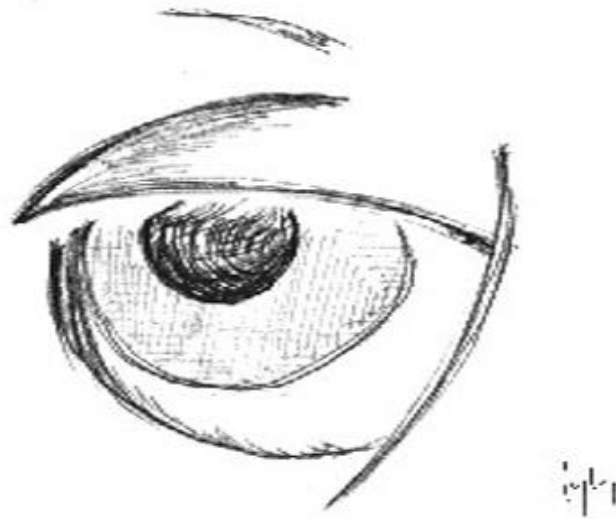


Vientos en los planetas gigantes



Agustín Sánchez Lavega
Dpto. Física Aplicada
Universidad del País Vasco
wupsalaa@bi.ehu.es

Profundizar en el conocimiento científico es
una de las mejores vías para lograr plenitud y libertad

Pilar Álvarez Pellicero

Cuando observamos al telescopio o desde las naves espaciales los planetas gigantes Júpiter y Saturno, y los gigantes “helados” Urano y Neptuno, lo que vemos son las capas superiores de nubes y nieblas formadas por pequeñas partículas en suspensión sobre profundas atmósferas de hidrógeno (en aproximadamente un 90% de composición) y helio (un 10%) (Figura 1). Las nubes superiores de estos planetas se ubican en los niveles de presión entre aproximadamente 0.5 y 10 bares, y las partículas que las constituyen actúan como reflectores difusos de la radiación solar a la vez que como filtros opacos a la radiación infrarroja que escapa del interior de estos planetas. Salvo en el caso de Urano, cuya fuente interna de calor es muy débil, en el resto de los planetas esta fuente energética es del orden de magnitud de la debida a la irradiación solar absorbida por los gases atmosféricos y las nubes. Tiene su origen la fuente interna de energía en el calor generado durante la fase de formación y subsiguiente contracción de estos planetas. Por ejemplo, en el caso de Júpiter, la emisión actual de energía interna puede explicarse si el planeta se enfría a razón de un grado por millón de años a la vez que se contrae unos 3 centímetros al año. Con todo, la energía calorífica disponible en estos planetas apenas alcanza, en el caso de Júpiter, 1/30 de la energía solar disponible en la atmósfera de la Tierra, es decir apenas una decena de vatios por metro cuadrado. Para Neptuno, el planeta más alejado, apenas se llega a 1 vatio por metro cuadrado (dado que el flujo energético solar decrece con el inverso del cuadrado de la distancia).

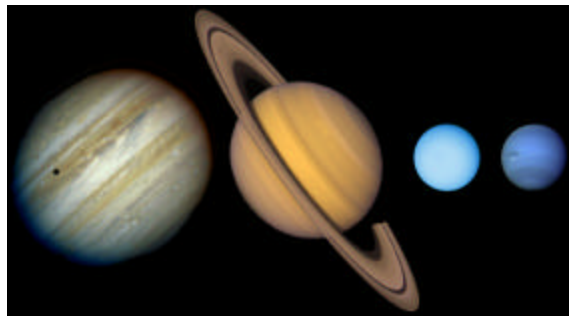


Figura 1: Aspecto visual, a escala de tamaño, de Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, según imágenes del Telescopio Espacial (Júpiter) y de la nave Voyager (Saturno, Urano y Neptuno). Los colores de las nubes han sido intensificados. NASA-JPL.

Con tan poca energía disponible, sería en principio de esperar que los movimientos atmosféricos de escala global no fueran muy intensos. Sin embargo, las observaciones precisas realizadas en el curso de las últimas dos décadas de todos estos planetas con las naves “Voyager”, con “Galileo” (en Júpiter) y con “Cassini” (en Saturno, a la espera del comienzo de su exploración de Saturno en el 2004), así como con el Telescopio Espacial “Hubble” (HST) y con diferentes telescopios en Tierra, demuestran lo contrario. Siguiendo el movimiento de las pequeñas formaciones nubosas en el curso de unas horas, se observa que los vientos que las arrastran se dirigen en los planetas gigantes a lo largo de los paralelos, en una circulación denominada “zonal”, sin apenas movimientos meridionales. Además los vientos se organizan de forma diferente en Júpiter y Saturno, que en Urano y Neptuno (Figura 2). En los dos primeros, los vientos alternan hacia el este y el oeste con la latitud, con unas 8 corrientes zonales (o “jets”) por hemisferio en Júpiter y 4 en Saturno. Además en el ecuador existe una ancha e intensa corriente en chorro de más de 100 m/s en Júpiter y de cerca de 500 m/s en Saturno, lo que equivale en este último planeta a unos

2/3 de la velocidad del sonido (nótese en este caso, al calcular la velocidad del sonido, la diferente composición y temperatura atmosférica con respecto a la Tierra). Por el contrario Urano y Neptuno solo tienen una corriente hacia el este en cada hemisferio, mientras que en el ecuador la corriente se dirige hacia el oeste, con velocidades máximas de 100 m/s en Urano y 400 m/s en Neptuno. Dado que estos planetas carecen de una superficie sólida que sirva de sistema de referencia, se miden los vientos con respecto a la velocidad angular de rotación de su campo magnético (cuya estructura espacial no es homogénea), que se supone ligado al interior del planeta, representando por lo tanto la verdadera rotación del planeta. Se conoce a este sistema de referencia rotante como "Sistema III".

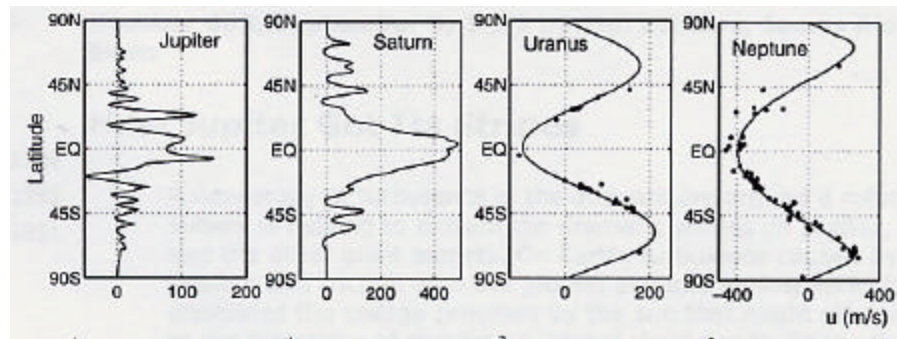


Figura 2: Perfil de vientos zonales en los cuatro planetas gaseosos. Eje vertical: latitud en grados desde el Polo Norte (90N) pasando por el Ecuador (EQ) al Polo Sur (90S). Eje horizontal: Velocidad del viento zonal (positiva hacia el este, negativa hacia el oeste) en metros por segundo (multiplicar por 3.6 para pasar a km/hr).

La alta velocidad y peculiar organización de las corrientes de vientos en los planetas gigantes tiene a buen seguro que ver por una parte, con el hecho de que estos planetas tienen una estructura totalmente diferente a la de los terrestres, y por otra a su alta velocidad angular de rotación con períodos de unas 10 hr para Júpiter y Saturno y 16-17 horas para Urano y Neptuno. Siendo la circulación de los planetas gaseosos un problema básico de la geofísica de fluidos, hemos de decir que aún no somos capaces de explicar como se originan los vientos, desconocemos hasta que profundidad se extienden, como se genera el intenso chorro ecuatorial hacia el Este en Júpiter y Saturno, o que papel juegan las diferentes fuentes de energía. En definitiva desconocemos como funciona una máquina térmica que con tan baja energía calorífica disponible, genera sin embargo movimientos tan intensos. En lo que sigue, comentaré algunas de las ideas que se emplean para aproximarse a una solución a este problema y las aportaciones que nuestro equipo de investigación viene realizando en este campo.

Modelos de circulación general

Nos ceñiremos en lo que sigue al caso de Júpiter y Saturno que son, de entre los cuatro, los planetas mejor estudiados. Existen básicamente dos grupos de modelos que intentan reproducir el sistema de vientos alternantes con la latitud de la figura 2. Todos ellos parten de los datos bien conocidos de tamaño (radio unas 10 veces el terrestre), rápida rotación, es decir intensas fuerzas de Coriolis, y escasa fricción (y por lo tanto

escasa disipación de energía) al no existir una superficie (un "suelo") con el que interactuar. Difieren sin embargo en la fuente de energía que domina el control de estos movimientos. Para los modelos de tipo "profundo" es el calor interno el que genera los vientos mientras que en los modelos de tipo "superficial" es la insolación la que, al igual que en los planetas terrestres, impulsa las masa de aire.

1. Modelos profundos

Para entender este grupo de teorías es necesario conocer primero la naturaleza del interior de estos planetas. El hidrógeno, componente fundamental, se encuentra en la parte exterior de los planetas gigantes en forma molecular (H_2) es decir formado por dos átomos de hidrógeno (cada uno con un protón en el núcleo y su electrón) unidos por fuerzas internas. El estado del hidrógeno molecular al nivel de las nubes superiores de amoníaco (presiones en torno a 1 bar) es el de un gas frío con dos estados posibles en la orientación de los espines del protón, paralelos (hidrógeno orto) o antiparalelos (estado para). A las bajas temperaturas al nivel de las nubes, de unos $-150^\circ C$ y $-180^\circ C$ para Júpiter y Saturno respectivamente, ambos estados del hidrógeno hacen que se comporte como dos gases distintos, liberándose calor latente durante la transformación de uno en otro. Sería esta una fuente adicional de energía para los movimientos.

A medida que penetramos hacia el interior de los planetas, las capas exteriores aplastan a las interiores, con lo que la presión aumenta con la profundidad, y consiguientemente con ella, la temperatura. El hidrógeno molecular se transforma gradualmente en un fluido líquido hasta que, llegadas las presiones cercanas a 1 Mbar (1 millón de bares) siendo entonces la temperatura en Júpiter de unos $6.000^\circ C$, la presión rompe la molécula de hidrógeno, separa protones y electrones, que quedan en forma de un plasma conductor eléctrico (H^+). Se trata del estado metálico del hidrógeno, una fase aún inalcanzable a esas altas temperaturas en los laboratorios terrestres. No se sabe si la transición del hidrógeno molecular al metálico es gradual o brusca, pero esta debe de acontecer, según la ecuación de estado teórica que describe este comportamiento, entre 1 y 3 Mbar de presión. Acontece tal situación a una profundidad aproximadamente de 0.8 veces el radio de Júpiter y 0.6 veces el de Saturno. Se considera pues como atmósfera de esos planetas la envoltura externa de hidrógeno molecular de un espesor de unos 13.000 kms y 24.000 kms para Júpiter y Saturno, respectivamente. El hidrógeno metálico se considera la base de la atmósfera, la región en donde se engendraría el campo magnético y en donde la rotación sería justamente la del interior planetario. Más hacia el interior es posible que ambos planetas posean un núcleo diferenciado formado por una cubierta de "hielos" sobre una esfera de metales y rocas.

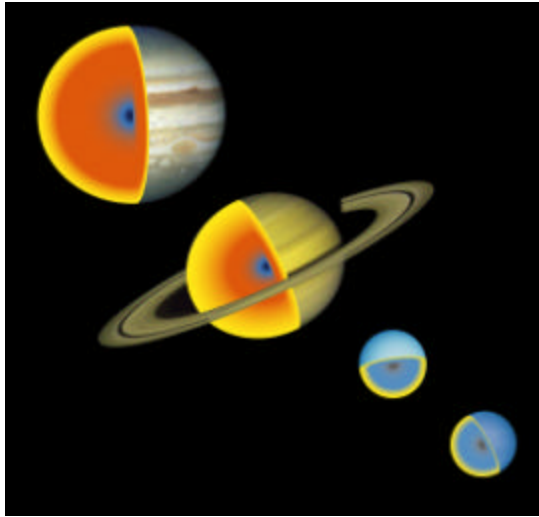


Figura 3: Interior de los planetas gigantes: hidrógeno molecular (atmósfera, amarillo), hidrógeno metálico (rojo), capa de hielos (azul) y núcleo (negro). Tomado de T. Guillot.

Los modelos de circulación profunda presuponen que es la fuente de energía interna la que mueve la atmósfera, y se fundamentan en el hecho de que el transporte de energía mediante convección en un fluido no viscoso, es organizado por la intensa rotación en un movimiento de columnas paralelas al eje de rotación del planeta de acuerdo con un teorema postulado por Taylor - Proudman. Estas columnas engendran a su vez un movimiento secundario residual de cilindros rotantes, concéntricos con ese eje y alternantes en su sentido de rotación. Cuando estos cilindros "tocan" el techo superior de nubes forman las corrientes zonales alternantes hacia Este y Oeste (figura 4).

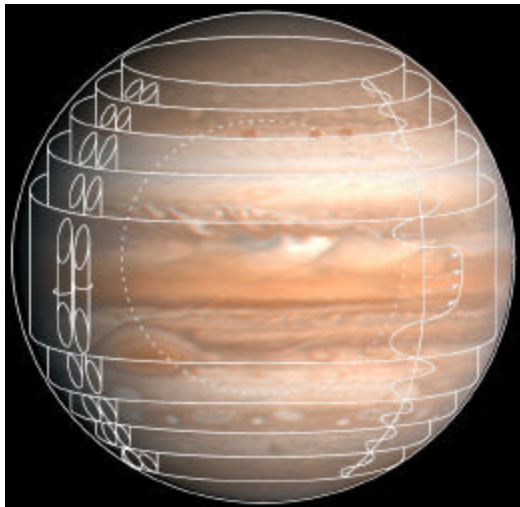


Figura 4: Modelo de circulación profunda para Júpiter y Saturno, engendrado cuando el calor interno transportado por convección unida a la intensa rotación, organiza los movimientos del fluido en columnas rotantes que, a su vez, forman un movimiento de toda la capa atmosférica de hidrógeno molecular en cilindros concéntricos con el eje de rotación.

Los cilindros se desarrollan sobre la capa de hidrógeno molecular, ya que la de hidrógeno metálico resulta impenetrable. La generación de este tipo peculiar de movimientos ha sido observada en diferentes experiencias de laboratorio (incluyendo algunas en el espacio, por ejemplo durante la misión "Skylab"), y ha sido comprobada a través de diferentes cálculos analíticos y numéricos realizados estos últimos con potentes ordenadores. En cualquier caso queda por explorar si los movimientos convectivos pueden acoplarse al campo magnético presente en la parte superior de la región de hidrógeno metálico, en cuyo caso podrían jugar algún papel en el movimiento de las columnas a través de fuerzas magneto-hidrodinámicas.

Según esta hipótesis, los vientos se extenderían en profundidad hacia el interior ocupando toda la atmósfera y la inercia de su movimiento sería tan grande que apenas presentarían cambios en el tiempo. Ambas ideas están en cierto modo de acuerdo con las medidas de la sonda Galileo que penetró en Júpiter en Diciembre de 1995 y encontró vientos crecientes en profundidad (hasta unos 25 bares instante en el cual la sonda quedó destruida). Sin embargo, la peculiar meteorología de la región sondeada (un "área caliente") de Júpiter en la región ecuatorial, no permite ser conclusivo y extender este resultado al resto del planeta. Por otra parte estaría también de acuerdo con las medidas de más de 100 años de velocidades en la atmósfera del Júpiter que indican que estas son globalmente estables. Hay que hacer notar sin embargo la existencia de algunos cambios menores pero significativos en los vientos, sobre todo en la corriente más intensa de 180 m/s a 23 °N de latitud, detectada por nuestro equipo usando imágenes del Telescopio Espacial Hubble (E. García-Melendo y A. Sánchez-Lavega, *Icarus*, Vol. 152, 316, 2001). Nuestras simulaciones usando modelos dinámicos de las perturbaciones que acontecen en esta región sugieren además que los vientos crecen levemente en profundidad, confirmando los resultados de Galileo ¿Pero, son también inmutables los vientos de Saturno? Sobre este aspecto hablaremos mas adelante.

2. Modelos superficiales

Este grupo de modelos postula que es la insolación, es decir la radiación solar absorbida en las nubes superiores, la que controla los vientos zonales, sin ningún papel de la fuente interna. En síntesis, las corrientes zonales se desarrollarían sobre una capa delgada (de un centenar de kilómetros aproximadamente), de manera que el comportamiento dinámico de la atmósfera sería el mismo que rige el de la atmósfera terrestre. Las ecuaciones del movimiento serían las mismas, solo que parametrizadas a la atmósfera de un planeta gigante (cambiando el radio del planeta, la composición química de la atmósfera, la velocidad angular de rotación, ...). En un planeta rápidamente rotante, siendo la capa atmosférica delgada (con espesor mucho menor que el radio del planeta), las diferencias de temperatura entre ecuador y polos generan movimientos turbulentos de pequeña escala (remolinos), que acaban mezclándose para formar estructuras bidimensionales rotantes (vórtices) de tamaño mucho mayor, que serían los que transmitirían el movimiento a las corrientes zonales. Un problema importante de estos modelos es que son incapaces de producir la intensa corriente ecuatorial hacia el este. Lo que es peor, predicen en principio movimientos ecuatoriales hacia el oeste, así que es necesario efectuar ciertas hipótesis "add hoc" si se trata de reproducir la corriente ecuatorial hacia el este (figura 5).

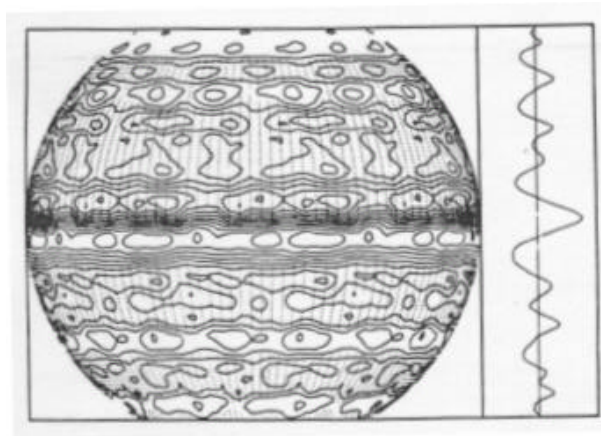


Figura 5: Modelo numérico de circulación general para Júpiter basado en las ecuaciones que rigen la circulación de la atmósfera terrestre (modelo de capa superficial). Las líneas equivalen en su trazado al que describirían las nubes superiores en el planeta. A la derecha se representa el perfil meridional de los vientos zonales. Según G. P. Williams (*Journal of the Atmospheric Sciences*).

El problema fundamental de este tipo de modelos es que hacen caso omiso de la fuente interna de calor. ¿Cómo se desacoplan los movimientos “de abajo” de los de la capa superior calentada por el Sol? Se requeriría de algún proceso que sea capaz de poner un límite inferior (el equivalente a una superficie) para constreñir la capa superficial delgada de los movimientos. Para entender el como puede esto suceder es necesario saber hasta que profundidad penetra la radiación solar y cuanta energía es absorbida por las capas superiores de nubes (tanto solar como interna). Y también que cantidad de calor latente puede ser liberada durante la condensación de las nubes superiores (fundamente de agua) al formarse por ejemplo tormentas masivas por convección húmeda como las observadas en ambos planetas. Junto con Santiago Pérez-Hoyos hemos emprendido un estudio para cuantificar la estructura vertical de las nieblas y nubes superiores de Saturno así como su variabilidad a largo plazo y de cómo esta afecta a la deposición de energía solar en el planeta. Por otra parte, junto con Ricardo Hueso estamos realizando modelos convectivos de las tormentas de agua y amoníaco que se desarrollan en el ecuador y en las latitudes medias de este planeta (por ejemplo las Grandes Manchas Blancas), que nos permitan controlar la cantidad de energía y movimiento que desencadenan y como estos pueden afectar a los vientos zonales. Esperamos así en breve poder constreñir dos aspectos importantes para la circulación zonal de vientos.

Cambios temporales en el sistema de vientos

Como hemos ido adelantando, un aspecto muy importante que debe de diferenciar a ambos modelos es la posible presencia de cambios temporales. Ya dijimos que en los modelos profundos, siendo la fuente de energía interna constante en el tiempo, no serían de esperar cambios significativos (no más de un 10%) en la intensidad y localización de las corrientes de vientos. Sin embargo, los modelos de insolación sobre capa delgada deberían ser sensibles a los cambios en la irradiación solar. Saturno es en este sentido un buen caso

de estudio pues el planeta está sometido a una intensa variabilidad en la insolación de naturaleza por una parte estacional (el eje de rotación del planeta está inclinado 27° respecto del plano de la eclíptica y su excentricidad orbital es la mayor de todos los planetas gigantes –y que la terrestre–), y por otra, en su región ecuatorial, a los cambios cíclicos producidos por la sombra de los anillos (y en mucha menor medida por la luz que reflejan sobre el planeta y la radiación térmica infrarroja que emiten hacia este). Existen evidencias desde hace muchos años de cambios estacionales por encima de las nubes de amoníaco en el campo de temperaturas de Saturno. ¿Se reflejarán estos cambios térmicos de alguna forma en el sistema de vientos?

Hasta la llegada de las naves espaciales Voyager 1 y 2 en 1980 y 1981 al planeta, los datos acerca de las nubes de Saturno y de sus movimientos eran realmente escasos. Usando las imágenes de alta resolución estas naves, pudimos medir con detalle el movimiento de más de 2.000 trazadores nubosos (A. Sánchez-Lavega, J. F. Rojas, P. V. Sada, *Icarus*, **147**, 405-420 (2000)). Los escasos datos históricos se correlacionaban bien con los de los Voyager, pero el número de puntos y su dispersión en latitud, impedían un análisis riguroso de los cambios de la circulación en Saturno a largo plazo. Con el propósito de estudiar este aspecto en detalle, emprendimos un estudio sistemático de las formaciones nubosas y de sus movimientos desde 1990 (aprovechando la incorporación de CCDs a la astronomía), utilizando primero solo telescopios en Tierra (básicamente el telescopio planetario del Observatorio del Pic-du-Midi en Francia colaboración con J. Lecacheux y F. Colas), posteriormente las imágenes de archivo del Telescopio Espacial Hubble entre 1994 y 1995, y desde entonces hasta ahora (1996 a 2003) las obtenidas con el HST en colaboración con R. French del Wellesley Collage en USA.

En 1990 aconteció un hecho importante, cuando una gran tormenta (una Gran Mancha Blanca, o GWS de las siglas inglesas) estalló a finales de Septiembre en el ecuador de Saturno (Sánchez-Lavega et al, *Nature*, **353**, 397-401. 1991) cuyos efectos se prolongaron a lo largo de 1991. Para nuestra sorpresa, en 1994 se formó otra gran mancha ecuatorial, algo más al sur que la primera (Sánchez-Lavega et al, *Science*, **271**, 631-634. 1996). Desde entonces el ecuador no ha cesado de mostrarnos estructuras nubosas irregulares, a veces grandes, a veces pequeñas, con más o menos contraste. Su seguimiento y medida nos ha permitido, junto con la de otras estructuras en latitudes fundamentalmente del hemisferio sur, trazar un perfil de velocidad de los vientos en función de la latitud para el período 1994-2002.

En la figura 6 mostramos dicho perfil en comparación con el de la época Voyager. Aunque el número de puntos es menor (unos 350) en 1994-2002 que en la época de los Voyager (recordamos que más de 2.000), nuestros resultados muestran algunos hechos destacados (A. Sánchez-Lavega, S. Pérez-Hoyos, J. F. Rojas, R. Hueso, and R. G. French. *Nature*, **423**, 623-625. 2003). En primer lugar confirmamos la existencia de una nueva corriente polar de 100 m/s, cerca del polo sur, que fue descubierta por nuestro grupo un par de años antes, contrapartida a la que encierra la estructura hexagonal en el polo norte, lo que hace que los jets de Saturno sean altamente simétricos por hemisferio. En segundo lugar, los jets no ecuatoriales parecen no haber sufrido ningún cambio entre ambos períodos. Pero finalmente, el resultado más interesante sin duda, es la “caída” de más de 200 m/s entre las latitudes $\pm 20^\circ$, de la corriente ecuatorial.

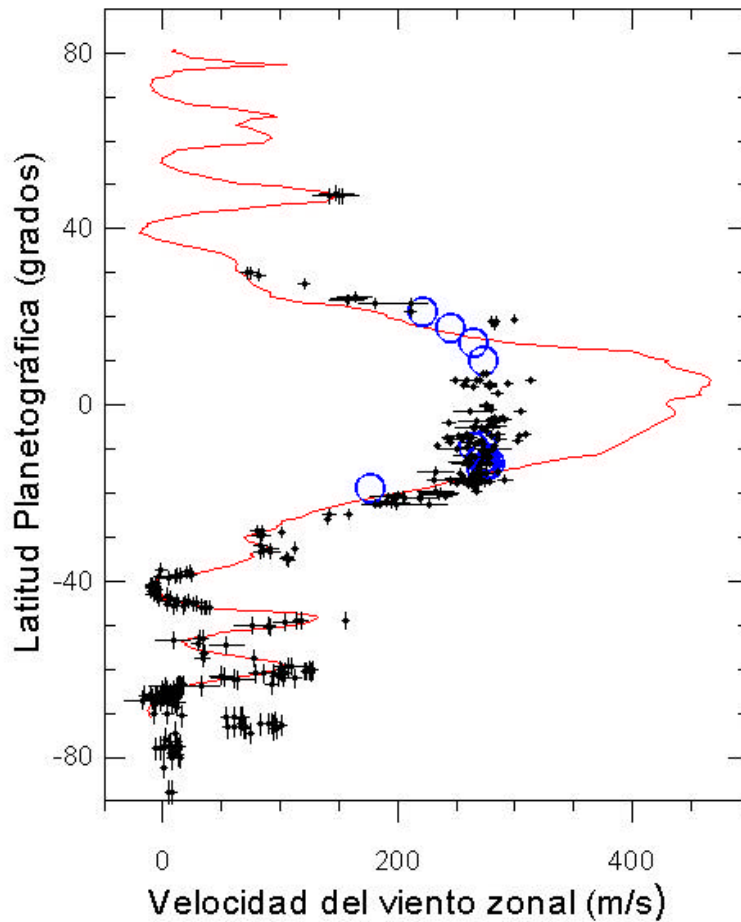


Figura 6: Perfiles de vientos en Saturno comparados: valor medio para 1980-81 a partir de las imágenes de las naves Voyager (línea roja) frente a las medidas individuales para el período 1994-2002 tomados con el HST (puntos negros), y a partir de las imágenes con telescopios en Tierra (círculos azules). Según A. Sánchez-Lavega et al., *Nature*. 2003, op. Cit.).

Y la pregunta resulta obvia ¿Cuál es el origen de este corte en el perfil del jet ecuatorial? Existen varias posibilidades. Podría ser que la resolución del telescopio espacial fuera insuficiente y en realidad existiesen otros pequeños detalles moviéndose con la velocidad de la época Voyager. Aunque así fuera, habría que explicar como es que existen vientos que mueven esos detalles atmosféricos 200 m/s más lentamente.

Una posibilidad es que dichos detalles estén ubicados más altos que en la época Voyager, y siguiesen la ley observada en otras latitudes del planeta de que los vientos decrecen con la altura por encima del nivel de las nubes. Ciertamente, a partir del estudio fotométrico que lleva a cabo S. Pérez Hoyos, hemos podido determinar que las formaciones nubosas entre 1994-2002 se encontraban unos 35 kms más altas que en 1980-81. Una caída tan brusca del viento (200 m/s) en tan corto espacio vertical, conllevaría diferencias de temperatura de más de 300 grados entre latitudes cercanas. Algo realmente inviable.

Una alternativa es que el movimiento que vemos corresponda en realidad al de ondas ecuatoriales de longitud de onda larga y no al fluido atmosférico. La onda se movería con una velocidad de fase de 200 m/s hacia el Oeste respecto del jet ecuatorial de 450 m/s.

Finalmente existe la posibilidad de que el jet ecuatorial haya cambiado realmente su velocidad. El cambio podría ser el resultado de las variaciones estacionales de insolación que sufre la región ecuatorial de Saturno, o bien ser una consecuencia de los cambios dinámicos generados por la gran tormenta ecuatorial de 1990 y la subsiguiente actividad que se viene registrando desde 1994. De ser así, los vientos serían sensibles a la dinámica local, es decir la que tiene lugar en las capas superiores de nubes. Una opción es que las propias tormentas o las ondas que pudieran excitar, extrayesen energía del flujo zonal medio, haciendo decrecer a este. Otra opción es que las nubes altas de las tormentas actúen como fuentes locales de opacidad a la radiación solar e interna, generando importantes diferencias térmicas entre áreas adyacentes que cambien el régimen de vientos.

Desde el punto de vista general de la circulación de los planetas gigantes, la impresión que en este momento tenemos es que la constancia casi global durante más de 100 años en el sistema de vientos de Júpiter, y también en los jets no ecuatoriales de Saturno, es que estos responden a una dinámica más profunda en la atmósfera. Sin embargo, cuando acontece algún fenómeno atmosférico de gran intensidad, las corrientes zonales pueden sufrir variaciones en su velocidad, moduladas por dicha dinámica. Es el caso de las GWS de Saturno y de las perturbaciones del intenso jet a 23 grados Norte de Júpiter. Quedaría en tal caso por saber que papel juega la radiación solar en la generación de estas formaciones meteorológicas gigantescas.

En menos de un año, la nave Cassini entrará en órbita alrededor de Saturno, y por unos cuantos años se convertirá en la mayor fuente de conocimiento sobre los planetas gigantes del sistema solar. Esperemos que entonces muchas de estas incógnitas puedan ir clarificándose con las nuevas observaciones que aporte. Mientras, es la intención de nuestro grupo el profundizar en el desarrollo de modelos numéricos de circulación general para los planetas gigantes que nos permitan contrastar las simulaciones de vientos con las observaciones existentes y con las nuevas que proporcione Cassini. Ni que decir tiene que todo avance en el conocimiento de los mecanismos que controlan la circulación general de las atmósferas planetarias repercutirá en una mejora de nuestros modelos para la Tierra y en su capacidad de predicción a largo plazo. Además, en el caso de los planetas gigantes, estos modelos serán la base que sustentarán la interpretación de las futuras observaciones de los gigantes extrasolares que se vienen descubriendo desde 1995.

Artículo publicado en Tribuna de Astronomía, No. 51 (Septiembre 2003)