

## CAPÍTULO 3

### ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DE LOS VIENTOS ZONALES DE JÚPITER ENTRE 1995 Y 2000

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

Como ya se ha comentado en el primer capítulo, uno de los desafíos relacionados con la dinámica de los planetas gigantes, y en especial Júpiter y Saturno, es llegar a comprender el origen del sistema de vientos zonales observado al nivel del techo de nubes. Cualquier teoría satisfactoria deberá arrojar luz sobre muchos aspectos fundamentales tales como la estructura interna de dichos planetas y su meteorología.

Las primeras medidas precisas del régimen de vientos zonales de Júpiter vienen con la enorme cantidad de información suministrada por la misiones Voyager en 1979. Las imágenes de las sondas Voyager 1 y 2 permitieron la determinación del perfil zonal de vientos de Júpiter durante el intervalo de 4 meses que separó la llegada a Júpiter de ambas sondas (ver, por ejemplo, Ingersoll y col. 1979, 1981, Limaye y col. 1982, Limaye 1986, 1989, Magalhaes y col. 1990). Estos resultados fueron plenamente consistentes con la distribución de vientos sugerida con anterioridad por las observaciones realizadas con telescopios desde la superficie terrestre (Smith y Hunt 1976, Rogers 1995). La parte de nuestro conocimiento de la circulación global de Júpiter al nivel del techo de nubes está basada en los resultados de la misión Voyager, que constituye una mera instantánea de todos posibles fenómenos variables en el tiempo. La misión Galileo sólo ha aportado información parcial sobre este asunto debido al problema de su antena (ver 1.1), y los resultados del sobrevuelo en diciembre de 2000 de la sonda Cassini han sido analizados hasta el presente de forma parcial (Porco y col. 2003).

A causa de la importancia del conjunto de datos aportados por Voyager, se ha dedicado mucho esfuerzo a determinar de forma fiable el perfil zonal de vientos así como a buscar posibles cambios en él. Este interés ha ido en creciente aumento desde el momento en que ha sido posible analizar las imágenes a media y alta resolución tomadas por el Telescopio Espacial Hubble, y las naves Galileo y Cassini. Un ejemplo de esto ha sido la corriente en chorro a  $\sim 24^\circ\text{N}$  sobre el límite sur de la Banda Templada Norte, la más intensa del sistema joviano de corrientes en chorro. Maxworthy (1984) reanalizó las imágenes tomadas por las sondas Voyager para establecer que esta corriente tenía una velocidad de pico de  $\sim 180 \text{ ms}^{-1}$ . Otros resultados (Magalhaes y col. 1990) apuntaron en la misma dirección, pero estaban en desacuerdo con los obtenidos por otros autores quienes midieron velocidades de pico más bajas (Ingersoll y col. 1979, 1981, Limaye y col. 1982, Limaye 1986, 1989, Beebe y

Hockey 1986). Cambios morfológicos importantes en la región que se produjeron después del sobrevuelo de las naves Voyager (Sánchez-Lavega y Quesada 1988, Sánchez-Lavega y col. 1991), y cuyos efectos fueron observados por el HST, animaron a la realización de nuevos estudios. Simon (1999) revisó los datos aportados por los Voyager, y obtuvo un nuevo perfil zonal de vientos que comparó con otro obtenido tras el seguimiento de trazadores nubosos en las imágenes del HST tomadas en octubre de 1995 en la banda de 935nm. La autora dedujo que la corriente en chorro disminuyó su intensidad de los  $\sim 180 \text{ ms}^{-1}$  a los  $\sim 140 \text{ ms}^{-1}$ . Nosotros mismos (García-Melendo y col. 2000) concluimos que la velocidad más baja persistió durante todo el tiempo en que Júpiter había sido observado por el HST hasta 1998. De hecho esta misma velocidad se ha mantenido hasta las últimas imágenes obtenidas en septiembre de 2000, exactamente 3 meses antes de que Cassini visitara Júpiter (García-Melendo y Sánchez-Lavega 2001). Posteriormente los resultados de la misión Cassini (Porco et al. 2003), han confirmado plenamente nuestros resultados. Este efecto será tratado en detalle en el Capítulo 4 de esta tesis.

Uno de los análisis más completos realizados sobre la estabilidad de los vientos zonales fue el publicado por Limaye (1989), quien de forma sistemática midió los vientos zonales durante 111 rotaciones de Júpiter con datos aportados por Voyager 1, y durante 134 rotaciones según imágenes de Voyager 2. El autor determinó variaciones superiores a los  $10 \text{ ms}^{-1}$  en algunas regiones del planeta, pero en términos generales se comprobó la gran estabilidad a corto plazo de la estructura general del sistema de circulación global visible. Sin embargo Limaye fue incapaz de determinar si estas variaciones temporales eran debidas a cambios en la altitud del techo de nubes o a cambios reales en los vientos zonales.

Desde 1995 a 2000, la resolución de las mejores imágenes de Júpiter tomadas con la cámara WFPC2 (Wide Field Planetary Camera 2) a bordo del HST fue de  $\sim 150 \text{ kmpix}^{-1}$ , que es similar a la resolución de  $\sim 160 \text{ kmpix}^{-1}$  de las imágenes obtenidas por los Voyager 1 y 2 usadas por Limaye (1989) para medir los vientos. La similitud entre ambos niveles de resolución nos animaron a usar técnicas de correlación, para obtener toda una serie de perfiles zonales de vientos a alta resolución que permitiesen una comparación robusta con los resultados publicados previamente a partir de los datos Voyager. Este trabajo proporcionó una oportunidad única para estudiar la circulación global de Júpiter durante un intervalo de tiempo de 5 años, es decir, unas 15 veces más largo que el intervalo de tiempo de 4 meses transcurrido entre los dos sobrevuelos de los Voyager 1 y 2 en 1979 hace 16 años. Estos datos caracterizan el estado de la circulación global unos pocos meses antes de la llegada de misión Cassini a Júpiter hacia finales de 2000.

Se obtuvieron un total de siete perfiles zonales entre el 5 de octubre de 1995 y el 2 de septiembre de 2000 en las bandas de 410 nm, 889 nm y 953 nm a partir de imágenes con una cobertura en longitud limitada. Basándonos en estos datos, presentamos aquí un estudio de las variaciones de los vientos zonales de Júpiter (situación e intensidad), durante los cinco años de análisis comprendidos entre 1995 y 2000. Uno de los resultados más importantes es la

fuerte estabilidad mostrada por el flujo zonal durante estos cinco años, aunque algunas corrientes en chorro mostraron variaciones en su forma e intensidad, posiblemente causadas por variaciones longitudinales o temporales en su estructura. Estos cambios nos permiten volver sobre la cuestión de la dependencia de los perfiles zonales de vientos de la morfología nubosa.

También exploraremos la estructura de los vientos zonales a latitudes más cercanas a los polos de lo que se había conseguido con las naves Voyager (hasta 77°N y 68°N). En este trabajo presentamos el descubrimiento, posteriormente confirmado por la sonda Cassini (Porco y col. 2003), de dos corrientes en chorro por encima de los 60°N, y una adicional hacia el sur a 70°S. También se analizan los perfiles de vientos obtenidos a diferentes longitudes de onda, los resultados sugieren que los efectos de color (altura) de los diferentes filtros son despreciables. En la comparación de los vientos obtenidos a partir de las imágenes del HST con el perfil de Limaye (1986) según las imágenes del Voyager 2 en luz violeta, se aprecian ligeras discrepancias en latitud (como máximo 1.5°) para la situación de los máximos de algunas corrientes en chorro, especialmente en el hemisferio norte del planeta. Más adelante se discuten algunas posibles causas de este efecto.

En los resultados presentados en este capítulo se hace uso de las técnicas de correlación y reducción de datos expuestas en el capítulo 2, donde también se discute la influencia de la morfología nubosa local en los resultados obtenidos.

### 3.2 OBSERVACIONES Y ANÁLISIS

El conjunto de imágenes analizado es el tomado por el HST en el período 1995 a 1998 con la cámara WPFC2. Además, en septiembre de 2000 se obtuvo tiempo de observación adicional. La Tabla 3.1 muestra el historial de las observaciones de Júpiter utilizadas.

Fecha	Resolución (km píxel <sup>-1</sup> )	Número de perfiles calculados	Filtros (nm)	Inclinación del polo norte de Júpiter (grados)
5 octubre 1995	190	3	410, 892, 953	-2.63
14 mayo 1996	150	3	410, 953	-1.76
21 octubre 1996	180	2	410, 953	-1.60
4 abril 1997	180	2	410, 953	-0.32
25 junio 1997	140	3	410, 953	0.20
16 julio 1998	150	5	410, 953	2.11
2 septiembre 2000	160	1	953	3.11

**Tabla 3.1.** Registro de observaciones del HST

En todos los conjuntos de imágenes se seleccionaron aquellas que mostraban los mismos segmentos de longitud para obtener barridos fotométricos que permitiesen calcular las correlaciones. Este procedimiento generó pares de imágenes separadas por una rotación joviana, o unas 10 horas. Los perfiles calculados también lo fueron a partir de imágenes tomadas con los filtros F410M (410-nm), FQCH4N (892-nm), y F953N (953-nm). En el apéndice A, y para ilustrar la morfología nubosa de la atmósfera, se muestran proyecciones cilíndricas en la banda de 410-nm de 1995 a 1998.

### 3.3 RESULTADOS

#### 3.3.1. VIENTOS ZONALES A DIFERENTES LONGITUDES DE ONDA

Varios autores han mencionado la posibilidad de detectar los movimientos del viento a diferentes altitudes, utilizando imágenes obtenidas a varias longitudes de onda sensibles a diferentes niveles de presión. Por ejemplo, Banfield y col. (1996) y Sánchez-Lavega y col. (1998a) usaron imágenes en la banda de absorción del metano para seguir los movimientos de los restos dejados por el impacto del cometa SL-9 en la estratosfera de Júpiter. El filtro FQCH4N, que trabaja en la banda de absorción del metano y opera a una longitud de onda efectiva de 892 nm es útil para sondear el nivel a 300mb, mientras que los filtros F953N (953 nm) y F410M (410 nm) son más sensibles al techo de nubes (Banfield y col. 1998). De hecho, la relación del viento térmico predice una cizalla vertical del flujo horizontal, cuando existe un gradiente horizontal de temperatura (a presión constante) en presencia de equilibrio geostrófico (Holton 1992, ecuaciones 1.7 y 1.8).

Basándose en los datos en infrarrojo suministrados por el experimento IRIS realizado por las naves Voyager y tras utilizar la expresión del viento térmico, Gierasch y col. (1986) indicaron que el viento decae con la atmósfera en las capas altas de la troposfera de Júpiter. La presencia de algunas diferencias entre los perfiles zonales de vientos en violeta y naranja, calculados por Limaye (1986) y Magalhaes y col. (1990), sugirieron la posibilidad de detectar directamente este efecto a través del movimiento de las nubes.

Más recientemente, Simon (1999), usando los filtros F212N y F273N en el instrumento NICMOS y el filtro FQCH4N fue incapaz de detectar diferencias significativas de velocidad entre los trazadores observados a esas diferentes longitudes de onda. De hecho, y aunque no relacionado con las medidas dominadas por los movimientos de trazadores nubosos al nivel del techo de nubes como es el caso en este trabajo, el experimento del viento Doppler realizado por la Sonda Galileo mostró que sí que existe una caída de la intensidad del viento desde el nivel de 4 bares hasta la tropopausa de casi  $100 \text{ ms}^{-1}$ ; también se encontró que los vientos permanecen casi constantes por debajo del nivel de 4 bares (Atkinson y col. 1998, véase capítulo 1 y Figura 1.10).

Para investigar este efecto se obtuvieron perfiles zonales con los filtros a 410 nm, 953 nm, y 892 nm desde los  $\sim 60^\circ\text{S}$  a los  $\sim 50^\circ\text{N}$  a partir de las imágenes de archivo del HST obtenidas el 5 de octubre de 1995. La Figura 3.1 muestra los tres perfiles medidos representados por separado para permitir la comparación entre ellos. Aparte de algunas diferencias en la velocidad de pico de la corriente en chorro situada a  $46^\circ\text{N}$ , no son visibles diferencias apreciables que superen la dispersión de  $\pm 6 \text{ ms}^{-1}$  de las medidas. Otra forma de comparar los perfiles es a través de la Figura 3.2 (arriba) donde se representan superpuestos, y la 3.2, abajo, que representa la diferencia de velocidad del viento  $\delta u$  entre los perfiles obtenidos con los filtros de 410 nm (violeta) y 892

nm (infrarrojo). Esta diferencia muestra una dispersión de velocidad  $\sigma(\delta u) \sim 7.7 \text{ ms}^{-1}$ . Para datos aleatorios con una estadística Gaussiana, la probabilidad de que  $\delta u \leq |2\sigma|$  es de 0.95. Por tanto la parte inferior de la Figura 3.2 sugiere que no hay diferencias estadísticas significativas entre los perfiles a 410nm y 892nm e ilustra lo que puede verse en la parte superior de la Figura 3.2, es decir, que no hay diferencias claras de velocidad. Muy probablemente con estos tres filtros estamos mirando a trazadores situados a niveles de presión similares, de acuerdo con los resultados encontrados por Simon (1999), o bien que la variación de velocidad vertical entre esos niveles está por debajo de nuestro nivel de detección.

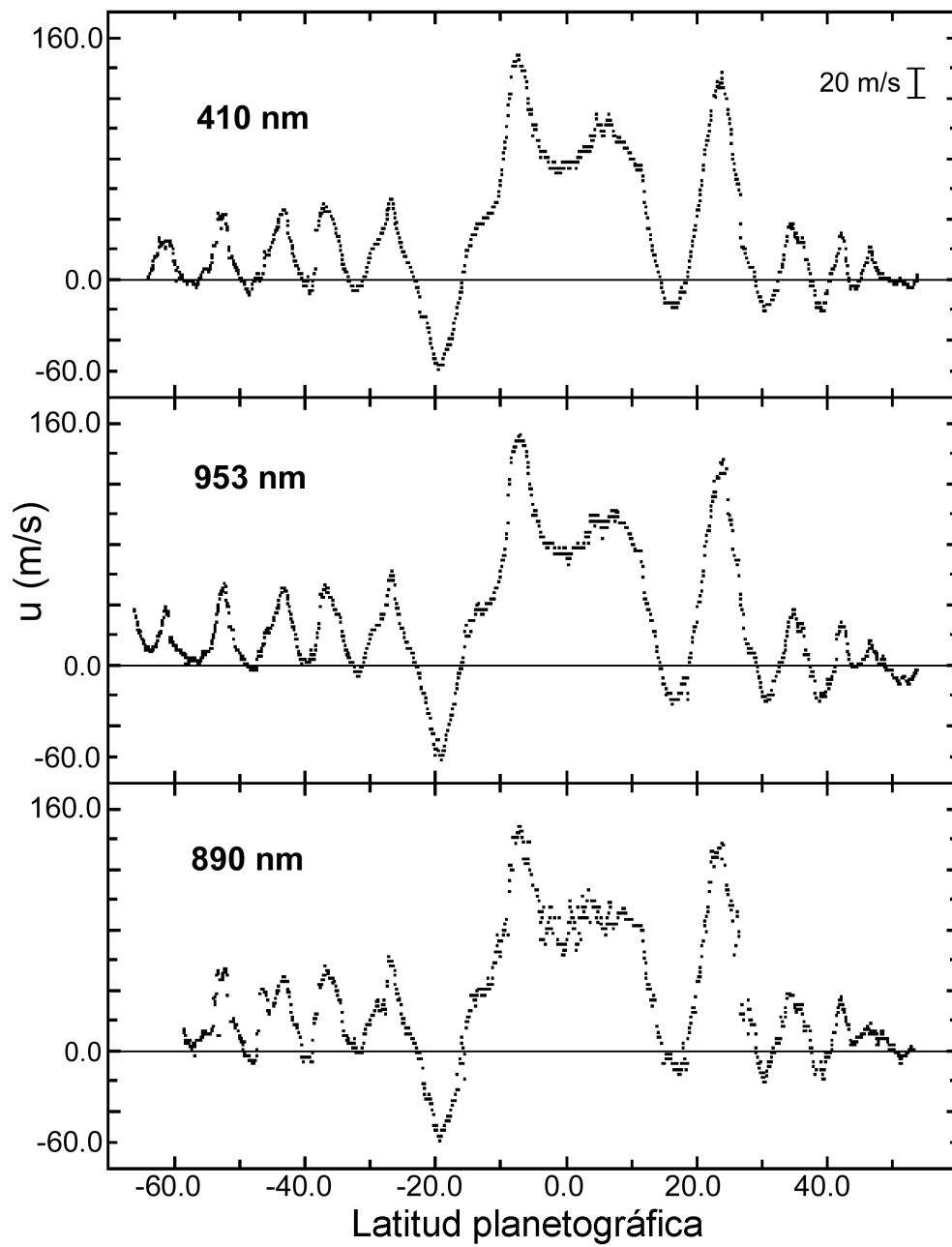
### 3.3.2 LOS PERFILES DEL HST: DE 1995 A 2000

Como ya se ha mencionado en la introducción, Limaye (1989) realizó un estudio de la variabilidad temporal del flujo zonal a partir de los datos de los Voyager 1 y 2. Su investigación cubrió un intervalo temporal de tan sólo 5 meses y medio, pero pudo analizar más de 250 rotaciones del planeta. En su trabajo afirma que fue capaz de detectar cambios superiores a los  $10 \text{ ms}^{-1}$ . En el estudio presente la situación es exactamente la opuesta: el flujo zonal ha sido monitorizado durante un intervalo de tiempo de 5 años, desde octubre de 1995 a septiembre de 2000, pero únicamente para una rotación, como mucho para dos, para cada caso. En este estudio el objetivo era detectar cambios en una escala temporal más grande (casi medio año de Júpiter), y comparar los perfiles con los del Voyager a la misma resolución.

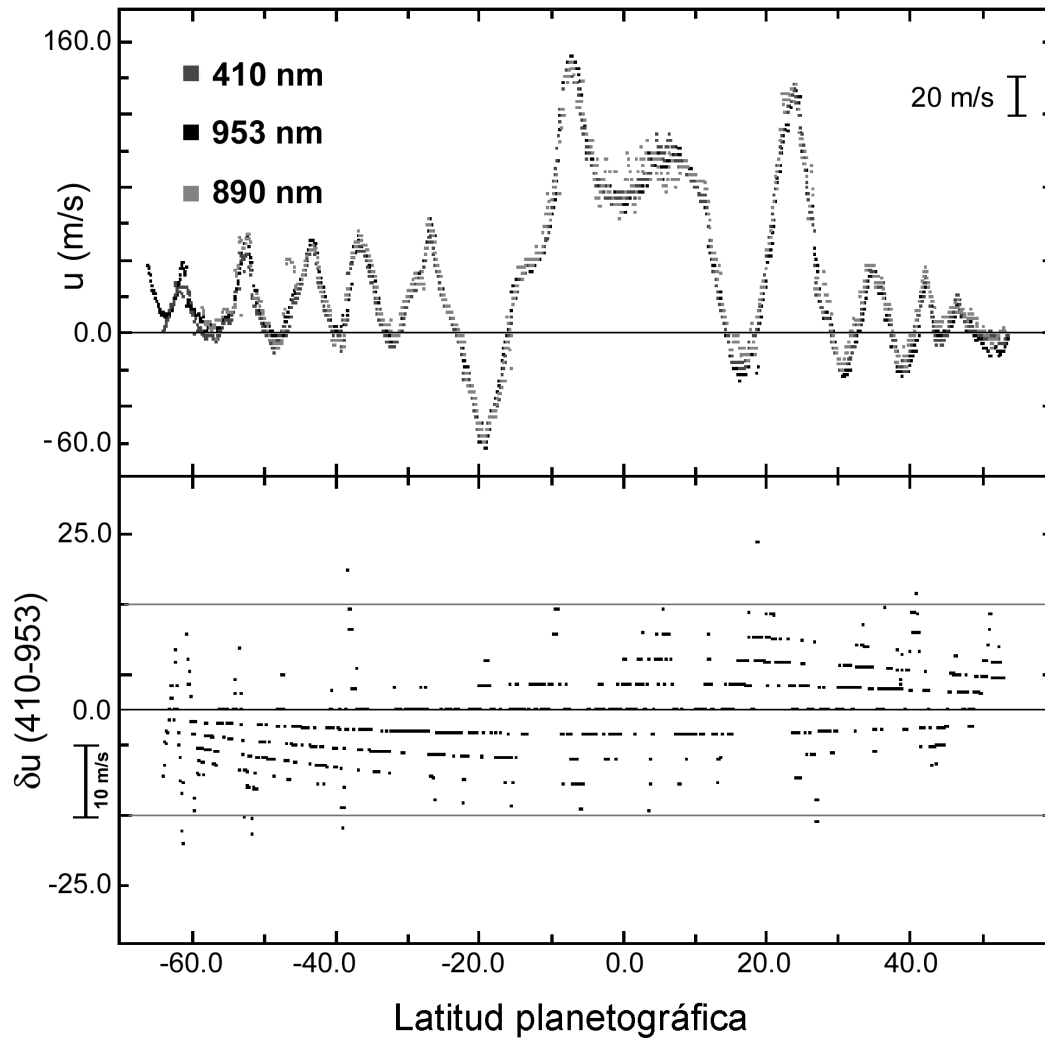
Empezando en 1995, se calculó un perfil de vientos medio para cada fecha (excepto 1999) usando pares de imágenes temporalmente separadas por una rotación del planeta, y obteniendo barridos separados por intervalos de latitud de 0.1 grados, un valor próximo a la máxima resolución del HST en Júpiter. Teniendo en cuenta que no se encontraron diferencias entre los perfiles obtenidos a partir de los tres filtros se asignó el mismo peso a todas las mediciones. La expresión usada para el cálculo de la velocidad zonal media  $\langle u(\varphi) \rangle$  fue

$$\langle u(\varphi) \rangle = \frac{\sum_{i=1}^{N(\varphi)} u_i(\varphi)}{N(\varphi)}, \quad (3.1)$$

donde  $N(\varphi)$  es el número de puntos a una latitud  $\varphi$  dada, y  $u_i(\varphi)$  es la velocidad individual de cada punto. El número de puntos para cada perfil osciló entre 1500 y 4500, lo que permitió obtener perfiles suaves para todas las fechas de observación excepto en septiembre de 2000, fecha en la que sólo pudo obtenerse un perfil.



**Figura 3.1** Los tres perfiles zonales promedio a varias longitudes de onda (410nm, 953nm y 892nm), calculados usando el método de correlación a partir de imágenes del HST tomadas el 5 de octubre de 1995.



**Figura 3.2.** (Arriba) superposición de los tres perfiles zonales de vientos medios medidos en imágenes del HST tomadas el 5 de octubre de 1995 (mostrados individualmente en la Figura 3.1). (Abajo) diferencia de velocidades ( $\delta u$ ) entre los perfiles a 410nm y 892nm. La dispersión media es de  $\sim 7.7 \text{ ms}^{-1}$ . Las líneas grises horizontales marcan los límites a  $\pm 2\sigma$ .

La incertidumbre de las medidas en cada perfil pudo estimarse usando la siguiente expresión (Bevington 1969)

$$\sigma(u) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (u(\varphi_i) - \langle u(\varphi_i) \rangle)^2}{N-1}}, \quad (3.2)$$

donde en este caso  $N$  es número total de puntos que componen el perfil,  $u(\varphi_i)$  son las medidas individuales de velocidad a la latitud  $\varphi_i$ , y  $\langle u(\varphi_i) \rangle$  es la velocidad media para dicha latitud. En la Tabla 3.2 se muestran los datos individuales de cada perfil y la dispersión  $\sigma$ .

Fecha	Número de puntos	Intervalo de latitud cubierto	$\sigma$ (ms <sup>-1</sup> )
5 octubre 1995	2290	66S-53N	2.9
14 mayo 1996	2302	17S-72N	3.6
21 octubre 1996	2395	68S-68N	2.3
4 abril 1997	1481	11S-77N	4.4
25 junio 1997	3452	68S-67N	3.6
16 julio 1998	4476	54S-72N	6.0
2 septiembre 2000	1124	53S-65N	3.0

**Tabla 3.2.** Propiedades generales de los perfiles observados. El número de puntos en cada perfil es el número total de correlaciones calculadas para cada fecha en todos los filtros y para todos los perfiles zonales especificados en la Tabla 3.1

En la Figura 3.3 se muestran individualmente todos los perfiles de vientos promediados desde octubre de 1995 hasta julio de 1998. Globalmente muestran que el perfil de vientos es estable respecto de la posición en latitud de las corrientes en chorro, tanto las dirigidas hacia el este como al oeste. Sin embargo es posible apreciar algunas diferencias en la forma e intensidad de algunas de las corrientes en chorro. Para poder comparar los perfiles entre sí se calcularon las diferencias entre ellos.

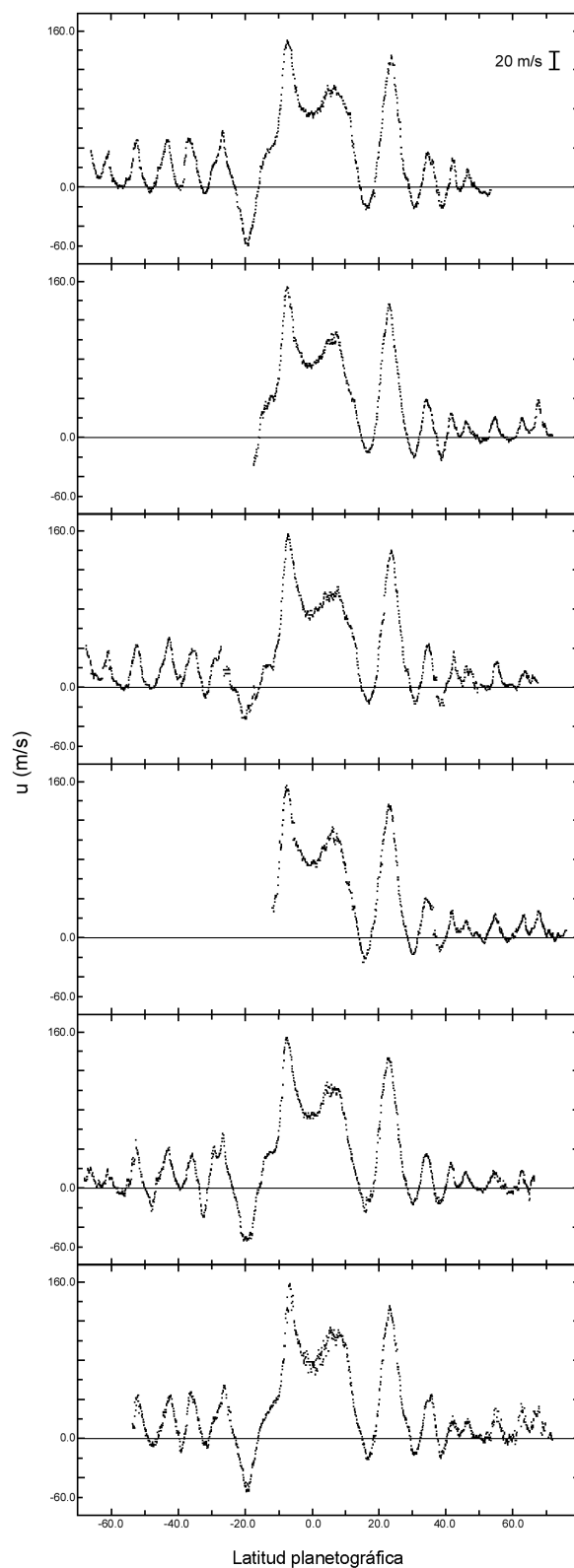
La Figura 3.4a muestra la diferencia entre los perfiles de junio de 1997 y octubre de 1995. La Figura 3.4b muestra la diferencia entre julio de 1998 y octubre de 1995. Las figuras 3.4c y 3.4d son las diferencias entre abril de 1997 y mayo de 1996, y entre julio de 1998 y mayo de 1996 respectivamente. La desviación estándar para las diferencias del hemisferio sur son 8.3m/s y 9.6m/s (Figuras 3.4a y 3.4b respectivamente), mientras que la dispersión de los datos para el hemisferio norte es de 6.0ms<sup>-1</sup>, 6.5m<sup>-1</sup>, 5.2m<sup>-1</sup>, y 6.5m<sup>-1</sup> (Figuras 3.4a, 3.4b, 3.4c y 3.4d respectivamente).

Aparentemente se detectaron cambios a ~37°S, ~10°S y a ~10°N que sobrepasan el nivel de dispersión de  $\pm 2\sigma$  y que están presentes en todas las diferencias calculadas. Finalmente una secuencia interesante es la variación de cambios de forma del flujo zonal en la corriente en chorro a ~27°S y en la intensidad de la corriente a ~32°S. En octubre de 1995 y julio de 1998 la corriente en chorro a ~27°S aparece como un pico sencillo, mientras que en junio de 1997 se ha dividido en dos picos más pequeños (ver la Figura 3.3). Este detalle estuvo presente sin ambigüedades en los tres perfiles medidos a 410 nm y 953 nm por encima de la dispersión de las medidas en cada perfil individual. En particular, el pico doble medido en la corriente en chorro a ~27°S es debido a la presencia de células ciclónicas muy extensas en longitud (ver Capítulo 2). Sin embargo los cambios detectados a ~10°S y ~10°N no tienen un origen claro, aunque también podrían estar ligados a la meteorología local.

### 3.3.3 EL PERFIL ZONAL MEDIO DE VIENTOS ENTRE 1995 Y 1998

La estabilidad del viento zonal durante el período comprendido entre 1995 y 1998 justifica el cálculo del perfil para todo ese período. Este nuevo perfil puede servir como referencia para futuros estudios de cambios a largo plazo.





5 octubre 1995

14 mayo 1996

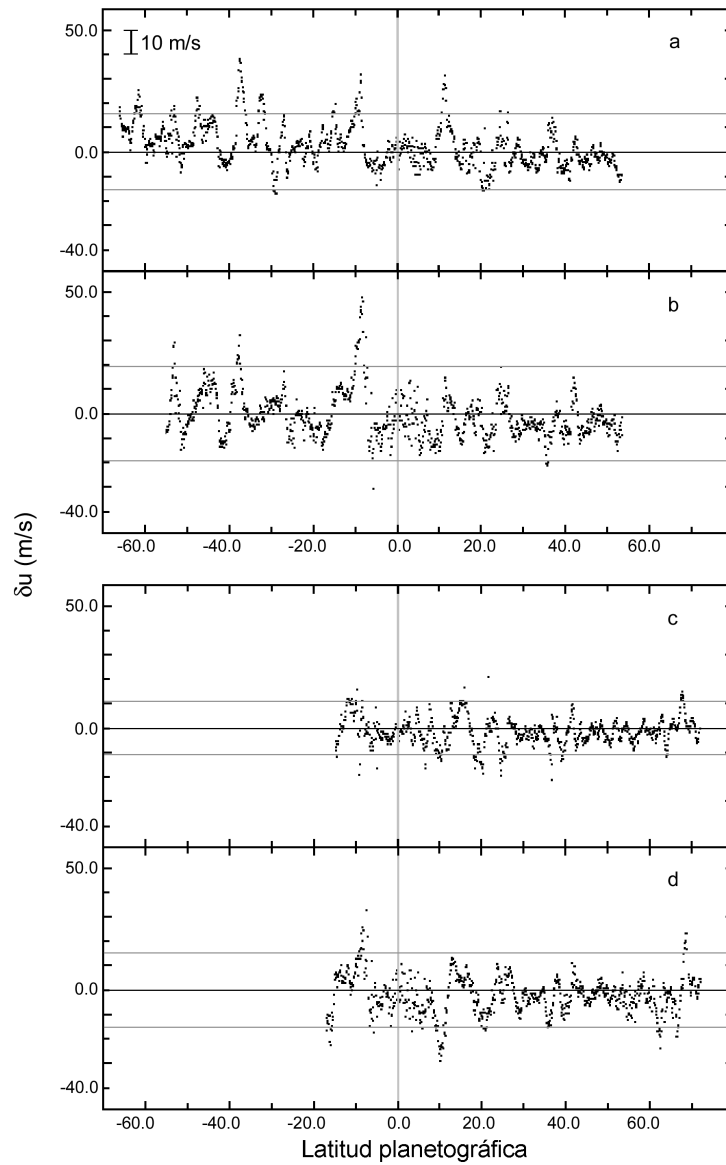
21 octubre 1996

4 abril 1997

25 junio 1997

16 julio 1998

**Figura 3.3.** Serie temporal del perfil zonal de vientos medio. Los datos de observación para estos perfiles son los que se recogen en las tablas 3.1 y 3.2.



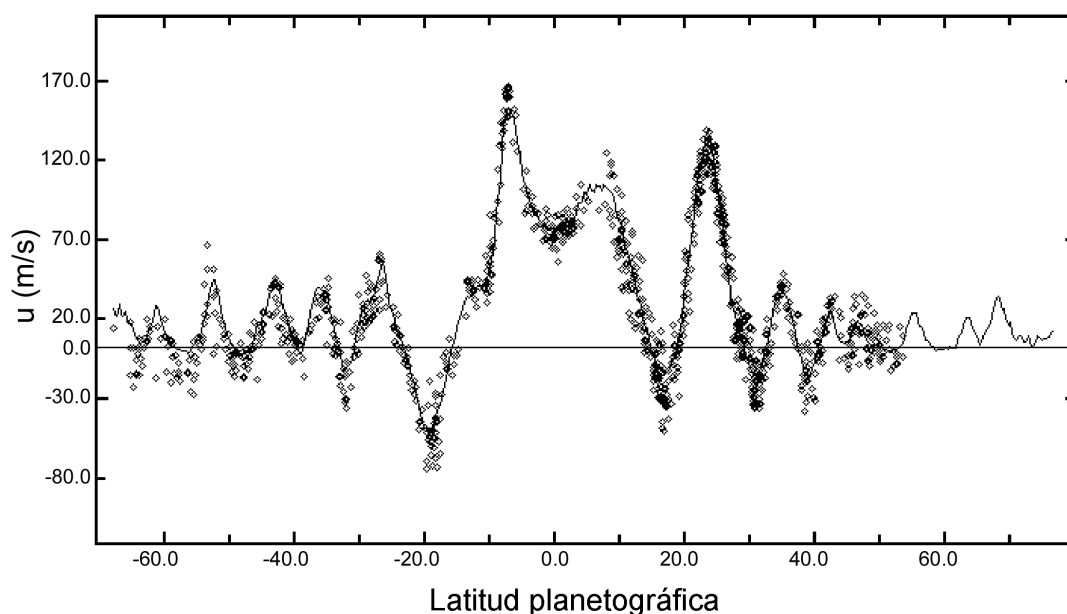
**Tabla 3.4.** Diferencias temporales entre perfiles de vientos jovianos. (a) Diferencia entre los perfiles del 25 de junio de 1997 y del 5 de octubre de 1995. (b) Diferencia entre los perfiles del 16 de julio de 1998 y del 5 de octubre de 1995. (c) y (d) Diferencias entre los perfiles del 4 de abril de 1997 y del 14 de mayo de 1996, y entre los perfiles del 16 de julio de 1998 y del 14 de mayo de 1996 respectivamente. Las líneas horizontales grises marcan la dispersión de los datos al nivel de  $\pm 2\sigma$ .

Para obtener una estimación de la dispersión de los datos que sea significativa, el perfil medio se calculó a partir de los perfiles individuales que aparecen en la Tabla 3.1, lo que resultó en un conjunto de datos preliminar con unas 15.000 medidas útiles que después fue dividido en intervalos de  $0.3^\circ$ . Este tamaño de intervalo proporcionó un número razonable de muestras a aproximadamente el doble de la resolución máxima del HST. En cada intervalo se promediaron las mediciones de velocidad zonal  $\langle u \rangle$  y sus latitudes (es decir, se calculó el “centro

de masas” para cada intervalo), y el error dado por la dispersión de los datos se calculó según (3.2). Este procedimiento para estimar el perfil zonal medio proporcionó pares (latitud,  $\langle u \rangle$ ) que no estaban separados exactamente  $0.3^\circ$  entre si, sino más bien por un intervalo de tamaño variable.

El error estimado representa una cota superior a cualquier posible cambio ya que no solamente incluye la dispersión real de los datos, sino también posibles pequeñas variaciones de longitud o cambios en el tiempo. Cualquier desviación importante proporcionada por futuras mediciones del perfil zonal de vientos sugerirá claramente variaciones reales en el perfil. En el Apéndice B se da una lista de los valores individuales del perfil zonal medio como una función de las latitudes planetográficas y planetocéntricas junto con el error estimado. Este nuevo perfil cubre completamente el intervalo entre  $\sim 70^\circ\text{S}$  y  $\sim 80^\circ\text{N}$ , y muestra el descubrimiento de dos nuevas corrientes en chorro a  $63^\circ\text{N}$  y  $68^\circ\text{N}$  y otra a  $67^\circ\text{S}$  que fueron marginalmente detectadas en estudios previos (Sanchez-Lavega y col. 1998b, Vincent y col. 2000).

Como comprobación de consistencia de los datos y control, también se obtuvo otro perfil de vientos a partir de las medidas de posición individuales de trazadores nubosos usando pares de imágenes tomadas por el HST sobre una o dos rotaciones con el filtro F953N. Los procedimientos de selección y medida se detallan en el capítulo 2. Usando el perfil medio obtenido mediante cálculos de correlación, obtuvimos que el error estimado del perfil medido a través del seguimiento de trazadores nubosos es de  $11.6\text{ms}^{-1}$ . En la Figura 3.5 se muestran ambos perfiles superpuestos.



**Figure 3.5.** Perfil zonal medio calculado según el método de correlación (línea continua), a partir de imágenes del Telescopio Espacial Hubble entre 1995 y 1998, después de promediar perfiles a 410 nm y 953 nm. Los puntos son medidas individuales obtenidas a partir del seguimiento de trazadores nubosos.

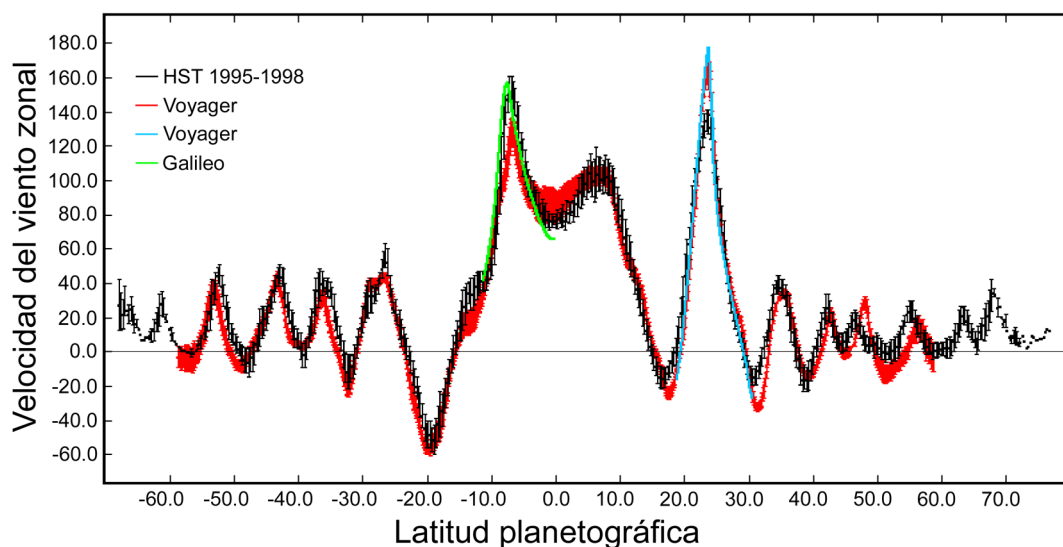
### 3.3.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS PERFILES HST DEL PERIODO 1995-1998 Y EL PERFIL VOYAGER

Al comparar los perfiles HST y Voyager debería tenerse en cuenta que cualquier diferencia superior al valor de la dispersión  $\sigma$  que abarque ambos perfiles deberá atribuirse a cambios reales del perfil entre ambos períodos. Ya que nuestros valores del perfil HST están calculados sobre promedios de perfiles medidos a diferentes longitudes y un intervalo temporal grande, cualquier error debido a efectos meteorológicos locales debe haber quedado diluido, tal y como se discute en el Capítulo 2 de este trabajo. Este será nuestro criterio para identificar cambios reales en las corrientes en chorro.

En la Figura 3.6 se compara el perfil HST promedio entre 1995 y 1998 y el perfil Voyager de 1979 (Limaye 1986) incluyendo las barras de error respectivas. Como referencia, también se superponen los perfiles individuales de la corriente en chorro a 23.7°N medidos por Maxworthy (1984) a partir también de los datos Voyager, y de la corriente a 7°S medida a partir de imágenes suministradas por la nave Galileo (Vasavada y col. 1998).

Puede comprobarse que globalmente los perfiles HST y Voyager concuerdan. Este resultado refuerza la idea de que la circulación global de Júpiter es muy estable en el tiempo. Sin embargo se encuentran discrepancias entre los dos perfiles que pueden clasificarse de dos tipos.

- (1) Parece haber una diferencia sistemática en posición latitudinal de las corrientes en chorro por encima de los 30° de latitud norte que en algunos lugares alcanza un valor aproximado de  $\sim 1^\circ$ . Nuestras corrientes en chorro tienden a estar situadas más hacia el ecuador que las de Limaye (1986) en ese intervalo de longitudes. Probablemente esa diferencia no sea real si no que tiene su origen en errores sistemáticos de navegación tanto en nuestro perfil HST como en el Voyager. Sin embargo debe insistirse en que esta diferencia latitudinal no sigue una ley sencilla; por ejemplo, mientras que ambos perfiles están de acuerdo en la localización de la corriente en chorro a 24°N, se producen discrepancias de  $\sim 1^\circ$  en la localización de los picos vecinos dirigidos hacia el oeste a 17°N y 30°N.
- (2) Algunas corrientes en chorro muestran diferencias significativas en la velocidad de pico. En particular las mayores discrepancias las encontramos en las corrientes en chorro dirigidas hacia el este a 7°S y 24°N (las más intensas), la corriente en chorro dirigida hacia el oeste a 32°N, y las corrientes situadas entre 44°N y 60°N. Veamos con un poco más de detalle dichos cambios.

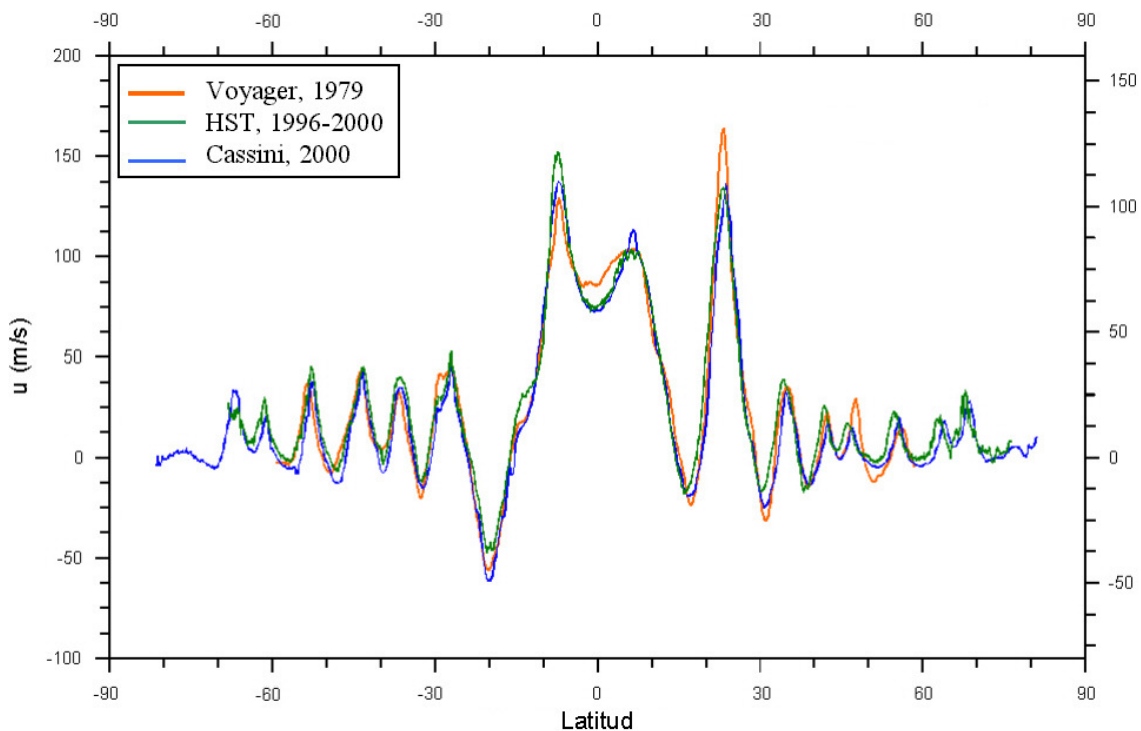


**Figura 3.6.** Comparación entre los perfiles zonales del período 1995-1998, el perfil medio Voyager de 1979, y la corriente en chorro a 23°N, y el perfil Galileo de 1996.

(2.a) La corriente en chorro a 24°N, tal y como ya se comentará en el Capítulo 4 y en la introducción de éste, ha atraído la atención de diversos autores y probablemente consiste en la parte más estudiada del flujo zonal. Todos los estudios hasta el momento en que se llevó a cabo este trabajo concluyeron con una análisis de los datos del HST en 1998. En nuestro trabajo presentado en el Capítulo 4 (publicado en García-Melendo y col. 2000) se presenta por primera vez de forma inequívoca una disminución de la intensidad de la corriente en chorro, pasando de los  $180\text{ms}^{-1}$  en 1979 a los  $140\text{ms}^{-1}$  estables durante el período 1995-2000, resultado que más tarde fue corroborado por los datos de la sonda Cassini a finales del año 2000 (Figuras 3.7 y 3.8). Como comentaremos en el Capítulo 4, probablemente esta alteración de la corriente en chorro a estas latitudes está relacionada con los cambios meteorológicos importantes que tuvieron lugar en dicha región del planeta durante la erupción o perturbación de la Banda Templada Norte en 1990 (Sánchez-Lavega y col. 1991).

(2.b) La corriente en chorro en dirección Este a 7°S no ha sido estudiada en tanto detalle como la situada a 24°N, pero resulta de interés repasar algunos resultados previos. Además los datos aportados por la nave Galileo sobre esta corriente en chorro han permitido validar nuestros resultados obtenidos por correlación a partir de las imágenes del HST. Los autores que han estudiado las imágenes suministradas por la misión Voyager parecen no ponerse de acuerdo sobre la velocidad de pico de esta corriente en chorro en 1979. Ingersoll y col. (1979, 1981) y Limaye (1986, 1989) obtienen velocidades máximas de  $\sim 130\text{ms}^{-1}$ . Magalhaes y col. (1990) informaron sobre las diferencias de velocidad de pico encontradas entre los mosaicos Voyager en naranja y violeta. De hecho, el perfil violeta no

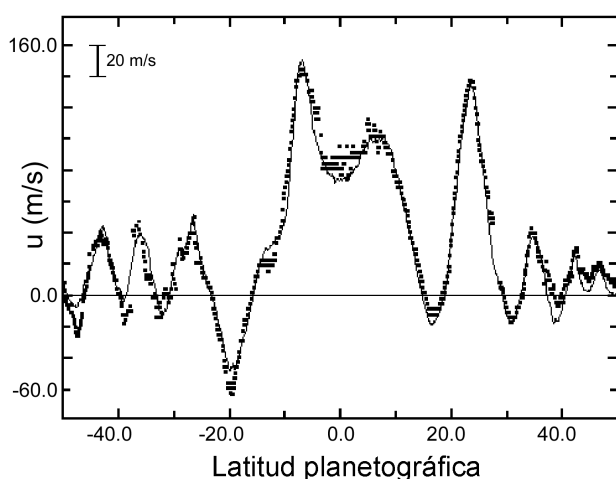
muestra un pico claro a  $7^{\circ}\text{S}$  como el perfil naranja. Además Beebe y col. (1989) obtuvieron velocidades máximas de  $150\text{ms}^{-1}$ , y Maxworthy (1985) comunicó una velocidad de pico de  $160\text{ms}^{-1}$ . Por si este panorama fuese poco confuso, Simon (1999) volvió a medir las imágenes Voyager para encontrar velocidades de pico de  $140\text{m}^{-1}$ . No obstante, un nuevo estudio realizado por Vasavada y col. (1998) sobre imágenes de Júpiter tomadas con las cámaras a bordo de los Voyager a alta resolución (“narrow-angle camera”) en naranja, proporcionó velocidades de pico del orden de  $150\text{ms}^{-1}$ . Finalmente, Vasavada y col. (1998) también midieron imágenes a altas resolución tomadas por la nave Galileo usando el método de la correlación, obteniendo unos resultados prácticamente idénticos a sus nuevas mediciones del perfil Voyager excepto por una diferencia de unos  $0.5^{\circ}$  en la situación del pico de la corriente en chorro. Medidas previas realizadas por Beebe y col. (1996) a partir de imágenes HST y Voyager usando el seguimiento de trazadores también concuerdan con los resultados de Vasavada y col. (1998).



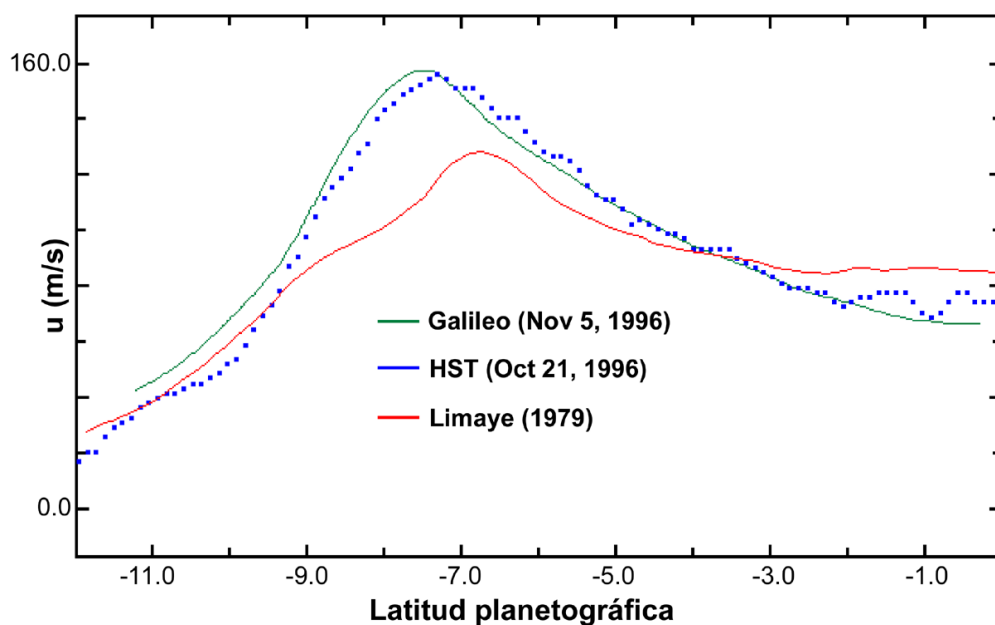
**Figura 3.7** Comparación entre diferentes perfiles zonales a lo largo del tiempo según observaciones de las sondas Voyager (Limaye 1986), HST (García-Melendo y Sánchez-Lavega 2001), y de la sonda Galileo (Porco y col. 2003). Los datos de la sonda Cassini confirmaron los resultados obtenidos a partir del estudio de las imágenes de archivo del HST, y en particular de la caída de intensidad de la corriente en chorro de la NTB.

Todos nuestros perfiles desde 1995 a 2000 muestran claramente que la velocidad de pico de la corriente en chorro a  $7^{\circ}\text{S}$  durante este período ha permanecido constante e igual al valor de  $155\text{ms}^{-1}$ . Afortunadamente, 15 días antes de que la nave Galileo tomase los datos analizados por Vasavada y col. (1998), el Telescopio Espacial

Hubble tomó imágenes de Júpiter, dándonos una oportunidad muy buena para comprobar la consistencia de nuestros datos. En la Figura 3.9 se comparan los perfiles de Galileo y HST para la corriente en chorro a 7°S junto con los resultados publicados por Limaye (1986). El acuerdo entre el perfil Galileo y el nuestro (HST) es muy bueno. Si consideramos como correcto el valor de pico de  $150\text{ms}^{-1}$ , entonces nuestros resultados sugieren que esta corriente ha permanecido estable al menos desde 1979 hasta 2000.

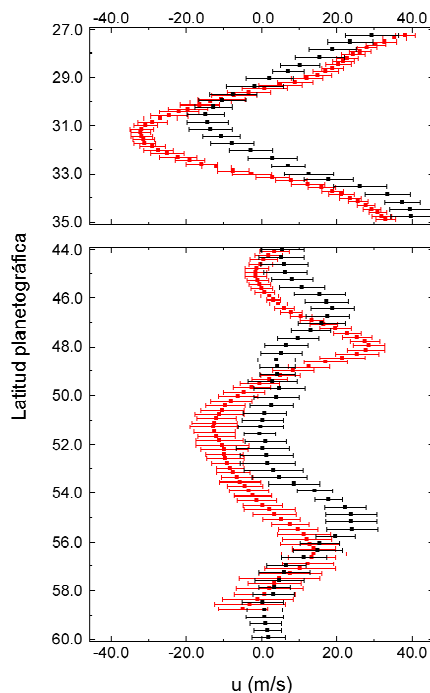


**Figura 3.8.** El perfil HST promedio entre 1995 y 1998 (línea continua), comparado con las medidas de correlación para el HST perfil de septiembre de 2000 en la banda de 953 nm (puntos).



**Figura 3.9.** Comparación entre los perfiles Galileo (Noviembre de 1996; Vasavada y col. 1998), HST (octubre de 1996; este trabajo), y Voyager 2 en luz violeta (1979; Limaye 1986) alrededor de la corriente en chorro a 7°S.

Cuando se comparan los cambios morfológicos de esta región del planeta, estos resultados son exactamente los opuestos a los encontrados en la NTB. Durante el sobrevuelo de Júpiter por las naves Voyager, la parte sur de la zona ecuatorial, donde se encuentra la corriente en chorro, se comportó de forma global como una región de albedo bajo (Beebe y col. 1989), excepto por la presencia de la denominada Gran Mancha Blanca (“White Spot”), un sistema sinóptico anticiclónico de larga vida con un tamaño aproximado de unos 10.000 km (Sánchez-Lavega y Rodrigo 1985, Maxworthy 1985). Este vórtice se movía a la velocidad de  $95 \text{ ms}^{-1}$ , más lentamente que el fluido circundante. Por el contrario, de 1995 a 2000 esta región ha mostrado un albedo elevado con estructuras delicadas en forma de espiga a lo largo de la corriente a  $7^\circ\text{S}$  (Vasavada y col. 1998). Pero en este caso, a pesar de los cambios morfológicos, la corriente en chorro ha permanecido aparentemente inalterada como ya se ha explicado. Lo mismo ocurrió durante los fuertes cambios de albedo que experimentó la Banda Ecuatorial Sur (SEB) durante el desarrollo de las erupciones o perturbaciones a  $16^\circ\text{S}$  (Sánchez-Lavega y Rodrigo 1989, Sánchez-Lavega y Quesada 1988, Beebe y col. 1989, Sánchez-Lavega y col. 1996). El seguimiento de trazadores nubosos a partir de observaciones terrestres durante el desarrollo de la erupción de la SEB de 1993, demostró que las velocidades del viento estaban en muy buen acuerdo con las mediciones realizadas a partir de los datos Voyager (Sánchez-Lavega y col. 1996).



**Figura 3.10.** Comparación entre los perfiles Voyager (rojo, 1979) y HST (negro, 1995-1998), para las regiones situadas alrededor de  $34^\circ\text{N}$  (arriba), y entre  $44^\circ\text{N}$  y  $60^\circ\text{N}$  (abajo).



(2.c) Finalmente se aprecia una disminución de la velocidad del viento de unos  $15\text{ms}^{-1}$  en la intensidad de la corriente en chorro dirigida hacia el oeste a  $32^\circ\text{N}$  y cambios más sutiles del perfil entre los  $44^\circ\text{N}$  y los  $60^\circ\text{N}$ . El debilitamiento de la corriente en chorro a  $32^\circ\text{N}$  podría estar relacionada con la aparición de la nueva banda oscura en la NTB de albedo más bajo después de la erupción de 1990 (Sánchez-Lavega y col. 1991), mientras que los posibles cambios entre los  $44^\circ\text{N}$  y  $60^\circ\text{N}$  no pueden correlacionarse con cambios morfológico significativos de la región.. En la Figura 3.10 se comparan se comparan los perfiles Voyager (Limaye 1986) y HST para la región alrededor de  $32^\circ\text{N}$  y entre  $44^\circ\text{N}$  y  $60^\circ\text{N}$ .

### 3.4 CONCLUSIONES

Nuestras medidas del viento zonal entre 1995 y 2000 indican que no ha habido cambios importantes durante este período en el flujo zonal medio de Júpiter. Durante este período de cinco años la morfología de Júpiter ha permanecido básicamente inalterada. Estos datos, tras compararlos con los aportados por las misiones Voyager, dan soporte a la idea de la estabilidad a largo plazo de la circulación global del planeta. Este trabajo también demuestra que es posible monitorizar la circulación global de forma continua desde telescopios espaciales, y en particular el HST, con una resolución similar a la proporcionada por las misiones Voyager.

