del Sol (-23° ó $+23^\circ$).
- $Difpart$ - Diferencia en tamaño entre partículas máximas y mínimas.

Otro parámetro importante es el ángulo sólido de Saturno Ω visible por las partículas, este cambia a diferentes distancias de Saturno, es posible que para las partículas más lejanas se vea el disco completo pero con un tamaño angular muy pequeño, por lo que es necesario realizar el cálculo para cada región ya que de éste dependerá el flujo energético infrarrojo F_{th} y en el visible F_{refp} proveniente de Saturno, como se muestra en las ecuaciones, 6.2, 6.3. Se evalúa a partir de la deducción del ángulo sólido visto a un punto externo de una superficie curva Rajpoot (2014):

$$\Omega = 2\pi\left(1 - \frac{\sqrt{D_{sat}^2 - R_{sat}^2}}{D_{sat}}\right) \quad (7.1)$$

Con R_{sat} el radio de Saturno y D_{sat} como distancia de la región al centro de Saturno, la Ecuación 7.1 es evaluada para la distancia promedio de cada selección, por lo que es una variable. Por ejemplo al ser monocapa el anillo C podrá ver el disco completo con ángulo sólido evaluado a su distancia D_{sat} al considerar también el poco grosor vertical del anillo, por lo que la partícula aproximadamente recibirá el flujo energético completo, en el caso de

Tabla 7.1: Parámetros de las wakes en los anillos A y B de Saturno.

Regiones del Anillo B					
Región	B1	B2	B3	B4	B5
τ_{wake}	0.28	0.24	0.19	0.32	0.35
Inclinación ϕ	67.5	68.5	72.5	75.5	77
Relación H/W	0.12	0.09	0.06	0.02	0.025
Relación S/W	0.957	0.573	0.173	0.213	0.12

Regiones del Anillo A					
Región	A1	A2	A3	A4	A5
τ_{wake}	0.143	0.12	0.117	0.157	0.205
Inclinación ϕ	67.5	68.5	72.5	75.5	77
Relación H/W	0.11	0.193	0.218	0.253	0.263
Relación S/W	0.763	1.39	1.65	2.053	2.415

la ecuación del flujo térmico F_{th} será completa.

Para los anillos A y B, cada partícula recibirá la emisión energética reducida ya que en el caso menos saturado de partículas como es el anillo A, sólo se observará la mitad iluminada de Saturno $\sim \Omega/2$. Para el anillo B se puede hacer una aproximación mucho menor de $\sim \Omega/4$ ya que las partículas de mayor elevación vertical obstruirán el paso de radiación electromagnética.

7.1.1. Parámetros de wakes

Con la Ecuación 5.1, se definen los parámetros básicos para las simulaciones de los anillos A y B en esta tesis y que se son enlistados en la Tabla 7.1.

Estos parámetros sirven para configurar las regiones simuladas por el código computacional, permiten definir las dimensiones y sus perturbaciones gravitacionales de manera que coincidan con los anillos reales. Deben ser independientes de las diferentes geometrías de observación (posición de la nave).

7.2. Distribución de masas

Al considerar el tamaño y las masas de partículas como consideramos densidades constantes estaremos hablando de la misma idea.

La información de tamaños es obtenida, junto con la de otras propiedades físicas, es inferida principalmente por observaciones de ocultación estelar lo cual nos permite tener un rango aproximado en los tamaños de las partículas del modelo, como se explicó en la Sección

3.2.1. En general, el tamaño de las partículas, su forma, composición y distribución espacial como puede ser en barras, acumulaciones o simples capas de material, controlan la manera en que la radiación electromagnética es absorbida o repartida en los anillos.

7.2.1. Ley de potencias para la masa

Con la profundidad óptica dinámica promedio de los datos del dispositivo UVIS se define el área ocupada por la sección transversal de las partículas, con lo cual se puede definir la masa total a repartir en diferentes partículas cuyas masas cumplen una distribución con ley de potencias observadas (Esposito, 2014).

En IDL se implementa el algoritmo aleatorio que cumple con la ecuación de una distribución por ley de potencias (Newman, 2005):

$$N = Ax^{-Q} \quad (7.2)$$

Donde N será un arreglo computacional en el que se distribuye la masa ocupada dentro de la caja (suponemos partículas con densidades constantes, por lo tanto, los tamaños y las masas cumplen relaciones similares). A el tamaño máximo y Q el valor exponente que define la distribución, característico para cada región estudiada que ha sido evaluada en investigaciones previas (Esposito, 2014).

Los valores específicos de Q definen conjuntos de partículas con dimensiones específicas en dicha distribución (como ejemplo la Figura 7.2). La suma total de masas describirá una profundidad óptica dinámica (véase Sección 3.8) como la de las observaciones.

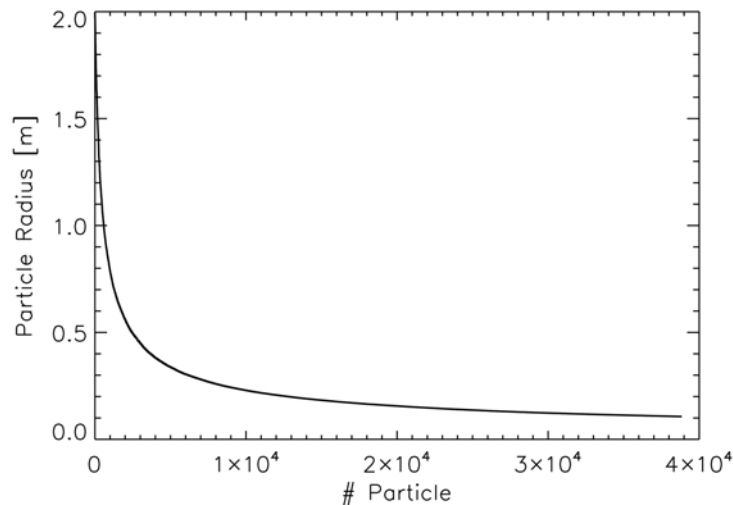


Figura 7.2: Distribución de masas para un arreglo sintético ($Q \sim 2.7$, $\tau = 1.2$, partículas ~ 38500 , radio máximo $rad_{max} = 2m$)

Al final, la selección de Q promedio, con base en observaciones para cada anillo usando como referencia a Esposito (2014) (ver Tabla 7.2). Como se han visto en trabajos previos (Flandes et al., 2010), el Anillo C tiene un comportamiento monocapa, por lo que las partículas simuladas tendrán un rango pequeño de variación, mientras que los anillos A y B, como la División de Cassini, tienen una gran variedad de tamaños, por lo que presentan un rango mucho mayor de variación (ver Tabla 7.2).

Tabla 7.2: Propiedades para la distribución de masas (anillos principales y División de Cassini).

Región	Q	Máx. [m]	Mín. [m]	Relación (Máx/Min)
C	3.1	1	0.5	$1 : \frac{1}{2}$
B	2.7	5	0.33	$1 : \frac{1}{15}$
CD	3.1	1	0.05	$1 : \frac{1}{20}$
A	2.8	2	0.13	$1 : \frac{1}{15}$

Con lo que para cada región tiene la masa con una distribución aproximado a la realidad, este parámetro se introduce al generar el objeto simulado en cada caso.

7.3. Arreglo sintético - Posiciones espaciales

Al obtener el arreglo computacional de tamaños para partículas de mayor a menor tamaño, se aplica una función aleatoria que genera valores positivos y negativos de manera distinta en cada eje y así asignarles sus posiciones espaciales (x, y, z). Se cuida que no exista superposición entre partículas anteriormente colocadas, ni que se encuentren fuera de la caja simulada.

Para su visualización por ejemplo la Figura 7.3 muestra las posiciones espaciales de las partículas y la variedad de tamaños que presentan.

7.3.1. Ajuste de grosor vertical por masas

Los conceptos definidos anteriormente muestran una dependencia de la masa y el grosor vertical máximo que pueden presentar las partículas en un anillo por lo que es necesario implementar un ajuste para las posiciones espaciales permitidas para cada una de ellas. Ésto se logra al usar una distribución aleatoria Gaussiana, con el ajuste de su grosor H_{max} (partículas grandes cerca del plano), como:

$$P_z = (random_{Gauss})(H_{max}) \frac{e^{R_p} - e^{r_{max}}}{e^{r_{min}} - e^{r_{max}}} \quad (7.3)$$

Para la normalización de H_{max} se considera R_p el radio de la partícula a colocar, r_{max} y r_{min} radio máximo y mínimo respectivamente de esa región. La Ecuación 7.3 se usa para definir ajustar el grosor máximo todas las regiones estudiadas, pues describe su dinámica vertical. El anillo C, ya que sus partículas son muy similares (poca variación de tamaños)

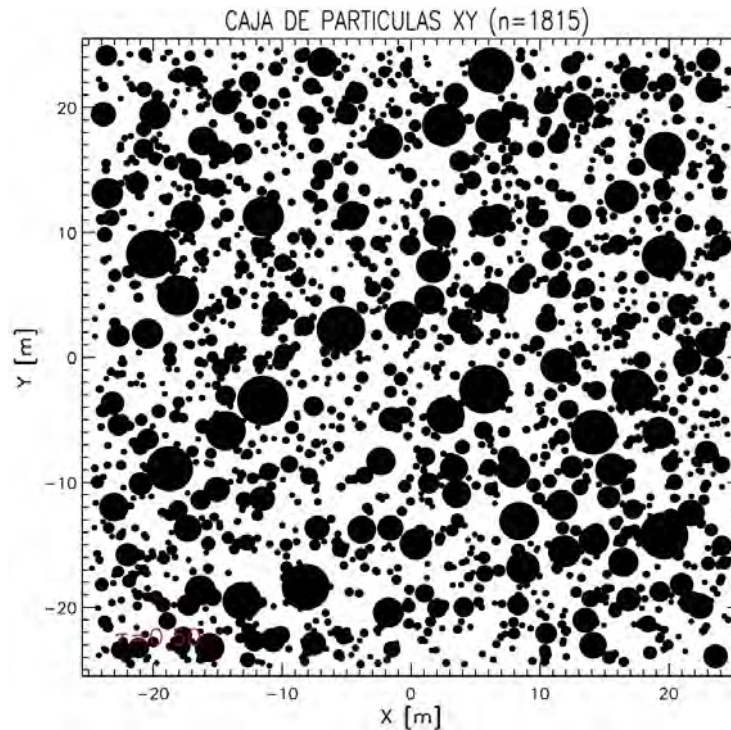


Figura 7.3: Ejemplo de visualización para un arreglo del anillo C en el plano XY ($\tau = 0.5$, $n=1815$ partículas).

presentará muy poco ajuste, casi será uniforme.

Una vez establecidas las posiciones y las características de las partículas, se genera un sub-programa de salida en lenguaje MEL (Maya Embedded Language usado en el ambiente de Autodesk Maya), que también incluye la colocación de una fuente luminosa móvil que simula al Sol y un observador.

7.4. Ray-Tracing

En este proyecto fue usado el software Maya de Autodesk en el que puede implementarse el método de *Ray-Tracing* que nos permite generar imágenes con gran realismo de objetos iluminados, debido a que el software combina la física involucrada en la interacción entre luz y las superficies donde incide.

En el método de Ray-Tracing se generan una cantidad particular de fotones de una fuente virtual que inciden sobre un cuerpo definido por una malla de polígonos. Cada polígono define una cara plana del cuerpo. El código traza el camino de cada fotón con base en las reglas básicas de la óptica geométrica, pero apoyado en los parámetros definidos con las formulas de Fresnel. Los fotones que alcanzan al observador imprimen una imagen en el plano de observación (este último proceso se denomina *renderizado* y los detalles anteriores están embebidos en el código llamado *Mental Ray* de Maya por lo que no entramos en más detalles al respecto).

Este método es computacionalmente demandante, pero nos permite obtener arreglos de partículas con iluminación similar a la que reciben en los anillos de Saturno reales. Una vez realizado el trabajo de renderizado nos será posible estimar curvas de sombra y temperaturas de brillo aparente para cada captura con geometría característica. Serán la base de perfiles térmicos para las regiones de estudio seleccionadas en los anillos principales de Saturno y futura comparación con los datos de Cassini.

7.4.1. Implementación

El sub-programa de salida en MEL resultante contiene las instrucciones para crear el arreglo sintético en el ambiente de Autodesk Maya, implementando una fuente de luz puntual a una distancia mayor a la de las dimensiones Lx, Ly de la caja por mínimo un orden de magnitud, una cámara que cumple la función de observador apuntando en dirección al plano en el arreglo sintético, como también la colocación de las partículas con textura lambertiana.

Las condiciones especificadas en la Sección 7.1.1 de los ángulos máximos sirven de punto de partida para las simulaciones de estudio, tienen contemplado la presencia de los parámetros para las wakes o perturbaciones gravitacionales en los anillos A y B, por lo que las geometrías contemplan:

- Elevación solar variable (B') - Permite a la fuente luminosa variar entre -23° a 23° .
- Elevación de la nave (B) - Permite al observador (cámara) variar ángulo de estudio, para tener una variación solo de la elevación solar se fija la cámara a 23° .

Se hizo un render cada 2 grados de elevación solar. Se obtienen así imágenes con una resolución aproximada de 960 x 540 pixeles y un campo de visión que incluya una muestra significativa de las partículas. Para el caso de los anillos A y B, el campo de visión debe incluir, al menos, una wake, y, en algunos casos, varias (p.e, el anillo A la Figura 7.7).

Esto permite un conjunto de renders que muestran el cambio progresivo en iluminación, ya sea por que la fuente no está en ángulo directo de visión o porque las partículas se ensombrecen entre sí (función de sombra). Estas imágenes obtenidas son el fundamento del análisis fotométrico de éste trabajo, y sientan las bases de comparación entre geometrías y distribución de partículas, lo cual es otro objetivo de este trabajo.

En las siguientes figuras se esquematizan los arreglos obtenidos.

- El anillo C tiene una estructura que se acerca más a una monocapa ($H \sim 1.5m$) y una profundidad óptica baja $\tau \sim 0.1$, Figura 7.4.



Figura 7.4: Vista preliminar de malla sintética para el Anillo C, región 1.

- La división de Cassini con cualidades distintas en partículas pero un grosor pequeño $H \sim 2m$ y baja profundidad óptica $\tau \sim 0.1$, Figura 7.5.

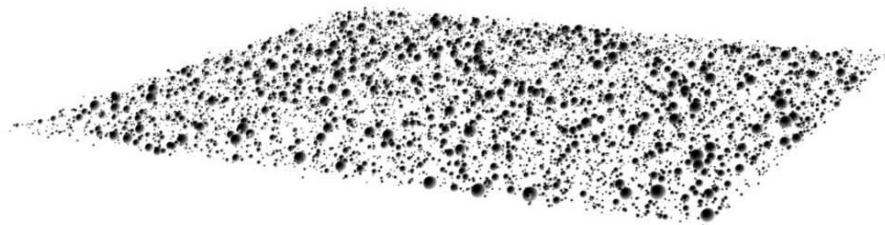


Figura 7.5: Vista preliminar de malla sintética para la División de Cassini.

- El anillo B con alta profundidad óptica $\tau \sim 3$, gran grosor $H > 40m$ y presencia de una wake, Figura 7.6.

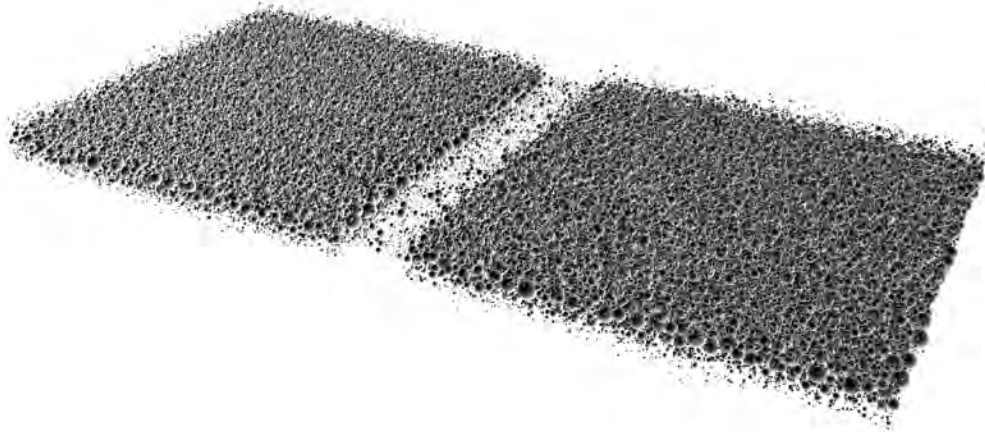


Figura 7.6: Vista preliminar de malla sintética para el Anillo B, región 2.

- Anillo A con wakes muy marcadas, cercanas, grosor intermedio $H \sim 12m$ y profundidad óptica media $\tau \sim 0.8$, Figura 7.7.

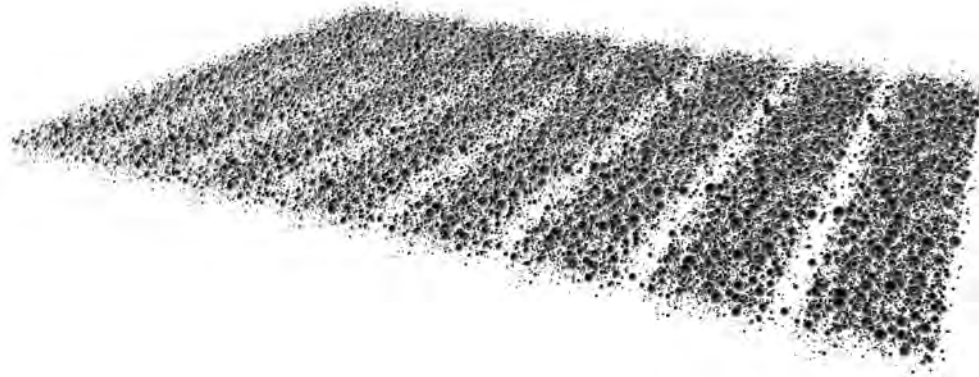


Figura 7.7: Vista preliminar de malla sintética para el Anillo A, región 3.

Capítulo 8

Resultados de la simulación

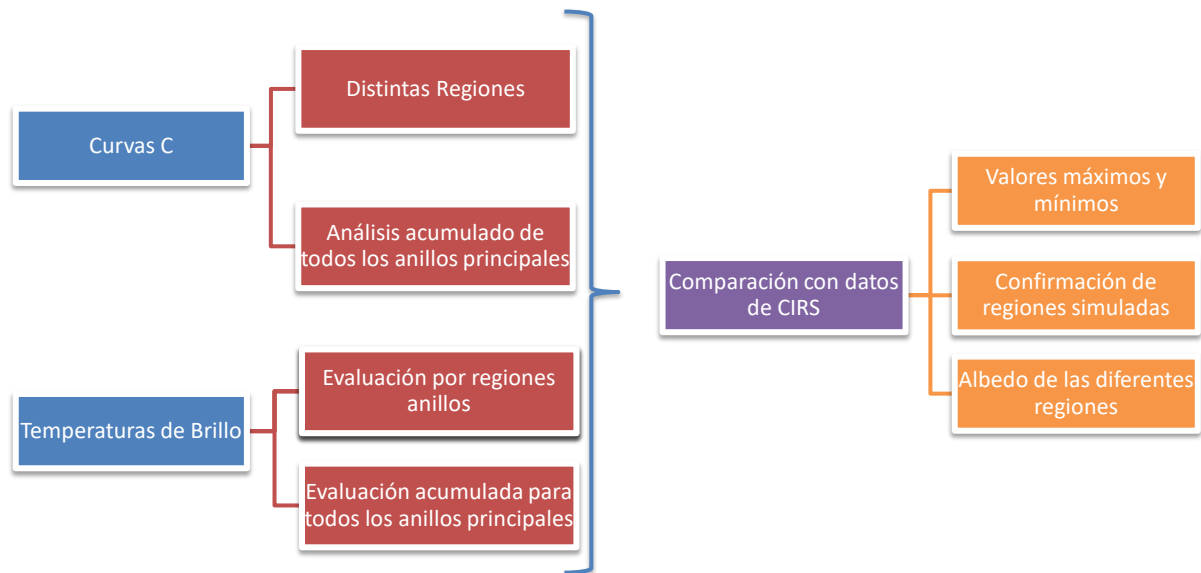


Figura 8.1: Diagrama de flujo de la obtención de resultados.

Siguiendo el proceso descrito en el diagrama de la Figura 8.1, se evaluaron los datos de profundidad óptica de UVIS usando el código que se desarrolló para este trabajo. Se obtuvieron, para cada región, los tamaños máximo y mínimo de las partículas (ver Tabla 8.1).

Los parámetros resultantes del código de IDL que se muestran en la Tabla 8.1. Un ejemplo del conjunto usado se muestra en las Figuras 7.4, 7.6, 7.5 y 7.7. Las cuales son conjuntos de renders para las mallas sintéticas donde la única variable es la elevación solar (B'). El observador (cámara) se encuentra en el mismo vector posición que el Sol como si estuviera a su espalda, los dos con elevación de $+23^\circ$, como se explicó antes la fuente luminosa (Sol) se mueve 2° cada vez en su trayectoria, hasta tener una elevación negativa bajo el plano del anillo a -23° , como se describe con de la Figura 8.2.

Tabla 8.1: Parámetros de salida en la creación de arreglos sintéticos para todas las selecciones. Se considera el grosor máximo H_{max} , los radios de las partículas y la profundidad óptica τ , para todas las regiones y en caso de tener wakes se incluyen los valores para las barras y las separaciones entre ellas (p.e. $B1_{bar}$, $B1_{sep}$).

Región	τ	H_{max} [m]	# Partículas	R_{max} [m]	R_{min} [m]
<i>C1</i>	0.09	1.28	610	0.92	0.46
<i>C2</i>	0.11	1.91	710	0.94	0.47
<i>CD</i>	0.11	3.96	15210	0.98	0.04

Anillo B	Ancho [m]	τ	H_{max} [m]	# Partículas	R_{max} [m]	R_{min} [m]
$B1_{bar}$	41.96	1.15	24	25100	1.98	0.13
$B1_{sep}$	31.05	0.28	4.54	17730	0.98	0.06
$B2_{bar}$	93.75	1.94	24	93800	1.99	0.13
$B2_{sep}$	15.94	0.24	4.43	7420	0.99	0.13
$B3_{bar}$	1666.67	4.52	60	55700	4.99	0.33
$B3_{sep}$	33.33	0.19	3.98	12490	4.99	0.06
$B4_{bar}$	285.71	5.97	72	51200	5.99	0.40
$B4_{sep}$	57.14	0.32	7.74	37500	0.99	0.06
$B5_{bar}$	480.00	3.41	48	66500	3.99	0.26
$B5_{sep}$	57.60	0.35	9.95	40910	0.99	0.06

Anillo A	Ancho [m]	τ	H_{max} [m]	# Partículas	R_{max} [m]	R_{min} [m]
$A1_{bar}$	34.09	1.09	24.00	20300	1.97	0.13
$A1_{sep}$	55.22	0.143	5.25	16660	0.99	0.06
$A2_{bar}$	15.54	0.69	12.00	23400	0.99	0.06
$A2_{sep}$	21.60	0.12	4.75	4640	0.99	0.07
$A3_{bar}$	14.28	0.59	12.00	18400	0.99	0.06
$A3_{sep}$	3.00	0.11	4.88	500	0.97	0.08
$A4_{bar}$	11.85	0.60	12.00	15300	0.99	0.06
$A4_{sep}$	24.34	0.15	6.93	7900	0.98	0.06
$A5_{bar}$	11.40	0.63	12.00	15300	0.99	0.06
$A5_{sep}$	27.54	0.20	9.76	11910	0.99	0.06

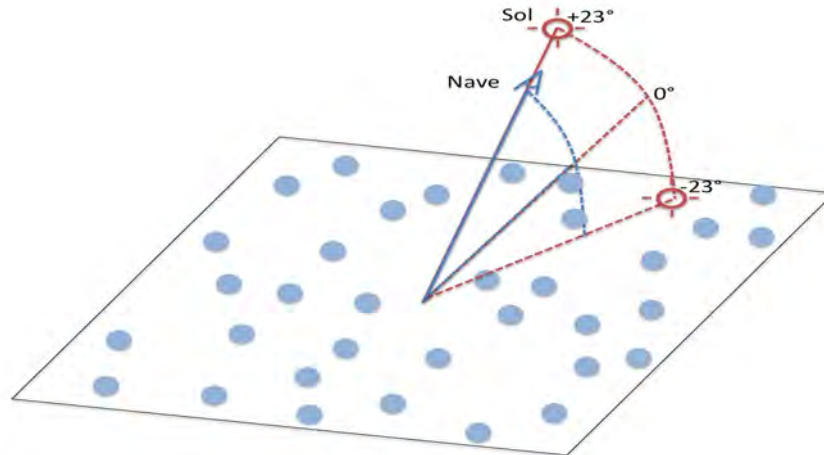


Figura 8.2: Ejemplo de geometrías de observación, la nave se encuentra a una elevación de 23° y la fuente luminosa se mueve entre -23° y 23° del plano descrito por el anillo.

8.1. Outputs - Función C simulada

El análisis de cada imagen/render de cada ángulo de elevación solar representa un punto de la función sombra C entre las partículas y, posteriormente, podemos estimar sus temperaturas de brillo (Sección 3.1.1).

Específicamente, usando un código en el programa IDL se contabilizan el número de píxeles iluminados y su intensidad, para normalizarlos. Se considera un valor 0 en la curva de ocultación como el valor de menor intensidad luminosa en el conjunto de renders y el valor 1 como el punto de mayor iluminación donde por lo general coincide con la elevación solar máxima y la del observador. Así podemos hacer una estimación de las características dinámicas y de distribución con partículas en distintas regiones de los anillos de Saturno al comparar con las curvas definidas de observaciones, para todas las regiones se encontraron diferentes tendencias como se muestra las curvas C acumuladas en la Figura 8.6.

8.1.1. Anillo C y División de Cassini.

Los perfiles descritos por estas regiones son muy similares en la Figura 8.3, pues cuentan con profundidad óptica similar aunque se encuentren a diferente distancia de Saturno. Las características de la División de Cassini se deben a las resonancias de 1:2 con Mimas principalmente, lo cual causa que el material de los anillos principales no encuentre una estabilidad y migre a otras regiones (como el anillo A y B). Lo cual permite que la pequeña cantidad de material que permanece se comporte con una profundidad óptica similar al anillo C, con variaciones de altura en pequeñas regiones sugieren que no desarrolla un conjunto de monocapa sino que es multicapa y con gran variedad de tamaños en sus partículas, por lo que contrasta al anillo C que se le considera como monocapa y tiene pequeña variación en las dimensiones de sus componentes como se muestra en la Tabla 8.1.

Las curvas describen poca variación o de pendiente casi constante, en elevaciones solares lejanas al equinoccio ($B' \sim 0^\circ$) pues al acercarse empieza a notarse la obstrucción luminosa

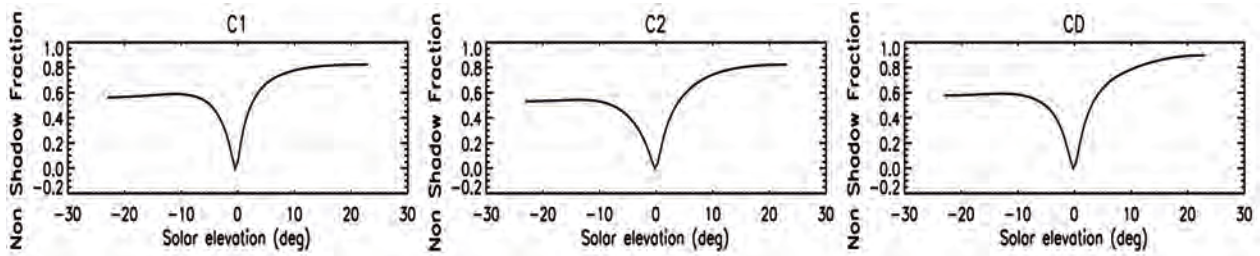


Figura 8.3: Curvas función de sombra acumuladas para regiones del anillo C y la División de Cassini. Elevación de la nave $+23^\circ$.

en forma de una pendiente más pronunciada, esto nos muestra el poco grosor que tienen estas regiones, el cual no supera el diámetro de 2 partículas con tamaño máximo. De todos los anillos principales de Saturno, éste es el que tiende a tener una mayor simetría en sus curvas al ser evaluadas a valores negativos de elevación solar, esto debido al poco grosor y baja densidad de partículas presentes.

8.1.2. Anillo B.

El anillo B es el que ha sido más complicado de modelar y por ende estudiar, debido a su gran grosor y alta densidad de partículas. Sin embargo, en nuestras simulaciones, fue posible encontrar un arreglo de partículas que incluyera estas características.

Las partículas que lo componen son las de mayor tamaño y sus distribuciones de partículas son las más compactas. Lo anterior da como resultado curvas C , en sus diferentes regiones, con pendientes casi constantes lejos del equinoccio, tanto para el lado iluminado, como el no iluminado Figura 8.4.

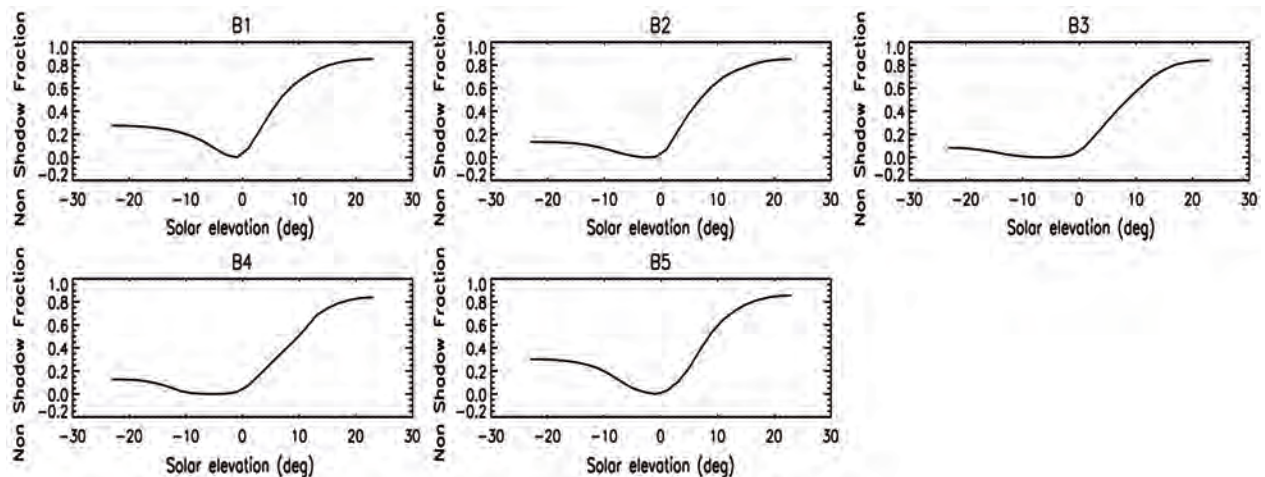


Figura 8.4: Curvas función de sombra acumuladas para las regiones del anillo principal B de Saturno. Elevación de la nave $+23^\circ$.

Las funciones de sombra en el anillo B son las menos simétricas de todos los anillos

principales cuando se considera el lado iluminado y el lado no iluminado, Para elevaciones solares negativas (en este caso, el lado oscuro) aún cercanas al solsticio de invierno no se elevan, la fracción iluminada con tan poco flujo energético no permite un cambio mayor a 40%. Donde para el comportamiento de la pendiente para el lado negativo no es pronunciada muestra fácilmente que poca luz está cruzando inclusive por las wakes.

8.1.3. Anillo A.

El anillo A, en todas su regiones, es, tanto, el más dinámico como también el que tiene mayores perturbaciones gravitacionales, como se muestra en sus características en la Tabla 7.1. Contiene barras más compactas y separaciones mucho más amplias con lo que se puede describir fácilmente que a pesar de su elevación vertical mayor en comparación al anillo C permite el paso de flujo energético fácilmente pero debido a su elevado valor de $\tau > 1$ existe una gran densidad de partículas cercanas a las barras y por ende, a elevaciones solares al equinoccio muestra un gran sombreado entre sus componentes.

Las curvas muestran una pendiente poco pronunciada, pero constante al alejarse de los solsticios, un poco más pronunciada cercana al equinoccio, lo cual nos muestra la gran separación de material en las wakes pero que al acercarse a la geometría adecuada la luz es obstruida.

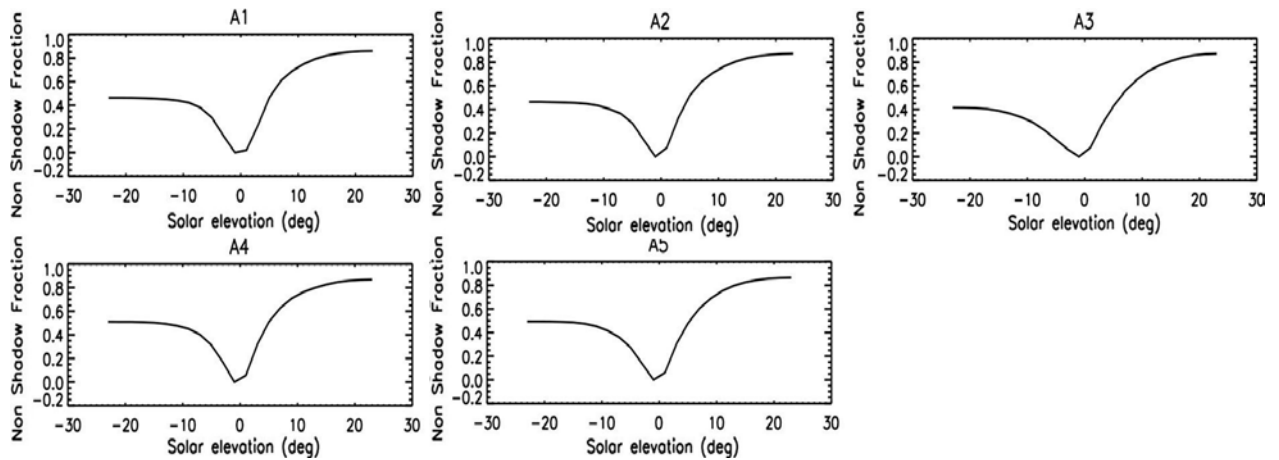


Figura 8.5: Curvas función de sombra acumuladas para las regiones del anillo principal A de Saturno. Elevación de la nave $+23^\circ$.

Las curvas descritas para las regiones del anillo A en la Figura 8.5, tienen una simetría marcada en las pendientes pero no en intensidad máxima obtenida. Ésto se debe a que las constantes separaciones permiten el paso de energía aunque de manera atenuada como se observa por la fracción iluminada puede llegar fácilmente a ser de 50%.

8.1.4. Análisis acumulado de función sombra - C

En la Figura 8.6 se tiene una gráfica compuesta de todas las curvas de C para todas las regiones estudiadas con el fin de comparar el comportamiento de cada región de los anillos.

Se puede notar que tienen pendientes menos pronunciadas lejos del equinoccio en el lado iluminado $B' \gtrsim 15^\circ$ como para el lado oculto $B' \lesssim -10^\circ$ con valores máximos no tan altos, por lo que se puede realizar la distinción por densidades de partículas entre diferentes regiones. Para el anillo B coinciden en regiones con partículas de mayor tamaño. Para el anillo A no existen esas distinciones ya que depende mucho de la dinámica variable que tiene, pero en general se tienen pendientes muy similares en diferentes regiones con excepción del anillo B que casi no presenta simetría.

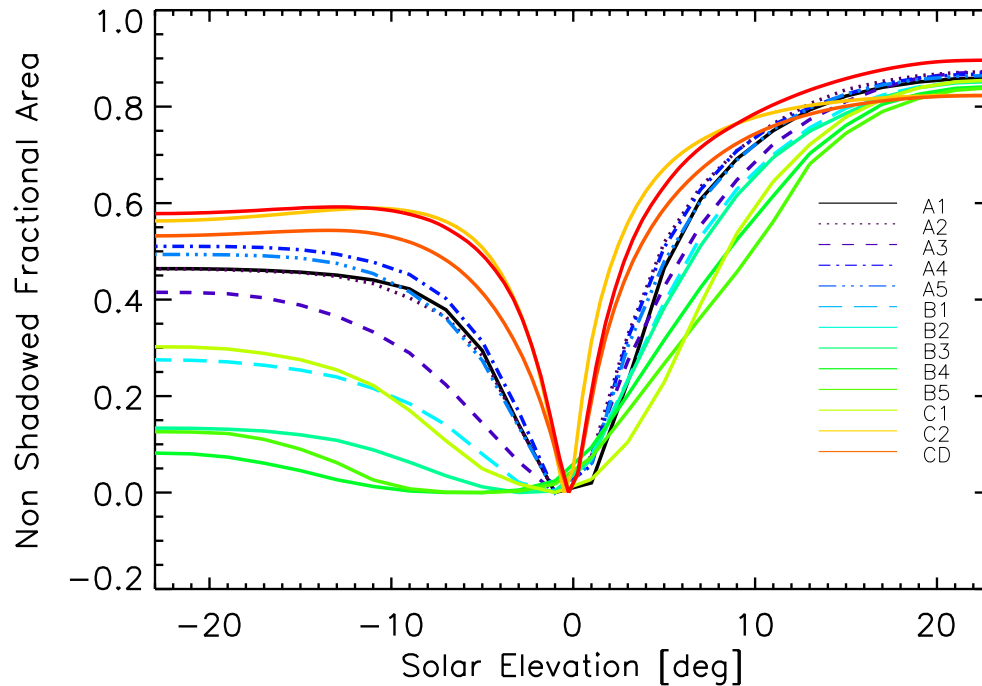


Figura 8.6: Función de sombra de todas las regiones de los anillos de Saturno.

Las pendientes nos muestran cualitativamente la disposición del material en la región del anillo, Entre más pronunciadas, nos indica una mayor profundidad óptica.

8.2. Temperaturas sintéticas.

Las curvas de sombra estimadas son el requisito fundamental para encontrar las variaciones en los flujos energéticos ya que modulan la energía que recibe cada partícula y, por lo tanto, la temperatura de brillo observada.

Como siguiente paso, la función de sombra se introduce en la ecuación del modelo de flujos energéticos. Las temperaturas de las diferentes regiones se obtienen con las funciones de sombra obtenidas para cada región. En la Ecuación 6.6 se puede observar que el albedo de las partículas es el único parámetro de ajuste.

Tabla 8.2: Tabla de albedos tomados de la literatura y los usados en este trabajo, para cada anillo principal, la División de Cassini y la atmósfera de Saturno.

Región	Este trabajo	Flandes - 2010	Porco - 2005
A_C	0.35	0.25	0.37
A_B	0.80	0.58	0.87
A_A	0.75	0.50	0.59
A_{CD}	0.50	-	-
A_{sat}	0.342	0.342	-

Con base en las curvas y a los valores máximos y mínimos de los datos observados por la nave Cassini, se realizó el ajuste y la verificación de los albedos para los distintos anillos. El mejor conocido y más fácil de ajustar es el anillo C por su poco grosor y poca densidad de partículas. El que mayor reto presenta es el anillo B, donde se encontró que los albedos definidos previamente no lograban reproducir las temperaturas de brillo esperadas. Por lo que las funciones de sombra, C , que mejor se ajustaron a estos valores fueron los que presentaban un albedo que permitiera evaluar la temperatura de brillo aparente similar a los obtenidos por CIRS, como se muestran en la Tabla 8.2.

La División de Cassini, por su ubicación entre los anillos A y B, debería presentar alto albedo, pero el ajuste que coincide es intermedio, lo cual podría deberse a la baja concentración de material y al bajo dinamismo que presenta, no existe mucha bibliografía para realizar una comparación.

Los perfiles térmicos como se esperaba resultaron ser diferentes y modulados directamente por la función C , por lo que presentarán una tendencia similar pero con diferencias como se dijo antes en la Sección 7.1, por las condiciones específicas de cada anillo y región.

8.2.1. Anillo C y División de Cassini.

Como se explicó en la Sección 8.1.1, existen muchas similitudes entre el anillo C y la División de Cassini, por ejemplo, su baja profundidad óptica. Podemos notar que debido a su pequeño grosor las partículas se bloquean poco la radiación entre ellas, por lo que el flujo energético llega fácilmente a casi todas y sólo a bajas elevaciones solares ($B' < 10^\circ$) la radiación solar disminuye en gran medida.

Debido al mayor grosor vertical en la División de Cassini, se encuentra que el máximo del perfil de temperatura estimado es unos cuantos grados menos que el anillo C. En comparación de los demás anillos, sus perfiles son muy simétricos y tienen pendientes casi horizontales y una pendiente muy pronunciada cerca del equinoccio. Se muestran los resultados para este anillo en la Figura 8.7.

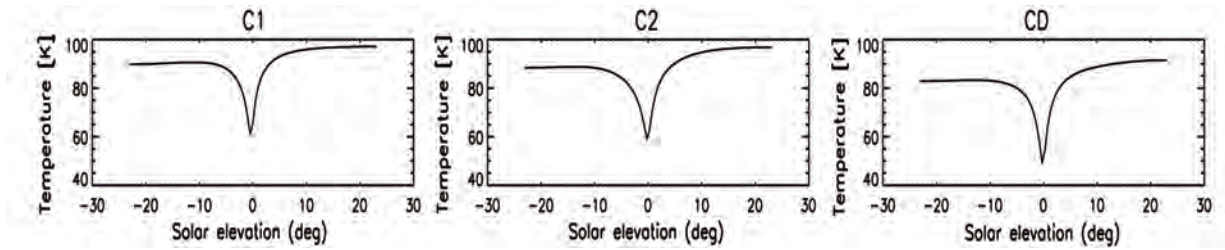


Figura 8.7: Curvas de Temperaturas vs Elevación Solar para regiones del anillo C y la División de Cassini. Elevación de la nave $+23^\circ$.

8.2.2. Anillo B.

El anillo B fue el más complicado debido al poco conocimiento de la dinámica de sus wakes gravitacionales, su grosor vertical mayor y profundidad óptica alta que requieren implementar las observaciones más actuales para desarrollar un modelado sintético. Al calcular los perfiles térmicos de diferentes regiones del anillo B de Saturno se encuentra que, al variar la elevación solar y acercarse al plano del anillo, incrementa su pendiente de manera gradual, hasta el equinoccio y, debido a la geometría en que se construyeron las mallas simuladas, el punto más bajo de la curva no corresponde a elevación solar $B' = 0^\circ$ ya que la gran densidad de partículas cerca del plano central continúan obstruyendo la radiación solar hasta unos grados por debajo del plano ($B' \sim 3^\circ$).

Si el observador está enfocado en la parte no iluminada cuando la elevación solar es negativa, evalúa temperaturas de brillo por debajo de 40 % del máximo iluminado. Esto se debe a que las perturbaciones gravitacionales generan pequeñas separaciones con diferentes dimensiones (ver Tabla 8.1), por lo que poca radiación solar llega a la parte superficial de los anillos y es captada por el observador. Se muestran los resultados para este anillo en la Figura 8.8.

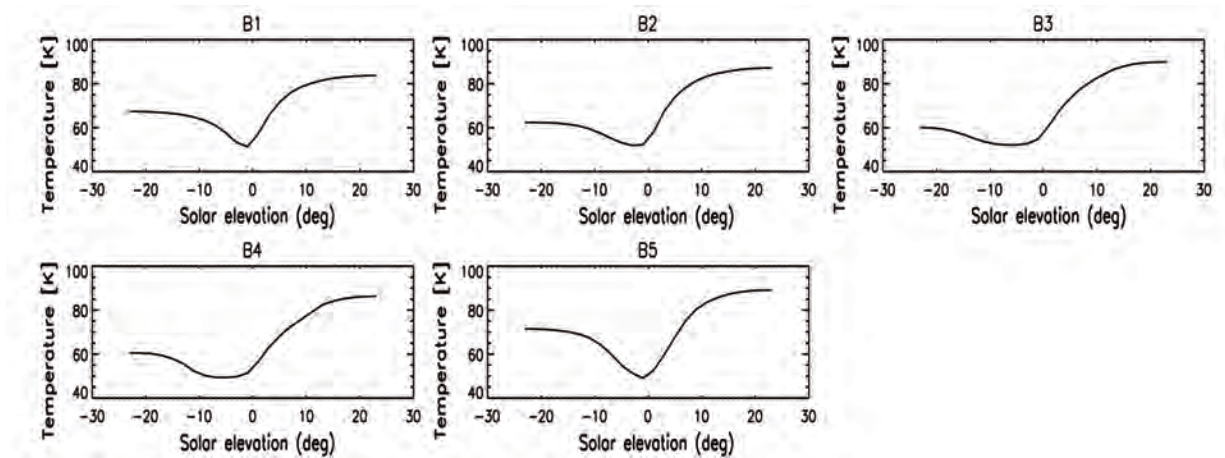


Figura 8.8: Curvas de Temperaturas vs Elevación Solar para las regiones del anillo principal B de Saturno. Elevación de la nave $+23^\circ$.

8.2.3. Anillo A.

El anillo A es el más dinámico, presenta características gravitacionales que generan barras mucho más estrechas en comparación con el anillo B por lo que al evaluar sus perfiles térmicos nos es fácil notar que tienen equilibrio de temperaturas al tener elevación solar cercana a los solsticios y sus pendientes casi planas cambian al acercarse a $\pm 8^\circ$ de manera pronunciada.

Su mínimo valor de temperatura no se encuentra exactamente en el equinoccio (0°) esto es debido al grosor vertical y de igual forma como pasa en el caso del anillo B, a la forma de construir la caja de estudio. Se muestran los resultados para este anillo en la Figura 8.9.

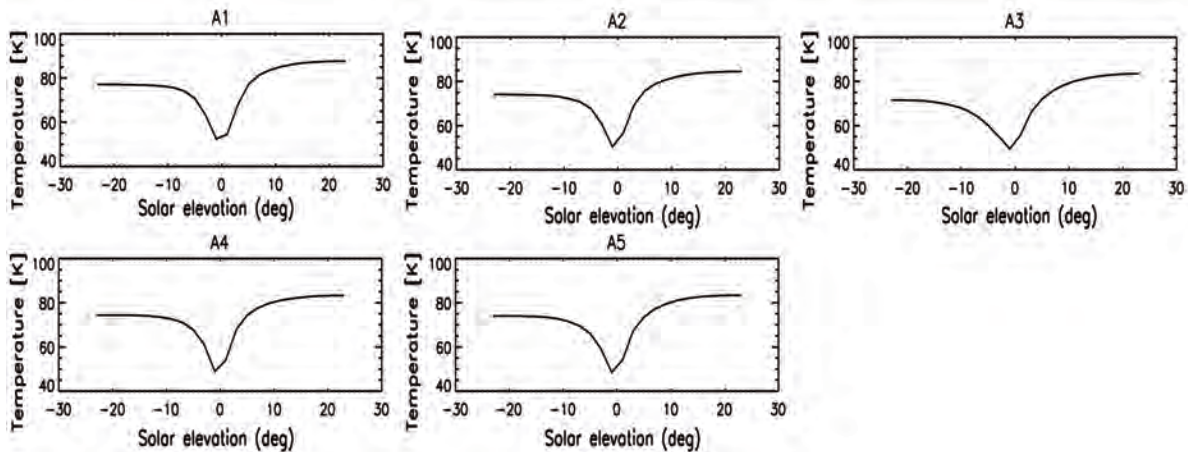


Figura 8.9: Curvas de Temperaturas vs Elevación Solar para las regiones del anillo principal A de Saturno. Elevación de la nave $+23^\circ$.

8.2.4. Análisis de Temperaturas.

Cada anillo presenta una forma diferente en el acomodo de las partículas, así como distribuciones de tamaños posibles y como grados de dinamismo en sus wakes, por lo que describen perfiles térmicos asimétricos y variaciones en valores máximos y mínimos de temperatura.

Se realizaron ajustes para el albedo de cada anillo principal obteniendo un mejor ajuste con los valores de temperatura simulada con el modelo de flujos energéticos y las temperaturas de brillo obtenidas con CIRS. Y fueron obtenidos los perfiles térmicos para todas las regiones.

En el anillo C como en la División de Cassini no existen perturbaciones periódicas (aunque CD es en si mismo una perturbación gravitacional de gran tamaño). Ambos tienen perfiles térmicos muy simétricos y con pendiente casi plana hasta que la elevación solar se acerca al equinoccio su pendiente cae rápidamente, por el poco grosor vertical que presentan, el anillo C tiene una temperatura un poco más elevada que la División de Cassini, su temperatura no puede ser la misma ya que la distancia a Saturno es mayor para la División de Cassini. Describen un albedo relativamente bajo $A_C = 0.35$ y $A_{CD} = 0.5$, lo que puede deberse al poco dinamismo en ellos, a la poca renovación de material de hielo lo que fomenta contaminación

rocosa que no se oculta rápidamente.

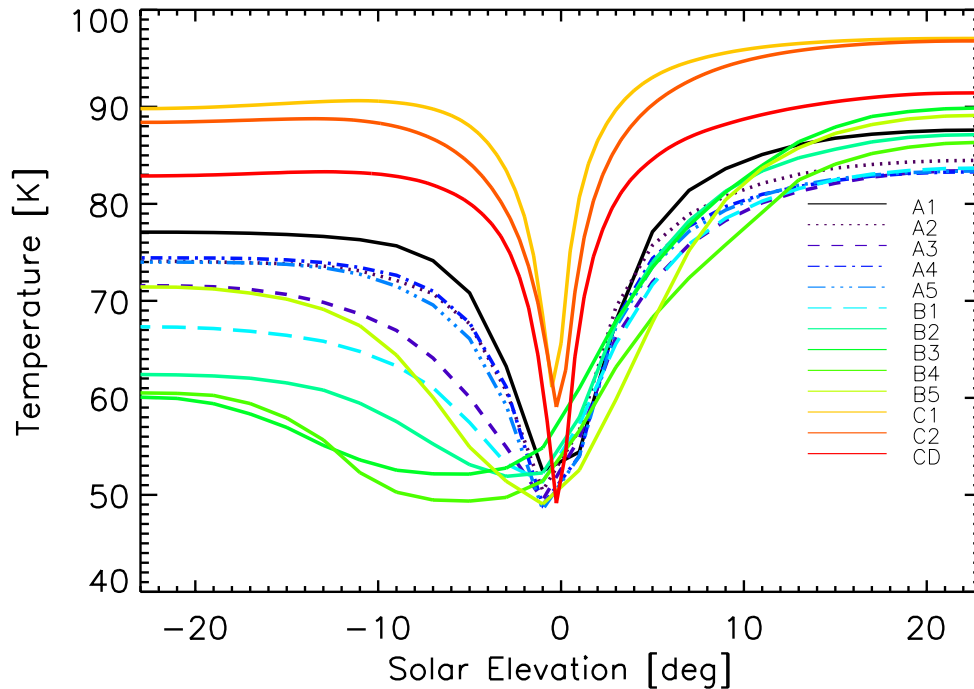


Figura 8.10: Curvas de Temperatura vs Elevación Solar acumuladas para las regiones de los anillos de Saturno. Nótese que, en los datos $B' < 0^\circ$, pues, antes de 2009, el lado sur de los anillos era el iluminado. La gráfica supone $B' > 0^\circ$ para el lado iluminado y viceversa, por tanto los datos se asumen positivos.

Con el anillo B, más complicado de modelar y ajustar por su dinámica baja, sus partículas de mayor tamaño, alta densidad de material en plano del anillo y perturbaciones gravitacionales pequeñas, se observa una ocultación entre cuerpos muy alta por lo que las temperaturas de brillo aparente decaen rápidamente al bajar la elevación solar y no vuelven a recuperarse aún al punto de temperatura superior, mostrando el perfil menos simétrico de todos los anillos principales.

El mayor de todos los albedos ajustados es el del anillo B $A_B = 0.8$, esto, posiblemente, puede ser explicado por la renovación constante por microimpactos y colisiones entre las partículas del anillo.

Para el anillo A, mucho más dinámico que los demás y con una constante creación de wakes, describe unas curvas simétricas a elevaciones solares fuera del equinoccio ($B' \lesssim -10^\circ$ y $B' \gtrsim 10^\circ$), donde por la geometría de iluminación realiza un alto grado de ocultación mostrando pendientes medianamente pronunciadas (no tanto como el anillo C) por el grosor vertical máximo intermedio para los demás anillos principales de Saturno. Presenta un alto albedo $A_A = 0.75$, debido a su gran actividad suscita un alto grado de volatilidad y posterior captura de material como el hielo liberado por impactos entre partículas o microimpactos.

Tabla 8.3: Comparación en diferentes regiones de temperaturas máximas y mínimas para datos promedios de CIRS y resultados de la simulación.

Región	CIRS T_{max} [K]	σ	CIRS T_{min} [K]	σ	Sim T_{max} [K]	Sim T_{min} [K]
C1	101.145	0.404	67.309	1.882	97.048	61.104
C2	101.322	1.022	64.498	3.890	96.795	59.058
CD	96.489	2.402	50.813	3.167	91.437	49.147
B1	92.506	1.013	53.783	0.977	83.698	51.371
B2	91.140	0.449	51.495	1.254	87.148	51.906
B3	91.315	1.207	49.314	0.750	89.895	52.142
B4	92.243	0.854	47.797	1.126	86.355	49.362
B5	90.030	0.488	46.888	0.953	89.137	49.048
A1	90.207	0.963	46.682	1.333	87.615	52.456
A2	87.820	0.393	47.172	1.488	87.615	50.440
A3	87.021	0.315	48.252	1.352	83.446	49.487
A4	86.849	0.341	48.141	1.809	83.312	48.963
A5	85.528	0.315	46.054	1.832	83.399	48.492

8.3. Comparación de Temperatura simuladas con los datos de CIRS.

Usando como referencia los valores promedio estimados con CIRS, delimitados por regiones como se mostraron en la Figura 4.2 para geometrías de observación aproximadas, cercanas a la seleccionada este trabajo. Sirven como ejemplo de las restricciones máximas y mínimas a estimar en la validación de los perfiles térmicos.

Cabe mencionar que, debido a la geometría de las mallas simuladas los valores de C , la evaluación del brillo de los pixeles debe de normalizarse entre 1 y 0, ya que no reflejan necesariamente un flujo nulo de energía en el visible como sería el caso $C = 0$ de este trabajo. Pero, como se muestra en la Sección 6.1 y sus ecuaciones, existen aportaciones energéticas que proceden de Saturno y las demás partículas.

Por la construcción de mallas simuladas, el mínimo se encuentra corrido a valores negativos de elevación solar, ésto se debe a la manera de generar la geometría (colocación de fuente luminosa, partículas y observador), esa situación puede ser mejorada en trabajos posteriores.

Se encuentra que el rango de valores obtenido en la simulación y estimación promedio para temperaturas de brillo aparente en este trabajo esta relacionado al rango de valores para las observaciones del dispositivo CIRS. Con la estimación de valores promediados máximos, mínimos y sus errores de observaciones con CIRS y de la simulación en este trabajo, podemos notar en la Tabla 8.3 que nuestros valores quedan dentro del intervalo observado.

Tabla 8.4: Lista de escaneos radiales y sus propiedades, fecha, elevación solar B' y ángulo de fase α (Flandes et al., 2010). Elevaciones solares negativas a la eclíptica pero observando la parte iluminada del anillo.

Año	Día	B' [°]	α [°]
2005	104	-22.0	31.1
2005	177	-21.3	0.3
2006	349	-14.6	25.7
2007	115	-12.7	15.2
2007	298	-10.1	25.0
2007	354	-9.2	35.0
2008	347	-3.7	32.9
2009	18	-3.2	42.3
2009	60	-2.5	56.8
2009	115	-1.7	51.4
2009	175	-0.7	144.0
2009	224	0.0	70.9

Por último, para validar el trabajo y encontrar las mejoras al modelo propuesto, fue necesario usar datos reales de temperaturas de los anillos en las diferentes elevaciones solares en cada región seleccionada (datos de B' en la Tabla 8.4).

Con los ajustes de albedo para cada región fue posible encontrar perfiles térmicos que tuvieran una gran semejanza a los datos que se escogieron para comparar. El anillo C y la División de Cassini con albedos $A_C = 0.35$ y $A_{CD} = 0.5$, para los anillos A y B se les asignaron los albedos $A_A = 0.75$ y $A_B = 0.8$. Éste es, en sí, uno de los objetivos planteados y da sustento a la estructura propuesta para cada una de las regiones.

Se utilizaron los datos de los escaneos radiales de Flandes et al. (2010) (como se muestra en la Tabla 8.4) con ángulos de fase ($\alpha < 40^\circ$) diferentes a los usados en este estudio que contemplaba $\alpha \sim 0^\circ$ en todas las regiones. Sin embargo para elevaciones solares altas ($B' > 7^\circ$) los ajustes coinciden de manera adecuada con las observaciones. En el rango cercano al plano ($B' \sim 1^\circ - 7^\circ$) las observaciones se encuentran fuera de la curva, esto es debido a que no existen datos con un ángulo de fase adecuado llegando hasta $B' > 120^\circ$. Por último, los valores cercanos al equinoccio ($B' \sim 0^\circ$) muestran ángulos de fase adecuados, el trabajo previo de Altobelli et al. (2007) ha demostrado que no existe dependencia en la fase para este tipo de observaciones. Las discrepancias encontradas al estudiar los anillos más gruesos son debido a la construcción del arreglo computacional que afectan los perfiles térmicos simulados. La Figura 8.11 muestra todos nuestros resultados y su comparación con los datos de CIRS.

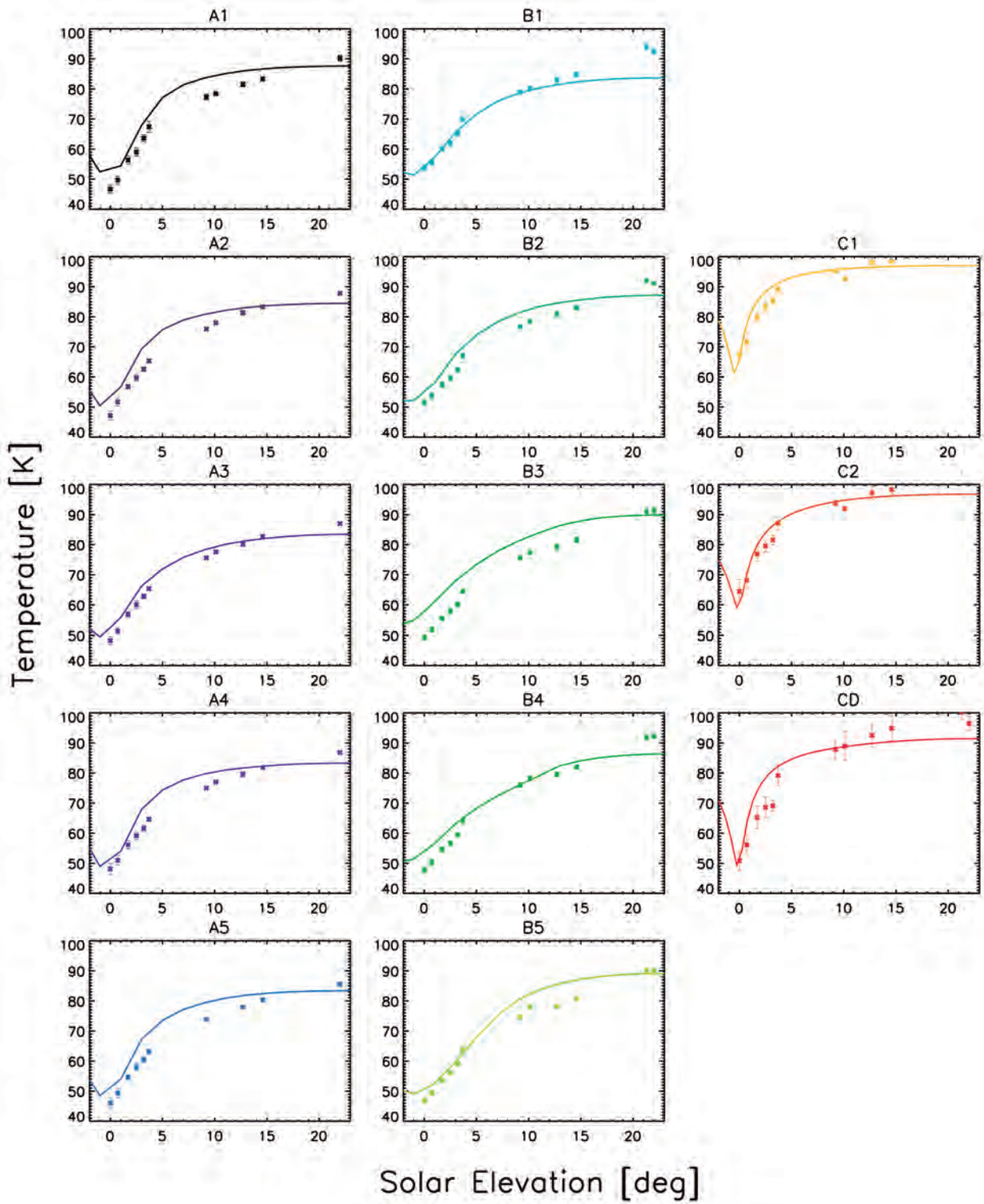


Figura 8.11: Curvas de Temperatura vs Elevación Solar para todas las regiones de estudio con datos promediados de CIRS (puntos con barras de error).

Capítulo 9

Conclusiones.

- Se lograron reproducir regiones específicas de los anillos a partir de un modelo computacional aleatorio sin la necesidad de utilizar simulaciones dinámicas de n-cuerpos. Estas cumplen con la física aplicada a cuerpos con autogravedad entre partículas y con órbitas keplerianas, pero representa el comportamiento promedio de la región dada como si estuviera en equilibrio.
- Para nuestras simulaciones no fue necesario el uso de supercómputo y en tiempos computacionales cortos.
- A diferencia de la simulaciones dinámicas nuestro modelo implementa además un análisis fotométrico del que pueden derivarse las temperaturas de las regiones de estudio.
- Con los arreglos anteriores se pudo reproducir las condiciones de iluminación promedio y el comportamiento térmico de regiones específicas de los anillos principales para diferentes elevaciones solares con respecto al plano de los anillos.
- Los resultados de nuestro análisis se compararon con los datos obtenidos por el instrumento CIRS de la misión Cassini y se verificó que el modelo de balance de energía usado es consistente, al menos, para ángulos de fase bajos ($\alpha \leq 30^\circ$). Nuestro modelo térmico de flujos de energía aplicado a partículas con superficies lambertianas, baja inercia térmica y baja rotación permite la modelación de temperaturas de brillo como un cuerpo negro.
- Los albedos obtenidos de este estudio de los diferentes anillos, en comparación con los valores publicados, cambiaron poco para el anillo C ($A_C = 0.35$), para la División de Cassini que ajusta correctamente ($A_{CD} = 0.5$) con el valor seleccionado, en contraste para los anillos A ($A_A = 0.75$) y B ($A_B = 0.8$) cambiaron un aproximado de $\sim 30\%$. Los microimpactos son más frecuentes en regiones dinámicas renovando la superficie de las partículas y evitando la contaminación rocosa, estarán en relación directa a un alto albedo.
- La herramienta desarrollada en esta tesis nos puede permitir analizar los datos observacionales en una amplia gama de geometrías como regiones específicas. Una vez definido el alcance del método y posibles mejoras es posible plantear trabajos futuros.

Capítulo 10

Apéndice

Los resultados preliminares de este trabajo fueron presentados en formato de póster en el congreso American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting del año 2016 con sede en San Francisco, E.E.U.U. El póster esta en la Figura 10.1.

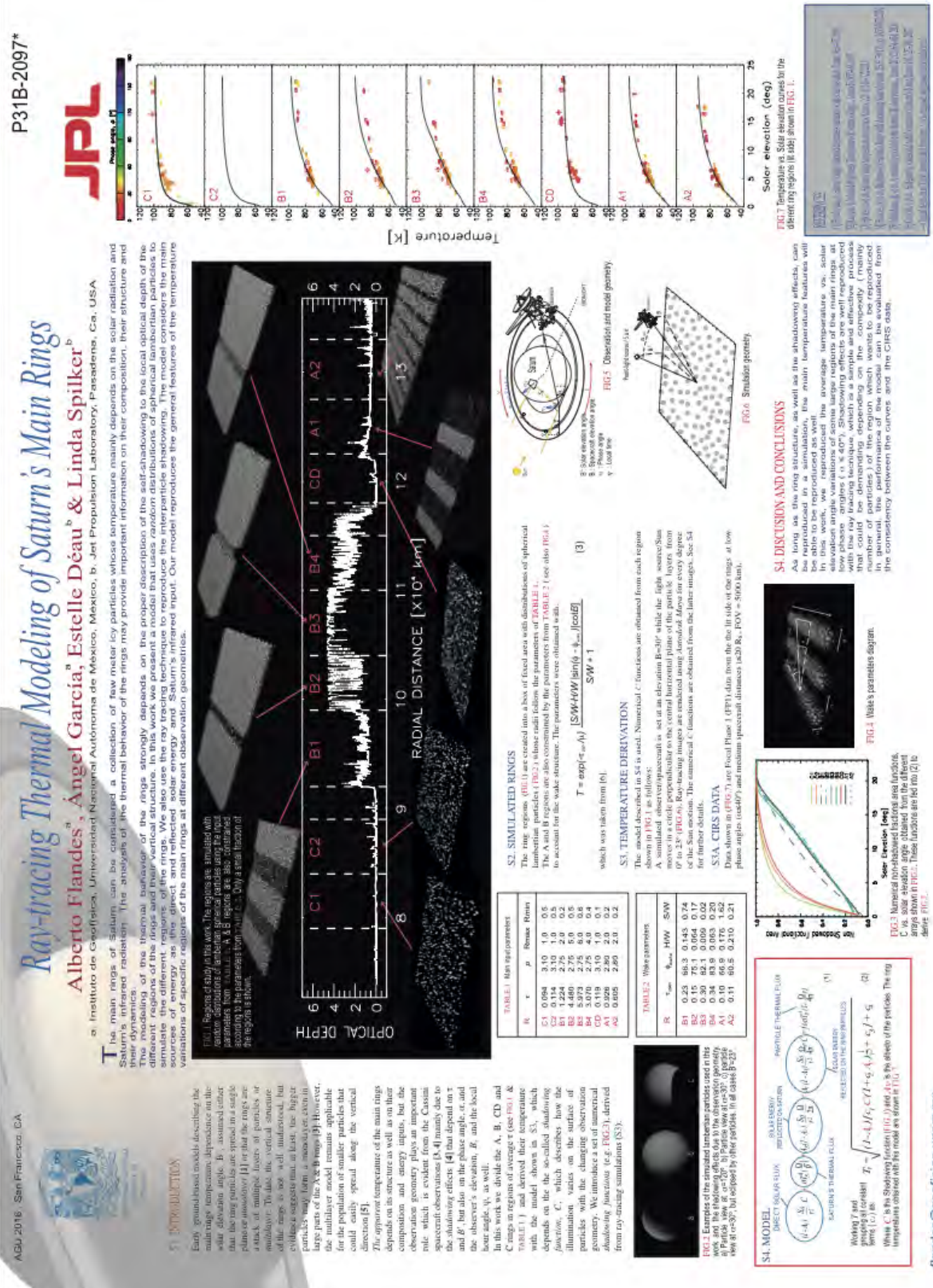


Figura 10.1: Póster presentado en el congreso AGU 2016.

Bibliografía

- Altobelli, N., Spilker, L., Pilorz, S., Brooks, S., Edgington, S., Wallis, B., and Flasar, M. (2007). C ring fine structures revealed in the thermal infrared. *Icarus*, 191:691–701.
- Atreya, S. K. (1986). *Atmospheres and Ionospheres of the Outer Planets and their Satellites*. Springer.
- Canup, R. M. (2010). Origin of Saturn’s rings and inner moons by mass removal from a lost Titan-sized satellite. *Nature*, 468:943–946.
- Colwell, J. E., Esposito, L. W., and Sremcevic, M. (2006). Self-gravity wakes in Saturn’s A ring measured by stellar occultations from Cassini. *Geophysical Research Letters*, 33:L07201.
- Colwell, J. E., Esposito, L. W., Sremcevic, M., Stewart, G. R., and McClintock, W. E. (2007). Self-gravity wakes and radial structure of Saturn’s B ring. *Icarus*, 190:127–144.
- Cuzzi, J. N., Burns, J. A., Durisen, R. H., and Hamill, P. M. (1979). The vertical structure and thickness of Saturn’s rings. *Nature*, 281:202–204.
- Daisaka, H., Tanaka, H., and Ida, S. (2001). Viscosity in a Dense Planetary Ring with Self-Gravitating Particles. *Icarus*, 154:296–312.
- Dougherty, M., Esposito, L., and Krimigis, S. (2009). *Saturn from Cassini Huygens*. Springer Science & Business Media.
- Esposito, L. W. (2014). Studies of planetary rings. In *Planetary Rings*. Cambridge University Press, second edition. Cambridge Books Online.
- Ferrari, C., Galdemard, P., Lagage, P. O., Pantin, E., and Quoirin, C. (2005). Imaging Saturn’s rings with CAMIRAS: thermal inertia of B and C rings. *Astronomy and Astrophysics*, 441:379–389.
- Flandes, A. (2012). Luz y sombra en los anillos de Saturno. *¿Cómo ves?*, 158:10–14.
- Flandes, A., Spilker, L., Morishima, R., Pilorz, S., Leyrat, C., Altobelli, N., Brooks, S., and Edgington, S. G. (2010). Brightness of Saturn’s rings with decreasing solar elevation. *Planetary Space Science*, 58:1758–1765.

- Flasar, F. M., Kunde, V. G., Abbas, M. M., Achterberg, R. K., Ade, P., Barucci, A., B'ezard, B., Bjoraker, G. L., Brasunas, J. C., Calcutt, S., Carlson, R., C'esarsky, C. J., Conrath, B. J., Coradini, A., Courtin, R., Coustenis, A., Edberg, S., Edgington, S., Ferrari, C., Fouchet, T., Gautier, D., Gierasch, P. J., Grossman, K., Irwin, P., Jennings, D. E., Lellouch, E., Mamoutkine, A. A., Marten, A., Meyer, J. P., Nixon, C. A., Orton, G. S., Owen, T. C., Pearl, J. C., Prang'e, R., Raulin, F., Read, P. L., Romani, P. N., Samuelson, R. E., Segura, M. E., SHOWALTER, M. R., Simon-Miller, A. A., Smith, M. D., Spencer, J. R., and Spilker, L. J. (2004). Exploring the saturn system in the thermal infrared: The composite infrared spectrometer. *Space Science Reviews*, 115(1):169–297.
- Miner, E., Wessen, R., and Cuzzi, J. (2005). *Planetary Ring Systems*. Praxis.
- Newman, M. E. J. (2005). Power laws, Pareto distributions and Zipf's law. *Contemporary Physics*, 46:323–351.
- Rajpoot, H. (2014). *Advanced Geometry*. Harish Chandra Rajpoot.
- Salo, H. (1992). Numerical simulations of dense collisional systems. II - Extended distribution of particle sizes. *Icarus*, 96:85–106.
- Salo, H. (1995). Simulations of dense planetary rings. III. Self-gravitating identical particles. *Icarus*, 117:287–312.
- Salo, H. and Karjalainen, R. (2003). Photometric modeling of saturn's rings: I. monte carlo method and the effect of nonzero volume filling factor. *Icarus*, 164(2):428–460.
- Tipler, P. A. and Llewellyn, R. A. (1987). *Modern Physics*. Worth Publishers.
- Wisdom, J. and Tremaine, S. (1988). Local simulations of planetary rings. *Astronomical Journal*, 95:925–940.