

CAPÍTULO 2

EL ANÁLISIS DE IMÁGENES PLANETARIAS

Dado que esta tesis tiene como parte experimental el estudio de la atmósfera de Júpiter al nivel del techo de nubes basándose en imágenes tomadas con diferentes tipos de telescopio, dedicamos este capítulo a la metodología empleada en su análisis.

2.1 TERMINOLOGÍA Y OTRAS DEFINICIONES

La terminología habitualmente aceptada de la familiar distribución de bandas y zonas de Júpiter, visibles con instrumentos a baja resolución, es la indicada en la Figura 2.1. Las bandas son las estructuras nubosas de bajo albedo que circundan el planeta, mientras que las zonas son las regiones claras entre ellas. La nomenclatura anglosajona internacionalmente aceptada es la de denominar a bandas y zonas según su posición respecto al ecuador combinando los términos B (Belt), Z (Zone), E (Equatorial), T (Temperate), S (South), N (North), P (Polar), Tr (Tropical) y R (Region). Por ejemplo, la NTB es la Banda Templada Norte o North Temperate Belt. A medida que nos desplazamos más hacia los polos, se añaden sucesivamente más veces el término N (North) o S (South). Por ejemplo, SSTZ es la Zona Templada Sur Sur (South South Temperate Belt). Algunos detalles tienen denominaciones especiales como la Gran Mancha Roja: GRS (Great Red Spot), o los óvalos blancos de la STB denominados WOS (White Oval Spot).

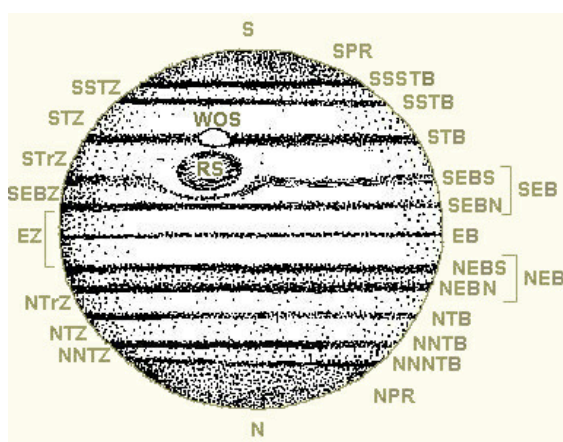


Figura 2.1. Terminología de las bandas y zonas de Júpiter.

2.1.1 LAS BANDAS Y ZONAS DE JÚPITER

Existe una interpretación para la estructura de bandas observada en Júpiter. Si se superponen los vientos zonales sobre el aspecto visible del planeta, encontramos que las corrientes en chorro están correlacionadas con la estructura de zonas y bandas (Figura 2.2). Júpiter es un planeta en rápida rotación, el número de Rossby para latitudes medias es sensiblemente inferior a uno ($R_o \sim 0.01$ para Júpiter) así que podemos aplicar el criterio de equilibrio geostrófico según el cual los vientos se mueven siguiendo las isobaras. Aplicando dicho criterio, se llega a la conclusión de que las zonas de Júpiter son regiones de alta presión (anticiclónicas) y las bandas regiones de baja presión (ciclónicas, ver la Figura 2.3). Desde el punto de vista atmosférico, el hecho de que en las bandas dominen las bajas presiones respecto de las zonas, también nos indica que el techo de nubes de las zonas debe ser más alto que el de las bandas, es decir, la columna de aire debe ser más alta.

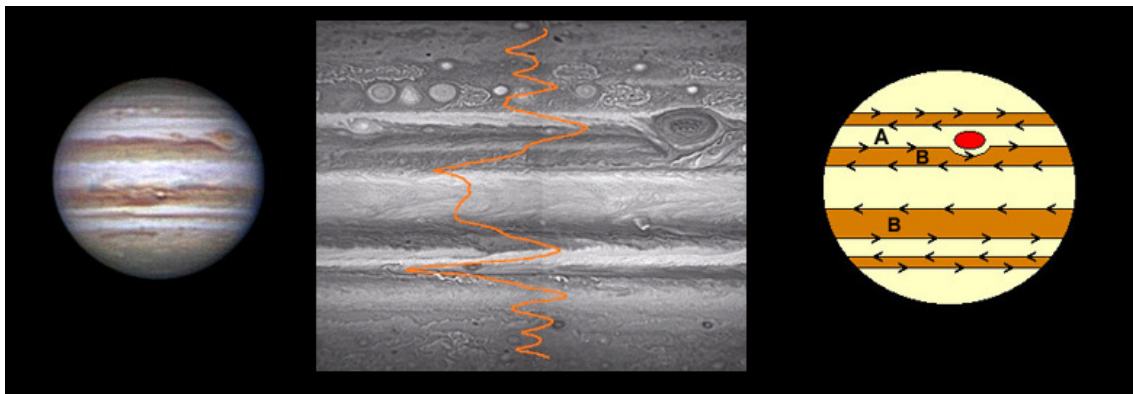


Figura 2.2. A la izquierda se muestra una visión telescópica a baja resolución típica donde es patente la estructura de bandas (regiones más oscuras y rojizas) y de zonas (regiones más claras) de Júpiter. La mancha roja también es visible en esta imagen. En el centro se superponen los vientos zonales sobre una proyección cilíndrica confeccionada a partir de imágenes del Hubble Space Telescope, en la que se comprueba cómo las corrientes en chorro delimitan claramente las fronteras entre bandas y zonas. En la parte derecha, un esquema de la estructura de bandas y zonas de Júpiter señala que las bandas son regiones de baja presión (B), mientras que las zonas más claras (A), lo son de alta presión.

Este comportamiento se evidencia a través de la observación del planeta a diferentes longitudes de onda. En las zonas de coloración típicamente blancas, las nubes son más gruesas y se encuentran a mayor altura, por lo que el techo de nubes está más frío y además bloquea con mayor efectividad la radiación térmica que proviene del interior. Sin embargo el techo de nubes de las bandas, más oscuras, se encuentra más bajo y no es tan grueso, por lo tanto no está tan frío y radia con más efectividad a longitudes de onda térmicas. Las imágenes en infrarrojo térmico ($4\mu\text{m}$) indican cuáles son las regiones más calientes y más frías del planeta, por otro lado, las imágenes tomadas en la banda principal de absorción del metano (890nm) dan información sobre la altura del techo de nubes. El análisis de las imágenes tomadas en diversas longitudes de onda sugieren que las zonas son regiones donde las nubes son más altas y espesas bloqueando de manera más efectiva la radiación térmica proveniente del interior (Figura 2.4). Aunque el techo visible de las zonas sea más alto, como la columna de aire es más alta en las zonas que en las bandas,

también debe ser más caliente en su interior, tal y como se explica en la Figura 2.5.

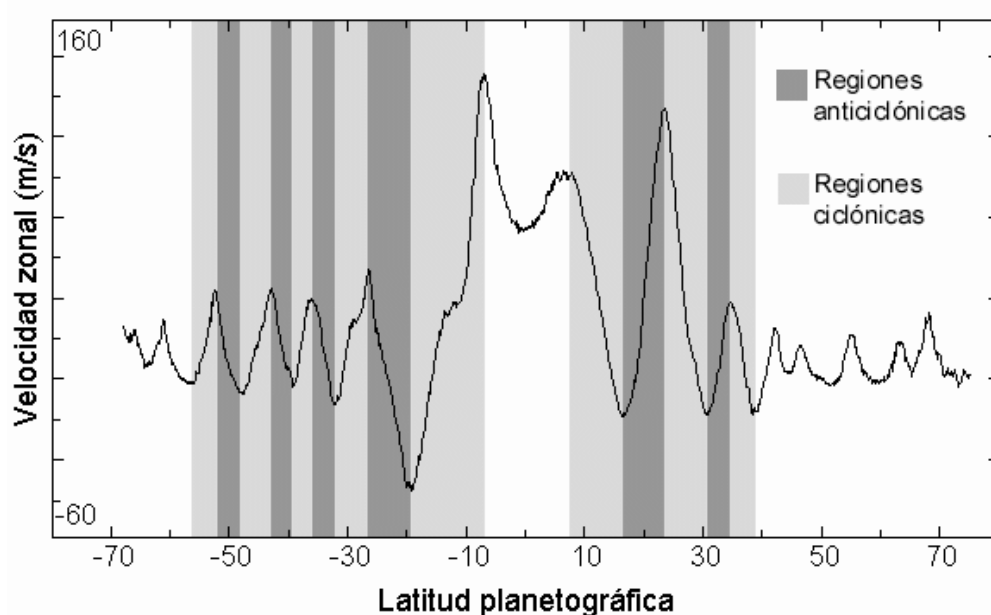


Figura 2.3. Las regiones ciclónicas y anticiclónicas del perfil zonal de vientos se corresponden exactamente con la estructura de bandas y zonas observada. En la zona ecuatorial, debido a que ya no es válido el régimen geostrófico, no puede aplicarse esta correspondencia.

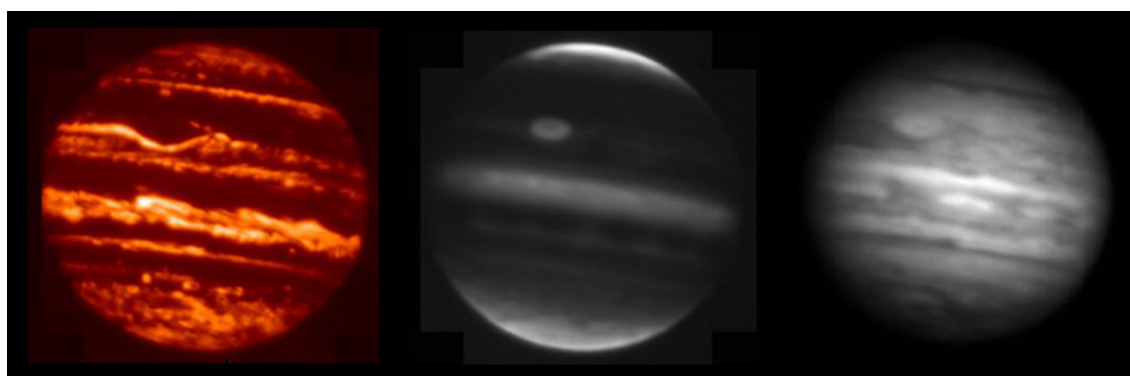


Figura 2.4. Imágenes de Júpiter tomadas de izquierda a derecha en las bandas de $4.78\mu\text{m}$, $2.30\mu\text{m}$, y $1.58\mu\text{m}$, por el Infrared Telescope Facility el 5 de octubre de 2000. La imagen de la derecha tomada en infrarrojo cercano muestra la estructura visible de nubes y la alternancia de zonas y bandas. La imagen del centro, capturada en las bandas de absorción del metano, muestra como regiones más claras las nubes más altas de amoníaco, donde es patente las nieblas que cubren los casquetes polares, la mayor altura del techo de nubes de la Gran Mancha Roja, y donde las zonas, sobre todo en la región ecuatorial, aparecen como franjas más brillantes a causa de la mayor altura de las nubes. En la última imagen en el extremo de la izquierda, tomada a longitudes de onda térmicas, se observa el bloqueo del calor proveniente del interior del planeta por las nubes más altas, frías y gruesas de las zonas y de la propia mancha roja. En esta imagen térmica de Júpiter se revela de forma todavía más espectacular la alternancia de bandas y zonas.

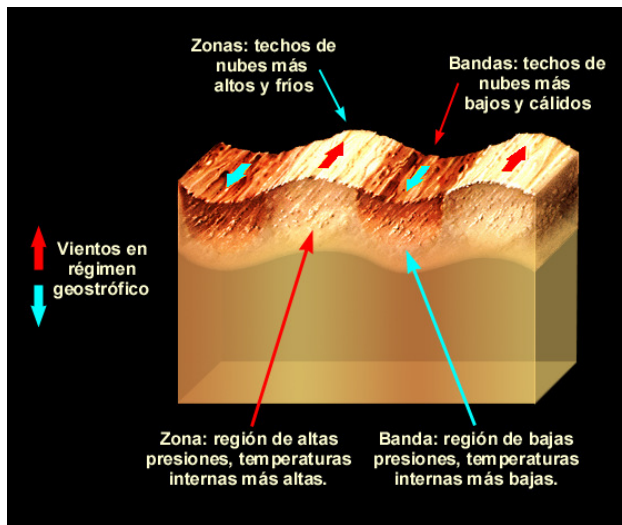


Figura 2.5. De acuerdo con la interpretación de equilibrio geostrófico, las zonas son regiones más altas que las bandas. El aire por debajo de las zonas posiblemente esté más caliente que el que se encuentra bajo las bandas. Sin embargo, la mayor altura y espesor de las zonas provoca un mayor enfriamiento del techo de nubes y un bloqueo más efectivo de la radiación térmica que proviene del interior.

2.1.2 SISTEMAS DE ROTACIÓN Y DEFINICIONES DE LA LATITUD

Se denomina *sistema* a cada uno de los períodos de rotación de referencia que se han adoptado para Júpiter. Debido a la naturaleza nubosa de la atmósfera del planeta, ningún detalle o formación posee un período de rotación constante que sirva de referencia para un arbitrario meridiano cero, por lo que han sido adoptados dos Sistemas de rotación "visuales", denominados Sistema I y Sistema II y un tercero o Sistema III, que se aplica a las ondas de radio decamétricas o como referencia del movimiento de los detalles en ms^{-1} , ya que se considera que debe ser muy cercano o igual al del núcleo sólido de Júpiter al estar modulado por el campo magnético. El Sistema I posee un período de 9h 50m 30.003s (rotación de $877^{\circ}90/\text{día}$) y se aplica a los detalles de la Zona Ecuatorial, comprendiendo también las dos bandas contiguas a ésta, la NEBs y la SEBn (en ocasiones también se aplica a ciertos detalles de la NTBs). El Sistema II con un período de 9h 55m 40.632s (rotación de $870^{\circ}27/\text{día}$) se aplica al resto del planeta, desde la NPR hasta el borde Norte de la NEBs y de la SPR hasta el borde Sur de la SEBn. El Sistema III posee un período de 9h 55m 29.711s $\pm 0.04\text{s}$ (Figura 2.6).

Por otro lado se utilizan las siguientes fórmulas para pasar de unos sistemas de rotación a otros:

$$\begin{aligned} \text{SI} &= (\text{SII} + 0^{\circ}1) + 7^{\circ}63(\text{DJ} - 2442624.5) \\ \text{SII} &= (\text{SI} - 0^{\circ}1) - 7^{\circ}63(\text{DJ} - 2442624.5) \\ \text{SIII} &= \text{SII} + 0^{\circ}27432(\text{DJ} - 2435839.5), \end{aligned}$$

donde DJ indica el tiempo dado en días julianos. Como se ve los sistemas II y III se hicieron coincidir de manera arbitraria el $\text{DJ} = 2435839.5$.

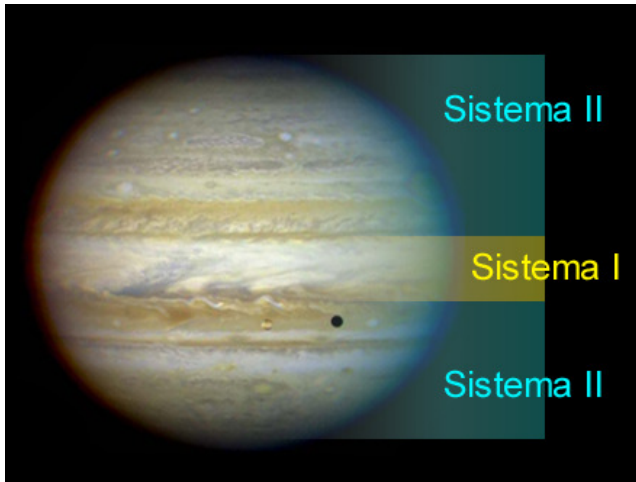


Figura 2.6. Los sistemas clásicos de Júpiter utilizados históricamente por los observadores del planeta. El sistema I, con un período de rotación de 9h 50m 30.0s, se reserva para la zona ecuatorial del planeta tal y como se muestra en amarillo, mientras que el sistema II en azul, con 9h 55m 40.6s, se aplica al resto del globo.

El fuerte achatamiento polar de Júpiter ha dado lugar a dos definiciones para indicar la latitud de un detalle: las latitudes planetográfica y la planetocéntrica. En la Figura 2.7 se ilustran ambas definiciones. La latitud planetocéntrica o ϕ_c , al igual que la latitud geográfica de la Tierra se mide cómo el ángulo existente entre un detalle de la superficie y el ecuador respecto del centro O del planeta. La latitud planetográfica ϕ_g , por otro lado, es el ángulo más pequeño que forma el horizonte local del detalle con el eje de rotación (positivo si es norte o negativo si es sur).

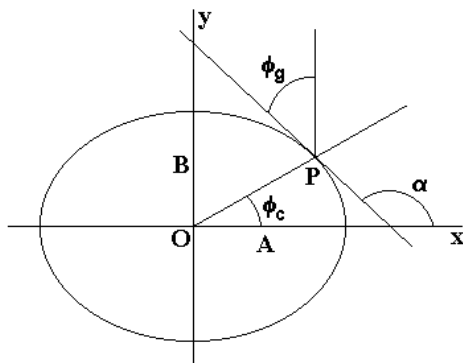


Figura 2.7. Definición de las latitudes planetográfica y planetocéntrica.

Si A y B son los semiejes mayor y menor respectivamente de la elipse resultante de cortar el elipsoide de revolución del planeta con un plano que contenga al eje de rotación, se tiene que para un punto P sobre la elipse, la pendiente del horizonte de ese punto respecto del plano del ecuador es

$$\operatorname{tg}(\alpha) = -\frac{1}{\varepsilon^2} \frac{1}{\operatorname{tg}(\phi_c)} . \quad (2.1)$$

En esta expresión, ε es la relación entre los radios ecuatorial y polar (ver la Figura 2.7), esto es,

$$\varepsilon = \frac{A}{B} . \quad (2.2)$$

Pero

$$\operatorname{tg}(\alpha) = -\frac{1}{\operatorname{tg}(\varphi_g)}, \quad (2.3)$$

por lo que la relación entre las latitudes planetográfica y planetocéntrica es

$$\operatorname{tg}(\varphi_g) = \varepsilon^2 \operatorname{tg}(\varphi_c) . \quad (2.4)$$

2.2 MEDIDA DE LA POSICIÓN DE DETALLES SOBRE EL DISCO DEL PLANETA

Para realizar estudios de la dinámica de la atmósfera del planeta, una operación imprescindible es la medida de la posición de detalles sobre el disco del mismo a partir, por ejemplo, de imágenes CCD. A esta operación también se la denominada “navegación”. El procedimiento que se sigue para navegar las imágenes depende mucho de cómo sean estas. Por ejemplo, no es lo mismo determinar posiciones de trazadores nubosos en el disco completo del planeta registrado en imágenes tomadas desde la superficie de la Tierra o desde el Telescopio Espacial Hubble, que a partir de imágenes completas o parciales enviadas desde el espacio desde un punto de observación cualquiera cercano al planeta como es el caso de una sonda espacial (Voyager, Galileo y Cassini). Puesto que las imágenes utilizadas en el trabajo experimental de esta investigación han sido todas obtenidas desde la Tierra (o el HST), nos limitaremos a este primer caso.

En primer lugar se escoge un sistema de coordenadas de tal manera que los ejes x e y coincidan con los radios ecuatorial y polar del planeta sobre la imagen CCD. En dichos ejes tendremos el disco del *planeta aparente*, que se define como la proyección sobre el cielo del elipsoide de revolución real del planeta. El eje z para completar la terna de coordenadas, está dirigido directamente hacia la visual del observador. Todo ello se representa en la Figura 2.8.

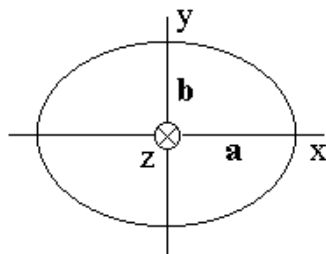


Figura 2.8. Disco elíptico de Júpiter de semidiámetros aparentes a y b .

El eje de rotación de Júpiter posee una inclinación $i=3^\circ.12$ sobre su plano orbital, lo que causa que a veces el planeta se vea como un elipsoide de revolución más o menos achatado. El grado de inclinación con el que se ve el planeta lo da la denominada *declinación planetocéntrica* D de la Tierra, que en

definitiva es la latitud planetocéntrica del planeta, desde la cual la Tierra se observa en el cenit. D es positiva en el hemisferio norte y negativa en el sur. Si X , Y y Z es el sistema de referencia ligado al elipsoide del planeta, de tal manera que X coincide con x , Y coincide con el eje de rotación y tiene el sentido del polo norte, y Z se encuentra en el plano ecuatorial del planeta completando los tres ejes de coordenadas (ver Figura 2.9), entonces la relación entre X , Y , Z y x , y , z será

$$\left. \begin{aligned} X &= x \\ Y &= y \cos(D) + z \sin(D) \\ Z &= -y \sin(D) + z \cos(D) \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Por otro lado el planeta tiene la forma de un elipsoide de revolución, por lo que

$$\frac{X^2}{A^2} + \frac{Z^2}{A^2} + \frac{Y^2}{B^2} = 1 \quad (2.6)$$

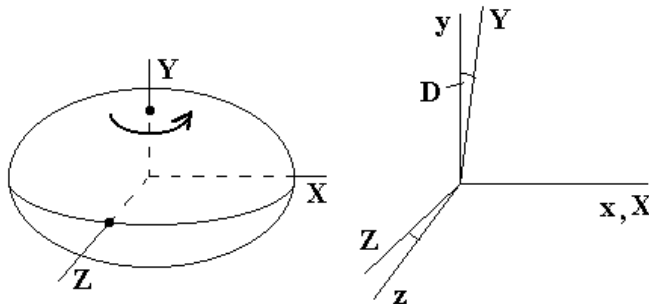


Figura 2.9. A la izquierda, sistema de coordenadas sobre el elipsoide de revolución (se indica el sentido de rotación del planeta, pero el sistema XYZ no gira). A la derecha posición relativa entre el sistema XYZ y el xyz . XYZ está afectada de un pequeño giro alrededor del eje x dado por la declinación planetocéntrica de la Tierra D .

Para cualquier punto del planeta, si determinamos sus coordenadas polares, tendremos automáticamente los valores de la longitud λ y la latitud planetocéntrica φ_c , que después podremos pasar a planetográfica según la expresión ya calculada.

Así pues, midiendo el valor de x e y sobre el disco del planeta en la imagen, y sustituyendo (2.5) en (2.6), resulta en una ecuación de segundo grado en z . Resolviendo dicha ecuación, se obtiene el valor de z , que junto con los medidos x e y , sirven para finalmente determinar X , Y y Z . A partir de aquí y según la Figura 2.9 se tiene que

$$\cos \lambda = \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Z^2}} \quad \text{y} \quad \operatorname{tg}(\varphi_c) = \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Z^2}} .$$

2.3 LA MEDIDA DE LA VELOCIDAD DE DERIVA. VELOCIDAD ZONAL

Debido a que la atmósfera de Júpiter es un fluido gobernado por un perfil de velocidades dependiente de la latitud como el que se muestra en la Figura 2.3, no existe una velocidad de rotación única y cada estructura nubosa posee la suya. Además, dicha velocidad de rotación puede que no sea constante en el tiempo sino que sufra fluctuaciones, como por ejemplo le ocurre a la Gran Mancha Roja, donde se ha detectado un movimiento fluctuante en longitud con unos 90 días de período (Solberg 1969, Trigo-Rodríguez y col. 2000). Para estudiar la dinámica del movimiento de detalles, generalmente se calcula la denominada *velocidad de deriva* respecto de algunos de los sistemas estándar, y que consiste en la determinación de la diferencia de velocidades de rotación, en unidades como puedan ser grados por día, entre el sistema estándar escogido y el propio detalle.

En general el procedimiento utilizado consiste en medir la longitud del detalle respecto de algunos de los sistemas estándar (el I, el II o el III), y a partir de ahí determinar la velocidad de deriva propia. La importancia de poder determinar dicha velocidad, reside en que en la mayoría de las ocasiones, estaremos interesados en estudiar la continuidad de muchas formaciones atmosféricas. Por ejemplo, es relativamente común la formación de vórtices, que a veces poseen períodos de vida de varios años. La atmósfera de Júpiter disipa la energía mucho más lentamente que la atmósfera terrestre, por ello, mientras que estructuras típicas de la Tierra como son los ciclones poseen periodos de vida entre 10 y 100 días, en Júpiter los períodos de vida pueden alargarse a varios años, y existen estructuras particulares como las WOS, con longevidades de décadas, y la propia GRS, con un período de vida mínimo de varios siglos. Una vez conocida la velocidad de deriva propia, ésta permite una identificación del detalle y efectuar su seguimiento. En definitiva, obtener la velocidad de deriva propia es equivalente a obtener el período de rotación propio. Las velocidades de deriva son imprescindibles para determinar la velocidad en ms^{-1} a la que se transporta una estructura nubosa en la atmósfera respecto del sistema III, que recordemos es el de rotación supuestamente auténtico del planeta. A dicha velocidad, se le denomina *velocidad zonal* y se expresa mediante la letra u .

Denominemos como SE , al Sistema Especial que gira a la misma velocidad que el detalle. En dicho SE los detalles serán prácticamente estacionarios y por tanto posible efectuar la identificación tanto de la continuidad como de otros comportamientos. Tal y como se indica en la Figura 2.10, supóngase que en t_0 se mide una longitud λ_0 , y en t_1 una longitud λ_1 para una misma estructura nubosa en un sistema genérico SG (como puedan ser el I, el II o el III). La diferencia de las longitudes medidas la denominaremos $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_0$.

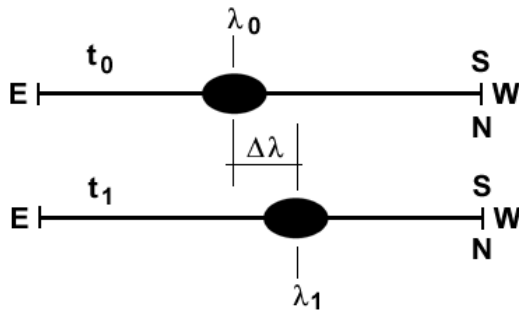


Figura 2.10. Mediciones de longitud λ_0 y λ_1 de un mismo detalle efectuadas en dos instantes de tiempo diferentes t_0 y t_1 y en un sistema genérico SG, como por ejemplo puedan ser los sistemas I, II o III. Los puntos cardinales ponen de manifiesto que la imagen está invertida e indican la orientación del disco del planeta.

La deriva del detalle en grados por unidad de tiempo, denominada w , será (si t_1 y t_0 están dados en días como a veces es más habitual, la unidad de tiempo será el día)

$$w = \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{t_1 - t_0}. \quad (2.7)$$

En lugar de dar la posición en SG, podemos utilizar el sistema especial SE en el que los detalles permanezcan estacionarios (se trata de una simple transformación galileana). Para ello utilizaremos la transformación

$$SE = SG - \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{t_1 - t_0} (t - t_0) = SG - w(t - t_0). \quad (2.8)$$

En este caso puede comprobarse que el detalle permanece estacionario en SE, ya que

$$SG = \lambda_0 + w(t - t_0). \quad (2.9)$$

Si ω es la deriva media de cualquier estructura nubosa referida a un sistema cualquiera de rotación, y si suponemos que ω se ha mantenido constante a lo largo de todo el período de observación, su posición en función del tiempo puede darse por la expresión lineal (como en 2.8)

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \omega(t - t_0), \quad (2.10)$$

donde los valores λ_0 que representa la posición en longitud para $t=t_0$ y ω pueden obtenerse a través del ajuste de una recta por mínimos cuadrados sobre la gráfica de deriva. Calculado el valor de ω , si este se da en grados por día, el período de rotación del detalle en segundos valdrá (Sanchez-Lavega y Rodrigo 1985)

$$\tau = (360^\circ \times 24 \times 3600) / (\Omega - \omega) \quad (\text{segundos}), \quad (2.11)$$

donde Ω es el período de rotación del sistema de referencia también en grados por día (por ejemplo, para el sistema I $\Omega=877^\circ 9d^{-1}$). A partir de τ , con muy buena aproximación puede calcularse la velocidad zonal u para una latitud planetográfica determinada ϕ_g como

$$u(\varphi) = 2\pi R \cos(\varphi_g)(\tau^{-1} - \tau_i^{-1}) . \quad (2.12)$$

$R=71.398.000$ m es el radio ecuatorial del planeta y $\tau_i=9h55m29,7s=35729,7s$ es el período de rotación del sistema III, que corresponde al período de rotación del campo magnético que supuestamente debe coincidir con el del interior de Júpiter (Riddle y Warwick, 1976).

Estas expresiones permiten la estimación de las variaciones de u debidas a fluctuaciones en ω manteniendo la latitud constante

$$du = -2\pi R(\varphi)\cos(\varphi)(k^{-1})d\omega \quad (2.13)$$

donde $k=360 \times 24 \times 3600$. O bien

$$\Delta u = -2\pi R(\varphi)\cos(\varphi)(k^{-1}) \Delta\omega \quad (2.14)$$

$\Delta\omega$ puede estimarse simplemente teniendo en cuenta que si la deriva real de un detalle es tal que

$$\lambda^{(1)}(t) = \lambda^{(1)}_0 + \omega^{(1)}(t - t_0), \quad (2.15)$$

y se supone que la deriva es $\omega^{(2)}$, entonces aplicando la fórmula de transformación (2.8), y sustituyendo SG por (2.14) resulta:

$$SE = \lambda^{(1)}_0 + \omega^{(1)}(t - t_0) - \omega^{(2)}(t - t_0). \quad (2.16)$$

Si $\omega^{(1)} = \omega^{(2)}$, entonces $SE = \lambda_0$ como ya se ha visto antes. Si $\omega^{(1)} \neq \omega^{(2)}$ entonces:

$$SE = \lambda^{(1)}_0 + (\omega^{(1)} - \omega^{(2)})(t - t_0) = \lambda^{(1)}_0 + \Delta\omega(t - t_0), \quad (2.17)$$

con $\Delta\omega = \omega^{(1)} - \omega^{(2)}$. La interpretación de esta expresión es directa, si $\omega^{(1)} \neq \omega^{(2)}$ entonces la pendiente de la gráfica de deriva en el nuevo sistema especial SE da la diferencia entre la velocidad deriva real y la de SE . No hay que confundir la expresión (2.17) con la (2.8). La primera da la deriva en el nuevo sistema especial, de ahí el signo “+” delante de $\Delta\omega$. La segunda es la propia expresión de transformación al SE , por lo que debe aparecer un signo “-” delante de la velocidad de deriva del nuevo sistema.

Si $SE = f(t)$, es decir, si tras pasar a un sistema de rotación especial obtenemos una gráfica arbitraria (ver Figura 2.11), utilizando un desarrollo en serie de Taylor alrededor de cualquier punto t_p de la gráfica puede estimarse el incremento de deriva $\Delta\omega$ al expresar SE como:

$$SE = f(t_p) + f'(t_p)(t - t_p) + \frac{1}{2}f''(t_p)(t - t_p)^2 + \dots \quad (2.18)$$

($f'(t_p)$, $f''(t_p)$, etc. indican que las derivadas de f se calculan en t_p).

Ahora puede identificarse $f(t_p)$ con $\lambda^{(1)}_0$ y $f'(t_p)$ con $\Delta\omega$ en la expresión (2.17). Evidentemente $\lambda^{(1)}_0$ y $\Delta\omega$ varían para cada punto de la gráfica de deriva en el SE, pero la pendiente $f'(t_p)$ proporciona una estimación de las fluctuaciones que pueden esperarse en u según (2.13).

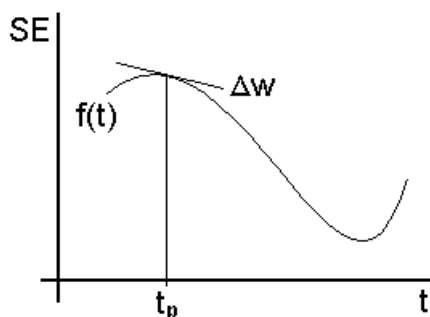


Figura 2.11. Si la gráfica de deriva en el sistema especial SE no presenta un valor de longitud λ_0 constante sino más bien representa una función arbitraria $f(t)$, siempre es posible estimar el incremento de deriva (y por tanto de velocidad del detalle), a través de la pendiente de la gráfica de $f(t)$ en cualquier punto t_p .

2.3.1 TÉCNICAS DE MEDICIÓN DEL PERFIL DE VIENTOS ZONALES: TRAZADORES Y CORRELACIÓN

Para medir la velocidad a la que se mueve el fluido atmosférico desde tierra o el espacio, es absolutamente imprescindible utilizar trazadores que sean arrastrados por el propio fluido. Los trazadores son estructuras nubosas que deben poseer un comportamiento totalmente pasivo. Grandes detalles como puedan ser vórtices a escala sinóptica, o regiones convectivas o turbulentas, pueden introducir componentes propios a la velocidad que enmascaren el verdadero comportamiento de la masa gaseosa de la atmósfera. Son pues buenos candidatos a trazadores las estructuras nubosas más pequeñas que no se encuentren situadas en vórtices o zonas especialmente turbulentas. La forma en que se utilizan los trazadores para estimar el perfil de vientos zonales da lugar a dos técnicas diferentes e independientes, una con más posibilidades de automatización que la otra.

En la primera de ellas se sigue a los trazadores de forma individual. Resulta por tanto conveniente seguir el máximo número de parejas de marcadores separadas por el mayor intervalo de tiempo posible para minimizar los errores en el cálculo de las velocidades zonales. Un intervalo de tiempo natural muy empleado es el período de rotación del planeta. Se mide la posición del trazador en cuestión en un momento inicial t_1 , y se espera a que la rotación del planeta, unas 10 horas más tarde, lo vuelva a mostrar otra vez al observador. Cuando los trazadores son muy pequeños son deformados y destruidos rápidamente por la cizalla del viento en el que se encuentran inmersos. Por regla general, muchos trazadores son capaces de sobrevivir conservando su identidad durante una rotación, pero no mucho más tiempo. El principal inconveniente de esta técnica es el juicio subjetivo del operador humano, que debe decidir qué pareja de trazadores representa en realidad el mismo detalle nuboso.

Tal y como se ha mostrado en la sección dedicada a la medida de la velocidad de deriva, las posiciones son utilizadas para calcular la deriva por día con respecto a un sistema de referencia, que luego sirve para determinar la velocidad zonal en ms^{-1} respecto del sistema III, supuestamente el de verdadera rotación del planeta.

El segundo método empleado es el de correlación, y se basa en la hipótesis de que en intervalos de tiempo suficientemente cortos, la mayoría de los marcadores a una latitud determinada permanecen prácticamente inalterados pero desplazados según la deriva impuesta por los vientos zonales. Por tanto, si se utiliza una función que describa adecuadamente la posición e identidad de *todos* los trazadores, bastará comparar la función para instantes de tiempo distintos para determinar la deriva sufrida por estos. Como función descriptora se suele utilizar el albedo del techo de nubes a una longitud de onda determinada a una latitud dada.

Defínase la operación $R_{fg}(l)$ entre dos funciones $f(x)$ y $g(x)$ como

$$R_{fg}(l) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)g(x-l)dx . \quad (2.19)$$

Es evidente que¹

$$R_{ff}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} f^2(x)dx \geq 0 . \quad (2.20)$$

Sea la función $f(x) + \beta g(x)$, con β un número real cualquiera distinto de cero. Entonces $R_{f+\beta g, f+\beta g}(0) \geq 0$. Desarrollando el valor de $R_{f+\beta g, f+\beta g}(0)$

$$R_{f+\beta g, f+\beta g}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} (f + \beta g)^2 dx = \int_{-\infty}^{\infty} (f^2 + 2\beta fg + \beta^2 g^2) dx . \quad (2.21)$$

Es decir, que $R_{f+\beta g, f+\beta g}(0) = R_{ff}(0) + 2\beta R_{fg}(0) + \beta^2 R_{gg}(0)$. Haciendo $\beta = -R_{fg}(0)/R_{gg}(0)$ resulta

$$R_{ff}(0) - \frac{R_{fg}^2(0)}{R_{gg}(0)} \geq 0 . \quad (2.22)$$

Luego $R_{fg}^2(0) \leq R_{ff}(0)R_{gg}(0)$. Por tanto, si $g(x) = f(x-l)$, entonces $R_{fg}(l) \leq R_{ff}(0)$. Es decir, $R_{fg}(l)$ es máxima en el origen.

Sea ahora $A(\lambda)$ la función de albedo, donde se omite la dependencia de φ por tomarse A a una latitud fija. Si se supone que al cabo de un cierto tiempo Δt se tienen exactamente los mismos marcadores pero desplazados una cantidad $\Delta \lambda$

¹ Para esta exposición general supondremos que el valor de la integral está acotado y siempre es $< \infty$.

² Esta expresión puede reconocerse como una forma de la desigualdad de Cauchy-Schwarz.

en longitud, entonces la nueva función de albedo al cabo del intervalo Δt será $A'(\lambda) = A(\lambda - \Delta\lambda)$. De donde

$$R_{AA'}(l) = \int_{-\infty}^{\infty} A(\lambda) A'(\lambda - l) d\lambda = \int_{-\infty}^{\infty} A(\lambda) A(\lambda - \Delta\lambda - l) d\lambda = \int_{-\infty}^{\infty} A(\lambda) A(\lambda - l') d\lambda = R_{AA}(l') \quad (2.23)$$

Donde se ha hecho el cambio de variable $l' = \Delta\lambda + l$. Pero $R_{AA}(l') \leq R_{AA}(0)$. Cuando $l'=0$, se obtiene que $l = -\Delta\lambda$, y por consiguiente la función de correlación es máxima para $l = -\Delta\lambda$. En otras palabras, si se utiliza la función de correlación como criterio de comparación, y los perfiles de albedo son similares, entonces cabe esperar que el máximo de $R_{AA'}(l)$ indique exactamente cual es la deriva sufrida por la función de albedo debido a la presencia del arrastre de los marcadores por el viento zonal.

En la práctica no puede trabajarse con funciones de longitud infinita, y como estas se derivarán de imágenes digitales, la señal además de finita será discreta, por lo que R_{fg} se sustituirá por la versión discreta

$$R_{fg}(j) = \sum_{i=1}^N f(i)g(i-j) \quad (2.24)$$

Muchos autores han utilizado la función de correlación como función de comparación para determinar el perfil de vientos zonales de Júpiter y Saturno (Barnet y col. 1992). Sin embargo es posible utilizar otras funciones de comparación que se maximicen o minimicen en el punto de máxima similitud entre dos funciones de albedo (ver por ejemplo Limaye 1986). Al emplear la expresión (2.24), también pueden escalarse los valores de $f(i)$ y de $g(i)$ para limitar los errores de cálculo y evitar los problemas de “overflow” del ordenador. Por ejemplo, las imágenes del HST de Júpiter analizadas estaban en formato FITS de 16 bits con signo, es decir que el valor de blanco correspondía a 32768 y el de negro a -32767. Puesto que el número de multiplicaciones y sumas para cada par de perfiles de albedo es elevado, del orden de 10^3 , $f(i)$ y $g(i)$ (o A y A') se normalizaron al nivel del blanco dividiendo por 32767.

La obtención de las funciones de albedo $A(\phi, \lambda)$ a latitud constante, vendrá condicionada por la cantidad de información de que se disponga. Todos los autores mencionados en este apartado han hecho uso de funciones de albedo (o perfiles de albedo) sobre planisferios creados por proyección cilíndrica de las imágenes. Las colecciones de imágenes transmitidas por las sondas Voyager en su aproximación al planeta permitieron cubrir un número elevado de rotaciones y confeccionar planisferios para cada una de ellas. Posteriormente la comparación se efectuaba sobre dos perfiles de albedo pertenecientes a dos rotaciones sucesivas. Una de las ventajas principales de este método reside en que las correlaciones se calculan sobre un perfil de albedo que cubre todas las longitudes, por lo que se hace uso de la máxima información posible, y por tanto los resultados de la correlación son más fiables. Otra reside en el hecho de que los perfiles de albedo pueden considerarse funciones periódicas de 0° a

360° de longitud (cubren toda la circunferencia), por lo que no existen problemas de extremos para ningún valor de $R_{fg}(j)$.

Tal y como apuntan Barnet y col., (1992) en su aplicación del método para medir el perfil de vientos de Saturno a partir de imágenes del HST, y sorprendentemente no mencionado por el resto de los autores citados que utilizaron las imágenes Voyager para obtener la distribución de vientos zonales de Júpiter, para componer un planisferio completo, hay que ir esperando a que todas las longitudes del planeta vayan discurriendo por el meridiano central siguiendo la rotación para tomar todas las secuencias de imágenes, tanto si estas se toman desde el espacio como desde la Tierra. Puesto que el período de rotación es de aproximadamente de 10h, las estructuras nubosas se irán viendo progresivamente más afectadas por los vientos zonales, y por tanto la comparación no se efectuará sobre dos perfiles de albedo instantáneos, sino más bien sobre dos funciones distorsionadas. Barnet y col. (1992) intentan solucionar este problema obteniendo secuencias de perfiles de forma iterativa. Con el primer perfil se corrigen las funciones de albedo y vuelve a calcular un segundo perfil y así sucesivamente. Los autores afirman que el método converge rápidamente en las primeras iteraciones. Por otro lado, Magalhaes y col. (1990) argumentan que el cálculo de la función de correlación suministra una deriva que es la *media* de la de todos los detalles, por lo que está plenamente justificado hablar de *velocidad zonal media* $\langle u \rangle$.

2.3.2 EFECTOS DE LA METEOROLOGÍA SOBRE LAS MEDIDAS DE CORRELACIÓN

Es también conveniente comentar cómo afecta la “meteorología” a la medida por correlación del viento zonal. Cuando las medidas de correlación se llevan a cabo sobre intervalos de longitud limitada (es decir, inferior a los 360°), puede producirse una variabilidad en los vientos zonales medidos dependiendo de la extensión e intensidad de los movimientos relacionados con fenómenos meteorológicos locales. Estos fenómenos pueden alterar localmente el régimen de vientos introduciendo fluctuaciones en las correlaciones de las funciones de albedo que pueden influenciar las medidas de velocidad a lo largo de un círculo de latitud. El resultado puede ser alteraciones temporales ficticias en el perfil de vientos zonales si se realizan comparaciones entre perfiles independientes resultado de una sola medición. De todas formas esta variabilidad puede suavizarse si se calcula el promedio para varios sectores de longitud. Enumeremos las diferentes clases de detalles que pueden introducir alteraciones en las mediciones por correlación (Figura 2.12):

a) (Figura 2.12, parte 1) Nubes en expansión de origen convectivo que muestran movimientos rápidos de divergencia. La componente de la velocidad de crecimiento a lo largo de un círculo de latitud puede alterar el auténtico movimiento zonal del fluido. $\pm u'$ es la velocidad de crecimiento espuria que se añade al valor zonal $\langle u \rangle$.

b) (Figura 2.12, parte 2) Fenómenos ondulatorios donde las velocidades de fase $\pm c$ espurias pueden contaminar las medidas de velocidad.

c) (Figura 2.12, parte 3) Los vórtices anticiclónicos de gran tamaño pueden tener dos efectos sobre la medida de vientos zonales. El primero está relacionado con su propia velocidad de deriva $\pm V$ relativa al flujo zonal donde se encuentra inmerso (ya que no actúan como trazadores pasivos). El segundo está relacionado con las “bahías” o “meandros” que estos vórtices inducen en los bordes norte y sur y las estelas que generan. Este tipo de fenómenos se observan en la vecindad de la Gran Mancha Roja y de los óvalos blancos WOS. Además, la velocidad tangencial $\pm v_T$ del vórtice puede tomarse como la velocidad zonal real a dicha latitud.

d) (Figura 2.12, parte 4) Las células ciclónicas de gran extensión, en particular en la STB, son otra fuente de errores, ya que su flujo interno queda superpuesto al flujo ambiente. Estas células suelen tener una morfología caracterizada por muchos trazadores nubosos individuales de elevado albedo, alineados en la dirección zonal tanto en los límites norte como sur, por lo que puede influenciar notablemente los resultados de la correlación. Los paneles 4a y 4b muestran como ejemplo algunos casos reales e ilustran el efecto sobre la medida de los vientos zonales: el panel 4a representa la región de la STB que aparece en una imagen del HST a 410 nm de junio de 1997. Las líneas horizontales blancas representan, de arriba abajo, las corrientes en chorro a 32°S, 29.1°S, 26.4°S, y 20°S. El viento zonal medido está superpuesto en la parte derecha. El panel 4b es la misma región de la STB observada por el HST a 410 nm en octubre de 1995, en este caso las líneas horizontales blancas son las corrientes en chorro a 32°S, 26.4°S, y 20°S. Se observa como la presencia de una célula ciclónica distorsiona la medida del perfil zonal de vientos introduciendo un pico adicional a 29.1°S.

2.3.3 OTROS EFECTOS SOBRE LAS MEDIDAS DE CORRELACIÓN

Puede también ocurrir, como es el caso de las imágenes del HST de Júpiter analizadas, que no se tenga información suficiente como para poder componer los planisferios de dos rotaciones sucesivas, así que hay que efectuar las comparaciones entre perfiles de albedo sucesivos realizados directamente sobre el planeta para dominios con un tamaño limitado en longitud. Esta forma de reducción posee sus propias particularidades.

En primer lugar, denominemos meridiano central o CM, a la longitud que pasa por el meridiano central en un instante de tiempo determinado, en un sistema específico. Cuando se trabaja con dominios de longitud limitada por el hemisferio que aparece en una imagen, generalmente la comparación debe efectuarse a partir de dos perfiles de albedo obtenidos de dos imágenes que no poseen el mismo meridiano central para el sistema de rotación utilizado (sistemas I, II o III). Hay que recordar que el máximo de correlación debe suministrar información sobre la deriva que han sufrido todas las estructuras nubosas respecto de un sistema de referencia. Al utilizar perfiles de albedo realizados sobre planisferios no existe este problema, ya que siempre puede escogerse como origen la misma longitud. Cuando se comparan funciones de

albedo obtenidas directamente sobre el planeta tendremos la situación reflejada en la Figura 2.13, y aplicar la siguiente corrección.

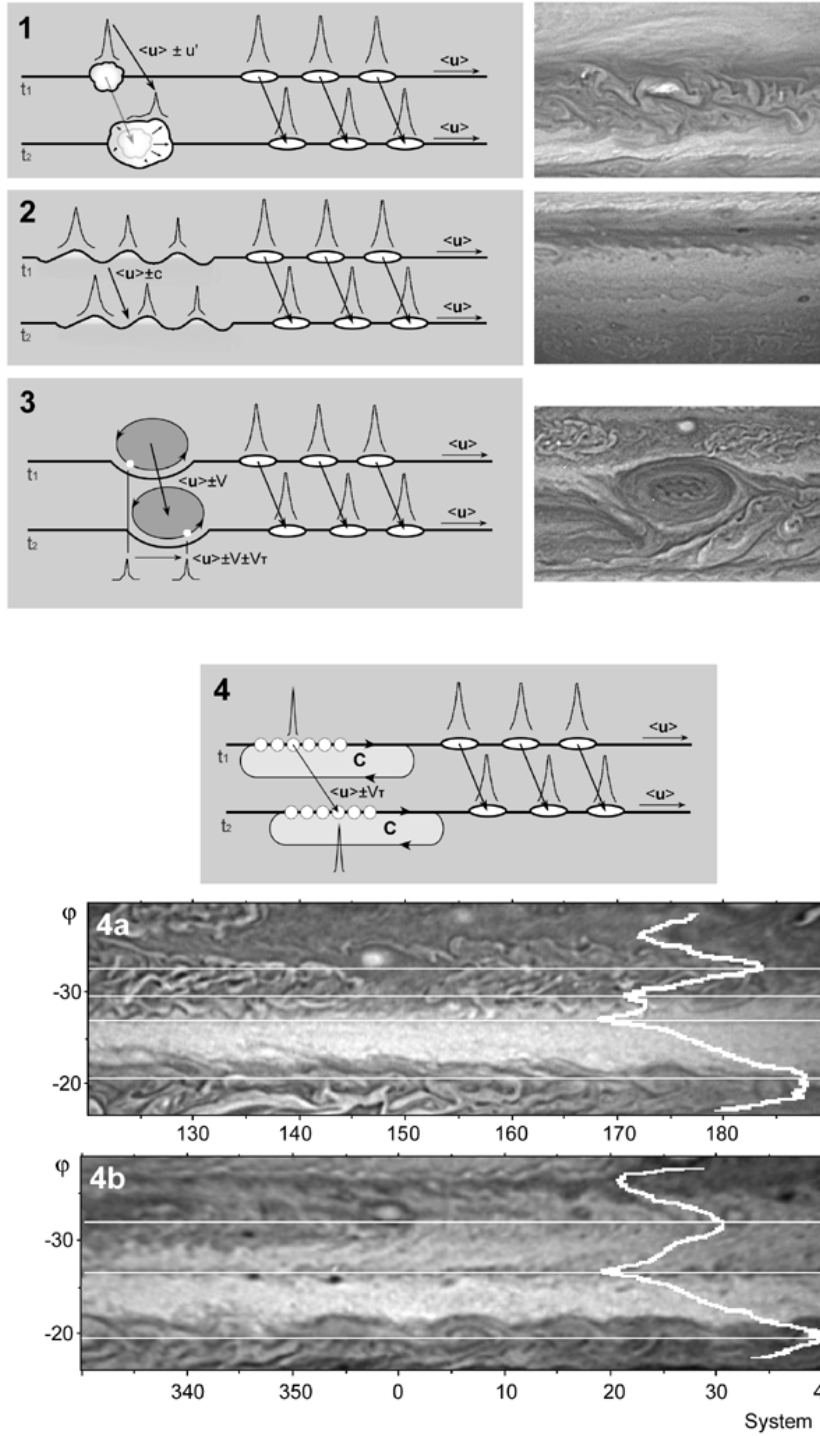


Figura 2.12. Ilustración de la influencia de los fenómenos meteorológicos en las medidas del viento zonal. En todas las idealizaciones se representa la morfología de las nubes en tiempos t_1 y t_2 ($t_2 > t_1$), junto con perfiles de albedo a una latitud fija, donde se representan picos para algunos trazadores.

En t_1 se tiene un perfil de albedo idealizado donde la única estructura nubosa existente está localizada en la longitud λ_1 para un sistema de rotación determinado. Al cabo de un tiempo T , más o menos coincidente con el período de rotación del planeta, el nuevo perfil de albedo sitúa al detalle centrado en λ'_2 . Sin embargo si los meridianos centrales coincidiesen, el detalle debería situarse a la longitud λ_2 . $\Delta\lambda'$ es el desplazamiento debido a la diferencia de meridianos centrales, mientras que $\Delta\lambda$ es la deriva que quiere medirse. Por tanto el máximo de la correlación cruzada l' se situará a $l' = \Delta\lambda' + \Delta\lambda$. En este caso la deriva buscada será $\Delta\lambda = l' - \Delta\lambda'$. El signo de $\Delta\lambda'$ puede llevar a confusión lo que obliga a considerarlo con cierto detenimiento. Tal y como está representado en la figura, $\Delta\lambda'$ implica que en t_2 el planeta ha girado un poco más allá del meridiano central de t_1 . Por tanto el detalle situado en λ'_2 se verá desplazado hacia longitudes más pequeñas, por lo que $\Delta\lambda' < 0$, luego $-\Delta\lambda' > 0$. Si en t_2 el planeta no hubiese llegado todavía al meridiano central marcado por t_1 , entonces $\Delta\lambda' > 0$.

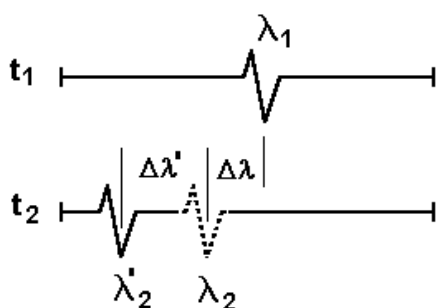


Figura 2.13 Correcciones debidas a los desplazamientos por rotación del planeta.

También puede ser necesario compensar el efecto de oscurecimiento del limbo o “limb-darkening”. Al trabajar con las imágenes originales brutas del HST, una forma de eliminar directamente el efecto de oscurecimiento del limbo es filtrar el perfil de albedo, esto puede hacerse siempre y cuando el filtro utilizado, no sustraiga la información de alta frecuencia de las pequeñas estructuras nubosas. Para ello bastará tener en cuenta que el ancho de banda del filtro tal y como se ilustra en las figuras 2.14 y 2.15. Por último puede no utilizarse ningún tipo de corrección y calcular directamente la función de correlación. En tal caso puede ser que el máximo de la función de correlación quede enmascarado y no sea detectable.

Para evitar los efectos de los límites de los perfiles, el perfil de referencia siempre es más largo que el otro con el que se compara, de tal manera que en todo el recorrido de la correlación siempre puede superponerse completamente un perfil sobre el otro. La Figura 2.16 muestra cómo se efectúa esta superposición.

Una vez tenidas en cuenta todas estas consideraciones, en la Figura 2.17 se muestran dos perfiles de albedo tras aplicar la deriva señalada por $R_{AA}(0)$.

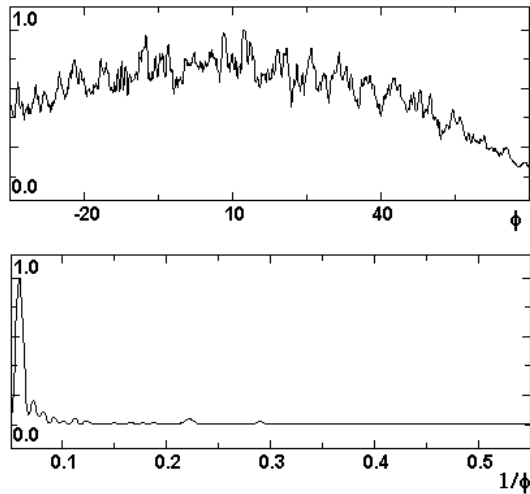


Figura 2.14. En esta imagen se representa cómo afecta el efecto de limb-darkening a la información contenida en el perfil de albedo. En la parte superior aparece una gráfica de albedo desde -35° a $+70^\circ$ respecto del meridiano central, tomado a la latitud de 21°N sobre una imagen a 410nm tomada por el HST. En la parte inferior se representa la densidad espectral de energía, donde es patente como la mayor parte de la energía de la señal se concentra a bajas frecuencias debido al oscurecimiento del limbo. En ambas figuras el eje horizontal representa la longitud en grados. En la figura superior el eje de ordenadas son unidades arbitrarias normalizadas de brillo, mientras que en el inferior el eje vertical es la densidad espectral de energía normalizada.

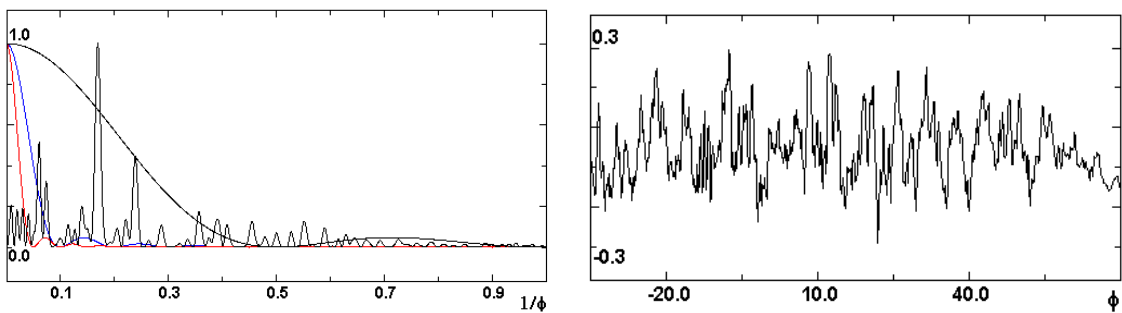


Figura 2.15. En la parte derecha se tiene el perfil de albedo de la Figura 2.14 una vez eliminado el efecto de “limb-darkening” utilizando una media móvil de 20° de longitud de anchura. En la parte izquierda se muestra la densidad espectral de energía para el perfil de la derecha, donde aparece un pico principal cercano a la frecuencia 0.2 que es el que posee la información necesaria sobre la distribución de los marcadores. Dicho máximo es vagamente visible en la Figura 2.14 inferior. También se superpone a la misma escala la densidad espectral de energía de diferentes ventanas cuadradas utilizadas para efectuar una media móvil. La representada en negro tiene una anchura de 2° de longitud, la azul 10° y la roja 20° . Puede comprobarse inmediatamente que una media móvil de anchura 20° puede eliminar el efecto de limb-darkening sin afectar a la información esencial del perfil de albedo. Las unidades de los ejes son las mismas que en la Figura 2.14.

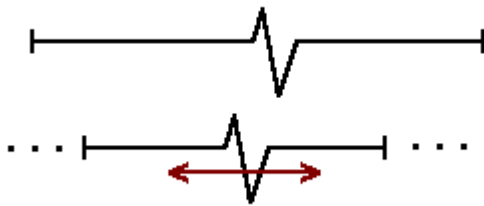


Figura 2.16. Al comparar dos perfiles mediante correlación cruzada, el perfil de referencia (perfil superior) siempre es más largo que el comparado para evitar el efecto de los límites. El perfil a comparar (inferior) se desplaza tanto a longitudes positivas como negativas, para cubrir la deriva de los detalles y la diferencia entre los meridianos centrales (CM) de las imágenes. Por ello es conveniente efectuar comparaciones entre perfiles correspondientes a imágenes que tengan los CM más parecidos posible.

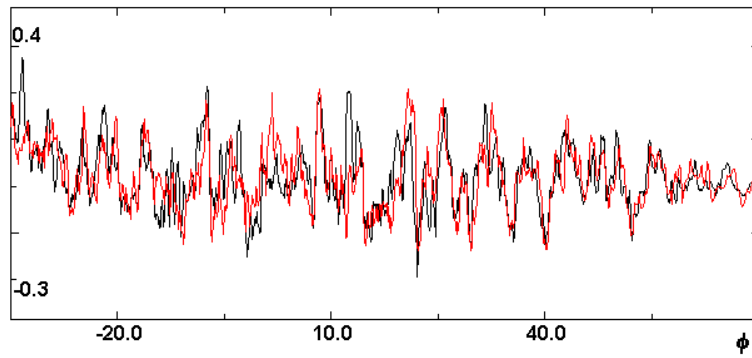


Figura 2.17. Perfiles obtenidos a 21°N a partir de dos imágenes tomadas por el HST el 14 de mayo de 1996, tras aplicar una deriva total $l'=\Delta\lambda'+\Delta\lambda=1^\circ.2$. Véase la coincidencia y permanencia de las estructuras nubosas. Nuevamente el eje de abcisas es la longitud en grados y el horizontal la reflectividad del techo visible de nubes en unidades arbitrarias.

