Este artículo ha aparecido publicado en el Anuario del Observatorio Astronómico de Madrid para el año 2015.

LAS ATMÓSFERAS DE LOS PLANETAS DEL SISTEMA SOLAR

Julio Solís García

Agencia Estatal de Meteorología

Estamos tan acostumbrados al azul del cielo, a las nubes blancas, a nuestros cúmulos, cirros, nieblas, heladas, lluvia, nieve, viento, etc., que muchas veces nos olvidamos de que por encima de nuestras cabezas, recorriendo el cielo entre las estrellas, nos acompañan esos magníficos luceros, nuestros parientes próximos, los planetas y alguno de sus grandes satélites. Ellos tienen también sus propias atmósferas, su particular geografía, su luz, sus nubes y vientos, que forman sus maravillosos y exóticos paisajes tan distintos de los nuestros.

Venus

Parece un planeta gemelo de la Tierra, por sus dimensiones (su radio es tan solo 285 km menor que el terrestre) y porque está rodeado de nubes, pero las apariencias engañan. Es un planeta hermoso cuando lo observamos a simple vista, con prismáticos o con telescopio. Después del Sol y la Luna es el objeto más brillante en nuestro cielo, lo que ha dado lugar en tiempos pasados a fantasías que describían a Venus, (que es por otro lado el planeta más cercano a nosotros, llegando a una distancia mínima de 38 millones de kilómetros, motivo por el que brilla tanto en el cielo, aparte de por su elevado albedo que le proporciona el permanente manto nuboso), como un paraíso con mucha agua, grandes y extensos bosques y un clima tropical, como pusieron de manifiesto en sus obras J.H.B. de Saint-Pierre o el premio Nobel S.A. Arrhenius, en las que manifestaban su creencia en que Venus era un lugar idílico y exótico, plagado de selvas y agua en abundancia. Con la llegada al planeta de las primeras sondas interplanetarias, la soviética Venera 1, y la norteamericana Mariner 2, se enterraron definitivamente todos aquellos bosques y selvas tropicales de ensueño.

En 1966 se envió el primer vehículo que pudo atravesar su densa atmósfera, y en 1970 se logró posar suavemente una sonda en el suelo de Venus (Venera 7), que pudo transmitir datos durante 23 minutos. Las posteriores sondas Venera 8, 9 y 10 fueron capaces de "sobrevivir" durante un tiempo más dilatado a los caóticos ataques de los componentes atmosféricos y al intenso calor superficial, enviando, además, las primeras fotografías de la superficie de ese mundo. En los años siguientes lograron posarse otras seis naves Venera, hasta completar una serie de 16, la última de las cuales llegó al planeta en 1983. Posteriormente se han lanzado más sondas interplanetarias, como las misiones Vega 1 y 2, quienes antes de continuar su trayectoria hacia el cometa Halley liberaron dos globos sonda que durante tres días estuvieron mandando datos de la atmósfera. Alguno de los módulos de la serie soviética Venera, mientras hacían su entrada en la atmósfera, detectaron, entre otros componentes, dióxido de carbono (96 %), nitrógeno (3 %), agua, gases sulfurosos (sulfuro de hidrógeno y sulfuro de carbonilo), y algunos gases nobles (argón, xenón, neón y helio).

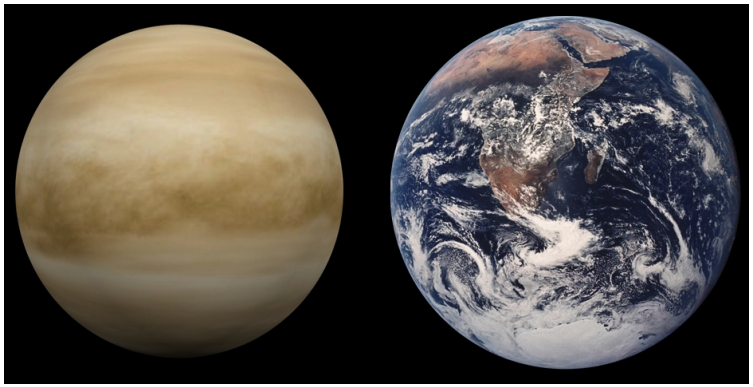

Figura 1: La Tierra y Venus a la misma escala. (Cortesía de NASA)

La estructura nubosa de Venus es persistente, manteniendo al planeta siempre cubierto de nubes. Si fuéramos ascendiendo desde la superficie podríamos observar que la atmósfera es limpia y transparente hasta unos 30 km de altitud, aunque es necesario señalar que la presión y temperatura en superficie son tan altas, que el dióxido de carbono adquiere un aspecto fluido y pastoso, con una elevada eficiencia en la transmisión de calor, favoreciendo precisamente la uniformidad de esa elevada temperatura por todo el planeta. Entre los 32 y los 48 km iría apareciendo una bruma de dióxido de azufre y azufre polimerizado responsable de la reflexión de la radiación infrarroja hacia el suelo, y que se convertirá en una verdadera capa nubosa a partir de los 48 km, con un espesor de cuatro o cinco kilómetros, compuesta por partículas cristalinas, sales de cloro y azufre, y

por ácido sulfúrico. Por encima de esa capa nubosa aparecerían otras dos capas de nubes compuestas por una solución acuosa al 80 % de ácido sulfúrico, y pequeñas cantidades de ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico, que irían perdiendo densidad y reduciendo el tamaño de las partículas con la altura, hasta sobrepasar los 67 km. Si seguimos subiendo nos encontramos finalmente con una capa brumosa de dióxido de azufre hasta los 90 km.

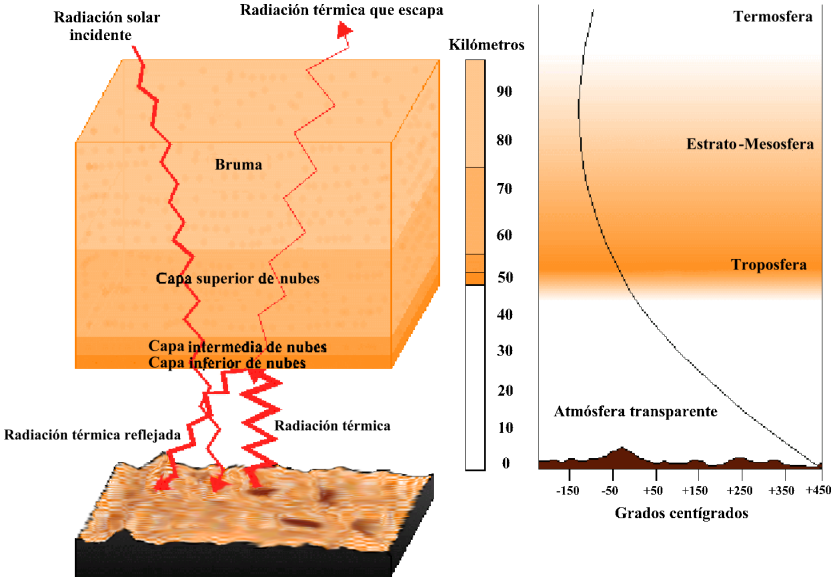

Figura 2: Corte de la atmósfera en Venus. (Imagen creada por Julio Solís)

Su velocidad de rotación es muy lenta, tarda nada menos que 243 días en rotar sobre sí mismo, y además lo hace en sentido contrario, es decir, en el sentido de las agujas del reloj mirándolo desde el polo norte, de modo que el sol en Venus sale por el oeste y se pone por el este (si es que pudiera verse la salida y puesta de sol, porque en realidad ese fenómeno no es observable desde la superficie al estar su cielo permanentemente nublado en todo el planeta). Tampoco existen estaciones similares a las de la Tierra, dado que su eje de rotación es casi perpendicular al plano de su órbita, la excentricidad de su órbita es muy pequeña y la uniformidad climática por toda la superficie es dominante, debida al fuerte efecto invernadero y al permanente manto de nubes.

Las condiciones climáticas en la superficie de Venus son radicalmente opuestas a las nuestras, con una temperatura ambiente por encima de los +460 ^{o}C casi constante por todo el planeta, da igual que nos situemos en

los polos o cerca del ecuador, o que sea de día o de noche, y una presión atmosférica en superficie de 93 200 hPa (90 veces la nuestra, es decir, la que podríamos encontrar en el fondo marino a una profundidad de un kilómetro), sequedad absoluta y presencia en la atmósfera de sustancias muy nocivas y corrosivas, como el ácido sulfúrico y el ácido clorhídrico, que darían lugar a verdaderos ríos de plomo, en el caso de que hubiera grandes cantidades de dicho metal en su superficie, corriendo en estado líquido sobre la superficie pedregosa. Todo ello sitúa a Venus en el primer lugar de la lista de planetas más cálidos del sistema solar, más aún que Mercurio.

Figura 3: Paisaje de Venus. (Imagen creada por Julio Solís)

La temperatura en el seno de las nubes oscila entre los +100 ^{o}C en la base de la capa más baja y unos +10 ^{o}C en la cima. En la parte superior de la capa nubosa se originan partículas de ácido sulfúrico que se precipitan hacia las partes inferiores, donde el fuerte calor las descompone en dióxido de azufre y agua, provocando su evaporación y vuelta a las alturas, por lo que aunque exista una continua lluvia, ésta no llega nunca al suelo (tenemos una permanente virga de ácido sulfúrico en Venus).

Curiosamente, las nubes de Venus deben su opacidad al gran espesor que poseen, y no a su densidad, son más bien una especie de neblina que permite una visibilidad de un kilómetro aproximadamente dentro de las propias nubes. No obstante, la circulación vertical de las partículas que componen las nubes genera un estado de frecuentes fenómenos eléctricos similares a los terrestres, con truenos y relámpagos que deben ser constantes, aunque dada la altura de las nubes no parece probable que alcancen nunca el suelo, al modo de nuestros conocidos rayos.

Los vientos en superficie son muy flojos o nulos, aunque pueden ejercer una fuerza considerable en objetos y obstáculos, debido a la enorme densidad del aire venusiano. Sin embargo la masa nubosa en su cima se mueve muy rápidamente, tanto que dan una vuelta al planeta en cuatro días (mientras el propio planeta tarda 243 días en girar sobre sí mismo). Este curioso fenómeno se conoce como "superrotación", con vientos de más de 370 km/h, que arrastran las nubes de este a oeste. Entre el ecuador y las latitudes medias domina la mencionada superrotación con esos fuertes vientos zonales constantes, que van decreciendo globalmente dentro de las nubes, con la altura, hasta velocidades de 180 km/h. A partir de dichas latitudes medias, los vientos decrecen hasta hacerse nulos en los polos, donde se forma un inmenso vórtice. También se produce un movimiento meridional (norte-sur) en forma de célula de Hadley, que transporta el calor desde zonas ecuatoriales hacia las polares a unas velocidades muy débiles de unos 15 km/h. Todavía es una incógnita la verdadera causa de que un planeta que gira tan lento tenga vientos globales huracanados tan fuertes en la cima de su cubierta nubosa.

Las nubes son un factor determinante en el clima de Venus. La capa que envuelve al planeta deja pasar la mayor parte de la radiación solar, que calienta el suelo, pero es muy opaca a la radiación infrarroja, dejándola retenida entre el suelo y las nubes, provocando un recalentamiento de la superficie, caso extremo de efecto invernadero que debería ponernos en guardia respecto a lo que podría pasar en la Tierra en caso de aumentar descontroladamente la acumulación de gases como el dióxido de carbono. Si pudiéramos llegar a la superficie de Venus, y aguantar el ambiente corrosivo y las altísimas temperatura y presión, veríamos el suelo con una apariencia de desierto seco y rocoso, inmerso en una luz amarillenta-anaranjada. Debido a la alta presión y densidad podríamos apreciar fenómenos ópticos como la refracción múltiple, que dan lugar a sucesivas imágenes de un mismo objeto. Tendríamos la sensación de estar viendo el paisaje desde el fondo de una piscina o desde el fondo del mar, sin olvidar que la luminosidad en la superficie de Venus es incluso menor que la de un día nublado y tormentoso en la Tierra. No se verían nunca ni el Sol ni el cielo estrellado.

Tierra

La atmósfera de nuestro planeta no fue siempre como la conocemos ahora. Tras la desgasificación producida por la intensa actividad volcánica de una parte de los elementos volátiles químicamente ligados o absorbidos por el material condensado, que constituía la parte sólida del planeta, se liberaron cantidades muy importantes de vapor de agua, monóxido y dióxido de carbono, que dieron lugar a los océanos, lagos y ríos, conformando una "hidrosfera" cuyo carácter regulador de la temperatura resultó determinante para el clima terrestre, junto con su capacidad para transformar grandes

cantidades de dióxido de carbono, dióxido de azufre, ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico en sales marinas y minerales. Su carácter reductor inicial se perdió debido a procesos de fotosíntesis bajo la acción de la luz solar, que genera oxígeno libre en la atmósfera, facilitando a su vez reacciones químicas que dan lugar al nitrógeno, gas inerte que no reacciona con las rocas superficiales y que por tanto quedó en la atmósfera, constituyendo el 78 % del total (en segundo lugar aparece el oxígeno con un 21 %, siendo el porcentaje de otros gases como el argón, dióxido de carbono, neón, vapor de agua, kriptón, metano, ozono, etc., residual, aunque cualitativamente determinante en la evolución climática).

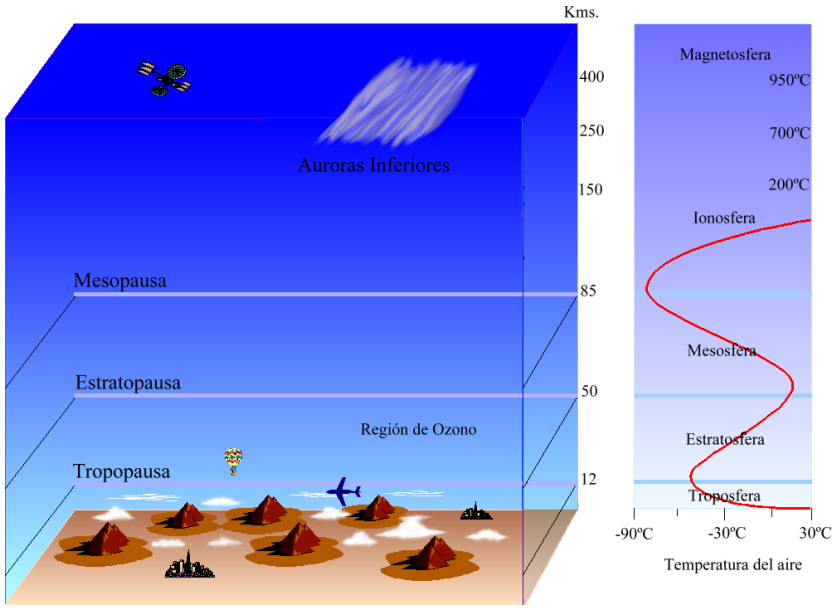

Figura 4: Corte de la atmósfera de la Tierra. (Imagen creada por Julio Solís)

La dinámica de la atmósfera terrestre tiene su "motor" en la energía que recibe del Sol, responsable último de todos los fenómenos meteorológicos desde un punto de vista energético, dando lugar a las borrascas y anticiclones, frentes, y todos los meteoros que nos resultan familiares. Ascendiendo desde la superficie, recorriendo la troposfera, que es el nombre que se le da a esta primera capa, la temperatura disminuye a razón de algo más de 6 ^{o}C por kilómetro, hasta alcanzar los -60 ^{o}C en la tropopausa (a unos 12 km de altitud), lugar en el que se entra en la siguiente capa, la estratosfera, en la que tiene lugar una inversión térmica, aumentando la temperatura con la altura hasta alcanzar los 0 ^{o}C en la estratopausa que da lugar a la tercera

capa atmosférica, la mesosfera, que se extiende desde los 50 a los 80 km aproximadamente y donde la temperatura vuelve a bajar con la altura hasta alcanzar los -100 ^{o}C en la mesopausa. A partir de ese punto se entra en la termosfera. El 80 % de los gases atmosféricos se concentra en la troposfera, que es donde se desarrollan todos los fenómenos meteorológicos, quedando el 20 % restante en la estratosfera, zona limpia y clara, sin nubes ni vientos destacables y con una visibilidad excelente.

Figura 5: Estratocúmulos y altocúmulos - mar de nubes. (Julio Solís)

En la estratosfera y en la termosfera se encuentran varias zonas de especial interés para la vida y para las comunicaciones, por un lado, a unos 25 km de altitud se encuentra una capa rica en ozono (ozonosfera) que nos protege de una parte importante de la radiación ultravioleta procedente del Sol, que afectaría muy negativamente el desarrollo de la vida si llegara directamente a la superficie. Por otro lado, entre los 90 y los 300 km se encuentra la ionosfera, zona donde las partículas del aire están ionizadas, comportándose como un espejo para las ondas de radio cortas y ultracortas, haciendo posible las telecomunicaciones entre lugares que quedan "invisibles" entre sí debido a la curvatura de la Tierra. También se producen en esta zona las espectaculares auroras polares, que no son otra cosa que resplandores de diversas formas y colores generados por la interacción del viento solar con el campo magnético terrestre, como si fuera un gigantesco tubo de neón.

Marte

Bastante más amigable que Venus, en Marte ya no tendremos que soportar presiones aplastantes, temperaturas abrasadoras o una atmósfera corrosiva. Su tamaño es la mitad del de la Tierra, cuenta con una masa 10 veces menor y la fuerza de la gravedad en su superficie es el 38 % de la nuestra. Gira alrededor del Sol en 687 días y le separan del mismo 70 millones de kilómetros más.

Marte presenta estaciones, que duran el doble que en la Tierra, debido básicamente a la inclinación de su eje de rotación que es de 25º, también tiene casquetes polares y una atmósfera ligera. Otra similitud es la duración de sus días, con algo más de 24 horas de periodo de rotación. A pesar de todo, al carecer de vida (hasta donde somos capaces de saber, a día de hoy) y de otros elementos que puedan presentar cambios estacionales, salvo variaciones en las masas de hielo polar y el oscurecimiento de zonas de su superficie, esas estaciones no provocan demasiados cambios en el paisaje. La sensación que se podría tener sería parecida a la existente en un desierto pero con un clima ártico, 7 hPa de presión atmosférica en superficie, temperatura media de unos -50 ºC durante el día (casi siempre soleado), aunque en verano y en zonas ecuatoriales se pueden registrar hasta +20 ºC, que llega a descender hasta -80 ºC durante la noche, y una tenue capa de ozono insuficiente para detener la radiación solar ultravioleta.

La atmósfera de Marte está constituida principalmente por dióxido de carbono (95,3 %), nitrógeno (2,7 %), argón (1,7 %), cantidades menores de agua, monóxido de carbono y oxígeno molecular, y vestigios de gases nobles como el neón, kriptón y xenón. En función de la estación del año marciano, hora del día y latitud, varía la concentración de vapor de agua en la atmósfera, aunque nunca da lugar a nubes de cierta consistencia como pudieran ser los cúmulos o estratocúmulos terrestres. La atmósfera más seca se ha detectado en las zonas polares durante el invierno, y la más húmeda también en zonas polares pero en verano. Las frecuentes tormentas de polvo reducen el contenido de vapor de agua atmosférico mientras tienen lugar.

En las primeras etapas de su formación, Marte poseía una envoltura gaseosa mucho mayor, que fue paulatinamente desapareciendo, y con ella el agua líquida superficial. De ahí que Marte no tenga océanos, ni lagos, ni corrientes de agua, y esté helado (aunque se han encontrado indicios muy claros de que en un tiempo pasado hubo líquidos, seguramente agua, corriendo por su superficie en forma de torrentes, ríos o lagos). Por tanto, en semejanza con Venus y la Tierra, Marte tampoco posee una atmósfera primigenia, sino secundaria, o sea, compuesta por gases que fueron liberados por su caliente interior, por actividad volcánica. Los últimos datos ofrecidos por los vehículos enviados a la superficie marciana (Curiosity, Phoenix, Odyssey, etc.) confirman que en el subsuelo existen grandes depósitos de agua helada mezclada con tierra y rocas, sobre todo cerca del polo sur, que

pudieran ser los restos de lo que fueron mares, lagos y ríos de hace miles de millones de años, cuando la atmósfera era más densa.

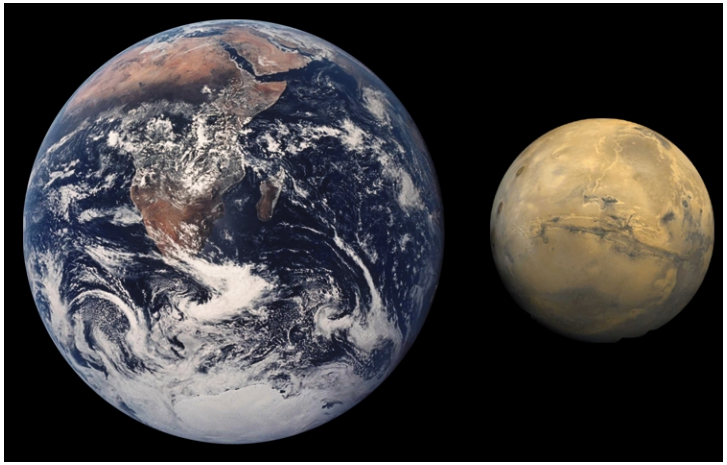

Figura 6: La Tierra y Marte a la misma escala. (Cortesía de NASA)

Contrariamente al proceso de calentamiento que ocurre en Venus, la tenue atmósfera de Marte no permite una acumulación de calor suficiente como para evitar el progresivo enfriamiento y formación de hielo en los polos (hielo seco, mayormente), estimándose en tan solo 5 ºC el aumento en la temperatura debido al efecto invernadero. La pequeña cantidad de oxígeno presente en la atmósfera imposibilita la formación de una verdadera capa de ozono, lo que permite la disociación del dióxido de carbono en monóxido de carbono y oxígeno en toda la atmósfera. El agua se disocia en hidrógeno atómico y en radical hidroxilo debido a los rayos UV solares, productos muy reactivos que pueden catalizar la recombinación del monóxido de carbono y del oxígeno para volver a dar dióxido de carbono, lo que mantiene la proporción de este compuesto en valores tan altos y constantes. Un fenómeno peculiar, exclusivo de Marte, es el flujo de condensación del dióxido de carbono desde el polo norte (que es calentado por los rayos solares, haciendo que el hielo se sublime), hacia el polo sur, donde se deposita en forma de hielo (se congela a -57 ºC). Las reacciones entre el hidrógeno atómico y el oxígeno molecular llegan a formar peróxido de hidrógeno, poderoso oxidante que juega un importante papel en la oxidación de los minerales de la superficie, dando a Marte ese tinte rojo tan característico.

A pesar de la pequeña cantidad de vapor de agua en la atmósfera marciana, se alcanza la saturación con mucha facilidad, dando lugar a diversos tipos de nubes bastantes parecidas a las existentes en la Tierra. Las nubes de Marte son amarillentas, blanquecinas y azuladas, las primeras deben estar

formadas por polvo superficial levantado por el viento, y siempre aparecen asociadas a las grandiosas tempestades de arena, tormentas de polvo tan habituales como únicas entre todos los cuerpos del sistema solar; las blancas se observan siempre en lugares próximos al "terminador" (línea que separa la zona iluminada de la oscura), es decir, al amanecer y al atardecer, dando la sensación de desaparecer con el calentamiento de la atmósfera en el transcurso del día. Las nubes azuladas siguen el mismo patrón de conducta que las blancas, que también se forman en las zonas polares. A pesar de la existencia de nubes, no llueve nunca, pues las mencionadas condiciones de presión y temperatura no lo hacen posible.

Entre los distintos tipos de nubes se encuentran las nubes convectivas, que se forman por calentamiento de la superficie durante el día a una altitud de entre 5 y 8 kilómetros, versiones reducidas y menos consistentes de nuestros conocidos cúmulos, en forma de pompa, que se forman en las altiplanicies ecuatoriales a partir del mediodía marciano. Cuando existen fuertes vientos y encuentran un gran obstáculo en su camino (una elevada cadena montañosa, por ejemplo), al rebasarlo se produce un movimiento ondulatorio que da lugar a las llamadas nubes ondulatorias, de bastante parecido a los altocúmulos lenticulares que vemos en la Tierra, siempre que se den las condiciones de humedad y temperatura necesarias. Si se da un ascenso forzado por una gran pendiente de enorme extensión, el aire, en su elevación, se satura y forma nubes orográficas, que son nubes aisladas, delgadas y uniformes, con similar aspecto a los estratos terrestres, y que se encuentran en las proximidades de las elevadas cumbres (recordemos que Marte posee las montañas más altas de todo el sistema solar). Las nieblas matinales parecen estar en equilibrio con la capa de escarcha de agua que cubre la superficie del planeta en extensas regiones, que con el calentamiento de los primeros rayos del sol se evapora (sublima), condensándose en el seno de la atmósfera y dando lugar a la niebla. Por la noche, cuando descienden las temperaturas de nuevo hasta valores de -120 ^{o}C, aparece de nuevo la blanquecina escarcha sobre la superficie.

En las regiones polares, y en épocas invernales o de finales de otoño, donde pueden registrarse hasta -130 ^{o}C, la temperatura de la atmósfera a grandes altitudes es suficientemente baja como para dar lugar a la formación de unas nubes blancas que pueden estar compuestas por cristales de hielo seco. Son nubes de dióxido de carbono, probablemente con aspecto parecido a los cirros terrestres, que desaparecen en primavera.

En Marte, los fenómenos erosivos están provocados por el viento y por las diferencias de temperaturas, tan notables a causa de una atmósfera tan liviana, y que han pulverizado las rocas cristalinas de la superficie, dando lugar a enormes campos de dunas y a una capa de polvillo que recubre la totalidad del planeta. Aparecen diferenciados dos regímenes de vientos, el de invierno en latitudes medias, en el que, como ocurre en la Tierra, se suceden vientos dominantes del oeste y corrientes en chorro a gran altura,

y el del verano ecuatorial, sometido únicamente al lento suceder de las largas estaciones marcianas, cuyo "motor", al igual que en la Tierra, es la variación diurna en la insolación, y por tanto del calor suministrado al suelo por el Sol. El efecto combinado del calor y la topografía local, es la clave de los vientos en las zonas ecuatoriales, en donde los vientos dominantes son análogos a las brisas de montaña de la Tierra.

Figura 7: Superficie de Marte. (Imagen creada por Julio Solís)

El ciclo diario de calentamiento de la superficie, conlleva una notable oscilación en el régimen de vientos (efecto de marea) en la atmósfera, mucho más intenso que en nuestro planeta. Cerca de la superficie, el viento suele soplar con una velocidad media aproximada de 40 km/h, viento más que apreciable. Aún así, a distancias mayores del suelo, entre 50 y 100 km, por ejemplo, los efectos de marea son mucho más intensos, sirviendo de "mezclador" eficaz de los componentes atmosféricos. A consecuencia de la baja presión en la superficie, o mejor dicho de la baja densidad de su atmósfera, levantar partículas sólidas de polvo o arena del suelo precisa de vientos de más de 100 km/h; no obstante, una vez suspendidas en el aire pueden ya permanecer como tormentas o grandes tempestades de polvo durante largos periodos de tiempo, meses incluso, debido al efecto combinado de la baja gravedad en superficie (1/3 de la terrestre) y de su tenue atmósfera. En invierno, cerca de los polos, se producen fuertes vientos, con intensidad superior a 300 km/h, que suelen originar esas espesas tormentas de polvo locales que frecuentemente se esparcen por todo el planeta dando lugar a violentas tempestades globales que cubren a Marte de un opaco velo amarillo-rosáceo.

El paisaje típico de Marte nos muestra impresionantes cañones, elevados volcanes extinguidos, cráteres semejantes a los de la Luna y continuas tormentas de arena que nublarán su rojiza superficie muy pedregosa y escarchada (en Marte se encuentra el Monte Olimpo, la mayor elevación del sistema solar, con un diámetro de 600 kilómetros y una cima que se eleva 24 000 metros sobre su base). El cielo presenta un color asalmonado más o menos intenso dependiendo de la cantidad de polvo en suspensión, que deja ver el Sol (siempre que alguna nube o tormenta de polvo, no lo impidan) con un tamaño casi la mitad del que muestra desde la Tierra. El cielo de Marte debe mostrar un espectáculo nocturno extraordinario, pues su suave atmósfera permitirá contemplar el sistema Tierra-Luna, Venus y Mercurio con particular claridad y colorido, al igual que Júpiter con sus grandes satélites galileanos y Saturno con sus anillos. Fobos y Deimos, sus dos lunas, se verán como dos estrellas muy brillantes desplazándose por el cielo marciano aparentemente en sentido contrario la una respecto a la otra, debido a que mientras que el periodo orbital de Deimos es mayor que el día marciano, el de Fobos es mucho menor. No podrían verse "redondas" como nosotros vemos a la Luna, en primer lugar debido a su pequeño tamaño y a su forma irregular (Fobos: $27\times22\times18$ km y Deimos: $15\times12\times10$ km) que las asemeja a dos grandes "patatas" cósmicas.

Proseguimos nuestro viaje hacia las profundidades del sistema solar, cruzamos el cinturón de asteroides y empieza a dominar el fondo estrellado el planeta gigante que se quedó a un paso de ser una estrella, Júpiter.

Júpiter

Un poco más de masa y se hubiera convertido en el segundo sol del sistema solar, con su cohorte de satélites helados rebosantes de agua, que hubieran dado lugar a planetas con unas condiciones similares a las de la Tierra, como sería el caso de su luna Europa, de hecho Júpiter tiene una composición química muy similar a la de las estrellas. El más grande de entre los gigantes, con una órbita que le sitúa a 770 millones de km del Sol. Su enorme tamaño de 143 000 kilómetros de diámetro permitiría alojar en su seno a más de mil trescientos planetas como la Tierra. Tiene un sistema de anillos, nada comparable a los majestuosos de Saturno, pero que le confieren un detalle de "elegancia" al rey del sistema solar, que cuenta además con un número de satélites superior a 65.

A pesar de su enorme tamaño no es un planeta "perezoso", es un mundo muy agitado y dinámico, gira sobre sí mismo en algo menos de 10 horas, lo que le produce un achatamiento por los polos, siendo su radio ecuatorial un 7 % mayor que el polar. Si nos zambulléramos en su atmósfera con la pretensión de posarnos en su superficie, al modo en que lo haríamos en los planetas terrestres (Mercurio, Venus, la Tierra y Marte), nuestro empeño sería vano, pues Júpiter no tiene una superficie sólida diferenciada.

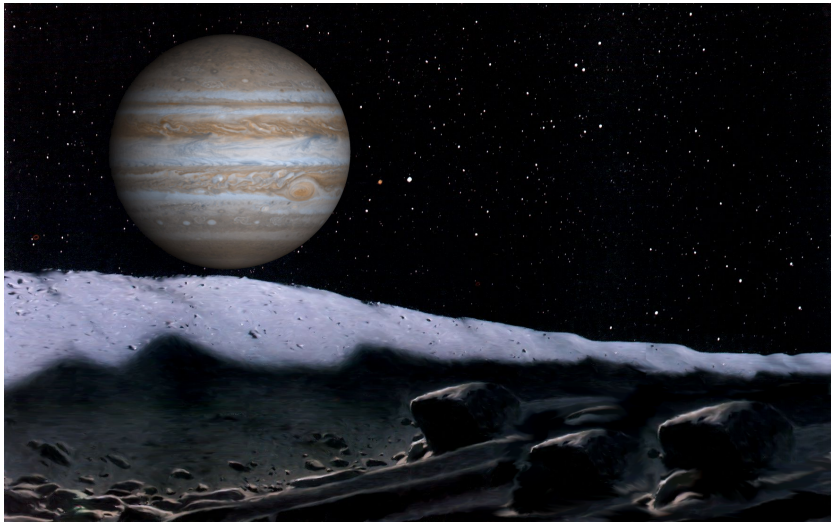

Figura 8: Júpiter desde Ganímedes. (Imagen creada por Julio Solís)

La magnetosfera joviana es la más grande y poderosa de entre todos los planetas del sistema solar, con un campo magnético 10 veces superior al terrestre y con una extensión de 7 millones de kilómetros en dirección al Sol y cientos de millones de kilómetros en dirección opuesta (hasta llegar casi a la órbita de Saturno), provocando magníficas y continuas auroras polares. Por debajo de la enorme y densa cubierta nubosa que envuelve al planeta de manera permanente, y que tiene una profundidad estimada de 1 000 kilómetros, encontraríamos un fluido líquido de hidrógeno y helio, con trazas de carbono, nitrógeno y azufre, sometido a una presión en aumento que alcanza 3 millones de atmósferas a una profundidad de 18 000 kilómetros, donde el hidrógeno adquiere propiedades metálicas al transformarse en una mezcla conductora de electricidad, con protones y electrones sueltos inundando el fluido. La temperatura y la presión siguen aumentando conforme nos acercamos al núcleo sólido y rocoso de Júpiter, compuesto por metales y silicatos, donde se alcanzan unos 30 000 ^{o}C y millones de atmósferas de presión.

En la atmósfera joviana encontramos sobre todo hidrógeno (>87 %) y helio (>12 %), aunque existen compuestos, como los derivados del azufre y del fósforo, en mucha menor proporción, que otorgan el variado colorido de las colosales formaciones nubosas que rodean al planeta. Metano, amoníaco, agua, cianuro de hidrógeno, fosfina, monóxido de carbono, etano, acetileno, hidrosulfuro de amonio, y otros muchos compuestos que se generan en presencia de la radiación ultravioleta, y de los relámpagos y descargas eléctricas en el seno de las nubes de metano.

Nos encontramos con las cimas de las nubes en niveles de presión de 1 hPa, capa nubosa permanente que da lugar, en las profundidades de la densa atmósfera, a una espesa niebla de amoníaco y agua que cubre el pastoso océano global de hidrógeno molecular, sin olas ni mareas y con vientos en calma. Por encima de la capa superior de nubes, la atmósfera presenta un aspecto similar al terrestre, azulado, pero algo más oscuro debido a la menor luminosidad del Sol.

Como resulta difícil identificar algo a lo que pudiera llamarse "superficie" en Júpiter, por debajo de su capa de nubes, podemos establecerla en aquel lugar de aspecto mortecino y penumbroso, en casi total oscuridad tan solo rasgada por frecuentes relámpagos, que no siendo claramente ni océano ni atmósfera, donde se registran 20 atmósferas de presión y +140 ^{o}C de temperatura. A partir de esta referencia arbitraria, en sentido ascendente, tendríamos una troposfera que es donde se desarrollarían los fenómenos meteorológicos, y en su tropopausa (50 kilómetros por encima) alcanzaríamos temperaturas por debajo de -170 ^{o}C y presiones inferiores a 0,1 atmósferas. En la estratosfera, con un espesor superior a los 250 kilómetros, la temperatura aumenta hasta -80 ^{o}C, temperatura que se mantiene más o menos constante en dicha capa. A partir de 10^{-6} atmósferas entramos en la termosfera donde la temperatura aumenta con la altura hasta alcanzar los 1 000 ^{o}C.

A diferentes niveles de la atmósfera encontramos nubes de distintas coloraciones, las más frías y por tanto más altas son rojizas en su cima, tomando un color blanquecino o parduzco por las zonas medias, siendo las nubes más bajas de tonalidad azulada. Existen tres capas de nubes, la más alta contiene nubes de amoníaco cristalino, la intermedia compuesta por nubes de hidrosulfuro amónico, y la inferior caracterizada por nubes compuestas por cristales helados de agua. Por debajo de las nubes más altas tipo "cirros", de amoníaco, deben encontrarse nubes convectivas que podrían dar lugar a chubascos (de amoníaco también).

Júpiter es un planeta que emite más energía de la que recibe del Sol, y por tanto, la energía liberada a nivel de la baja atmósfera parece ser la mayor causa de la agitación atmosférica; en cambio, la energía proveniente del Sol tiene un efecto menor en la dinámica atmosférica del gigante. El comportamiento de los gases atmosféricos más profundos se asemeja al de un líquido colocado en una cazuela puesta al fuego. El calor emanado de sus entrañas agita los gases generando un incesante movimiento ascendente/descendente, que mantiene al planeta siempre cubierto de nubes, en su mayoría de carácter convectivo.

La configuración nubosa de Júpiter presenta las características bandas paralelas al ecuador, debido sobre todo su rápida rotación, alternándose en colores claros y oscuros, a las que se denominó desde los tiempos de las primeras observaciones telescópicas, "zonas" y "cinturones" (o "bandas"). Las zonas son provocadas por una fuerte ascendencia de gas, y sus nubes

son de tipo cumuliforme, de amoníaco y tono claro, alcanzando las mayores alturas y temperaturas muy bajas, con vientos del oeste de hasta 500 km/h. En los cinturones, los movimientos son descendentes, y sus ocres nubes de hidrosulfuro amónico son más oscuras, menos densas y alcanzan menor desarrollo vertical, con vientos de menor intensidad que en las bandas nubosas adyacentes ("zonas"), y que en este caso soplarían en dirección contraria (serían vientos del este). A latitudes por encima de los 55^{o}, la disposición nubosa pierde su carácter zonal y se vuelve totalmente desordenada, rompiéndose en irregulares movimientos de torbellino.

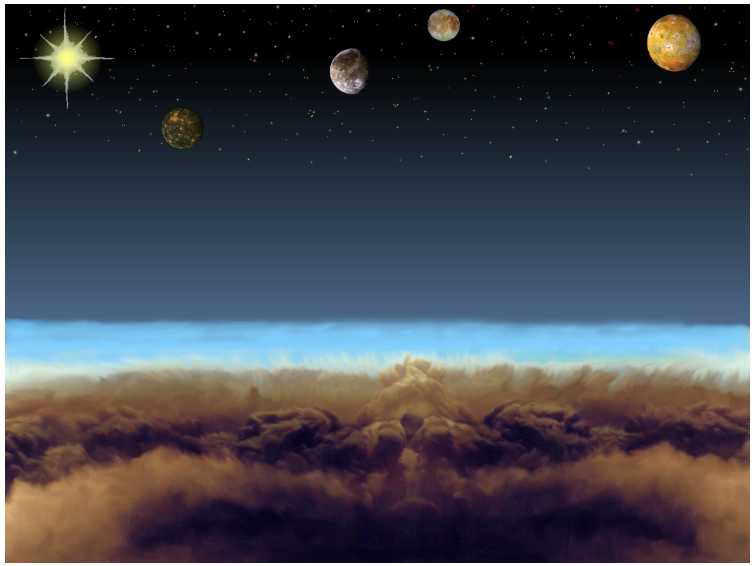

Figura 9: Vistas de Júpiter. Los tamaños angulares de los satélites galileanos no están a escala de sus diferentes distancias. (Imagen artística creada por Julio Solís)

Uno de los fenómenos meteorológicos más llamativos es la Gran Mancha Roja (GMR), que es un gigantesco anticiclón (óvalo de 12 000$\times$30 000 kilómetros) situado en latitudes tropicales del hemisferio sur, que gira sobre sí mismo en unos cinco días, y tiene unos vientos periféricos huracanados de más de 400 km/h,. También se observan vórtices que en su mayoría son blanquecinos y de carácter anticiclónico, estimándose que son formaciones de poca profundidad que no superan unos pocos cientos de kilómetros. Las estructuras atmosféricas descritas, bandas, zonas, vórtices, etc. son muy persistentes en el tiempo, dándose el caso por ejemplo de que la GMR se mantiene en su aspecto actual desde hace por lo menos 300 años.

Saturno

Otro gigante, solamente un poco menor que Júpiter, aunque si contamos su majestuoso sistema de anillos dejaría pequeño al rey de los planetas del sistema solar; sistema de anillos compuesto por ocho grupos diferenciados, situados en el plano ecuatorial del planeta, con un espesor aproximado de 1 kilómetro, y que se extienden desde 6 500 km por encima de las nubes hasta casi los 480 000 km. Situado a 1 425 millones de km del Sol, tiene unas características únicas, gran achatamiento polar debido a su rápida rotación (de poco más de 10 horas), espectacular sistema de brillantes anillos, formados por trozos de hielo y rocas orbitando al planeta a 50 000 km/h, una densidad tan baja que le haría flotar en un barreño con agua lo suficientemente grande, y más de 60 satélites catalogados, entre los que se encuentra uno de gran tamaño y con una atmósfera importante (Titán).

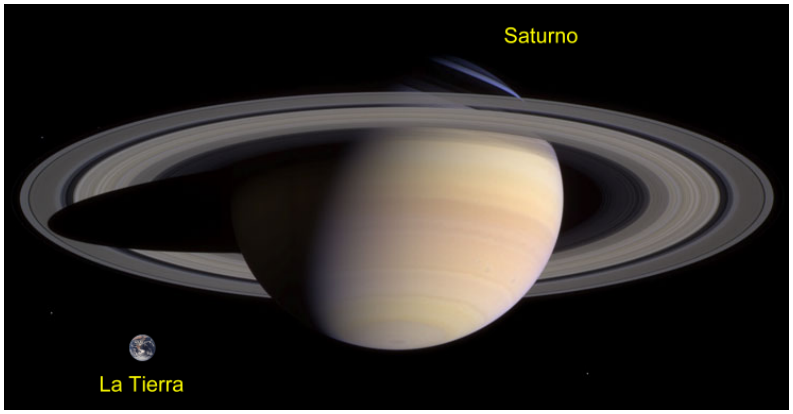

Figura 10: La Tierra y Saturno. (Cortesía de NASA)

Saturno está compuesto por hidrógeno (90 %), helio (5 %), y pequeñas cantidades de metano, vapor de agua, amoníaco, etano, propano, fosfina, monóxido de carbono, y acetileno. Tiene un núcleo sólido rodeado por una inmensa capa de hidrógeno líquido metálico, sobre la que se extiende a su vez la atmósfera de hidrógeno y helio, que alcanza unos 30 000 km, de espesor, y que presenta una estructura en bandas paralelas al ecuador semejantes a las de Júpiter pero menos marcadas y turbulentas, con velocidades del viento en las cimas de las nubes de hasta 1 500 km/h, del oeste, y sin que se aprecien grandes vórtices o remolinos.

El planeta se contrae lentamente generando un calor interno que, al igual que en el caso de Júpiter, es el motor principal de su dinámica atmosférica. Sus nubes, de amoníaco, hidrosulfuro de amonio, o agua, dependiendo

del nivel de presión, presentan unos colores tono "pastel" amarillento, que quedan semiocultas por una importante capa neblinosa uniforme de cristales de amoníaco, generada en la parte más alta de la atmósfera por fenómenos fotoquímicos. Se repiten los patrones observados en Júpiter respecto a la disposición nubosa en bandas paralelas al ecuador, con zonas (ascendencia) y bandas (subsidencia) debido al poderoso efecto Coriolis, hasta latitudes de 60º, dominando los torbellinos irregulares conforme nos acercamos a los polos.

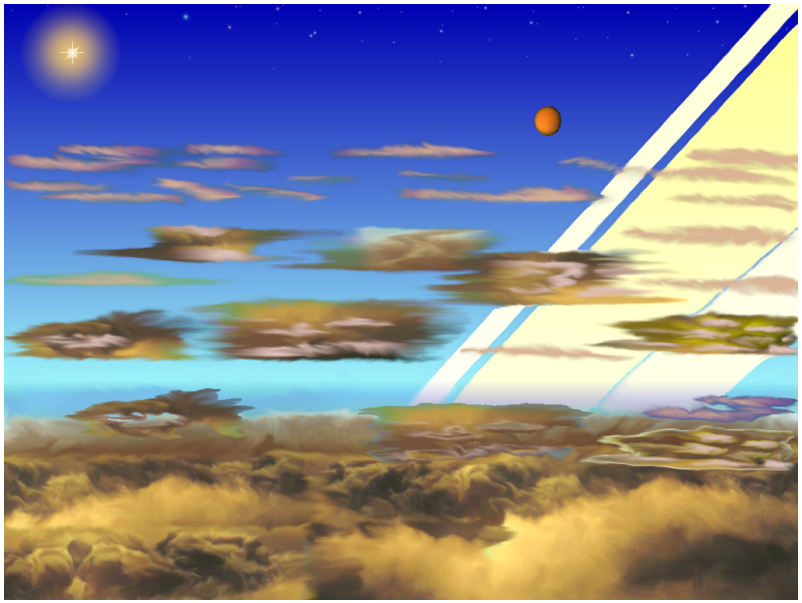

Figura 11: Vistas de Saturno. (Imagen creada por Julio Solís)

Tampoco encontraremos en Saturno una superficie sólida claramente diferenciada bajo las nubes. Los registros de las últimas sondas ofrecen temperaturas de -130 ºC a unos niveles de presión similares a los de la superficie de la Tierra, disminuyendo a razón de 0,85 ºC por kilómetro, en sentido ascendente, hasta alcanzar -193 ºC a niveles de presión de 0,07 atmósferas. Por encima del manto de nubes se encuentra una ionosfera de hidrógeno ionizado, y una magnetosfera que aunque es tres veces menor que la de Júpiter supera en mucho a la terrestre, dando lugar a vistosas e intensas auroras polares. También se han encontrado en Saturno estructuras turbulentas a modo de grandes huracanes, fenómenos convectivos de tamaño colosal que atraviesan la bruma superior, sin el tamaño y espectacularidad de la GMR de Júpiter, pero que parecen tener un origen similar, siendo de color blanquecino, y con una vida media de pocos meses.

El satélite Titán

Titán es grande, tiene un tamaño intermedio entre Marte y Mercurio, y es el mayor de la numerosa cohorte de satélites de Saturno, y sobre todo el único con una atmósfera densa y homologable a la terrestre. El 14 de enero de 2005, la sonda Huygens logró posarse en la superficie de este gran satélite, tras separarse de la nave Cassini, ofreciendo imágenes y datos de la superficie y de la atmósfera, que nos han permitido conocer mucho mejor las características globales de este apasionante y helado mundo.

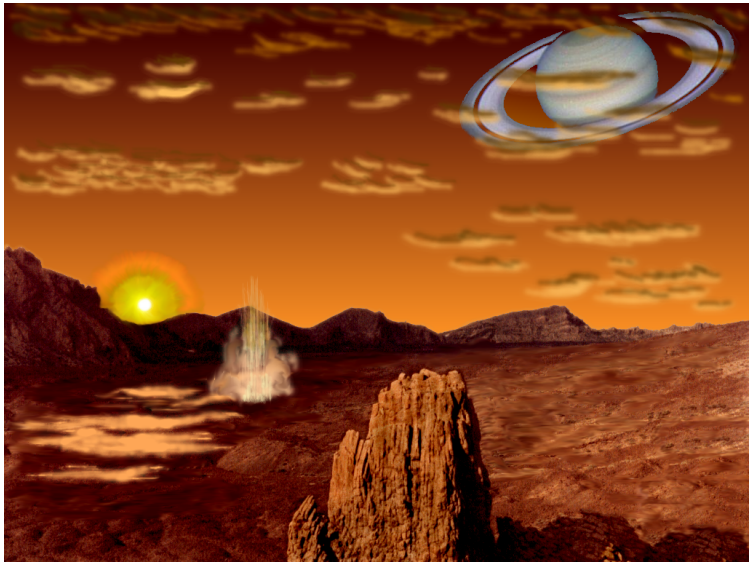

Figura 12: Superficie de Titán. (Imagen creada por Julio Solís)

Su atmósfera está compuesta de nitrógeno (95 %) y otros compuestos (5 %), mayormente hidrocarburos como el metano, y en menor medida etano, acetileno, metilacetileno, diacetileno, cianoacetileno, propano, dióxido y monóxido de carbono, cianógeno, cianuro de hidrógeno, helio y compuestos químicos complejos, resultado de la fuerte actividad fotoquímica en la atmósfera superior. Particularmente interesante resulta la presencia de cianuro de hidrógeno, nitrilo precursor de las purinas, constituyentes de los ácidos nucleicos presentes en las células vivas.

Titán es el único lugar del sistema solar, junto con la Tierra, donde se producen precipitaciones que dan lugar a ríos y lagos, aunque aquí los fenómenos meteorológicos no tienen su base en el agua, sino en el metano líquido, que es el componente principal de las nubes tormentosas de gran desarrollo vertical (hasta 35 kilómetros) que descargan importantes cantidades de precipitación. También existen nubes tipo cirros en la estratosfera

de Titán, a una altitud de entre 50 y 100 kilómetros, compuestas por cristales de hidrocarburos. Su temperatura ambiente media es de $-180\ ^{o}$C, con una superficie anaranjada y fría, arcillosa y blanda, con rocas dispersas y bloques de hielo, en la que puede haber actividad volcánica con erupciones de agua mezclada con amoníaco, y vapores brumosos próximos a ríos y lagos, o tras la lluvia, y donde la presión atmosférica registra 1 600 hPa. Se han detectado vientos dominantes del oeste, que en superficie tienen velocidades de entre 50 y 100 km/h, llegando hasta 200 km/h en zonas altas de la atmósfera, lo que unido a su rotación capturada o síncrona, con un periodo de 16 días, pone de manifiesto un fenómeno de superrotación similar al de Venus, régimen dinámico cuyo origen sigue siendo una incógnita en ambos casos. Entre la niebla anaranjada y espesa en la alta atmósfera, y la lejanía al Sol, la luminosidad en un día cualquiera en Titán puede asemejarse a la crepuscular terrestre.

Su baja densidad media (<2 gr/cm^3) indica que debe estar compuesto por una mezcla de hielo y roca, con un manto arcilloso, y posiblemente con un océano de agua con amoníaco disuelto, y diversos hidrocarburos, a una profundidad de unos 100 kilómetros.

Urano

Al igual que Júpiter, Saturno y Neptuno, es un planeta gaseoso con un núcleo sólido y sin una superficie sólida diferenciada, con una permanente y densa cubierta nubosa. De aspecto verde azulado uniforme, en cuya superficie es difícil distinguir manchas o formaciones de cualquier tipo, es verdaderamente un planeta muy curioso, que tiene también anillos (nada parecidos a los espectaculares de Saturno), magnetosfera y un número importante de satélites (27), aunque ninguno tiene características destacables, y también experimenta un achatamiento por los polos debido a la rápida velocidad de rotación (lo hace en 17 horas), que además es retrógrada. Tarda 84 años en dar una vuelta completa alrededor del Sol, que destaca en su cielo (por encima de las nubes, claro) como una gran estrella brillante, perdida a 3 000 millones de kilómetros (su luz tarda 2 horas y media en llegar) y 400 veces menos luminoso que visto desde la Tierra; pero lo más llamativo es la gran inclinación de su eje de rotación (98^{o}), que le convierte en un planeta que va “rodando” sobre su órbita con sus polos apuntando al Sol alternativamente durante 20 años cada uno, en cada vuelta alrededor del Sol, y tomando el aspecto de una diana visto desde el interior del sistema solar con los anillos como si fueran círculos alrededor del disco planetario.

Es el segundo planeta menos denso, después de Saturno, con un núcleo rocoso y un manto de hielos de agua, amoníaco y metano, aunque es importante señalar que este manto “helado” no está compuesto de hielo en sentido convencional, sino que es un fluido sometido a enorme presión,

caliente y denso con una conductividad elevada, y se parecería más a un océano espeso. Por encima tiene una atmósfera de hidrógeno molecular (83 %), helio (15 %), metano (2 %), amoníaco (0,01 %) y otros elementos en menor cantidad (etano, acetileno, monóxido de carbono, sulfuro de hidrógeno...). En esta atmósfera, la más fría del sistema solar (−224 °C) encontramos varias capas nubosas de cristales de metano en zonas de mayor altitud, y de agua en zonas más bajas, con vientos que pueden llegar hasta los 1 000 km/h.

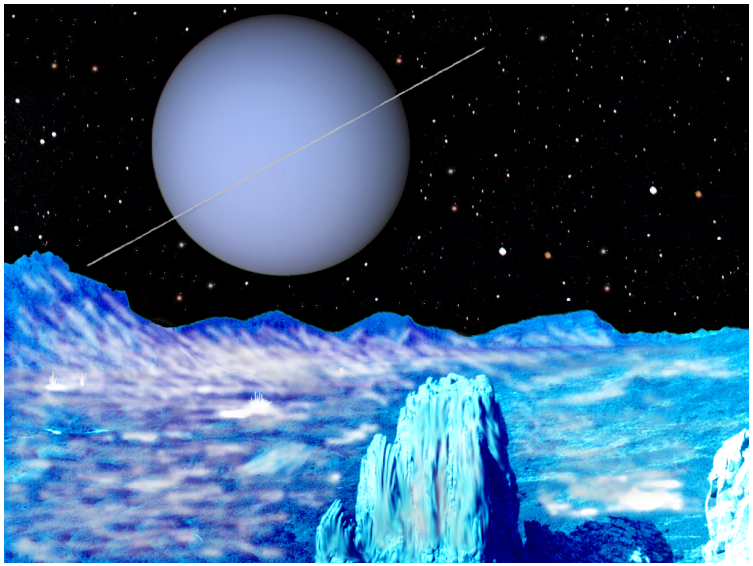

Figura 13: Urano desde Titania. (Imagen creada por Julio Solís)

Los sensores de la sonda espacial Voyager 2, que ha analizado la atmósfera desde las cercanías del planeta, la han escudriñado hasta una profundidad de 300 kilómetros por debajo de lo que se ha dado en llamar arbitrariamente "superficie", o sea, el nivel de presión en su atmósfera de 1 bar, donde midió presiones de 100 000 hPa a una temperatura de +50 °C. Dicho análisis ha determinado la presencia de una troposfera desde los −300 kilómetros hasta los +50 kilómetros (tomando como referencia el nivel mencionado de 1 bar), donde la temperatura disminuye con la altitud hasta los −224 °C en la tropopausa. No disponemos de datos observacionales a lo largo de un año completo uraniano, pero se da por hecho que existen cambios estacionales apreciables en su troposfera, que es la capa más dinámica de la atmósfera, con presencia de nubes de agua en los niveles inferiores, encontrando nubes de hidrosulfuro amónico, de amoníaco, sulfuro de hidrógeno, según se asciende, y nubes de metano llegando a la tropopausa.

Por encima tenemos la estratosfera, donde la temperatura aumenta con la altitud hasta valores de +500 °C (4 000 kilómetros por encima de la "superficie"). En las zonas más bajas de la estratosfera se condensa una mezcla de hidrocarburos (metano, acetileno y etano) en forma de niebla o bruma que seguramente es la causante del aspecto liso que se aprecia desde el exterior. La capa más exterior es la termosfera/corona que se extiende hasta los 50 000 kilómetros, manteniendo de manera uniforme la temperatura alcanzada en la estratopausa.

Figura 14: Vistas de Urano. (Imagen creada por Julio Solís)

Neptuno

Algo más pequeño que Urano pero muy parecido en aspecto y composición, también tiene anillos y un menor número de satélites (14), aunque entre ellos destaca Tritón, algo más pequeño que nuestra Luna, pero mayor que cualquiera de los de Urano. Tarda nada menos que 165 años en recorrer su órbita alrededor del Sol, y 16 horas en rotar sobre sí mismo.

Su estructura interna es similar a la de Urano, con un núcleo sólido rocoso envuelto por una especie de mar de agua y amoníaco, o mejor dicho un fluido de gran conductividad eléctrica, y sometido a grandes presiones, y temperaturas de varios miles de grados, y una atmósfera externa con nubes de hidrógeno, helio y metano. También se ha detectado un campo magnético que al igual que el de Urano está muy inclinado respecto a su eje de rotación.

Como está tan lejos del Sol (4 500 millones de kilómetros), recibe muy poco calor, por lo que se dan temperaturas en su "superficie" inferiores a los -200 ^{o}C, a pesar de lo cual el planeta genera calor interno a expensas de una lenta contracción, de manera similar a Júpiter y Saturno, lo que sirve de motor para su dinámica atmosférica, dando lugar a manchas, remolinos, y estructuras nubosas muy activas, dispuestas también en bandas paralelas al ecuador que recuerdan más a los dos planetas gigantes citados que a Urano. Su atmósfera está compuesta por hidrógeno (84 %), helio (12 %), metano (2 %), amoníaco (0,01 %), y cantidades menores de etano y acetileno, mostrando un color azulado más intenso que el de Urano. La disociación del metano atmosférico, causada por la radiación solar, da lugar a una finísima bruma de hidrocarburos en las capas altas.

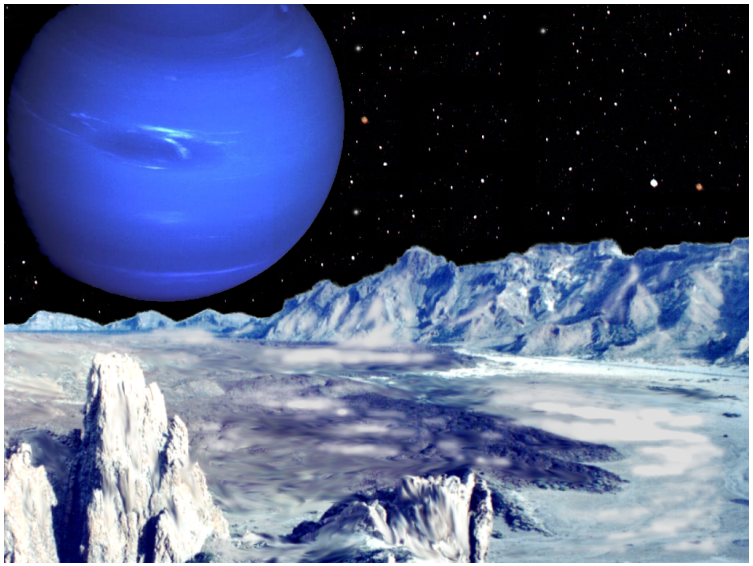

Figura 15: Neptuno desde la superficie de Tritón. (Imagen creada por Julio Solís)

La nave Voyager 2, cuando llegó a Neptuno en agosto de 1989, descubrió una gran mancha oscura, similar a la GMR de Júpiter, con un tamaño de 12 000$\times$8 000 kilómetros, un gigantesco huracán que presenta formaciones nubosas tipo cirros de color blanquecino en sus bordes, donde se producen vientos de hasta 2 000 km/h, que le convierten en el planeta con los mayores registros de velocidad del viento. Se catalogaron varios remolinos ovalados más pequeños, con estructura similar, que mostraban las cimas de enormes nubes de carácter convectivo con capas de cirros de metano de color blanco, unos 50 kilómetros por encima. Estos "cirros" son descompuestos, mediante procesos fotoquímicos, en hidrocarburos más pesados que el

metano. Con todo, la atmósfera de Neptuno tiene mayor transparencia que la de Júpiter y Saturno.

Figura 16: Vistas de Neptuno. (Imagen creada por Julio Solís)

Bibliografía y consultas

J. Solís García, G. P. Arranz, 1994, "Cielos Exóticos", Ed. Equipo Sirius.

R. Millar W. K. Hartmann, 1983, "Viaje Extraordinario. Guía turística del sistema solar", Ed. Planeta.

M. Marov, 1985, "Planetas del sistema solar", Ed. Mir.

J. Solís García, G. P. Arranz, 1992, "Atmósferas y cielos planetarios", Tribuna de Astronomía n^{o} 80/81.

Investigación y Ciencia, colección TEMAS, números 12, 15, 26 y 45 (años 1998 a 2006).

NASA `http://www.jpl.nasa.gov/`.

ESA `http://www.esa.int/ESA`.

`http://www.astromia.com`.