

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
CIENCIA Y TECNOLOGÍA ESPACIAL**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***CARACTERIZACIÓN DE ONDAS DE GRAVEDAD DE
JÚPITER CON IMÁGENES DEL TELESCOPIO
ESPACIAL HUBBLE***

Estudiante	<i>Crespo Iglesias, David</i>
Director/Directora	<i>Barrado Izagirre, Naiara</i>
Departamento	Física Aplicada I
Curso académico	<i>2020/2021</i>

Bilbao, 10, Septiembre, 2021

Resumen // Summary // Laburpena

Existe en Júpiter un fenómeno atmosférico llamado onda de gravedad, el cual puede ser apreciado a diferentes longitudes de onda. Estas ondas han sido estudiadas previamente mediante imágenes de la *Voyager* en 1986 por Flasar y Gierasch [1], de la misión *Galileo* en 2009 por J. Arregi [2] o, más recientemente, de la misión *JUNO* en 2018 por Sánchez-Lavega [3]. Además, estas pueden ser captadas desde la órbita de la Tierra por el Telescopio Espacial Hubble (HST), como muestra Simon en 2018 [4]. Por tanto, este trabajo busca caracterizar ondas de gravedad medidas con anterioridad y, posteriormente, buscar y analizar nuevas ondas que no hayan sido caracterizadas. Las imágenes usadas para este trabajo fueron capturadas por la cámara Wide Field Camera 3 del Telescopio Espacial Hubble.

Jupiterren badago grabitate uhinak izeneko fenomeno atmosferiko bat, uhin luzeera ezberdineko irudietan ikusgarria izan daitekeena. Uhin horiek aldeaz aurretik aztertutako izan dira misio ezberdineko irudiak erabiliz; besteak beste, *Voyager*-ak 1986an hartutako irudiekin Flasar eta Gierasch-ek aztertutako [1], *Galileo* misioaren 2009koak J. Arregi [2] edo, duela gutxi, 2018an Sánchez-Lavega egindako *JUNO* misiotik lortutako irudiekin [3]. Gainera, hauek ere Lurraren orbitatik behatu daitezke Hubble Espazio Teleskopioa (HST) erabiliz, Simon et al. 2018en [4] erakusten duten bezala. Hori dela eta, lehenago neurtutako grabitate uhinak karakterizatu nahi ditugu lan honetan eta, horrez gain, karakterizatu gabeko uhin berriak bilatu eta aztertu. Lan honetarako erabili diren irudiak Hubble Espazio Teleskopioaren Wide Field Camera 3-k hartutakoan izan dira.

There is an atmospheric phenomenon in Jupiter known as gravitational waves. Said phenomenon can be perceived through different wavelengths. This kind of waves have been studied through images pictured by the *Voyager* in 1986 by Flasar and Gierasch [1], mission *Galileo* in 2009 by J. Arregi [2], and recently, through the mission *JUNO* in 2018, carried out by Sánchez-Lavega [3]. Wavelengths may as well be measured from Earth through the Hubble Space Telescope (HST), in a study by Simon in 2018 [4]. Therefore, the aim of this project is to categorize wavelengths which have been previously-measured, as well as to research and analyze new waves that have not been set into a category yet. Images used in this project were captured by a Wide Field Camera 3, using a Hubble Space Telescope.

Palabras clave: Júpiter, atmósferas planetarias, dinámica atmosférica, ondas de gravedad, planisferio, perfil de vientos, Hubble, HST

Índice general

1. Fundamentos Teóricos	2
1.1. Introducción a las Atmósferas Planetarias	2
1.2. Dinámica Atmosférica	5
1.2.1. Vientos	5
1.2.2. Ondas	6
2. Observaciones	9
2.1. Onda 1	11
2.2. Onda 2	12
3. Metodología	15
3.1. Navegación de imágenes	15
3.2. Toma de medidas	18
3.3. Análisis de las medidas	19
3.4. Obtención de resultados	20
4. Caracterización y Resultados	22
4.1. Caracterización	22
4.1.1. Onda 1	22
4.1.2. Onda 2	23
4.2. Resultados y Comparación	24
4.2.1. Onda 1	24
4.2.2. Onda 2	26
A. Medidas de las imágenes	29
Bibliografía	33

Índice de figuras

1.1. Esquema donde se representa la diferencia entre la latitud planetográfica y la latitud planetocéntrica.	3
2.1. Imágenes procesadas donde se muestra la segunda onda de gravedad que se va a analizar.	10
2.2. Planisferio de la figura 2.1a centrado en la onda donde se muestran las cretas del propio paquete de onda. La figura está definida desde la esquina izquierda entre la latitudes 6° y la 23° ; y desde la longitud 69° a la 0°	11
2.3. Planisferio de la figura ?? centrado en la onda donde se muestran las cretas del propio paquete de onda. La figura está definida desde la esquina izquierda entre la latitudes 3° y la 21° ; y desde la longitud 65° a la 357°	12
2.4. Planisferio de la figura 2.6a centrado en la onda donde se muestran las cretas del propio paquete de onda. La figura está definida desde la esquina izquierda entre la latitudes -18° y la -4° ; y desde la longitud 353° a la 312°	12
2.5. Planisferio de la figura 2.6b centrado en la onda donde se muestran las cretas del propio paquete de onda. La figura está definida desde la esquina izquierda entre la latitudes -18° y la -4° ; y desde la longitud 353° a la 312°	13
2.6. Imágenes procesadas donde se muestra la segunda onda de gravedad que se va a analizar.	14
3.1. Imagen del programa L.A.I.A. donde se ve una imagen ejemplo de Júpiter junto a una tabla a la derecha donde se muestra la información necesaria para la navegación de la propia imagen.	16
3.2. Imagen del programa L.A.I.A. donde la imagen ejemplo ya ha sido rotada y se ha aplicado el espejo.	16

3.3. Imagen del programa L.A.I.A. donde se ve la imagen ejemplo de Júpiter con la inversión de grises y se aprecian tanto la recta vertical como la horizontal que sirven de guía para definir los puntos cardinales. Además, se puede apreciar el menú donde se definen los puntos cardinales.	17
3.4. Imagen del programa L.A.I.A. donde se ve una imagen ejemplo de Júpiter correctamente navegada, ya que se puede apreciar un borde verde en torno al planeta, que define la periferia del mismo.	18
3.5. Ampliación de la figura 2.1b donde se muestran las medidas tanto del ancho de la onda (puntos rojos) como de la longitud de la misma (puntos azules).	18
3.6. Gráficas extraídas de [5] donde se muestran los vientos zonales de Júpiter en 2016. (a) Vientos zonales medidos en 2016 por el HST (azul), por diversos observatorios terrestres (magenta) y en 2000 usando imágenes del sobrevuelo de Cassini a Júpiter (negro) con su barra de error (gris). (b) Desviación estándar de los datos de 2016. (c) Número de medidas por segmento de latitud de 0.1° . (d) Diferencias entre las mediciones de 2016 (negro) donde se aprecia un error general de $\pm 3,7\text{m/s}$ (sombreado verde). Las líneas rojas representan la desviación estándar de la diferencia de mediciones.	21

Índice de tablas

1.1. Tabla adaptada de Sánchez-Lavega [6], de donde se muestran los diferentes valores de c_s en las diferentes atmósferas planetarias dependiendo de la temperatura y presión.	7
2.1. Imágenes utilizadas en este proyecto	9
3.1. En la tabla se muestran la longitud y la latitud, tanto planetocéntrica como planetográfica, de los diferentes puntos medidos de la onda 1 que se muestra en la figura 3.5.	19
4.1. Caracterización onda 1. Figura 2.1a	22
4.2. Caracterización media de la onda 1.	23
4.3. Caracterización onda 1. Figura 2.1b	23
4.4. Caracterización onda 2. Figura 2.6a	23
4.5. Caracterización onda 2. Figura 2.6b	24
4.6. Caracterización onda 2. Figura 2.6b	24
4.7. Resultados obtenidos de la onda 1.	24
4.8. Resultados onda 1.	26
A.1. Medidas de la imagen 2.1a	29
A.2. Medidas de la imagen 2.1b	29
A.3. Medidas de la imagen 2.6a	30
A.4. Medidas de la imagen 2.6b	30

Introducción y objetivos

Gracias al avance en la exploración espacial, se han podido llegar a conocer, no solamente las atmósferas de nuestros vecinos planetarios Marte y Venus, sino que, hoy en día, gracias a técnicas espectroscópicas usadas en periodos de tránsito, se puede conocer la composición atmosférica de planetas extrasolares encontrados a más cientos o miles de años luz de distancia. Aunque bien es cierto que el estudio de atmósferas en exoplanetas es un campo en desarrollo, se ha conocido un amplio abanico de posibilidades que pueden llegar a distar en gran medida con lo encontrado en el sistema solar. Aun así, dentro de este, sigue existiendo una amplia variedad de tipos de atmósferas encontradas no solamente en planetas, sino también en satélites, como puede ser el caso de Titán o IO.

Dentro del estudio de la atmósferas planetarias, uno podría basar su investigación en la medición de vientos a diferentes presiones o en el análisis de las diversas tormentas que se puedan encontrar en ella. En cambio, existen otros fenómenos atmosféricos, entre ellos se encuentran las ondas de gravedad, en las cuales se centrará este trabajo.

El objetivo principal será la búsqueda y posterior análisis de este tipo de ondas en la atmósfera de Júpiter. Para ello, se recurrirá a las imágenes obtenidas por el telescopio espacial Hubble (HST, del inglés *Hubble Space Telescope*) durante los últimos años. Así pues, una vez hayan sido localizadas y medidas estas ondas de gravedad, se calcularán sus principales características. Finalmente, si estas ya han sido analizadas previamente por un grupo de investigación, se procederá a contrastar los resultados obtenidos para así poder llegar a una conclusión final.

Capítulo 1

Fundamentos Teóricos

En este primer capítulo se buscará introducir los conceptos físicos necesarios para la realización del trabajo. Para ello, se explicará brevemente los fundamentos básicos de caracterización de las atmósferas planetarias basándose en diferentes factores para su clasificación como la densidad o la propia composición atmosférica. Posteriormente, se analizará la dinámica atmosférica centrándose en la circulación general de los vientos para finalizar con los diferentes tipos de ondas e inestabilidades atmosféricas.

1.1. Introducción a las Atmósferas Planetarias

Existen un gran número de factores en una atmósfera por los cuales uno las puede clasificar y caracterizar, en cambio, no todas tienen la misma importancia. Un método ampliamente usado, es la clasificación de las atmósferas del sistema solar según su presión superficial P_s . Esta presión se define como el peso de una columna de masa por unidad de superficie, es decir, $P_s = Mg/S$. Gracias a esto, se pueden diferenciar así tres grupos: atmósferas delgadas o tenues, atmósferas intermedias y atmósferas masivas y profundas[7].

Dentro del primer grupo, se encuentran aquellos cuerpos con poca gravedad que han sido incapaces de conservar su atmósfera, llegando a obtener una delgada capa atmosférica denominada exosfera. La presión superficial de estas atmósferas es menor de 10^{-5} bar. Dentro de este grupo se encuentran Mercurio, la Luna, Plutón y los satélites Galileanos entre otros.

En el grupo de atmósferas intermedias, se puede encontrar aquellas con presiones de entre $7 \cdot 10^{-3}$ y 90 bar; donde de incluirían Venus, la Tierra, Marte y Titán.

Por último, se encuentran las atmósferas de los gigantes gaseosos como Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno; cuyas atmósferas se denominan masivas y profundas debido a su gran presión P_s , la cual se

encuentra en el rango de los kbar a los Mbar.

Así pues, existen diferentes factores que caracterizan cada atmósfera, de forma que atmósferas similares pueden verse alteradas por factores externos, como puede ser el viento solar o las fuerzas de marea. Otro factor a tener en cuenta es la propia rotación del planeta sobre su eje y la inclinación del mismo. Como consecuencia de esta rotación, el planeta sufre un achatamiento, definido por la elipticidad o por el factor de achatamiento f_{EP} , lo que hará que la gravedad del planeta no sea homogénea y por tanto, no existirá la misma P_s en todos los puntos del mismo.

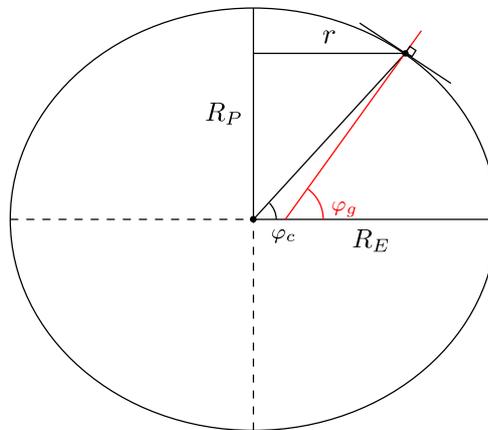


Figura 1.1: Esquema donde se representa la diferencia entre la latitud planetográfica y la latitud planetocéntrica.

Así mismo, este achatamiento será clave a la hora de definir la posición geográfica de un detalle dentro de una atmósfera planetaria, ya que tendremos dos posibilidades para medir su latitud. En primer lugar tendríamos la latitud planetocéntrica (φ_c en la figura 1.1) definida como el ángulo que forma con el ecuador una línea recta que vaya desde el centro del planeta hasta un punto P. Por otro lado tenemos la latitud planetográfica (φ_g en la figura 1.1), que se trata del ángulo formado por el ecuador y la línea perpendicular a la tangente del planeta que pasa por un punto P. Así pues, conociendo el radio del planeta en el ecuador R_E y el radio del polo R_P , podemos definir matemáticamente el factor de achatamiento como:

$$f_{EP} = \frac{R_E - R_P}{R_P} \quad (1.1)$$

Gracias a este factor, podemos definir el radio r de una circunferencia correspondiente a una latitud concreta como

$$r \simeq R_E (1 - f \sin^2(\varphi_c)) \quad (1.2)$$

Por otro lado, existen factores determinantes en la formación y evolución de una atmósfera, como pueden ser la formación del planeta y su posición en el disco protoplanetario; o la actividad geológica. Un factor de gran importancia en la conservación de una atmósfera es el campo magnético generado por el mismo cuerpo, ya que, éste crea una magnetosfera que mantendrá la atmósfera protegida frente a los vientos solares. Un claro ejemplo de ello podría ser Marte, el cual, tras perder su campo magnético, ha ido perdiendo progresivamente su atmósfera.

Cuando se habla de una atmósfera planetaria cuyo espesor es mucho menor que el radio del planeta, se dice que esta se encuentra en equilibrio hidrostático. Esto quiere decir que ha pasado suficiente tiempo para que las fuerzas del gradiente vertical de presión y la gravedad estén en equilibrio, lo que implica que sobre el aire la fuerza neta vertical sea nula[8]. Se puede expresar matemáticamente este equilibrio como

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g \quad (1.3)$$

donde $\frac{dP}{dz}$ es la variación de la presión con la coordenada vertical z , ρ la densidad media del fluido y g la gravedad.

De esta forma, si se aproxima una atmósfera como un gas ideal, se puede introducir la escala de altura H , definida como la altitud para la cual la presión atmosférica disminuye en un factor e , expresada como

$$H(z) = \frac{R_g}{\mu(z)} \frac{T(z)}{g(z)} \quad (1.4)$$

donde R_g es la constante universal de los gases ideales y T es la temperatura, μ la densidad media del fluido y g la gravedad dependiente de la altura z .

Así pues, debido a que la atmósfera se encuentra en equilibrio hidrostático hace que la densidad del aire disminuya a medida que aumenta la temperatura, en otras palabras, que el aire más ligero se encontrará sobre el aire más pesado. Esto, hace que exista una estabilidad con respecto a los desplazamientos verticales, denominada estabilidad vertical o estabilidad estática[9], expresada por S_T .

$$S_T = \frac{dT}{dz} + \frac{g}{C_p} \quad (1.5)$$

donde C_p es la capacidad calorífica del gas a presión constante.

Gracias a esto, se puede conocer la estabilidad del fluido a los desplazamientos verticales debido a la convección. Esta estabilidad puede ser expresada por la frecuencia a la que oscila una sección con desplazamiento vertical dentro de la estabilidad estática. Esta frecuencia se denomina frecuencia de flotabilidad o frecuencia de Brunt–Väisälä, N_B , cuyo cuadrado representa la rigidez del medio y viene expresado por

$$N_B^2 = \frac{g}{T} S_T \quad (1.6)$$

El signo de este valor será de gran utilidad ya que un $N_B^2 > 0$ implica que la fuerza de flotabilidad se desplaza en dirección opuesta a la sección de desplazamiento; y lo hace describiendo oscilaciones de frecuencia N_B . En cambio, si $N_B^2 < 0$, tanto la fuerza de flotabilidad como la sección desplazada se mueven en la misma dirección, lo que hace que el desplazamiento sea amortiguado[10].

1.2. Dinámica Atmosférica

En cambio, sabemos que las atmósferas planetarias no son sistemas perfectamente estables, por lo que existen ciertos fenómenos de circulación atmosférica. Estos fenómenos pueden implicar movimientos de masas, como el caso de los vientos, o solamente propagación de energía, como lo son las ondas.

1.2.1. Vientos

El viento en la atmósfera implica el movimiento de masas de gas y puede ser causado por la fuerza que ejerce el gradiente de presión, el cual determinará tanto su velocidad como su dirección. Además, existen otros factores que pueden cambiar estas características, como los son la velocidad de rotación del planeta, manifestada en las fuerzas de Coriolis; o el arrastre turbulento (del inglés "*turbulent drag*"). Esta relación de fuerzas y aceleraciones vienen descritas por la segunda ley del movimiento de Newton para un fluido (ecuación de *Navier-Stokes*) [11] [12].

Si todas las fuerzas implicadas se encuentran en equilibrio, los vientos serán constantes. En cambio, si solamente se manifiestan las fuerzas del gradiente de presión y Coriolis en el balance, se alcanza

el equilibrio geostrófico. Por tanto, retomando lo descrito en el apartado anterior (sección 1.1), obtendremos, para latitudes medias, equilibrio hidrostático en el eje vertical y geostrófico en el horizontal.

1.2.2. Ondas

En cambio, no todos los movimientos atmosféricos llevan consigo el transporte de masa. Un claro ejemplo de esto son las ondas, las cuales pueden ser realmente variadas y manifestarse en la morfología de las nubes o en factores como la temperatura, la presión o la densidad. Estas, pueden ser clasificadas de diferentes maneras basándose en sus características como su longitud de onda, amplitud y dirección de propagación entre otros. Aun así, todas serán tratadas como ondas armónicas sinusoidales, las cuales obedecen a la siguiente expresión:

$$\Psi(x, y, z, t) = \Psi_0 \cdot \exp[i(kx + ly + mz - \omega t)] \quad (1.7)$$

donde Ψ_0 es la amplitud y ω la frecuencia angular.

Como se trata de la expresión general de una onda tridimensional, esta tendrá 3 longitudes de onda diferentes, L_x , L_y y L_z ; tal que, a cada una de ellas le corresponde un número de onda, definido como

$$k = \frac{2\pi}{L_x}; \quad l = \frac{2\pi}{L_y}; \quad m = \frac{2\pi}{L_z} \quad (1.8)$$

A continuación se pondrá la vista en las ondas más interesantes para objeto de estudio, siendo siempre tratadas bajo el contexto de la teoría lineal[6].

Ondas acústicas y de Rossby

Las primeras ondas a tratar son las ondas acústicas o sonoras, comúnmente asociadas a la presencia de un sonido. Aunque se conoce que la velocidad del sonido en la Tierra es 340m/s , esta velocidad no es universal, ya que esta no solamente necesita un medio para propagarse, sino que, la velocidad a la que se mueva el sonido, v_s , dependerá de la composición y características del medio. Así pues, podemos definir la velocidad de esta onda c_w como

$$c_w = \bar{u} \pm c_s \quad (1.9)$$

tal que \bar{u} es la velocidad media de los vientos zonales y c_s es la velocidad del sonido relativa al flujo de fondo[6] definida por

$$c_s = \pm (\gamma R_g^* T)^{1/2} \quad (1.10)$$

donde γ es el coeficiente de dilatación adiabática.

Velocidad del sonido en atmósferas planetarias				
Planeta	Altura	T (K)	P (bar)	c_s (m s ⁻¹)
Venus	Superficie	734	92	420
	z = 60km (nubes)	250	0.22	248
Tierra	Superficie	285	1	340
	z = 10km	217	0.1	295
Marte	Superficie	240	0.007	229
	z = 80km	140	0.0001	185
Titan	Superficie	94	1.5	194
	z = 28km	73	0.3	170
Júpiter	Nubes de amoniaco	127	0.4	815
	Nubes de agua	270	5	1200
Saturno	Nubes de amoniaco	107	0.5	763
Urano	Nubes de metano	85	1.4	655
Neptuno	Nubes de metano	81	1.4	640
HD 209458B	—	1350	0.5	2500

Tabla 1.1: Tabla adaptada de Sánchez-Lavega [6], de donde se muestran los diferentes valores de c_s en las diferentes atmósferas planetarias dependiendo de la temperatura y presión.

Por otro lado, están las ondas de Rossby u ondas planetarias, las cuales se forman en fluidos en rotación y son de baja frecuencia. Estas pueden ser barotrópicas, es decir, que no varían en la vertical y tienen una velocidad de propagación rápida. Asimismo, estas ondas pueden manifestarse en atmósferas u océanos, y son influenciadas por la fuerza de Coriolis, cuya variación meridional β viene definida por

$$\beta = \frac{df}{dy} = \frac{2\Omega \cos(\varphi)}{R_{Plt}} \quad (1.11)$$

donde Ω es la velocidad angular de rotación del planeta, R_{Plt} el radio del planeta y φ la latitud a la que se encuentra la onda [13]. Este parametro β es conocido como el parametro de Rossby, de tal forma que si tiene un valor nulo, no existirán este tipo de ondas.

Así pues, la velocidad de fase de una onda de Rossby, c_x , relativa al flujo de fondo \bar{u} , viene dada por la siguiente expresión

$$c_x - \bar{u} = \frac{\beta}{k^2 + l^2} \quad (1.12)$$

donde k y l son los números de onda definidos en la ecuación 1.8.

Este tipo de ondas son realmente comunes en los planetas, pudiendo encontrarlas en Júpiter, Saturno e incluso en la propia Tierra, donde han sido manifestadas en océanos así como en la atmósfera terrestre.

Ondas de gravedad

Una onda de gravedad es aquella que tiene la fuerza de gravedad como fuerza restauradora. Para que este tipo de onda atmosférica sea posible, la atmósfera debe estar estratificada de manera estable, es decir, $N_B^2 > 0$ [14]; de tal forma que una sección del fluido se desplace verticalmente y esto produzca oscilaciones de flotabilidad[15]. En otras palabras, estas oscilaciones son debidas a la fuerza de flotabilidad y la fuerza gravitatoria del planeta. Estas ondas de gravedad pueden ser ondas de gravedad puras (GW, de las siglas en inglés *Gravity Waves*) o pueden ser ondas de inercia-gravedad (IGW, siglas de *Inertio-Gravity Waves*)[3]. Por otro lado, tenemos las ondas de mesoscala, que son aquellas ondas de gravedad cuya longitud de onda en el eje horizontal es mucho más pequeña que el radio del planeta, es decir $L_x \ll R_p$.

De esta forma, sabemos que la relación de dispersión de la onda de gravedad, es decir, la velocidad de fase de la onda, c_x , relativa al flujo de fondo \bar{u} , viene dada por la siguiente expresión

$$c_x - \bar{u} = \pm \frac{N_B}{\sqrt{k^2 + m^2 + (1/4H^2)}} \quad (1.13)$$

donde si la longitud de onda vertical es $\ll 4\pi H$, el término $1/4H^2$ puede ser despreciado [16] [17].

Así pues, el valor de m^2 será de gran importancia para estas ondas, ya que si $m^2 < 0$ eso implicaría que las IGW y la WG no se propagarían verticalmente.

Capítulo 2

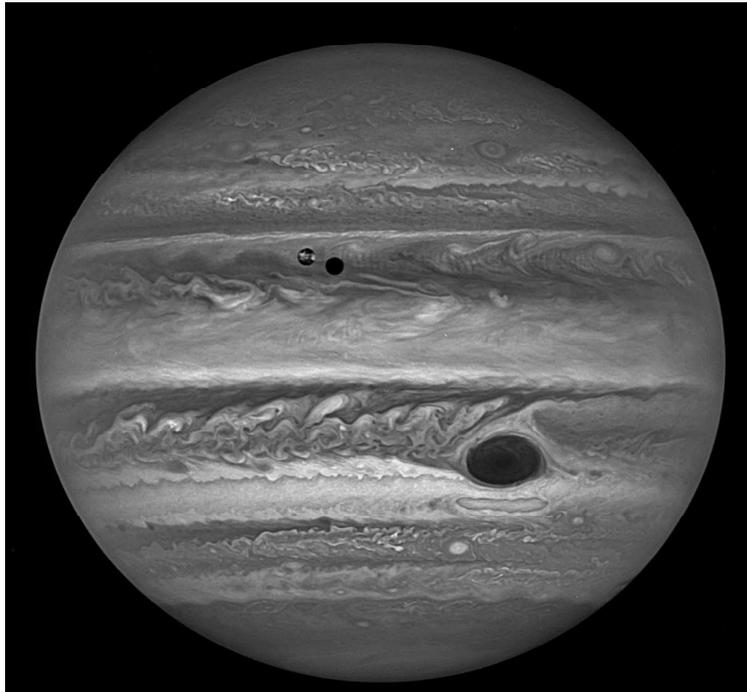
Observaciones

A continuación, en este capítulo se expondrán tanto las imágenes como las características que se encuentran en ellas, las cuales serán usadas en capítulos posteriores. Allí serán analizadas y se llevará a cabo la toma de medidas. El objetivo principal de este capítulo pues, será la familiarización con las imágenes para su posterior tratamiento.

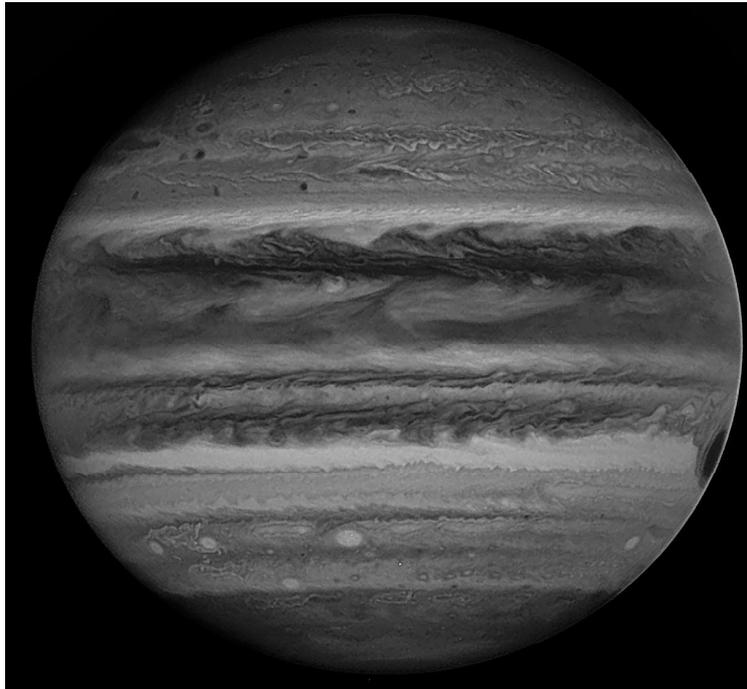
Todas las imágenes usadas han sido captadas por el HST. Este, se trata de un telescopio de tipo reflector cuyo espejo primario posee un diámetro de 2,4m, junto a un espejo secundario de 0,3m[18]. Asimismo, además de observar en el visible e infrarrojo cercano, puede detectar a longitudes de onda del ultravioleta, al contrario que los telescopios terrestres debido al filtro natural que es la atmósfera, lo cual, es realmente interesante. Este telescopio posee tres cámaras, un espectrógrafo y un sensor de orientación, aunque en este trabajo solo usaremos la cámara de gran angular Wide Field Camera 3 [19].

Fecha	Imagen	Filtro
2017/04/03 04:29:03	ID9911BQQ	395 nm
2017/04/03 14:20:11	ID9916FHQ	343 nm
2019/06/26 21:04:13	IDUY16P6Q	395 nm
2019/06/27 05:01:10	IDUY21S6Q	395 nm

Tabla 2.1: Imágenes utilizadas en este proyecto



(a) Imagen id9911bqq. Captada el 03/04/2017 a las 04:29:03 con filtro 395nm[20]



(b) Imagen id9916fhq. Captada el 03/04/2017 a las 14:20:11 con filtro 343nm[20]

Figura 2.1: Imágenes procesadas donde se muestra la segunda onda de gravedad que se va a analizar.

2.1. Onda 1

La primera onda de gravedad de este estudio se trata de una onda de mesoescala encontrada a longitudes de onda visibles. Su fecha de captación data del 3 de Abril del año 2017. Una vez encontrada, se han tomado 2 imágenes del HST (figura 2.1) con una separación de una rotación de Júpiter. Esto se hace para poder observar el mismo fenómeno atmosférico unos 10hr después y así calcular con menor error los cambios de los detalles que se están analizando.

La primera imagen (véase 2.1a) fue tomada a las 04:29:03, y en ella se puede apreciar un paquete de ondas de gravedad a una latitud planetográfica de aproximadamente $16,5^\circ$. Esta imagen ha sido tomada con un filtro ultravioleta de $395nm$, pudiéndose ver la onda incluso a longitudes de onda visibles como $467nm$, $502nm$ y $631nm$, como en el visible; pero no siendo perceptible ni en filtro de metano de $889nm$ ni en ultravioleta lejano de $275nm$. Por otro lado, al tomar el número de crestas de la onda, mostradas en la figura 2.2, se pueden apreciar como la onda se divide a su vez en tres paquetes de ondas. Así pues, en este trabajo se analizarán estos paquetes de onda como uno solo, debido a que parecen comportarse como un paquete único.

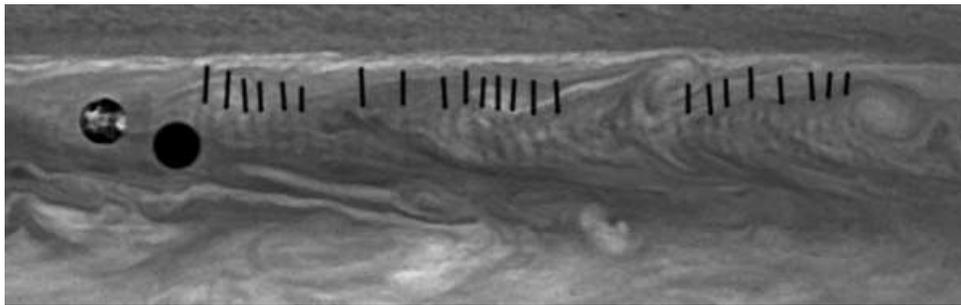


Figura 2.2: Planisferio de la figura 2.1a centrado en la onda donde se muestran las crestas del propio paquete de onda. La figura está definida desde la esquina izquierda entre las latitudes 6° y la 23° ; y desde la longitud 69° a la 0° .

En la segunda imagen (véase 2.1a) se puede apreciar la misma onda a una latitud similar tras un periodo de rotación del planeta. Esta ha sido tomada en el mismo día a las 14:20:11, aunque en este caso ha sido tomada con un filtro de ultravioleta más profundo, de $343nm$; siendo la onda aún visible en el ultravioleta próximo y en el visible. Tomando una ampliación de la onda, imagen 2.3 con el objetivo de ilustrar con mayor claridad el número de crestas, se puede ver nuevamente los tres paquetes de onda anteriormente mencionados.

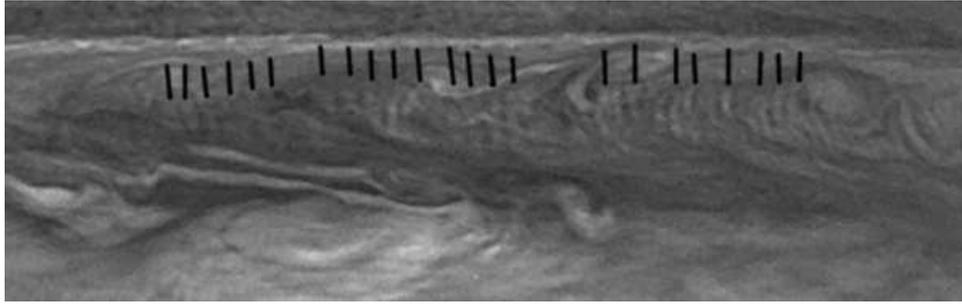


Figura 2.3: Planisferio de la figura ?? centrado en la onda donde se muestran las crestas del propio paquete de onda. La figura está definida desde la esquina izquierda entre la latitudes 3° y la 21° ; y desde la longitud 65° a la 357° .

2.2. Onda 2

Esta segunda onda de gravedad se captada el 27 de Junio del pasado 2019. Al igual que en la anterior onda, las dos imágenes separadas un ciclo (figura 2.6) fueron tomadas por el HST.

La hora a la cual se capturó la primera imagen (véase 2.6a), fueron las 09:56:28. Esta onda es de menor tamaño que la anterior vista y parece corresponderse con una onda de corta vida. Se puede apreciar a una latitud planetográfica de aproximadamente $11,8^\circ$. Esta imagen ha sido tomada con un filtro ultravioleta cercano de $395nm$, pudiéndose ver la onda incluso a longitudes de onda visibles como $467nm$, $502nm$ y $631nm$; en cambio, no parece ser apreciable para un filtro de metano de $889nm$. A continuación, figura 2.4, se pueden apreciar la imagen aumentada de la onda donde se indican las crestas de la misma.

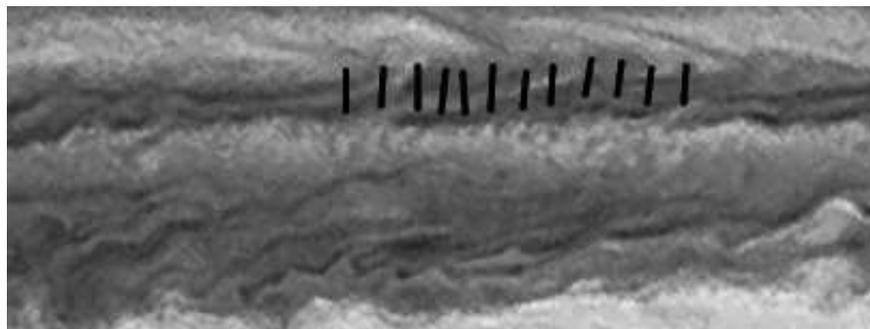


Figura 2.4: Planisferio de la figura 2.6a centrado en la onda donde se muestran las crestas del propio paquete de onda. La figura está definida desde la esquina izquierda entre la latitudes -18° y la -4° ; y desde la longitud 353° a la 312° .

Por otro lado, la segunda imagen (véase 2.6b) fue tomada a las 21:04:13, lo que hace que haya sido un periodo de tiempo entre imágenes superior a un ciclo de Júpiter. Esto se debe a la disponibilidad del HST, ya que este no puede estar captando imágenes continuas del gigante gaseoso. Aún así, es un periodo de tiempo razonable y puede ser usado sin mayor problema. Al igual que en el caso anterior, la imagen ha sido tomada con un filtro de $395nm$ y la latitud de la misma no parece variar en gran medida, por lo que el desplazamiento meridional parece ser nulo. Así pues, en la figura 2.5, se puede apreciar un aumento de la onda donde se marcan las crestas de la misma.

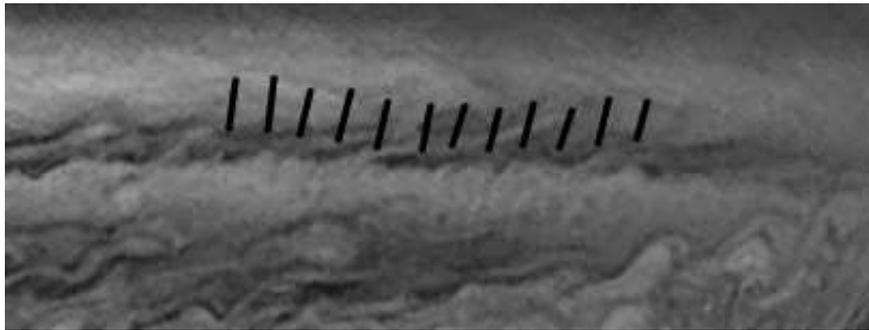
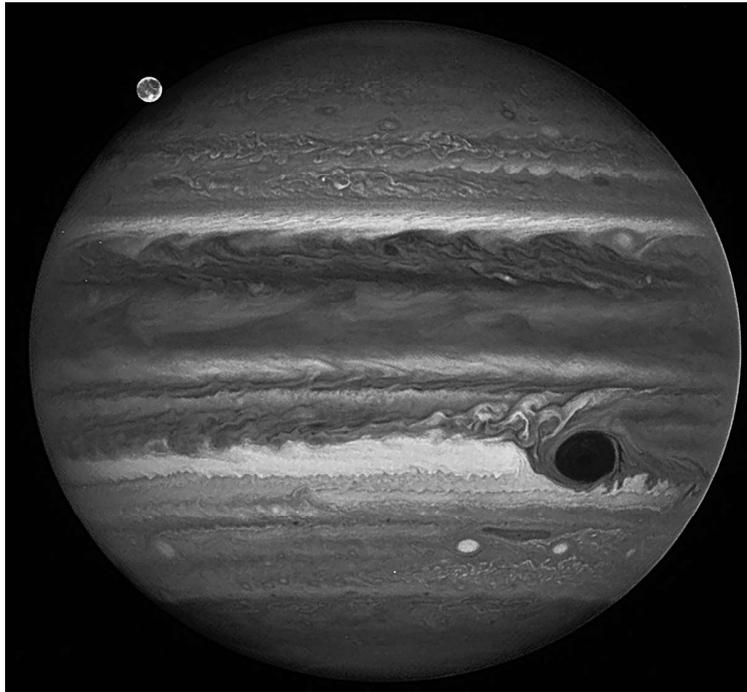
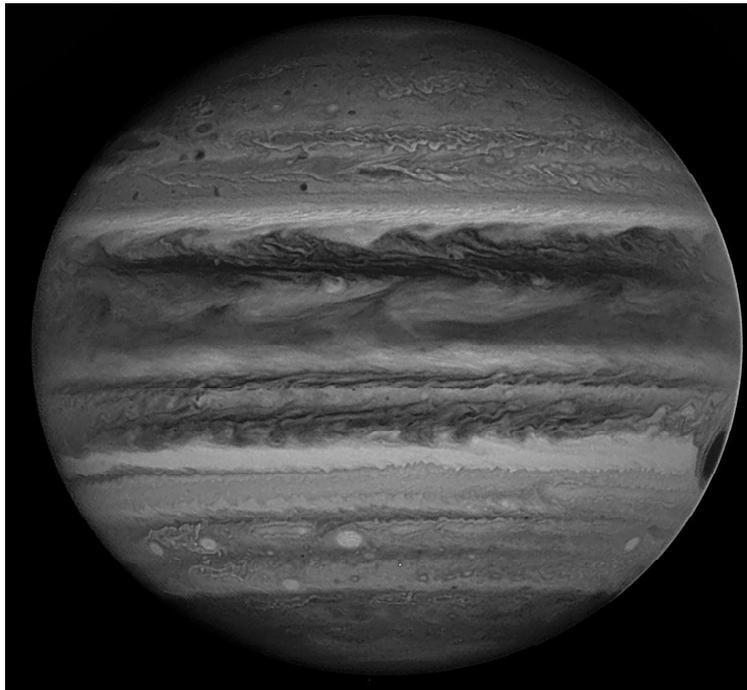


Figura 2.5: Planisferio de la figura 2.6b centrado en la onda donde se muestran las crestas del propio paquete de onda. La figura está definida desde la esquina izquierda entre las latitudes -18° y la -4° ; y desde la longitud 353° a la 312° .



(a) Imagen iduy10n6q. Captada el 27/06/2019 a las 09:56:28 filtro 395nm[20]



(b) Imagen iduy16p6q. Captada el 27/06/2019 a las 21:04:13 filtro 395nm[20]

Figura 2.6: Imágenes procesadas donde se muestra la segunda onda de gravedad que se va a analizar.

Capítulo 3

Metodología

En este capítulo se darán las bases para la toma de medidas y los pasos que se han de seguir para la obtención de resultados coherentes. Para facilitar la explicación se tomará de ejemplo la onda que se muestra en la imagen 2.1a. Antes de la toma de medidas de las ondas para su posterior análisis, se debe realizar una navegación adecuada de las imágenes. Para ello, se recurrirá al navegador de imágenes astronómicas L.A.I.A.(Laboratorio de Análisis de Imágenes Astronómicas)[21]. Mediante una serie de puntos que deberán ser proyectados en la imagen y por medio de la información incluida en la propia imagen, L.A.I.A. calculará la matriz de transformación y la aplicará a cada punto que se tome de la imagen, facilitando enormemente la labor de la toma de medidas. Posteriormente, se tomarán los datos y serán analizados con el objetivo de obtener información útil de ellos.

3.1. Navegación de imágenes

El primer paso recae en una correcta navegación de las imágenes espaciales. Esta requiere encontrar una matriz de transformación de coordenadas del espacio de la imagen al espacio de coordenadas del planeta, es decir, asignar a cada pixel perteneciente a la zona de interés un valor concreto de longitud y latitud.

Para realizar este proceso lo más exacto posible, lo primero será tomar la imagen original, la cual, ya debería tener consigo la información correspondiente, como por ejemplo la hora y fecha de la captura de la imagen o el tipo de objeto concreto que se analiza, es decir, si se habla de Júpiter, Saturno u otro astro. Se puede ver un ejemplo de estos datos en la figura 3.1.

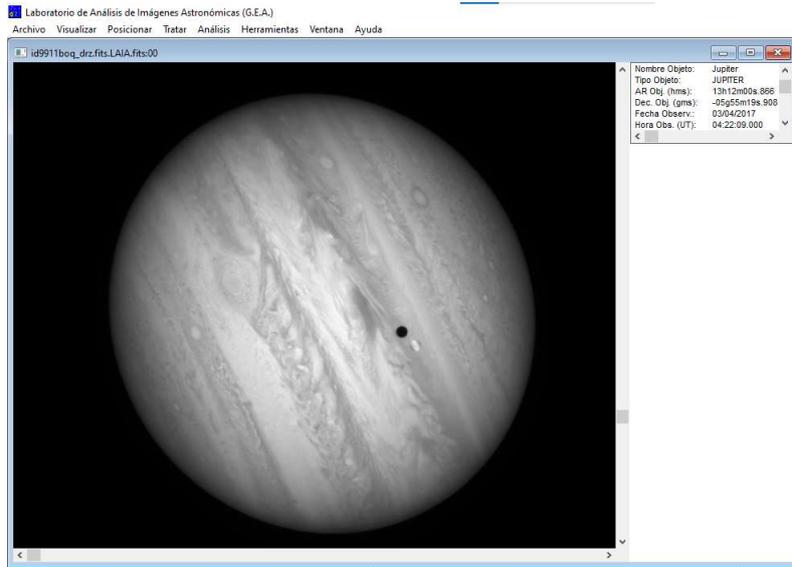


Figura 3.1: Imagen del programa L.A.I.A. donde se ve una imagen ejemplo de Júpiter junto a una tabla a la derecha donde se muestra la información necesaria para la navegación de la propia imagen.

Una vez comprobado esto, el primer paso será enderezar la imagen por medio de rotaciones. En el caso de Júpiter, este paso es relativamente sencillo, ya que se pueden usar las franjas de nubes como referencia. Una vez hecho esto, debido a que el HST es un telescopio de tipo reflector, la imagen está invertida, por tanto, se deberá aplicar un espejo horizontal. Tras este paso, se debería obtener algo similar a la figura 3.2

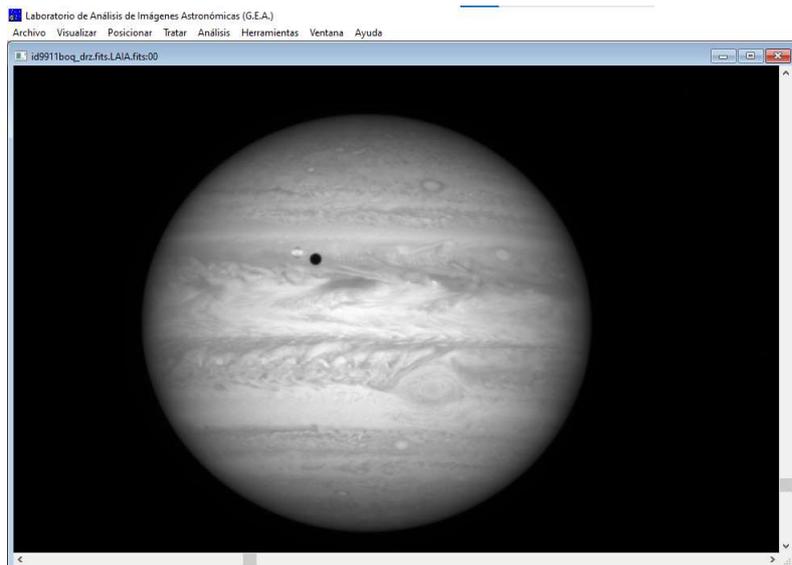


Figura 3.2: Imagen del programa L.A.I.A. donde la imagen ejemplo ya ha sido rotada y se ha aplicado el espejo.

El siguiente paso consiste en darle al programa ciertos puntos cardinales, lo cual, ayudará al programa a obtener la matriz de transformación. Por medio de la herramienta de análisis, se debe definir el norte del planeta. Una vez hecho, aparecerá una recta vertical que deberá cruzar el planeta de norte a sur, la cual servirá de guía para definir el sur. Tras eso, aparecerá una recta tangente a la anterior mencionada que cruzará el astro de este a oeste, la cual será utilizada como guía para definir el limbo del planeta. Este se define como el borde del cuerpo celeste visto por un observador situado en la Tierra. Así pues, con el objetivo de una mejor visualización del limbo, se aplicará la inversión de grises, tal y como se puede apreciar en la figura 3.3.

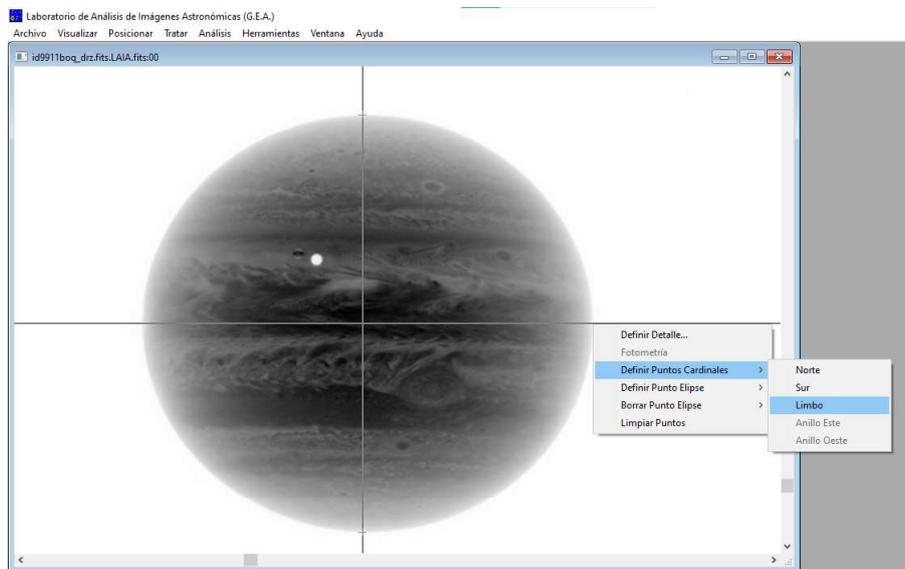


Figura 3.3: Imagen del programa L.A.I.A. donde se ve la imagen ejemplo de Júpiter con la inversión de grises y se aprecian tanto la recta vertical como la horizontal que sirven de guía para definir los puntos cardinales. Además, se puede apreciar el menú donde se definen los puntos cardinales.

Tras definir este último punto cardinal, ya habrá quedado definida la matriz de transformación y los límites del planeta, por tanto, ya se pueden invertir los grises nuevamente y se podrá comenzar la toma de medidas. En la figura 3.4 se puede ver un ejemplo final de cómo se vería una imagen de Júpiter correctamente navegada.

Por otro lado, L.A.I.A. incluye la opción de crear un planisferio con una imagen. Para esta opción solamente hace falta conocer tanto la longitud y latitud mínima y máxima de la imagen, y el programa creará un planisferio automáticamente, el cual será de gran utilidad para la medición del ángulo y el número de crestas.

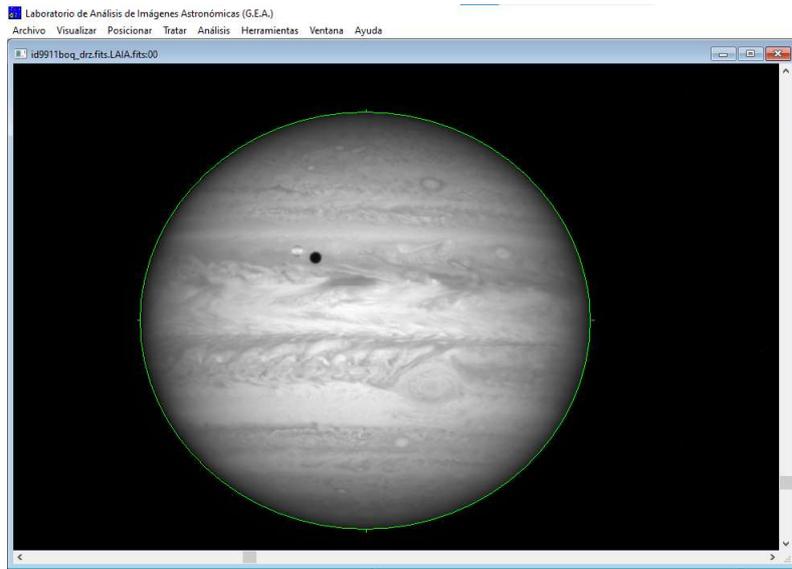


Figura 3.4: Imagen del programa L.A.I.A. donde se ve una imagen ejemplo de Júpiter correctamente navegada, ya que se puede apreciar un borde verde en torno al planeta, que define la periferia del mismo.

3.2. Toma de medidas

El siguiente paso será la toma de medidas, las cuales se dividirán en 2 tipos diferentes. La primera de ellas consiste en medir el ancho de la onda por medio de 6 puntos diferentes situados en grupos de 2, uno en el límite superior y otro en el inferior, tomados en la parte izquierda, derecha y central de la onda, tal y como se muestra en la figura 3.5. En ésta, se pueden ver las medidas del ancho en color rojo, donde se diferencian las medidas superiores, etiquetadas como $U1$, $U2$ y $U3$; y las medidas inferiores, etiquetadas como $D1$, $D2$ y $D3$.

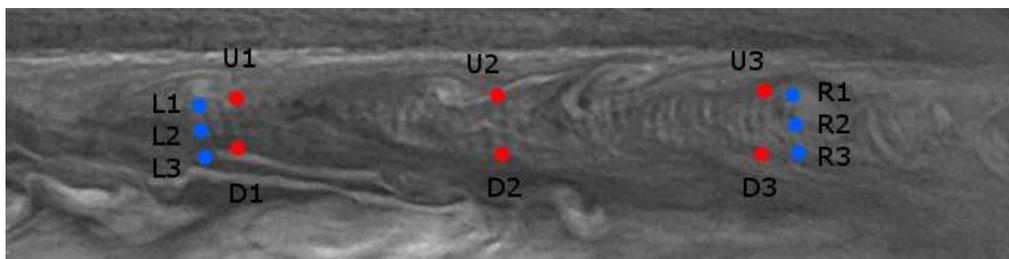


Figura 3.5: Ampliación de la figura 2.1b donde se muestran las medidas tanto del ancho de la onda (puntos rojos) como de la longitud de la misma (puntos azules).

El segundo tipo consiste en medir el largo de la onda. Para ello se tomarán 3 puntos en el extremo izquierdo de la onda, en la parte superior, media e inferior; etiquetadas como puntos azules en la

figura 3.5 como $L1$, $L2$ y $L3$ respectivamente. Asimismo, se procede de manera análoga en el extremo derecho de la onda, tal y como se muestra en la anterior figura, obteniendo así los puntos etiquetados como $R1$, $R2$ y $R3$.

Una vez se hayan obtenido estos puntos, se podrán anotar los datos que facilita LAIA. En este caso, de todos aquellos que ofrece la imagen, los más importantes y aquellos que se usarán en este trabajo serán las coordenadas espaciales dentro del planeta; más concretamente, la longitud en el Sistema de III (λ) y la latitud (φ) del punto, tanto la planetográfica (Pg) como la planetocéntrica (Pc). Así pues, continuando con el ejemplo de la imagen 2.2, se muestran a continuación en la tabla 3.1 los datos obtenidos.

Etiqueta	U1	U2	U3	D1	D2	D3	L1	L2	L3	R1	R2	R3
λ (SIII)	11,55	22,88	37,27	34,15	21,8	21,8	51,44	51,81	51,67	6,6	7,54	6,38
φ (Pg)	18,59	18,14	18,78	13,67	14,25	14,13	17,91	15,95	14,73	18,27	16,39	14,73
φ (Pc)	16,33	15,93	16,5	11,96	12,48	12,37	15,72	13,98	12,9	16,04	14,38	12,9

Tabla 3.1: En la tabla se muestran la longitud y la latitud, tanto planetocéntrica como planetográfica, de los diferentes puntos medidos de la onda 1 que se muestra en la figura 3.5.

El último paso en la toma de medidas consiste en medir el número de crestas que se pueden apreciar en la onda ($\#_c$) y calcular el ángulo de inclinación de la onda. Para esto, dentro de la herramienta de análisis, L.A.I.A. posee la opción de crear un planisferio, es decir, representar la esfera celeste en un plano. Para ello se deben conocer tanto la longitud y latitud máxima y mínima de la imagen a tratar, lo cual es fácil saber debido a que la imagen está navegada. Una vez representado el planisferio, usando una recta horizontal, se puede estimar la inclinación de las ondas de gravedad.

3.3. Análisis de las medidas

Gracias a estas medidas se obtienen los primeros resultados directos. En primer lugar, por medio de las medidas del ancho de la onda, se obtendrá la latitud media a la que se encuentra, es decir φ . Para ello, se hará un promedio de las latitudes de U_i y D_i , donde $i = 1, 2, 3$. Es por esto por lo cual, se realizan 3 medidas superiores e inferiores, ya que de esta forma se reduce el error de las medidas.

En segundo lugar, recurriendo a las medidas de L_i y R_i , donde $i = 1, 2, 3$, se obtienen 2 resultados

relevantes. Por un lado, está el resultado directo, que es la longitud de la onda de un extremo al otro, θ_{E-W} ; y por otro lado, por medio del promedio de las longitudes, se obtiene la λ media de la onda en ese instante de tiempo t . Al igual que en las medidas anteriores, la razón de la toma de diferentes puntos reside en la reducción de errores.

Finalmente, tras haber realizado este procedimiento con 2 imágenes separadas un día joviano, unas 9,84 horas, se tomarán los instantes de tiempo t a los cuales fueron tomadas las imágenes y se obtendrá la diferencia de tiempo Δt . Así mismo, si asumimos que el desplazamiento meridional de la onda es nulo, se podrá estimar una latitud media $\varphi(Pc)$, entendiendo en adelante φ como la latitud planetocéntrica. Para terminar, se compararán las λ media de las dos imágenes, obteniendo así, la variación de la longitud de la onda $\Delta\lambda$. Así pues, estos serán los datos necesarios para comenzar el cálculo y la posterior caracterización de la onda.

3.4. Obtención de resultados

Gracias a los datos obtenidos, podemos comenzar a realizar cálculos. En primer lugar, recurriremos a la ecuación 1.2 donde se define r . Una vez calculado, se puede obtener c_x , es decir, la velocidad que se mueve la onda, tal que

$$c_x = -\frac{\pi}{180} r(\varphi) \cdot \cos(\varphi) \cdot \frac{\Delta\lambda}{\Delta t} \quad (3.1)$$

Por otro lado, se hará una media del valor θ_{E-W} , y con ello se obtendrá la longitud de onda L_x por medio de la siguiente expresión geométrica:

$$L_x = \frac{2\pi r}{360} \cdot \frac{\theta_{E-W}}{\#_c} \quad (3.2)$$

Así mismo, conociendo L_x y aplicando la ecuación 1.8 anteriormente vista, obtenemos el valor del número de onda k . Por otro lado, fijándose en diferentes imágenes de la onda en diversos filtros, se podría estimar la altura aproximada a la que se encuentra la onda de gravedad, y por tanto, se puede también dar un valor de la frecuencia de Brunt-Väisälä, N_B . En cambio, en el trabajo se usarán los valores de N_B tabulados o usado en otros trabajos, como el de Simon[4]. Por último, se debe conocer la velocidad media de los vientos zonales a la latitud en la que se encuentra la onda, para ello, se recurrirá a los datos medios recogidos por R. Hueso[5] en 2016 por diversos métodos. En la figura 3.1 se representan gráficamente las velocidades de estos vientos zonales \bar{u} (m/s).

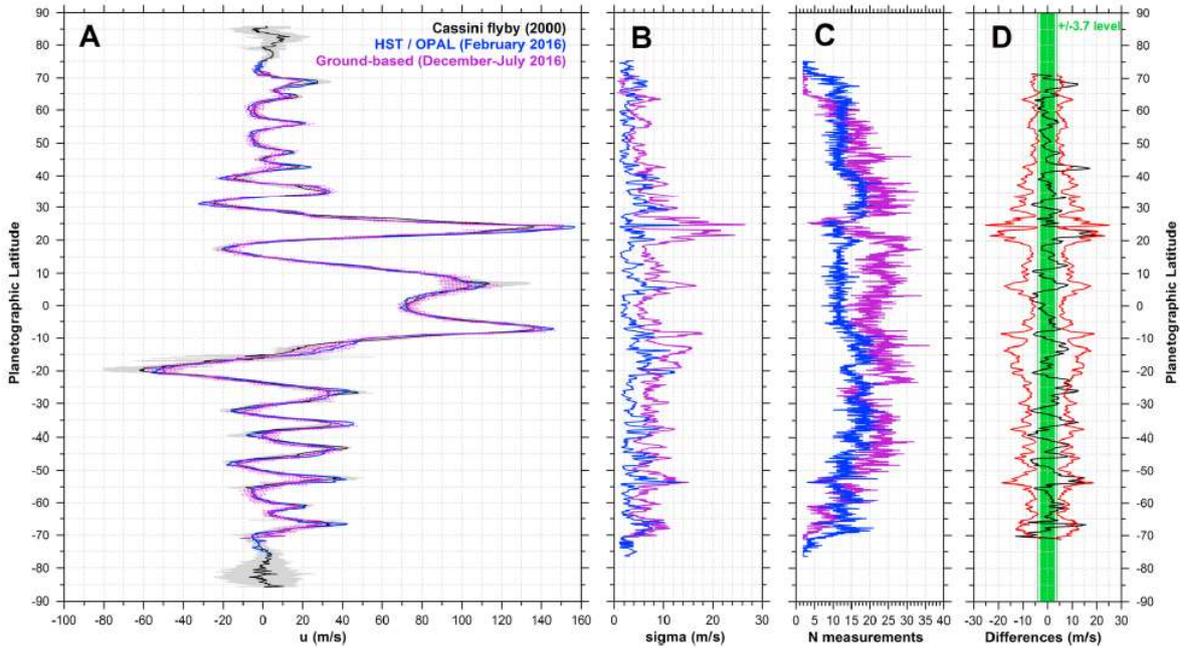


Figura 3.6: Gráficas extraídas de [5] donde se muestran los vientos zonales de Júpiter en 2016. (a) Vientos zonales medidos en 2016 por el HST (azul), por diversos observatorios terrestres (magenta) y en 2000 usando imágenes del sobrevuelo de Cassini a Júpiter (negro) con su barra de error (gris). (b) Desviación estándar de los datos de 2016. (c) Número de medidas por segmento de latitud de 0.1° . (d) Diferencias entre las mediciones de 2016 (negro) donde se aprecia un error general de $\pm 3,7\text{m/s}$ (sombreado verde). Las líneas rojas representan la desviación estándar de la diferencia de mediciones.

Una vez hayan sido recabados todos estos datos, se podrá obtener el valor aproximado del número de onda m derivada de la ecuación 1.13.

$$m^2 = \frac{N_B^2}{c_x - \bar{u}^2} - k^2 \quad (3.3)$$

Este valor es de gran utilidad, ya que si $m^2 > 0$, esto significa que existen soluciones reales y por tanto, que puede existir una propagación vertical de la onda. En cambio, si $m^2 < 0$ querrá decir que las soluciones de m son imaginarias, lo que implica que no existe desplazamiento vertical de la onda, es decir, que la onda se mantendrá a la altura encontrada.

Capítulo 4

Caracterización y Resultados

Finalmente, se buscará aplicar el método explicado en el anterior capítulo (capítulo 3) en las imágenes seleccionadas y clasificadas en el capítulo de observaciones (capítulo 2). Así pues, se contrastarán los resultados obtenidos por diferentes grupos de investigación.

4.1. Caracterización

4.1.1. Onda 1

Comenzando la caracterización de la primera onda en las imágenes de 2017, se deben seguir los pasos detallados anteriormente; de tal forma que, tomando la primera de las imágenes, una vez obtenidos los datos, estos se pueden agrupar en la tabla 4.1. En ella se puede ver la latitud media a la que se encuentra la onda, recordando que se trata de latitud planetocéntrica, ya que esta será la usada en los futuros cálculos.

Latitud (φ)	Longitud (λ)	Longitud del Pack		Ancho del Pack (P_c)		Ángulo de Orientación	# crestas
		E	W	N	S		
$14.1 \pm 1.9^\circ$	$30.0 \pm 24.7^\circ$	$52.6 \pm 0.5^\circ$	$7.4 \pm 0.2^\circ$	$15.9 \pm 0.4^\circ$	$12.4 \pm 0.2^\circ$	$\ll 1^\circ$	23

Tabla 4.1: Caracterización onda 1. Figura 2.1a

Asimismo, se procede de igual forma con la segunda imagen, obteniendo de manera análoga la tabla 4.2.

Latitud (φ)	Longitud (λ)	Longitud del Pack		Ancho del Pack (P_c)		Ángulo de Orientación	# crestas
		E	W	N	S		
$14.3 \pm 2.2^\circ$	$29.2 \pm 24.5^\circ$	$51.6 \pm 0.2^\circ$	$6.8 \pm 0.6^\circ$	$16.3 \pm 0.3^\circ$	$12.3 \pm 0.3^\circ$	$\ll 1^\circ$	23

Tabla 4.2: Caracterización media de la onda 1.

Así pues, al estar hablando de la misma onda, podemos obtener la media de estos resultados, recogidos en la siguiente tabla.

Latitud (φ)	Longitud (λ)	Longitud del Pack		Ancho del Pack (P_c)		Ángulo de Orientación	# crestas
		E	W	N	S		
$14.1 \pm 1.9^\circ$	$29.6 \pm 23.5^\circ$	$52.1 \pm 0.6^\circ$	$7.2 \pm 0.5^\circ$	$16.1 \pm 0.4^\circ$	$12.3 \pm 0.2^\circ$	$\ll 1^\circ$	23

Tabla 4.3: Caracterización onda 1. Figura 2.1b

Finalmente, gracias a la fecha y hora de captación de las imágenes, detalladas en el capítulo 2, se puede tomar el intervalo de tiempo existente entre ambas imágenes. En este caso, tomando los datos correspondientes, se tiene que esta diferencia es

$$\Delta t = (14hr\ 20'\ 11'') - (04hr\ 29'\ 03'') = 9hr\ 51'\ 8'' \quad (4.1)$$

4.1.2. Onda 2

Procediendo de manera análoga al caso anterior, se procede con a toma de datos de la primera de las imágenes obtenidas en 2019, resumidos en la tabla 4.4.

Latitud (φ)	Longitud (λ)	Longitud del Pack		Ancho del Pack (P_c)		Ángulo de Orientación	# crestas
		E	W	N	S		
$-10.4 \pm 1.4^\circ$	$329.9 \pm 8.5^\circ$	$337.6 \pm 0.3^\circ$	$322.1 \pm 0.1^\circ$	$-9.1 \pm 0.3^\circ$	$-11.6 \pm 0.1^\circ$	$\ll 1^\circ$	12

Tabla 4.4: Caracterización onda 2. Figura 2.6a

Seguidamente se hace lo propio con la siguiente imagen tras una rotación del planeta. Una vez analizados los datos los datos, se construye la tabla 4.5. De igual forma que en la onda de 2017, podemos tomar la media de estos datos en la siguiente tabla.

Finalmente, por medio a la fecha y hora de captación de las imágenes, detalladas en el capítulo 2, se puede tomar el intervalo de tiempo existente entre ambas imágenes. En este caso, tomando los datos correspondientes, se tiene que esta diferencia es

Latitud (φ)	Longitud (λ)	Longitud del Pack		Ancho del Pack (P_c)		Ángulo de Orientación	# crestas
		E	W	N	S		
$-9.8 \pm 1.2^\circ$	$331.5 \pm 8.5^\circ$	$339.3 \pm 0.2^\circ$	$323.8 \pm 0.1^\circ$	$-8.6 \pm 0.2^\circ$	$-10.9 \pm 0.1^\circ$	$\ll 1^\circ$	12

Tabla 4.5: Caracterización onda 2. Figura 2.6b

Latitud (φ)	Longitud (λ)	Longitud del Pack		Ancho del Pack (P_c)		Ángulo de Orientación	# crestas
		E	W	N	S		
$-10.1 \pm 1.3^\circ$	$330.7 \pm 8.1^\circ$	$338.5 \pm 0.3^\circ$	$323.0 \pm 0.4^\circ$	$-8.9 \pm 0.4^\circ$	$-11.3 \pm 0.4^\circ$	$\ll 1^\circ$	12

Tabla 4.6: Caracterización onda 2. Figura 2.6b

$$\Delta t = (21hr\ 04'\ 13'') - (09hr\ 56'\ 28'') = 11hr\ 07'\ 45'' \quad (4.2)$$

Este resultado parece alejarse ligeramente del tiempo de rotación del Joviano, en cambio esto no es un gran inconveniente en cuanto a los resultados, ya que, cuando se aplique el valor de Δt en las ecuaciones propuestas, se usará este valor y no el de la rotación del gigante gaseoso. La razón por la cual se buscan medidas con $\Delta t \sim 9,8hr$, es para facilitar la medidas. En este caso, aunque exista ese desfase, debido a la posición de la onda, no altera las mediciones ni los resultados de las mismas.

4.2. Resultados y Comparación

4.2.1. Onda 1

Una vez ya ha sido caracterizada la onda, es momento de usar los datos del apartado 4.1 con el objetivo de poder sacar conclusiones razonables. Así pues, siguiendo los pasos detallados en el capítulo 3, se obtiene los siguientes valores de longitud de la onda en grados (θ_{E-W}), latitud planetocéntrica media a la que se encuentra (φ), la variación de la longitud planetaria de una imagen con respecto a la otra ($\Delta\lambda$), la velocidad de movimiento en el eje x de la onda (c_x) y la velocidad de esta con respecto a los vientos zonales ($c_x - \bar{u}$).

θ_{E-W} ($^\circ$)	φ ($^\circ$)	$\Delta\lambda$ ($^\circ$)	c_x (m/s)	$c_x - \bar{u}$ (m/s)
45.0 ± 0.4	14.2 ± 0.4	-0.8 ± 0.5	-26 ± 10	-16 ± 10

Tabla 4.7: Resultados obtenidos de la onda 1.

Para la obtención de los vientos zonales, se han usado los datos medios de la figura 3.6, de donde se obtiene $\bar{u} \sim -9,75 \text{ m/s}$.

Usando la tabla 4.7, se puede comenzar el cálculo de resultados finales. En primer lugar, mediante el valor de θ_{E-W} , se obtiene la longitud de onda en el eje x, tal que

$$L_x = 2400 \pm 1200 \text{ km}$$

de tal forma que, se obtiene directamente el valor del número de onda k

$$k = (2,6 \pm 0,4) \cdot 10^{-3} \text{ km}^{-1}$$

Por otro lado, basándose en los filtros a los cuales la onda puede ser apreciada, se puede estimar la profundidad a la cual se encuentra. Según Simon .^{es} probable que la visibilidad de la onda se deba a una combinación de su ubicación de altitud entre 0, 1 y 0, 5 bar, justo por encima de las cimas de las nubes de los vórtices y las propiedades del aerosol / neblina en longitudes de onda cortas.”[4] Así pues, se puede considerar una frecuencia de Brunt-Väisälä tal que

$$N_B = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

Finalmente, se tiene todos los datos necesarios para calcular el número de onda m . Así pues, una vez calculado, se obtiene que $m^2 < 0$, lo que implica que existe propagación vertical de la onda.

Esta onda ya ha sido analizada con anterioridad en varios estudios, así pues, se pueden comparar los resultados obtenidos con el trabajo de Amy A. Simon [4], ya que, este, recopila los diferentes resultados a los largo de los años y de diferentes proyectos. En primer lugar, Simon estima que la latitud planetográfica a la cual se encuentra la onda es $\sim 16,5 \pm 0,5^\circ N$; donde en este trabajo se ha encontrado que es de aproximadamente $16,2 \pm 0,5^\circ$. Esto parece estar dentro de los márgenes aceptables, y no parece estar lejos de otros resultados propuestos.

El siguiente resultado notorio sería la velocidad de propagación de la onda c_x y la velocidad de esta con respecto a los vientos zonales $c_x - \bar{u}$. En ella, Simon estima una velocidad $c_x = -15 \pm 15 \text{ m/s}$ y una velocidad de fase de $c_x - \bar{u} = -3 \pm 15 \text{ m/s}$. Aunque este valor parezca estar muy alejado del obtenido en este trabajo, ya que distan de aproximadamente 11 m/s ; este sigue estando dentro del error descrito por Simon, por lo que parece ser un resultado coherente. Por otro lado, Simon estima un valor de la longitud de onda de $L_x = 1400 \text{ km}$, y ,en nuestro caso, este valor se encuentra en $2400 \pm 1200 \text{ km}$, lo que encaja a la perfección con la estimación de Simon.

Finalmente, en cuanto a la propagación vertical, tanto en el trabajo de Simon como en este, se han llegado a las mismas conclusiones. En otras palabras, no existe desplazamiento vertical; evidencia dada por el resultado de $m^2 < 0$.

4.2.2. Onda 2

Nuevamente, por medio de los datos obtenidos y siguiendo los pasos detallados en el capítulo 3, se puede llegar a obtener los datos descritos en la tabla 4.8. Para ello, se han necesitado los datos de la figura 3.6 sobre los vientos zonales a una latitud media de $14,19^\circ$, donde se ha aproximado $\bar{u} \sim 46,33\text{m/s}$.

$\theta_{E-W} (\circ)$	$\varphi (\circ)$	$\Delta\lambda (\circ)$	$c_x (\text{m/s})$	$c_x - \bar{u} (\text{m/s})$
15.5 ± 0.4	-10.1 ± 0.4	1.7 ± 0.5	51 ± 7	5 ± 7

Tabla 4.8: Resultados onda 1.

Así pues, mediante la tabla 4.8, ya se pueden obtener resultados interesantes, comenzando por L_x . Para ello, mediante el valor de θ_{E-W} , se aplica nuevamente la ecuación 3.2, de tal que

$$L_x = 1200 \pm 600 \text{ km}$$

Mediante este resultado, se obtendrá directamente el valor del número de onda k .

$$k = (5,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-3} \text{ km}^{-1}$$

De igual forma que en la subsección 4.2.1, mediante los filtros, se puede estimar la profundidad a la cual se encuentra la onda de gravedad. En este caso, al ser la onda visible en los mismos filtros que el caso anterior, se puede tomar el valor estimado por Simon de entre 0,1 y 0,5 bar. Así pues, se puede considerar la frecuencia de Brunt-Väisälä con un valor de

$$N_B = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

Finalmente, se tiene todos los datos necesarios para calcular el número de onda m . Así pues, una vez calculado, se obtiene que $m^2 < 0$, lo que implica que existe propagación vertical de la onda.

Al analizar los resultados obtenidos, vemos que la velocidad a la que se mueve la onda con respecto a los vientos posee un error mayor que la propia medida, esto se puede deber a varios factores.

En primer lugar, debido al método de medición de varios puntos, reduce el error en gran medida por lo que a la hora de calcular la velocidad a la que se mueve la onda (c_x) se obtiene una buena relación entre error y medida. En cambio, debido a la gran velocidad de los vientos a esa latitud, el error se mantiene mientras que la medida se reduce, produciendo este efecto. Este escenario, aunque no es el idóneo, suele ser común en este tipo de medidas, así como en el caso anterior, donde la propia Simon obtenía $c_x - \bar{u} = -3 \pm 15$ [4], un error mucho mayor que la medida. Así pues, los resultados obtenidos, tanto la velocidad a la que se mueve la onda, como los valores de los números de onda, parecen encajar dentro del marco de las ondas de gravedad más comunes en el gigante gaseoso. Por tanto, parece ser que efectivamente, se trata de una onda de gravedad.

Conclusiones y trabajo futuro

Usando imágenes obtenidas con el Telescopio Espacial Hubble, hemos caracterizado las ondas de gravedad en las nubes de Júpiter encontradas en los años 2017 y 2019. Dichas imágenes han sido navegadas y analizadas gracias a L.A.I.A., lo cual ha facilitado una correcta medición y ha facilitado la obtención de planisferios. En primer lugar, se ha analizado la onda de 2017, la cual, se trata de una onda de mesoescala de larga vida, la cual ha sido previamente caracterizada por Simon [4]. Tras la toma de medidas y el análisis de datos posterior, esta onda ha servido de guía para comprobar la fiabilidad del método usado. Los resultados obtenidos parecen estar dentro de los márgenes de error y, las características encontradas, se amoldan a los parámetros habituales de una onda de gravedad.

Así pues, el siguiente paso ha sido la búsqueda de ondas de gravedad que no hubieran sido analizadas con anterioridad con el objetivo de encontrar resultados novedosos. Es por eso que la siguiente onda data de 2019. Una vez descubierta en las imágenes de HST, esta onda no parecía haber sido medida con autoridad, por tanto era un candidato idóneo para su caracterización. Aunque no tuviera las dimensiones de la onda anterior, esta parecía encontrarse a la misma altura, ya que parecía ser perceptible para los mismos filtros que el caso anterior, lo que ha facilitado los cálculos posteriores. Tras su caracterización, se ha podido apreciar que sus características parecen corresponder a aquellas que poseen las onda de gravedad en un planeta como Júpiter, por tanto, se podría concluir que se trata de una onda de gravedad no analizada posteriormente.

Este trabajo se ha basado en la toma de imágenes realizadas por el HST, en cambio, a lo largo de la historia, por medio de otros instrumentos se han encontrado multitud de onda de gravedad en el gigante gaseoso. En 1986, Flasar y Gierasch [1] usaron las imágenes tomadas por la *Voyager* en su sobrevuelo por Júpiter y en 2009, J.Arregi [2] usó imágenes de la misión *Galileo*. Es por eso que, gracias a la reciente llegada de *JUNO* ha propiciado la detección de nuevas ondas de gravedad de incluso menor tamaño (Fletcher et al. 2018[22], Orton et al. 2020 [23], Sánchez-Lavega et al. 2018 [3]).

Es por esto, que no es de extraña que, tras el lanzamiento del Telescopio espacial James Webb, obtendremos nuevas imágenes de Júpiter, de mayor calidad, lo que propiciará el descubrimiento de nuevas ondas de gravedad en el gigante gaseoso, y puede que incluso se conozcan nuevas características de estas que hoy en día son desconocidas.

Apéndice A

Medidas de las imágenes

En el siguiente apéndice se mostrarán las tablas con las medidas de la longitud y la latitud, tanto planetocéntrica como planetográfica, para las diferentes imágenes analizadas. Todas las medidas están tomadas en grados con un error estimado de $\pm 1^\circ$.

Onda 1

Figura 2.1a

Etiqueta	U1	U2	U3	D1	D2	D3	L1	L2	L3	R1	R2	R3
$\lambda(\text{SIII})$	14,16	35,08	52,55	11,28	31,28	49,30	53,06	52,5	52,15	7,6	7,51	7,24
$\varphi(\text{Pg})$	18,29	17,56	18,35	14,25	13,83	14,3	17,37	16,38	14,8	17,92	16,45	14,4
$\varphi(\text{Pc})$	16,07	15,41	16,12	12,47	12,11	12,52	15,24	14,37	12,96	15,73	14,43	12,61

Tabla A.1: Medidas de la imagen 2.1a

Figura 2.1b

Etiqueta	U1	U2	U3	D1	D2	D3	L1	L2	L3	R1	R2	R3
$\lambda(\text{SIII})$	11,55	22,88	37,27	13,04	21,8	34,15	51,44	51,81	51,67	6,6	7,54	6,38
$\varphi(\text{Pg})$	18,59	18,14	18,78	13,67	14,25	14,13	17,91	15,95	14,73	18,27	16,39	14,73
$\varphi(\text{Pc})$	16,33	15,93	16,5	11,96	12,48	12,37	15,72	13,98	12,9	16,04	14,38	12,9

Tabla A.2: Medidas de la imagen 2.1b

Onda 2

Figura 2.6a

Etiqueta	U1	U2	U3	D1	D2	D3	L1	L2	L3	R1	R2	R3
$\lambda(\text{SIII})$	335,79	331,08	324,49	334,08	329,64	324,45	334,92	335,67	335,71	323,05	323,6	323,25
$\varphi(\text{Pg})$	-9,93	-10,02	-9,67	-12,5	-12,36	324,45	-10,36	-11,18	-11,87	-10,08	-11,01	-12,25
$\varphi(\text{Pc})$	-8,67	-8,75	-8,45	-10,93	-10,81	-12,52	-9,05	-9,77	-10,37	-8,8	-9,62	-10,71

Tabla A.3: Medidas de la imagen 2.6a

Figura 2.6b

Etiqueta	U1	U2	U3	D1	D2	D3	L1	L2	L3	R1	R2	R3
$\lambda(\text{SIII})$	326,34	330,46	338,61	335,94	330,92	326,47	339,43	337,73	337,7	321,34	322,64	322,33
$\varphi(\text{Pg})$	-10,04	-10,59	-10,62	-13,38	-13,2	-13,22	-10,49	-11,88	-13,36	-10,15	-12,2	-14,13
$\varphi(\text{Pc})$	-8,77	-9,25	-9,28	-11,71	-11,55	-11,56	-9,17	-10,38	-11,69	-8,87	-10,67	-12,37

Tabla A.4: Medidas de la imagen 2.6b

Bibliografía

- [1] FM Flasar and PJ Gierasch. Mesoscale waves as a probe of jupiter's deep atmosphere. *Journal of Atmospheric Sciences*, 43(22):2683–2707, 1986.
- [2] J Arregi, JF Rojas, R Hueso, and A Sánchez-Lavega. Gravity waves in jupiter's equatorial clouds observed by the galileo orbiter. *Icarus*, 202(1):358–360, 2009.
- [3] A Sánchez-Lavega, R Hueso, G Eichstädt, G Orton, J Rogers, CJ Hansen, T Momary, F Tabataba-Vakili, and S Bolton. The rich dynamics of jupiter's great red spot from junocam: Juno images. *The Astronomical Journal*, 156(4):162, 2018.
- [4] Amy A Simon, Ricardo Hueso, Peio Iñurriagarro, Agustín Sánchez-Lavega, Raúl Morales-Juberías, Richard Cosentino, Leigh N Fletcher, Michael H Wong, Andrew I Hsu, Imke De Pater, et al. A new, long-lived, jupiter mesoscale wave observed at visible wavelengths. *The Astronomical Journal*, 156(2):79, 2018.
- [5] R Hueso, A Sánchez-Lavega, P Iñurriagarro, JF Rojas, S Pérez-Hoyos, I Mendikoa, JM Gómez-Forrellad, C Go, D Peach, F Colas, et al. Jupiter cloud morphology and zonal winds from ground-based observations before and during juno's first perijove. *Geophysical Research Letters*, 44(10):4669–4678, 2017.
- [6] Agustin Sanchez-Lavega. *An Introduction to Planetary Atmospheres*, pages 432–433. CRC Press, 0 edition, 2010.
- [7] Agustin Sanchez-Lavega. *An Introduction to Planetary Atmospheres*, page 71. CRC Press, 0 edition, 2010.
- [8] R R Rogers M.K. Yau. *A Short Course in Cloud Physics*, page 29. International Series in Natural Philosophy. Butterworth-Heinemann, 3 edition, 1996.
- [9] Murry L. Salby. *Static stability*, page 171–202. Cambridge University Press, 2 edition, 2012.

- [10] Roger K. Smith (eds.) K. A. Emanuel (auth.). *The Physics and Parameterization of Moist Atmospheric Convection*, pages 42–43. NATO ASI Series 505. Springer Netherlands, 1 edition, 1997.
- [11] Roland Stull. *Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science*, pages 289–322. University of British Columbia, 3rd edition, 2015.
- [12] Agustin Sanchez-Lavega. *An Introduction to Planetary Atmospheres*, pages 352–358. CRC Press, 0 edition, 2010.
- [13] Agustin Sanchez-Lavega. *An Introduction to Planetary Atmospheres*, pages 441–450. CRC Press, 0 edition, 2010.
- [14] Agustin Sanchez-Lavega. *An Introduction to Planetary Atmospheres*, pages 432–441. CRC Press, 0 edition, 2010.
- [15] James R. Holton. *An Introduction to Dynamic Meteorology*, pages 196–204. The International Geophysics 88 89. Academic Press, 4 edition, 2004.
- [16] James R Holton and M Joan Alexander. The role of waves in the transport circulation of the middle atmosphere. *Atmospheric science across the stratopause*, 123:21–35, 2000.
- [17] D. C. Fritts. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences, Second Edition: V3, GRAVITY WAVES: Overview*. Academic Press, 2 edition, 2015.
- [18] Nelson, buddy; et al. (2009). «hubble space telescope: Servicing mission 4 media reference guide». washington d.c.: Nasa/lockheed martin. pages 1-5. https://esahubble.org/static/archives/presskits/pdf/sm4_english.pdf.
- [19] L Dressel, M Wong, C Pavlovsky, K Long, et al. Wide field camera 3 instrument handbook, 2010.
- [20] Outer planet atmospheres legacy (opal). <https://archive.stsci.edu/prepds/opal/>.
- [21] L.a.i.a. - laboratorio de análisis de imágenes astronómicas. Author: Joan A. Cano Gorini. Versión 4.1.0.1 - 14/03/2021.
- [22] Leigh N Fletcher, H Melin, Alberto Adriani, AA Simon, A Sanchez-Lavega, PT Donnelly, A Antuñano, GS Orton, R Hueso, E Kraaikamp, et al. Jupiter’s mesoscale waves observed at 5 μm by ground-based observations and juno jiram. *The Astronomical Journal*, 156(2):67, 2018.

- [23] Glenn S Orton, Fachreddin Tabataba-Vakili, Gerald Eichstädt, John Rogers, Candice J Hansen, Thomas W Momary, Andrew P Ingersoll, Shawn Brueshaber, Michael H Wong, Amy A Simon, et al. A survey of small-scale waves and wave-like phenomena in jupiter's atmosphere detected by junocam. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(7):e2019JE006369, 2020.