

Recents avenços en l'estudi de les atmosferes planetàries

Josep M. Gómez Forrellad *

Resum

Es fa ràpid un repàs de l'estat actual de coneixements sobre les atmosferes del planetes del sistema solar, començant primer per descriure molt per sobre els mètodes i mitjans que s'empren en aquests estudis, passant tot seguit a un resum del que se sap d'alguns planetes amb atmosferes de diversa composició i estat d'evolució, a fi de constatar les semblances i les diferències. També es comenta la possible existència de vida elemental en alguns casos. Part d'aquesta recerca es fa des de Mollet.

Paraules clau: astronomia, planetes, atmosferes planetàries, recerca espacial

Introducció

Qui més qui menys, tothom està familiaritzat amb el temps meteorològic. Cada dia ens mostren les previsions per televisió en forma de diversos mapes. També, quan volem iniciar una conversa, el més freqüent és parlar del temps que fa. Sabem que els moviments de les masses d'aire són els responsables de la gran variabilitat que constatem: la pluja, el vent, els núvols, el fred o la calor... Però, ha estat l'atmosfera sempre igual? Ha variat al llarg de les eres geològiques,

ja no sols el clima sinó també la composició dels gasos que constitueixen l'aire? I com són i com es comporten les atmosferes d'altres planetes del sistema solar?

Respondre a totes aquestes qüestions seria massa llarg i tampoc és possible fer-ho en tots els casos. Aquí simplement s'intentarà donar una ràpida visió del que se sap en aquests moments, en el ben entès que aquestes matèries estan en contínua revisió a mesura que es van adquirint nous coneixements. Part del que s'accepta ara com a més probable, podria no ser-ho d'aquí a un temps.

1. Obtenció de dades i estudi de les observacions planetàries

La informació que s'utilitza per estudiar els planetes prové tant d'observacions obtingudes des de la Terra com des de l'espai amb satèl·lits, en òrbita terrestre o dels planetes.

Des de terra es fa una vigilància diària per mitjà d'una xarxa mundial que aplega petits telescopis operats per astrònoms aficionats des de llurs cases, el que permet un seguiment durant les 24 hores del dia. En el cas dels planetes Júpiter, Saturn, Urà i Neptú aquesta tasca és coordinada per la International Outer Planets Watch

* Grup d'Estudis Astronòmics (GEA), Fundació Observatori Esteve Duran (FOED). Grupo de Ciencias Planetarias, Universitat del País Basc (GCP). jmgomez@astrogea.org

(IOPW) mitjançant el PVOL (Planetary Virtual Observatory and Laboratory), que és operat pel Grupo de Ciencias Planetarias (GCP) de la Universitat del País Basc (HUESO et al. 2010). Mitjançant Internet, els observadors hi envien cada dia les seves dades, que són classificades i ordenades per quedar a disposició de qualsevol investigador que en necessiti fer ús. Les imatges digitals i la informàtica fan que aquestes observacions siguin d'una qualitat molt superior a la que s'obtenia no fa massa anys amb els grans telescopis professionals. De totes maneres, si escau, també es recorre a l'ús d'observatoris professionals.

Des de l'espai, hi ha el recurs del Telescopi Espacial Hubble (HST) operat per la NASA (National Aeronautics and Space Administration) i l'ESA (Agència Espacial Europea). El problema és que té una demanda d'ús, per a tota mena d'investigacions astronòmiques, molt superior al temps real disponible i no és gens fàcil que sigui acceptada una sol·licitud d'utilització, però no impossible. Més fàcil és treballar amb material proporcionat per les sondes d'exploració que s'envien als planetes. Tots els planetes del sistema solar han estat visitats i actualment hi ha enginyers actius en òrbita al voltant de Mercuri, Venus, Mart i Saturn. Les dades obtingudes són processades i classificades, i resten "embargades" a disposició exclusiva dels científics que dirigeixen la missió, cosa que els permet fer un estudi preliminar i, si escau, ser els primers en publicar les principals troballes. Passat un any de la seva obtenció, les dades queden lliures a disposició de tothom que les vulgui analitzar. La quantitat d'informació és tan considerable que es poden fer grans estudis així com descobriments importants analitzant

dades antigues, fins i tot passats quinze o vint anys després d'haver finalitzat la missió espacial.

Les observacions es prenen en moltes longituds d'ona de l'espectre electromagnètic, des d'imatges en el visible fins a ones de ràdio. Les imatges en el visible, de l'ultraviolat a l'infraroig proper, proporcionen informació sobre els núvols i les seves alçades. En l'infraroig més llunyà s'obtenen temperatures. Per conèixer la composició química s'empra l'espectroscòpia. Una tècnica per observar el que ens resta ocult és el radar. Es fan rebotores de ràdio per cartografiar les superfícies permanentment tapades per una capa de núvols, casos de Venus o de Tità o, fins i tot per veure el subsòl (Mart). Les ones de ràdio en altres longituds d'ona donen informació del camp magnètic i del nucli intern dels planetes.

Encara que no sempre hi ha un perfil ben definit, els científics que estudien els planetes es poden dividir en dos grups: experimentals i teòrics. Amb l'estudi de les observacions, l'experimental aporta uns fets amb els quals el teòric treu una hipòtesi o construeix un model, la validesa o no del qual serà comprovada al seu torn per l'experimental. És així com progressa la ciència. Pas a pas i peça a peça, fins aconseguir muntar el trencaclosques.

Els experimentals solen constituir-se en equips bastant nombrosos on s'apleguen astrofísics, matemàtics, enginyers i especialistes en diverses disciplines. Els treballs poden consistir, per exemple, en mesurar les imatges i determinar la dinàmica atmosfèrica, l'anàlisi de dades espectroscòpiques, establir un model de transferència radiativa de l'atmosfera, o treure simulacions numèriques per ordinador, a

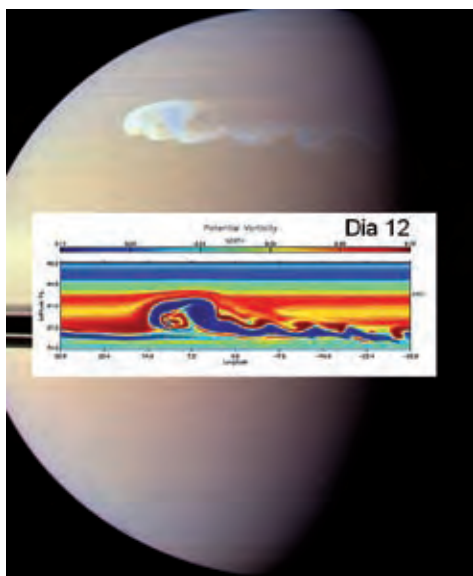


Figura 1. Simulació d'una tempesta observada en un planeta a fi d'obtenir un model que expliqui com s'origina (GCP-FOED/NASA-JPL)

fi i a efecte d'aconseguir emular el fenomen estudiat i quantificar els paràmetres que hi intervenen (figura 1).

Per contra, els teòrics solen ser científics que no observen ni analitzen les dades sinó que, a partir dels estudis fets pels experimentals, elaboren teories i treuen models sobre el funcionament general de l'atmosfera d'un planeta. Els equips de treball són més reduïts, integrats per una, dues o unes poques persones.

L'era d'Internet ha permès que puguin participar en una recerca concreta investigadors d'arreu del món, amb la mateixa facilitat que si tots ells estiguessin aplegats en un despatx o laboratori. Per exemple, de Mollet estant, es pot formar part d'aquests equips.

2. Notes sobre les atmosferes

Una cosa a remarcar és la diferència que hi ha entre el temps i el clima.

El temps fa referència a les condicions de temperatura, humitat, vent, pressió, nuvolositat, precipitació, etc., per a un lloc i un dia concret, com per exemple avui. El clima és la síntesi d'una llarga sèrie d'anys, de la temperatura, humitat, pressió, pluja, vent, etc., d'un indret o d'una regió. Així, podem parlar del clima mediterrani, del clima de muntanya o que el clima de Mollet a l'hivern es caracteritza per..., etc.

Un canvi climàtic és l'alteració de forma permanent del clima, com per exemple una glaciació o un escalfament. Aquests canvis poden ser a nivell local o afectar tot el món i llavors s'anomenen globals. Si un any fa més fred o més calor del que és habitual no indica cap canvi climàtic, sinó simplement una fluctuació estadística de les dades. El que indica si s'està produint un canvi climàtic és la tendència que mostren sèries correlatives climàtiques a la baixa o a l'alça, com per exemple, de la temperatura o de la pluja. Pot ser greu quan el clima canvia tan ràpid que no dóna temps que els organismes vius s'hi puguin adaptar.

El temps i el clima són una conseqüència del funcionament de l'atmosfera a partir dels gasos que la componen, de la calor que rep del Sol, de com circula i es reparteix, de com s'acumula i es dissipa, de la rotació de la Terra, de la inclinació del seu eix de rotació que dóna lloc a l'existència de les estacions, del mar, de les muntanyes, etc. Aquest factors no són pas immutables a molt llarg termini i solen ser diferents en altres planetes, d'aquí l'interès que hi ha per a conèixer el motor i la maquinària que fa moure les seves atmosferes i veure quins són els punts en comú i en què difereixen.

Si complex és conèixer el comportament de l'atmosfera de la Terra, molt més ho és el d'altres planetes, on la majoria de vegades ens hem d'acontentar només amb imatges similars, però d'inferior qualitat, a les que veiem cada dia per la televisió del satèl·lit Meteosat. Només amb aquestes imatges ens costaria molt esbrinar tots els secrets de la nostra atmosfera.

Ens podem preguntar quin interès té l'estudi de les atmosferes d'altres planetes. La resposta és que molt. Com més coneguem del seu comportament, més podrem conèixer la nostra pròpia atmosfera i respondre moltes qüestions sobre el passat, el present i el futur del clima a la Terra, i, entre d'altres, de l'efecte hivernacle i del controvertit canvi climàtic, també anomenat *escalfament global*.

Per sí mateix, l'efecte hivernacle no té res de negatiu i està present en gairebé tots els planetes amb una atmosfera de certa entitat. Sense l'efecte hivernacle no seria pas possible la vida a la Terra, ja que tindria una temperatura mitjana de -18°C . És a dir, l'efecte hivernacle incrementa la temperatura 33°C , fins els 15°C de mitjana que té el nostre planeta, fent possible l'existència de l'aigua en tres estats: sòlid, líquid i gasós, així com la vida. El problema és quan per alguna causa resulta alterat amb més o en menys.

Tot seguit farem un repàs a les atmosferes dels planetes, però no ens aturarem en tots, sinó només en aquells que, malgrat les seves similituds, han seguit evolucions diferents. També donarem una ullada a Tità, que no és pas un planeta, sinó un satèl·lit de Saturn amb categoria planetària en molts aspectes.

Una cosa que potser sobtarà és que en cap dels astres que visitarem hi tro-

barem oxigen molecular en quantitats significatives a la seva atmosfera. L'oxigen no és pas una condició prèvia i necessària perquè existeixi la vida, sinó al contrari, n'és la conseqüència directa, creat en temps preterits per microorganismes, que, en el decurs de milions d'anys han anat transformant l'atmosfera primitiva al respirar diòxid de carboni i exhalar oxigen. Pel que sabem actualment, en el cas de detectar-se oxigen en quantitats importants en l'atmosfera d'un planeta, significaria que allà existeix vida.

3. Venus i l'efecte hivernacle

Un cas extrem i catastròfic d'escalfament global es dona a Venus. És el planeta més proper que tenim i es podria dir perfectament que és el bessó de la Terra, doncs ambdós tenen un diàmetre i una densitat similars. De fet, es van formar al mateix temps i se suposa que en un principi les atmosferes tenien idèntica composició química. La interpretació de les dades de la sonda Venus Express que l'està estudiant indica que, originalment, Venus posseïa una gran quantitat d'aigua que en cas d'haver-se pogut condensar, possiblement hauria cobert gairebé tota la seva superfície. Es diria que va néixer predestinat a ser una segona Terra amb una pressió atmosfèrica similar però, en un moment donat de la seva evolució, alguna cosa es va torçar, iniciant una evolució en un sentit diametralment oposat.

Actualment Venus és un planeta completament sec, cobert per una capa tan gruixuda de núvols que des de l'espai no es pot observar absolutament res de la seva superfície (figura 2). La pluja està constituïda per gotes d'àcid sulfúric, mentre que arran de terra, que sempre està en una tenebrosa penombra al no penetrar-hi els

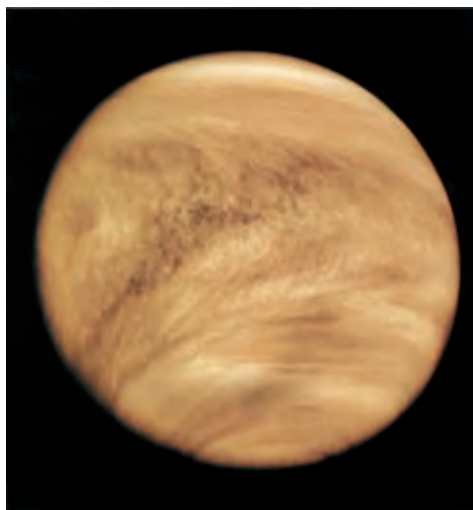


Figura 2. Imatge de Venus en llum ultraviolada presa per la sonda Venus Pioneer. La densa capa de núvols ens oculta perpètuament la seva superfície (Cortesia NASA)

rajos del Sol, la pressió atmosfèrica assoleix les 90 atmosferes i la temperatura prop de 500°C, suficient per fondre els metalls tous. Què li va passar? La resposta és que va experimentar un escalfament global descontrolat o runaway, autoalimentat per sí mateix per causa d'un efecte hivernacle extrem, anomenat en cercles científics *positive feedback loop*. Per no entrar en massa tecnicismes sobre el procés, sovint s'utilitza un exemple molt planer que sembla que va tenir el seu origen en unes lectures d'astronomia de la universitat de Tennessee:

“L'efecte hivernacle té lloc a planetes on les seves atmosferes contenen gasos anomenats d'hivernacle, com poden ser el diòxid carbònic, el vapor d'aigua o el metà, entre d'altres. Aquests gasos tenen la particularitat que deixen passar la llum i la calor del Sol, però quan aquests escalfen el terra o l'aigua, una part de la

radiació emesa en forma de longituds d'ona més llarga (calor) és retinuda pels esmentats gasos d'hivernacle i no pot escapar-se cap a l'espai per restablir l'equilibri. D'aquesta manera la calor es va acumulant i l'atmosfera del planeta s'escalfa. En determinades circumstàncies, l'efecte hivernacle pot desembocar en un runaway”.

A la Terra hi ha enormes quantitats de diòxid de carboni i de vapor d'aigua però, per sort nostra, la major part no és pas a l'atmosfera, sinó que l'aigua està reclosa en forma líquida en els mars i el diòxid de carboni està present combinat a les roques, tot constituint carbonats. A més, així com existeix el cicle de l'aigua, que consisteix en què aquesta s'evapora del mar passant a l'atmosfera en forma de núvols, que al seu torn precipiten en pluja per acabar altra vegada al mar, també funciona l'anomenat cicle del carboni. A grans trets, part del diòxid de carboni és absorbit per organismes vius dels mars. Quan moren, precipita al fons en forma de sediments de compostos carbònics que, a poc a poc, són incorporats a l'interior de la Terra mitjançant el mecanisme de la subducció dels continents. Finalment retorna de nou a l'atmosfera a través de la respiració dels éssers vius i de les erupcions volcàniques, per repetir-se de nou el cicle. Aquest equilibri fa milers de milions d'anys que es manté i possibilita unes condicions que permeten l'existència de la vida. El problema comença si per algun motiu es trenca.

Suposem ara un augment del contingut de diòxid de carboni i de vapor d'aigua a l'atmosfera per causa de la crema de combustibles fòssils o dels boscos. Aquesta aportació farà que s'elevi la temperatura de l'aire i com a conseqüència, que augmenti més el

vapor d'aigua per causa de l'evaporació dels mars, que al seu torn incrementarà encara més la temperatura. Quan més alta sigui, més vapor d'aigua produirà. Seguint aquest cercle infernal, s'arribaria a un moment en què els mars començarien a bullir i s'evaporarien, cada cop més ràpidament. Hauríem entrat en el *positive feedback loop*. Quan tota l'aigua de la Terra s'hagués evaporat, el procés s'aturaria, però la temperatura i la pressió atmosfèrica, a causa de la presència de tota l'aigua dels mars en forma de gas, hauria augmentat considerablement.

Però això no és tot. Segons quina fos la temperatura assolida, les roques es podrien arribar a sublimar i deixarien escapar cap a l'atmosfera el seu contingut de diòxid de carboni (és suficient una temperatura d'uns pocs centenars de graus), la qual cosa faria que seguís l'escalfament. Quan finalment s'hagués acabat tot el procés, s'hauria assolit una temperatura entre 400 i 500°C i la pressió atmosfèrica podria ser fins i tot 100 vegades superior a l'actual. Cal dir que no és gens menyspreable la quantitat de diòxid de carboni que contenen les roques de la Terra. Si s'alliberés en la seva totalitat, la pressió atmosfèrica passaria d'1 a 100 atmosferes.

Encara que no en coneguem els detalls, tot sembla indicar que un procés similar –que no igual– al descrit podria haver succeït a Venus fa uns milers de milions d'anys. Per sort, no sembla probable que aquest

dramàtic escenari es pugui repetir a la Terra en un futur més o menys immediat. Venus és a uns 108 milions de km del Sol, mentre que la Terra és a 150 milions de km. Això fa que nosaltres rebem molta menys radiació i les temperatures no poden pujar tant. S'ha estimat que, perquè a la Terra es poguessin donar les mateixes condicions que a Venus, hauria de ser entre 11 i 18 milions de km més a prop del Sol (RASOOL i DE BERGH 1970). Per la seva banda, John Houghton va descartar que fos possible un runaway

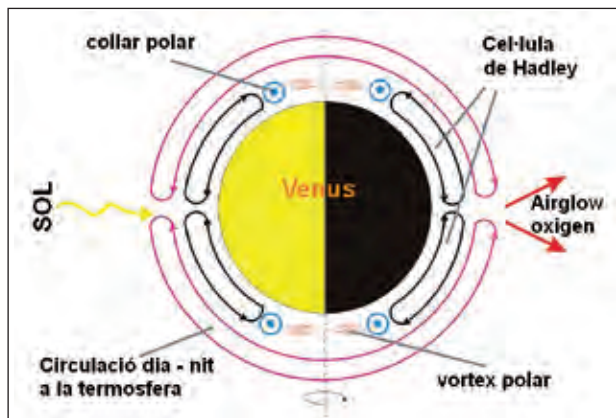


Figura 3. Esquema que mostra la circulació de l'atmosfera de Venus (Ruslik0, Wikipedia Commons)

a la Terra, o al menys de caràcter no reversible a llarg termini (HOUGHTON 2005). Alerta! Aquests estudis diuen que no és pas probable que acabem com Venus, però en cap cas descarten que no puguin pujar les temperatures fins a un límit poc compatible amb la vida. L'actual escalfament de la Terra no és pas un tema banal i ens cal actuar amb molta cura.

Actualment, l'atmosfera de Venus està composta en un 96% per diòxid de carboni i la resta és quasi tot nitrogen. L'aigua primitiva hauria

passat primer a l'atmosfera en forma de vapor d'aigua i posteriorment les seves molècules s'haurien dissociat per causa de la radiació ultraviolada del Sol i s'haurien perdut en gran part a l'espai, si bé radicals OH, combinats amb gasos sulfurosos provinents d'erupcions volcàniques, haurien format els núvols d'àcid sulfúric. En efecte, Venus està farcit de volcans de tota mena i grandària. Alguns tipus d'ells són específics i exclusius d'aquest planeta i no es donen en cap altre lloc del sistema solar. Aquesta circumstància encara agreuja més la situació, ja que els volcans emeten gasos d'efecte hivernacle. Així doncs, Venus, que duu el romàntic nom de la deessa de l'amor, és en realitat un veritable infern en tots els sentits.

La durada del dia de Venus equival a 243 dies dels nostres. Gira en sentit contrari al dels altres planetes, la qual cosa es pot explicar si en una època remota, probablement durant la seva formació, un altre astre va col·lidir amb ell i literalment li va tombar l'eix de rotació uns 180° per causa de l'impacte (la seva inclinació actual és de 178°). Però això no és tot, sinó que el seu any és de 224,65 dies, és a dir, un any dura 0,92 dies Venusians. No hi ha una explicació clara de per què Venus té un dia tan llarg comparat amb el de la resta de planetes.

La circulació de l'atmosfera de Venus també és molt particular i única entre el planetes coneguts. En efecte, malgrat la lenta rotació, l'atmosfera es troba en un estat de circulació vigorosa i *super-rotació*, que fa que doni la volta al planeta en només 4 dies. En alçada, entre els 30 i els 90 km, els vents bufen a uns 100 m/s (360 km/h) o el que és el mateix, unes 60 vegades més ràpids que la rotació del planeta, però la velocitat disminu-

eix a mesura que ens endinsem en la capa de núvols, fins arribar a valors de menys de 10 km/h al nivell de la superfície.

Els vents són originats mitjançant un mecanisme de convecció. L'aire calent s'eleva a l'equador, on es concentra l'escalfament solar i flueix cap els pols fins a uns 60° de latitud, on es comença a refredar i a baixar, per retornar en sentit contrari per sota de la capa de núvols visible. Aquest tipus de circulació s'anomena de Hadley i també té lloc a la Terra. Després de la cèl·lula de Hadley, entre les latituds $60-70^\circ$ hi ha una banda o collar on la temperatura és entre 30 i 40°C més baixa que la de la troposfera de les latituds veïnes, probablement induïda per un corrent ascendent i pel refredament adiabàtic resultant. Finalment, a cada un dels pols hi ha un enorme vòrtex de doble ull connectats entre ells per estructures nebuloses en forma de S. Donen una volta sobre sí mateixos en uns 3 dies en el sentit en què ho fa el planeta i la resta de la nuvolada (figura 3). De moment no s'ha trobat cap model que expliqui aquesta circulació de l'atmosfera.

Des de l'abril del 2007 hi ha en òrbita de Venus el satèl·lit europeu Venus Express que està subministrant dades molt valuoses sobre la dinàmica, composició i temperatura de l'atmosfera del planeta. És de suposar que ajudarà a respondre moltes de les qüestions que es plantegen.

4. Mart, el planeta contradictori

Mart és el següent planeta més proper a la Terra i objecte d'una investigació sistemàtica. Es tracta d'un planeta petit, ja que el seu diàmetre no arriba ni a 6.800 km, un 53% del de la Terra. Està a una distància mitjana del Sol de 228 milions de km,

aproximadament 1,5 vegades més lluny que la Terra, però la seva òrbita és bastant excèntrica. El seu dia és de 24 h 39 m 35,3 s (el període de rotació del nostre planeta és de 23 h 56 m 4,1 s). L'any marcià dura 687 dies terrestres, gairebé el doble que el de la Terra (1,88 anys terrestres). Una altra similitud és la inclinació de l'eix de rotació, 25,2° enfront dels 23,4° de la Terra. Aquesta darrera dada ens indica que a Mart també hi ha estacions climàtiques, la qual cosa és molt important des del punt de vista del seu clima.

Des de fa anys, diversos enginyers en òrbita marciana estan estudiant el planeta de manera contínua i minuciosa, alhora que robots exploren la seva superfície. Això es deu a què és el planeta que s'assembla més a la Terra des d'un punt de vista geològic i podria indicar que en el passat ambdós van tenir una evolució paral·lela. Estudiar Mart és saber no sols sobre la història de la Terra primitiva sinó també de l'època en què es va iniciar la vida en el nostre planeta i, per què no? ens en podria donar les claus.

La superfície està composta principal-

ment per basalts d'origen volcànic i òxids de ferro, fet que li confereix el seu característic color ataronjat. Per aquest motiu se'l coneix també amb el nom de *Planeta roig*. En el sòl hi predominen els silicats ferrosos, a diferència de les escorces de la Terra i la Lluna on preponderen els silicats aluminats. Per ordre d'abundància, els constituents del sòl són: oxigen (43,8%), silici (22,4%), ferro (12,1%), alumini (5,5%), magnesi (4,3%), calci (3,8%), més altres components en quantitats menors.

L'atmosfera de Mart es compon de diòxid de carboni (95,32%), nitrogen (2,7%), argó (1,65), oxigen (0,13%), monòxid de carboni (0,08%) i de traces d'altres gasos, entre ells el vapor d'aigua. També conté notables quantitats de pols en suspensió que li confereix un color rosat salmó característic. Aquesta atmosfera és molt tènue, amb una pressió superficial entre 7 i 9 hPa

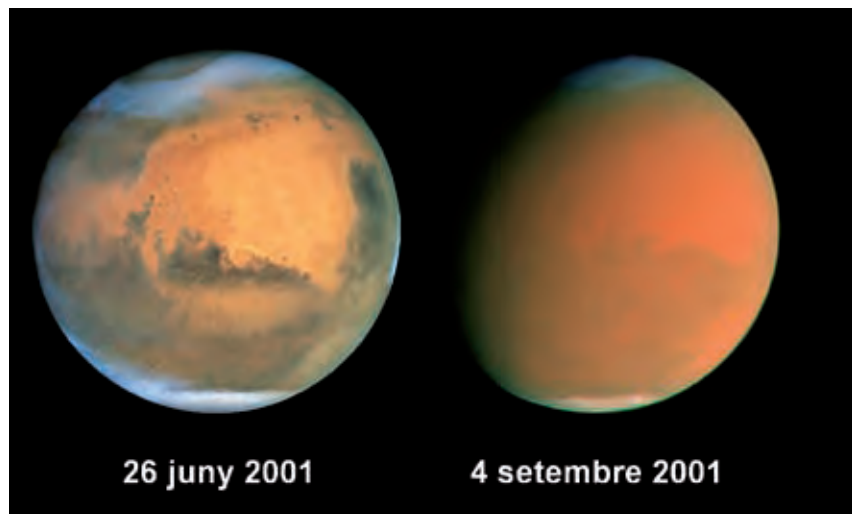


Figura 4. A Mart es poden desenvolupar enormes tempestats de pols que en el decurs de poques setmanes afecten tot el planeta. Aquestes imatges mostren aproximadament la mateixa cara de Mart, abans i durant una tempesta global de pols. (NASA, J. Bell, M. Wolff i el Hubble Heritage Team)

enfront dels 1.013 hPa de la atmosfera terrestre, és a dir, unes 125 vegades inferior i equival aproximadament a la que tenim aquí a una altura de 35 km. La feble pressió atmosfèrica no permet l'existència d'aigua líquida a Mart, sinó que aquesta passa directament d'estat sòlid a gas per sublimació. Malgrat tot, l'atmosfera és prou densa com perquè es creïn vents molt forts i grans tempestes de pols que poden arribar a afectar la totalitat del planeta durant mesos (figura 4), així com formar dunes de sorra. Encara que no gaire nombrosos, també s'hi observen núvols de diversa mena (figura 5): blancs que són de vapor d'aigua, grocs, típics de les tempestes de sorra i constituïts per petites partícules sòlides i també de tonalitat blavosa, que semblen com boirines. A més, també s'hi observen boires matineres i a les

fondalades. Altres fenòmens són: gebrades, d'aigua congelada o de diòxid de carboni i remolins de pols o *dimoniets* quan pica més el sol de migdia.

L'actual atmosfera de Mart (igual que la de la Terra i la de Venus) és de "segona generació", és a dir, que no té res a veure amb l'atmosfera primigènia de quan es va formar el planeta. L'erosió produïda pel vent solar, el progressiu refredament i les erupcions volcàniques durant milers de milions d'anys l'han anat transformant amb el que és ara.

La temperatura superficial de Mart varia entre -87°C durant l'hivern i -5°C a l'estiu. S'ha de tenir en compte que la dèbil pressió no deixa acumular gaire calor durant el dia. També, que en ser 1,5 vegades més lluny del Sol que la Terra, només rep un 43% de radiació de la que rebem nosaltres. Existeix un efecte hivernacle, però la rarificada atmosfera només permet que l'augment de la temperatura sigui de 5° .

Mart té dos casquets

57

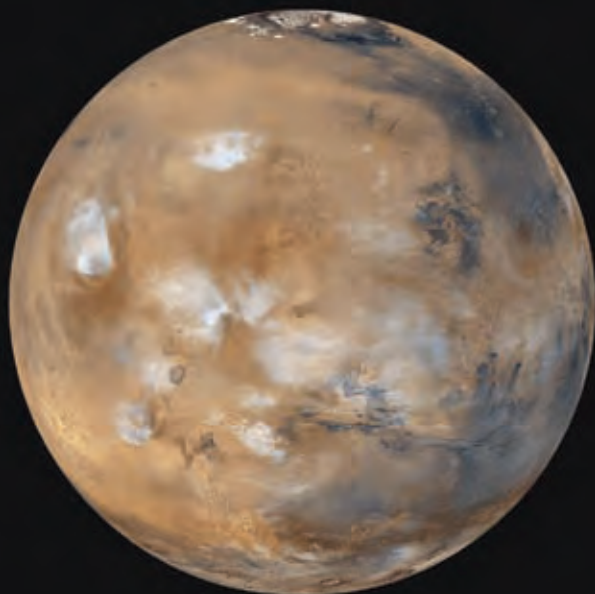


Figura 5. Mart vist pel satèl·lit Mars Global Surveyor (abril 1999). S'hi poden observar diverses formacions de núvols. A dalt es veu el casquet polar nord molt minvat, perquè era ple estiu. (NASA/JPL/MSSS)

polars permanents. Durant l'hivern, el refredament de la superfície provoca que entre el 25 i el 30% de l'atmosfera es condensi i formi gruixuts mantells de diòxid de carboni gelat sobre d'ells. Quan arriba la primavera i l'estiu als pols, el diòxid de carboni congelat es sublima i crea enormes corrents de vent. Els pols estan constituïts principalment per gel d'aigua. El casquet polar nord, durant l'estiu, té un diàmetre de prop de 1.000 km. S'ha determinat que té 2 km de gruix i conté al voltant d'1,6 milions de quilòmetres cúbics d'aigua congelada. El casquet polar sud té un diàmetre de 350 quilòmetres i un gruix de 3 km, amb un volum estimat també d'1,6 milions de quilòmetres cúbics.

Aquesta visió d'un petit planeta amb una atmosfera que no és gaire cosa es trenca quan s'explora la geografia de Mart. S'hi veuen antics llits de rius, torrents, rambles, llacs secs, el que sembla que eren costes de mars desapareguts, etc. Per força, en el passat, les condicions van ser molt diferents de les actuals, en les quals la pressió atmosfèrica era alta i la temperatura permetia l'existència d'aigua líquida, amb potents núvols de vapor d'aigua que donaven lloc a pluges torrencials i a immenses inundacions. Sembla que no hi havia només mars, sinó també un autèntic oceà que cobria l'hemisferi nord.

L'explicació que es dona és que en una època molt pretèrita, la pressió atmosfèrica i la temperatura eren potser iguals o superiors a les que hi ha a la Terra i donaven lloc al que s'acaba de descriure més amunt. Molt aviat, però, l'atmosfera va perdre entitat, el planeta es va refredar, l'aigua es va congelar i va quedar resclosa en el subsòl en forma de permafrost, però per causa de la calor generada per l'impacte de

grans meteorits i per l'activitat volcànica, hi havia transitoris desglàços i inundacions de magnitud enorme. És possible que en l'actualitat encara es puguin donar alguns episodis similars, però menors. En efecte, la inclinació de l'eix de rotació de Mart varia en el temps a causa de la precessió dels equinoccis en un cicle de 124 mil anys, i passa d'una inclinació de 15 a 35°. Èpoques de major insolació sobre el pols podrien provocar que s'evaporés part del gel d'aigua i passés a l'atmosfera. Augmentaria així la pressió atmosfèrica i l'efecte hivernacle, potser fins a un punt de permetre l'existència d'aigua en estat líquid. El contingut d'aigua congelada que té Mart podria ser bastant elevat, segons mostren les observacions.

Un dels principals objectius de la recerca espacial a Mart va encaminat a la possible existència de vida elemental a nivell de bacteris, ja sigui actualment o en el passat. El descobriment de vida a Mart, per rudimentària que fos, tindria profundes repercussions tant des del punt de vista de la biologia com des del filosòfic i de les religions. Significaria que la vida és un fet natural i que s'origina per sí sola, sense cap mena d'intervenció "externa", sempre que es donin les condicions idònies per desenvolupar-se.

El que s'hagi focalitzat a Mart aquesta recerca és perquè durant una època primitiva i durant probablement centenars de milions d'anys, hi van regnar unes condicions molt similars a les de la Terra en el moment que s'hi va iniciar la vida. En tot cas, si hi ha vida o n'hi ha hagut en el passat, s'espera que només sigui a nivell bacterià. A la Terra es van necessitar milers de milions d'anys per passar dels bacteris a primitius organismes pluricel·lulars. Aquest temps necessari

per poder evolucionar la vida no el va pas tenir Mart, perquè les condicions ambientals van canviar ràpidament.

El 2004 es va anunciar el descobriment de minses quantitats de gas metà (l'anomenat gas dels pantans) localitzades sobre dues regions concretes on era ple estiu. La qüestió és que Mart no pot retenir el metà durant molt de temps, ja que és destruït per la radiació ultraviolada del Sol. El fet que n'hi hagi significa que es va renovant de forma continuada. Una explicació (n'hi ha d'altres) és que podria ser el resultat del metabolisme d'algun tipus de microorganisme en el subsòl marcià. També podria ser que les mesures fossin errònies (ZAHNLEA 2011).

L'agost del 2012 és previst que arribi a Mart el robot Mars Science Laboratory (Curiosity) amb l'objectiu concret d'avaluar, de manera quantitativa, un indret de la superfície de Mart com a potencial hàbitat per a la vida, passada o present.

5. Tità, un món de ciència-ficció

Ara farem un salt de 1.400 milions de quilòmetres (9,5 vegades la distància de la Terra al Sol) i visitarem un petit món realment exòtic, diferent dels que hem vist fins ara, però al mateix temps també amb unes coincidències inversemblants. En molts aspectes, és com fer un salt enrere en el temps de 4.000 milions d'anys que ens portarà a conèixer una atmosfera primitiva, la de Tità, el major satèl·lit de Saturn i el segon més gran del sistema solar, que amb els seus 5.150 km de diàmetre, només és superat per Ganimedes per poc més de 100 km. Fins i tot és més gran que el planeta Mercuri.

Tità orbita Saturn en 15 dies i 22 hores a una distància de poc més

d'1,2 milions de quilòmetres. Igual que la Lluna i probablement gairebé la resta de satèl·lits dels altres planetes, el seu període orbital és idèntic al del seu període de rotació i en conseqüència, aquesta és la durada del seu dia. És a dir, que mostra sempre la mateixa cara a Saturn. Com que la seva òrbita està lligada a Saturn i l'eix de rotació d'aquest està inclinat 26,7° respecte el Sol, Tità experimenta marcades estacions climàtiques, que duren, cadascuna, més de 7 anys. Des del 2004 hi ha orbitant Saturn la sonda Cassini (PORCO et al. 2004) que ens està proporcionant una inestimable informació tant del planeta com dels seus satèl·lits, especialment de Tità.

Si ens basem en la seva baixa densitat, d'1,88 g/cm³, Tità ha d'estar constituït quasi a parts iguals per gel d'aigua i material rocós, sense un nucli metàl·lic. És probable que el seu interior tingui diverses capes diferenciades, amb un nucli de roca d'uns 3.400 km de diàmetre. Per sobre pot haver-hi una capa de gel molt comprimit i per damunt, un oceà líquid compost d'una barreja d'aigua i amoníac. Finalment, hi hauria l'escorça constituïda per metà glaçat i altres compostos orgànics.

Tità posseeix una densa atmosfera que impossibilita observar-ne la superfície en les longituds d'ona visibles per l'ull. Va ser descoberta per l'astrònom català Josep Comas i Solàal 1908 i confirmada el 1944 per Gerard P. Kuiper. Per la seva distància del Sol i per l'espessa atmosfera, la il·luminació de la superfície és mil vegades inferior a la que hi ha a la superfície de la Terra. Tot i així, és unes 350 vegades superior a la que tenim aquí en una nit de lluna plena.

La Terra i Tità són els únics cos-

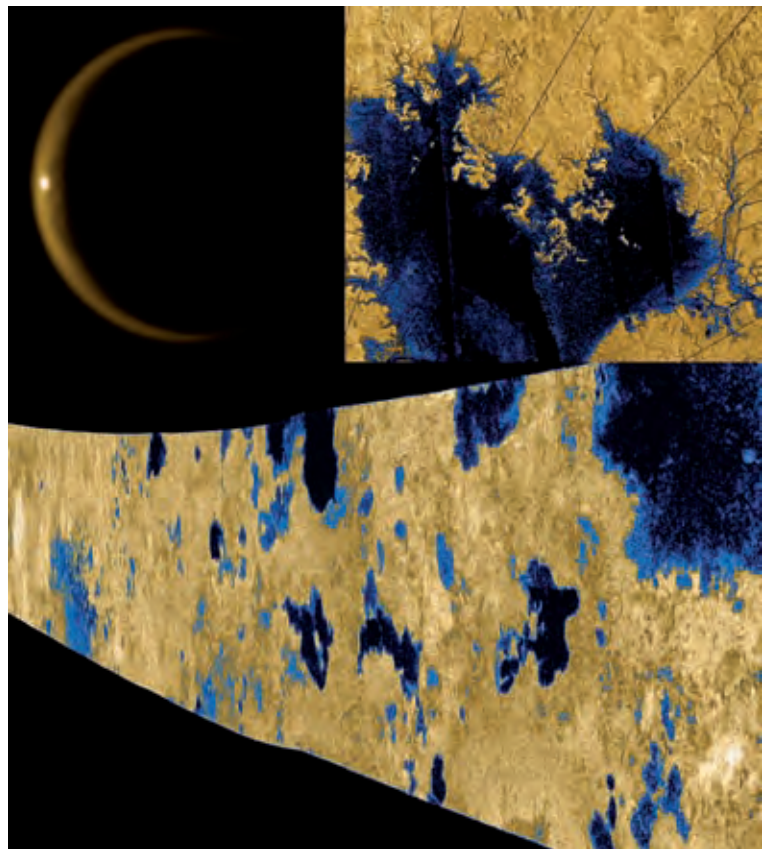
sos del sistema solar on el nitrogen és el principal component atmosfèric. En efecte, a l'estratosfera de Tità, el 98,4% és nitrogen, l'1,4% metà i entre el 0,1 i 0,2% hidrogen. L'abundància del metà augmenta a mesura que es davalla i, entre els 8 km i la superfície, la quantitat és del 4,9%. A més, hi ha traces de molts hidrocarburs. Es creu que el color taronja de la seva atmosfera es deu a petites quantitats d'altres productes químics més complexos, com a resultat de la descomposició del metà per la llum ultraviolada del Sol.

L'atmosfera és molt més important que no pas la de la Terra. La pressió atmosfèrica a la superfície és d'1,49 atmosferes i la seva massa supera en 1,19 vegades la de la Terra. Tenint en compte la diferència de grandàries entre ambdós cossos, per unitat de superfície la massa de l'atmosfera de Tità és 7,3 vegades superior a la terrestre (combinat amb la

baixa gravetat, amb unes ales als braços s'hi podria volar o, potser millor dit, nedar). Assoleix una gran alçària i s'observa distribuïda en diverses capes o nivells. Hi ha cirrus entre els 50 i 100 km d'altura, denses nuvolades prop dels dos pols, així com núvols de tempesta a diversos indrets que provoquen precipitacions líquides. A més, hi ha boira pertot arreu. Certes observacions suggereixen que l'atmosfera experimenta una super-rotació similar a la de Venus. En qualsevol cas, l'activitat atmosfèrica ha d'estar lligada al règim de les estacions climàtiques i possiblement també a la distància al Sol, donada l'excentricitat de l'òrbita de Saturn. El problema per comprendre bé com funciona és que

60

Figura 6. Llacs de metà líquid a Tità. A dalt a l'esquerra, l'astre mostra una acusada fase minvant. El punt brillant és el reflex del Sol sobre la superfície d'un llac. A la dreta i part inferior, dues regions mostren llacs, llacunes i un riu, paisatges que ens recorden a Finlàndia, aquí a la Terra. Aquestes darreres imatges han estat preses amb radar per la sonda Cassini. El color és fictici, codificant els tons grisos, ja que originalment les imatges són en blanc i negre. (NASA/JPL/USGS)



només portem observada una part del seu cicle climàtic anual, que és de 29,5 anys.

La temperatura superficial de Tità és d'uns 94 K (-179°C). El metà crea un efecte hivernacle a la superfície, però la boirina de l'atmosfera contribueix a combatre'l reflectint la llum solar cap a l'espai, motiu pel qual la superfície és significativament més freda que l'atmosfera superior.

Com que la radiació solar hauria d'haver convertit tot el metà existent en hidrocarburs més complexos en uns 50 milions d'anys i Tità té 4.500 milions d'anys, ha d'haver-hi alguna mena de mecanisme que n'aporti continuadament, des de la superfície o des del subsòl. Si bé no està descartat un possible origen biològic, s'ha suggerit que podria provenir de l'interior del propi Tità subministrat per erupcions de criovolcans (volcans freds on les laves són de gel). De totes maneres, l'existència d'aquests volcans

acaba de ser qüestionada (MOORE i PAPPARDOB 2011).

Un fet realment curiós i força interessant és que, amb les pressions i temperatures que es donen a Tità, el metà assumeix el mateix paper que té l'aigua a la Terra. Hi és present en els seus tres estats: sòlid, líquid i gasós. Això motiva que hi hagi un cicle del metà similar al de l'aigua a la Terra. A la superfície hi ha llacs (i potser fins i tot mars estacionals) plens de metà líquid i tal vegada també per età (figura 6). Quan s'evaporen, creen núvols que amb posterioritat donen lloc a precipitacions de metà, que els tornen a omplir. S'ha arribat a observar que després d'una tempesta s'emplenaven de metà llacs que semblaven secs. En efecte, de tant en tant es donen condicions apropiades d'humitat i temperatura perquè es desenvolupin fortes tempestes que descarreguen importants precipitacions de metà. Les simulacions numèriques per ordinador

mostren que els núvols ràpids i de color blanc intens que s'observen a Tità, amb un desenvolupament vertical d'uns

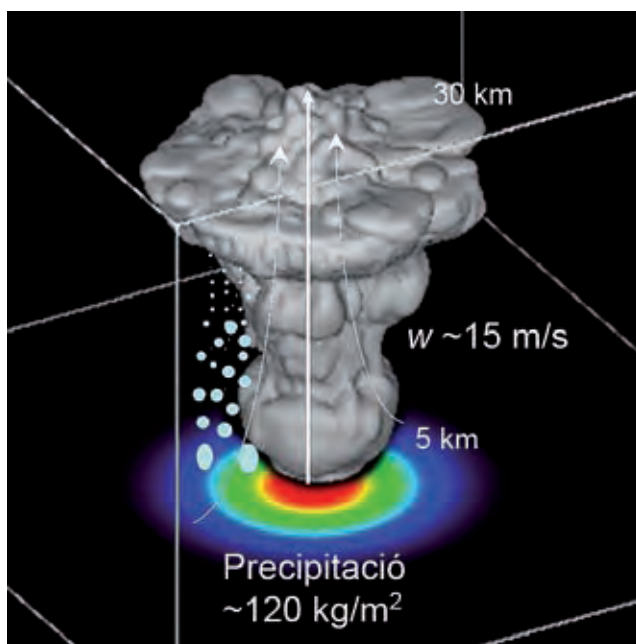


Figura 7. Simulació numèrica per ordinador d'una tempesta a Tità. S'expandeix des del sòl fins els 30 km d'altura, per assolir velocitats verticals de 15 m/s (54 km/h). El radi de la zona afectada per la pluja és de 5 km. (R. Hueso i A. Sánchez-Lavega [GCP-UPV]).

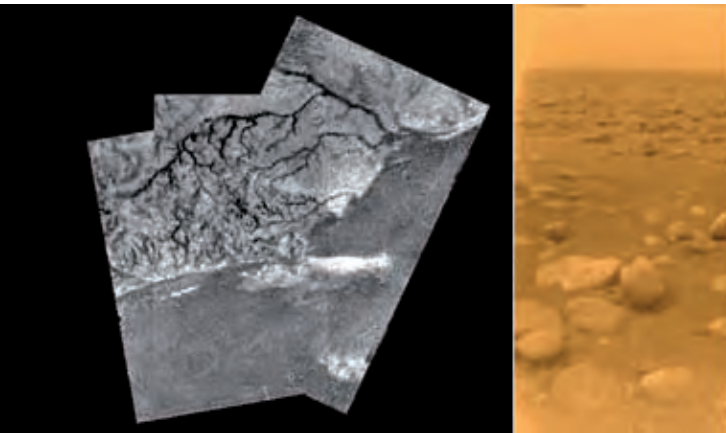


Figura 8. Imatges obtingudes per la sonda Huygens. A l'esquerra, mentre descendia en paracaigudes, mostra una impressionant xarxa fluvial i el perfil d'una "costa". Dreta, vista de la superfície de Tità amb un sòl pla sembrat de còdols de gel. (ESA, NASA, JPL i University of Arizona)

62

30 km d'alçada, poden desencadenar en hores intenses tempestes que donarien lloc a fortes pluges de metà amb gotes de fins a 5 mm de radi (figura 7), que podrien ser similars a les tamborinades de les tempestes terrestres (HUESO I SÁNCHEZ-LAVEGA 2006).

Si sorprenent és la dinàmica de l'atmosfera, no ho és menys l'espectacle que ofereix la superfície, explorada des de l'espai per la nau Cassini i des del mateix sòl per la sonda europea Huygens. S'hi veuen rius, conques de drenatge i canals de desguàs, el que semblen riberes de costa i llacs secs (plens temporalment), muntanyes, camps de dunes, possible vulcanisme criogènic i pocs cràters d'impacte originats per meteorits. Un relleu aparentment jove i que es renova, que recorda en gran manera el de la Terra (figura 8), però tot el paisatge que el configura és exclusivament de gel.

Es creu que l'atmosfera primitiva prebiòtica de la Terra era similar a la composició actual de l'atmosfera de Tità, amb una important excepció en aquest, que és la manca d'aigua. Simulacions de laboratori mostren que la matèria orgànica de Tità podria començar una evolució química anàloga a la de la Terra quan es va iniciar la

vida aquí. La falta d'aigua necessària per això, s'intenta explicar amb aportacions per cometes o per l'existència de reservoris d'aigua amb amoníac, que suporta molt baixes temperatures abans de congelar-se. I també amb teories alternatives, com la que en els llacs de metà líquid hi podrien viure organismes que inhalessin hidrogen en comptes de diòxid de carboni, que reacciona amb l'acetilè en lloc de la glucosa i exhala metà i no pas diòxid de carboni. Això tindria un efecte mesurable en la proporció de la mescla a la troposfera i realment sembla que s'ha observat. De totes maneres, hi poden haver altres explicacions al fenomen i no pas exclusivament des d'un punt de vista biològic.

6. Júpiter, el gegant dels gegants

A 780 milions de quilòmetres del Sol, més de 5 vegades la distància Terra-Sol, entrem en el reialme dels planetes gegants de gas (Júpiter, Saturn, Urà i Neptú). Júpiter és el primer i més gran de tots ells. És tan gegantí que supera 2,5 vegades la massa de tots els altres planetes junts. Té un diàmetre equatorial de 142.000 km (més d'11 vegades el de la Terra) i un volum 1.321 vegades el del nos-

tre planeta. El període de rotació és de gairebé 10 hores i per causa de la gran velocitat de gir, posseeix un alt grau d'aplanament polar que fa que el diàmetre polar sigui 9.300 km menor que l'equatorial.

La composició química de Júpiter presenta una gran semblança amb la solar, és a dir, constituïda en un 90% per hidrogen i un 10% per heli (amb traces de metà, amoníac, deuteri, età, aigua i hidrosulfur amònic a l'atmosfera) la qual cosa suposa que ha de ser bastant semblant a la de la nebulosa primitiva que va donar origen al sistema solar, encara que amb algunes peculiaritats. L'absència d'elements més pesats amb proporcions importants fa que tingui una densitat de tan sols 1,33 grams per centímetre cúbic (la densitat de la Terra és de 5,52). El fet que Júpiter estigui compost principalment per hidrogen i heli implica que el planeta és essencialment fluid, és a dir, format per un vast oceà d'hidrogen i heli, sense una escorça sòlida.

Es creu que el centre de Júpiter pot estar format per un nucli dens, potser rocós, que comprèn el 4% de la massa del planeta, segons es desprèn d'estudis gravimètrics realitzats per les sondes Pioneer i Voyager. El nucli es troba envoltat per una capa d'hidrogen metàl·lic d'uns 40.000 km de gruix. L'hidrogen metàl·lic, encara que líquid a les temperatures internes de Júpiter, es troba tan comprimit que es comporta com un metall i, per tant, és conductor de l'electricitat. Segurament, els moviments de l'hidrogen metàl·lic són la font de l'enorme camp magnètic que posseeix el planeta. L'hidrogen metàl·lic es forma quan les pressions de l'interior de Júpiter assoleixen els 3 milions d'atmosferes. Envoltant aquesta capa hi ha un oceà d'hidrogen molecular d'uns 30.000

km. En realitat, l'atmosfera gasosa de Júpiter és tan sols una pel·lícula molt prima d'uns pocs centenars de quilòmetres i els núvols que observem, tal vegada es troben confinats en menys de 100 km. La temperatura del nucli del planeta pot ser d'uns 30.000°. La temperatura i la pressió descendeixen progressivament fins al sostre visible de núvols on la temperatura és d'uns -120°C i la pressió entre 0,5 i 1 atmosferes.

Júpiter irradia a l'espai al voltant de 2,5 vegades més calor que el que rep del Sol, fet que indica l'existència d'una important font de calor interna. Aquesta calor podria ser un romanent de la que tenia quan es va formar el planeta i tal vegada no és pas el producte de la contracció gravitacional, perquè en comportar-se com un líquid significa que no s'hauria de poder comprimir. Hi ha explicacions alternatives.

L'únic que podem observar de Júpiter són els núvols superiors, que probablement són de cristalls d'amoníac congelat. Per sota, a una pressió de 2-3 atmosferes es troben núvols d'hidrosulfur amònic i, entre 4-6 atmosferes hi ha d'haver una densa capa de núvols formats per cristalls de vapor d'aigua, d'acord amb totes les teories. El cert és, però, que mai han estat observades aquestes boires d'aigua. Una sonda de la missió Galileo va ser llençada a l'interior de l'atmosfera i va ultrapassar aquesta regió sense detectar res, ja que va tenir la "mala sort" de caure dins un forat on no hi havia núvols i l'atmosfera era molt seca.

Vist amb telescopi, Júpiter mostra un aspecte d'alternatives franges clares i fosques paral·leles a l'equador. Les clares s'anomenen zones i les fosques bandes. A més, hi ha nombroses tem-

pestes amb formes ovals de caràcter ciclònic i anticiclònic. La més gran i famosa és la Taca roja, visible des de fa segles, si bé les seves dimensions s'han reduït amb el temps. Actualment té una llargada d'uns 18.500 km i una amplada d'11.500 km, però fa uns 130 anys tenia una longitud de prop de 40.000 km. Es tracta d'una tempesta enorme que gira en sentit anticiclònic, amb el cim situat uns 20-30 km per damunt de la resta de núvols.

En no haver-hi una superfície sòlida, els detalls que s'observen a Júpiter tenen diferents velocitats de rotació associades a la latitud. Les imatges d'alta resolució enviades per les sondes Voyager van permetre determinar que l'estructura de bandes i zones és

el resultat d'una circulació global, i que marquen la posició d'alternatius *Jet streams* (corrents amb un pic molt alt de velocitat) cap l'est i cap a l'oest (figures 9 i 10). També s'ha vist que aquests corrents són molt estables en el temps. La diferència de velocitat observada entre el més ràpid i el més lent d'ells és de 230 m/s (828 km/h). Com a referència del punt zero de velocitat es fa servir el període de rotació radioelèctric de Júpiter, ja que se suposa que està lligat a l'interior del planeta i ha de ser estable.

El perquè d'aquest perfil de vents observat és tot un desafiament, ja que qualsevol model no només ha d'explicar la distribució zonal de vents, sinó també l'aspecte observat. Per

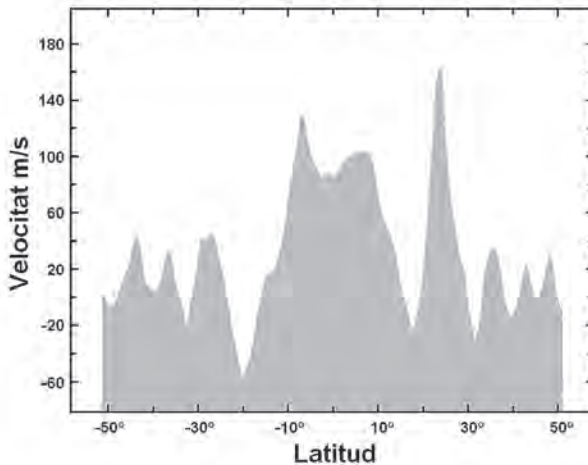


Figura 9. Perfil zonal dels vents de Júpiter. La velocitat del vent va lligada a la latitud i és gairebé immutable, de manera que si coneixem la latitud d'un detall, es pot saber la seva velocitat aproximada.

(S.S. Limaye i J.M. Gómez, [NASA/Voyager i FOED-GCP]).

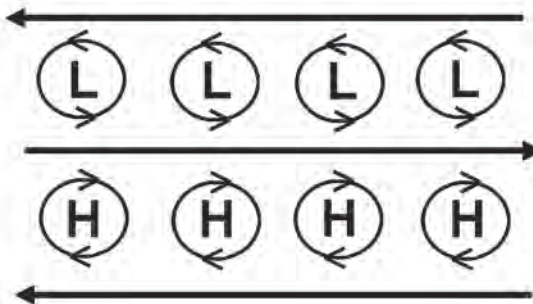


Figura 10. La disposició alternativa dels jets en sentit est-oest fan que la circulació atmosfèrica de Júpiter (i de Saturn) sigui molt senzilla. Entre jet i jet i a causa de la ràpida rotació del planeta, les forces de Coriolis creen ovalls que a una banda d'un jet giren tots en sentit ciclònic (L) i a l'altra banda tots en sentit anticiclònic (H). (J.M. Gómez [FOED-GCP]).

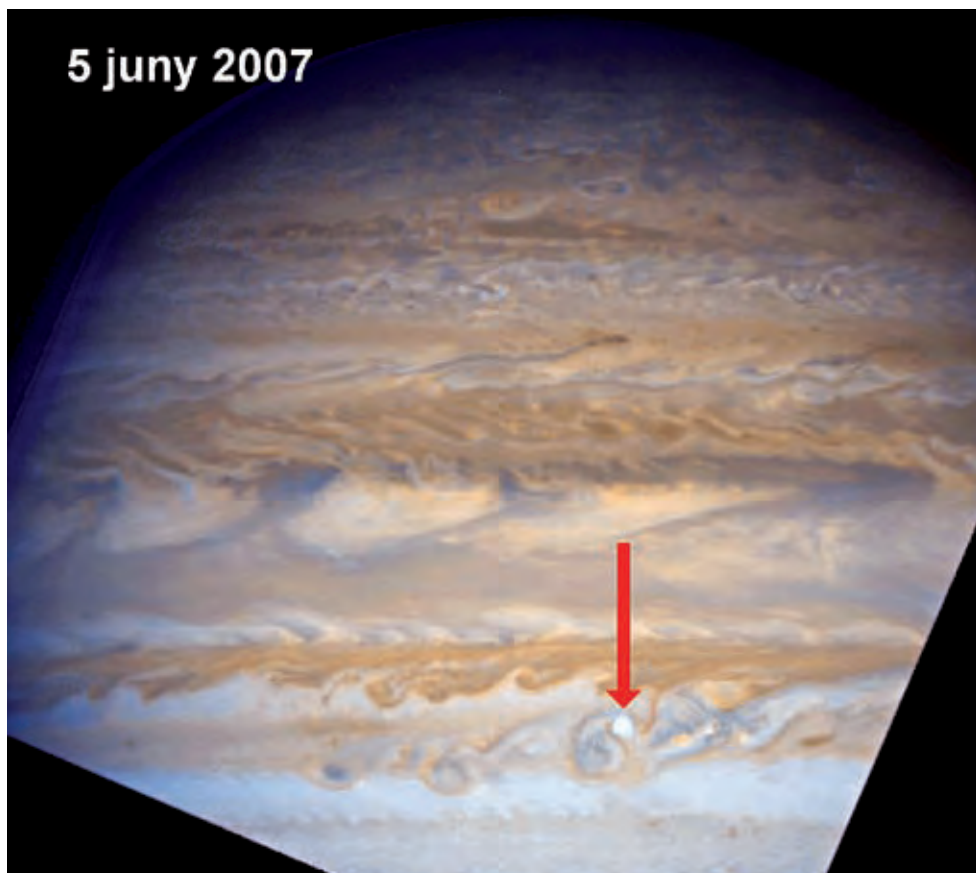


Figura 11. Imatge obtinguda amb el telescopi espacial Hubble on s'assenyala la fase inicial d'una gran tempesta de la SEB. (NASA, ESA i Sánchez-Lavega [GCP]).

exemple, gairebé tots els jets intensos es troben confinats en una zona més o menys estreta al voltant de l'equador. També hi ha una marcada asimetria nord-sud pel que fa a la distribució i les intensitats dels diferents jets.

Fins ara són dues les teories que competeixen per explicar la circulació observada a Júpiter. Una aplica un model "d'aigües somes", és a dir, que la circulació atmosfèrica es confina en una capa estreta prop de la superfície, que compta únicament amb la calor del Sol i ignora la de l'interior del planeta (WILLIAMS 1975). L'altre és

un model "d'aigües profundes", basat amb el teorema de Taylor-Proudman, en el qual el motor que fa moure l'atmosfera seria la calor interna. A causa de la convecció, juntament amb la ràpida rotació, es crearien una mena de cilindres coaxials també en rotació (BUSSE 1976). En el punt on aquests cilindres afloressin a la superfície és on se situarien els pics de velocitats dels jets observats. Això concorda amb l'estabilitat de la velocitat dels vents, ja que en estar lligats a l'interior tindrien una inèrcia enorme. Una pega és que el model no prediu l'existència

de jets més enllà dels 45° de latitud i al contrari, se n'observen gairebé fins els pols. L'altra pega és que tampoc explica l'asimetria del perfil vents.

A Júpiter es produeixen de tant en tant tempestes que afecten globalment tota una banda. Comencen per l'aparició de núvols blancs de convecció que se suposa que provenen de la capa de núvols de vapor d'aigua. Això proporciona una manera indirecta de sondejar l'interior de l'atmosfera per intentar deduir si és moguda per la calor del Sol o la interna de Júpiter. Aquestes tempestes tenen lloc en dos indrets molt concrets, a les bandes anomenades SEB (banda equatorial sud) i NTB (banda temperada nord).

En un treball per caracteritzar totes les erupcions de tempestes a la SEB (figura 11) no es va trobar cap relació entre aquestes i la major o menor radiació solar rebuda per Júpiter (SÁNCHEZ-LAVEGA i GÓMEZ 1996), cosa que podria indicar que la font de calor és interna. L'última erupció d'aquesta banda va tenir lloc el novembre de 2010 (SÁNCHEZ-LAVEGA et al. 2011a) i encara no s'ha conclòs el seu estudi. El que sí està acabada és l'anàlisi de l'erupció de la NTB de 2007 (SÁNCHEZ-LAVEGA et al. 2008). Per primera vegada es van poder mesurar les fonts de calor internes observant en infraroig amb un telescopi situat a més de 4.000 m d'altura al cim del volcà Mauna Kea, a Hawai (figura 12). Amb observacions fetes des de terra i des de l'espai amb el telescopi espacial Hubble, també es va determinar que la velocitat augmenta a mesura que ens endinsem en l'atmosfera. Aquests resultats estan d'acord amb la teoria dels cilindres coaxials de Busse.

Una de les objeccions que es fan al model dels cilindres és la de l'asimetria nord-sud del perfil de vents. Una

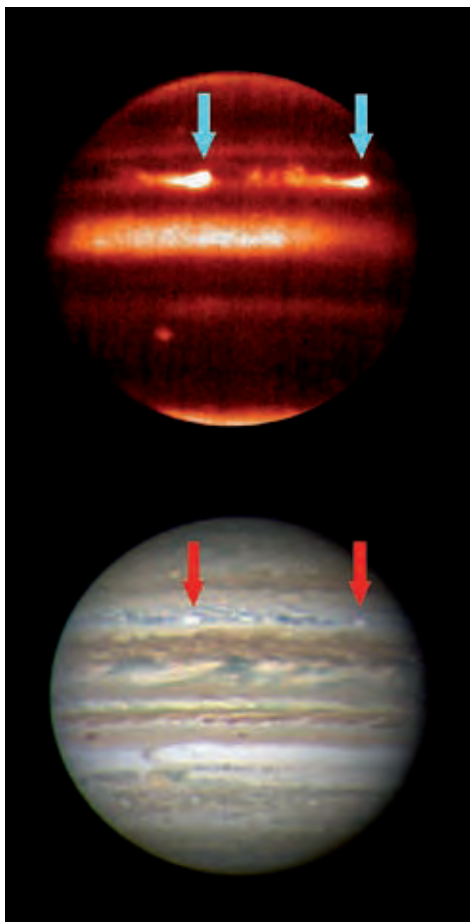


Figura 12. Els dos focus de la gran tempesta de la NTB de Júpiter del 2007. A dalt, imatge en l'infraroig tèrmic (NASA-IRTF). A baix, imatge en el visible (Zac Pujic-IOPW/PVOL/GCP).

d'aquestes asimetries es dona entre les bandes equatorials nord i sud. Les velocitats haurien de ser similars o iguals en ambdues, però de sempre s'ha observat que a la banda sud el jet és més intens. Doncs bé, en un recent treball (GARCÍA-MELENDO et al. 2011a) s'ha trobat que, en efecte, les velocitats són iguals, però a la banda nord queda emmascarat per la presència

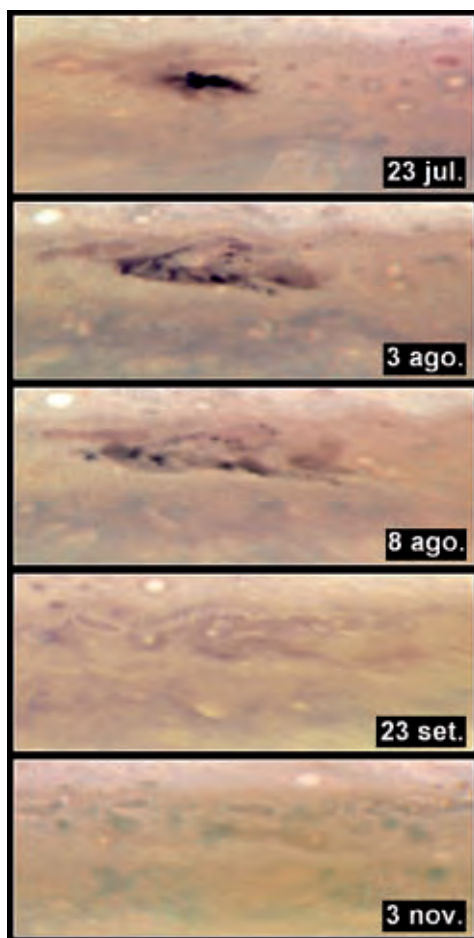


Figura 13. Dispersió de les restes de l'impacte d'un asteroide contra Júpiter el 2009 vistos amb el telescopi espacial Hubble. (NASA, ESA, M. Wong, H.B. Hammel, I. de Pater i el Jupiter Impact Team)

d'unes ones planetàries anomenades ones de Rossby. Això suggereix que és possible que asimetries observades en altres llocs, també es puguin explicar de manera similar.

Tenir informació d'allà on no hi ha núvols en ocasions pot venir de manera inesperada amb fets inèdits. Un

cometa anomenat Shoemaker-Levy 9 (SL9) va ser capturat per la gravetat de Júpiter, que el va fragmentar en una vintena de trossos, va modificar-ne l'òrbita i a l'estiu del 1994 van anar estavellant-se tots els fragments contra Júpiter, un darrera l'altre (GÓMEZ et al. 1994). Les restes es van anar dispersant per l'alta atmosfera, literalment dibuixant els corrents de vents fins aleshores mai vistos a aquella altura. Això va permetre fer acurats estudis tant a curt (SÁNCHEZ-LAVEGA et al. 1995) com a llarg termini (SÁNCHEZ-LAVEGA et al. 1998). També va ser la primera vegada que es va poder observar com un cos celeste impactava contra un planeta. Es pensava que era una circumstància molt poc freqüent que a Júpiter devia passar aproximadament una vegada cada 500 anys.

Just 15 anys després, gràcies a la vigilància continuada per part del IO-PW-PVOL, el juliol del 2009 es va observar un altre impacte del tot imprevis (figura 13). Els estudis van poder determinar que aquest cop es tractava probablement d'un asteroide desconegut i no pas d'un cometa (SÁNCHEZ-LAVEGA et al. 2010). El fet va proporcionar una nova oportunitat per estudiar els vents de l'alta atmosfera de Júpiter a mesura que es dispersaven les restes (SÁNCHEZ-LAVEGA et al. 2011c). Però és més, mesos després es va observar un tercer cas, si bé es va tractar d'un gran bòlid que no va deixar cap cicatriu a l'atmosfera. La reiteració d'aquests impactes en un termini tan curt de temps, han fet revisar també les teories sobre la possibilitat que petits cossos s'estavellin contra els planetes gegants, i n'han elevat considerablement la probabilitat estadística.

7. Saturn, el senyor dels anells

A 1.430 milions de quilòmetres,

unes 9,6 vegades la distància Terra-Sol, ens trobem amb Saturn, el senyor dels anells. És un altre planeta gegant, amb un diàmetre equatorial de 120 mil quilòmetres, però només 108 mil de diàmetre polar, la qual cosa representa un aixafament de gairebé el 10%, que es deu a la seva alta velocitat de rotació. A l'interior hi cabrien unes 764 terres. La seva òrbita està inclinada 26,7° i la recorre en 29,46 anys, cosa que significa que té unes acusades estacions que duren, cadascuna, prop de 90 mesos dels nostres, i mostren, alternativament, un i altre pol al Sol en el decurs del seu any.

És molt similar a Júpiter i gran part del que s'ha dit d'aquest també és aplicable a Saturn. Està compost en un 96% d'hidrogen i un 3% d'heli, amb traces d'amoníac, acetilè,età, metà i fòsfor. El major contingut d'hidrogen fa que la seva densitat sigui tan sols de 0,687 g/cm³ inferior a la de l'aigua!

L'atmosfera de Saturn mostra un patró de bandes i zones similar al de Júpiter, però més feble i menys contrastat, possiblement per la major distància que hi ha entre les capes de núvols i la boirina que s'hi interposa. En efecte, la part superior de l'atmosfera és entre 200 i 270 km per sobre

dels núvols visibles i hi predominen l'hidrogen i l'heli. Igual que a Júpiter, després venen els núvols d'amoníac, a -150°C. Per sota hi ha la capa de núvols d'hidrosulfur d'amoní amb una temperatura de -90°C que s'expandeix uns 80 km. Més avall, i a uns -23°C, es troba la capa de vapor d'aigua, d'uns 10 km de gruix.

El període de rotació és d'unes 10 hores i mitja, però no gira com un cos sòlid i hi ha notables diferències amb la latitud. Les velocitats més altes són a l'equador, on s'observen vents d'uns 400 m/s (GARCÍA-MELENDO et al. 2011b). El perfil de vents zonals és diferent al de Júpiter (figura 14), potser perquè és un planeta més petit, si bé com a explicació valen els mateixos models. El 1994, però, es va descobrir que la velocitat a l'equador en ocasions pot arribar a ser fins a 150 m/s més lenta, la qual cosa s'interpreta que és per diferències d'altura dels núvols (SÁNCHEZ-LAVEGA et al. 1996), que fins aquell moment es pensava que era molt menor.

L'aspecte de Saturn varia bastant segons el grau d'il·luminació o d'insolació de la seva atmosfera. Quan els primers rajos solars primaverals deixen veure les regions que surten de la

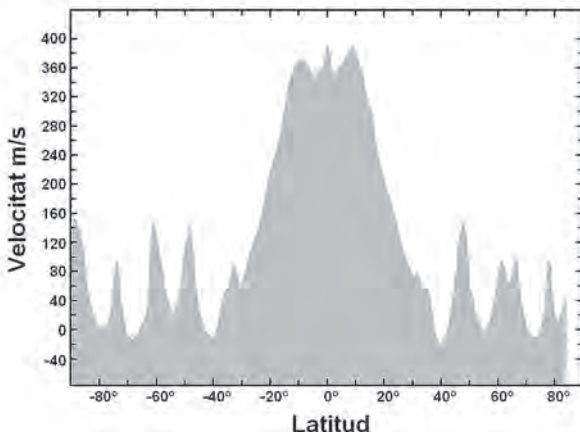


Figura 14. El perfil zonal dels vents de Saturn presenta apreciables diferències respecte el de Júpiter. (E. García-Melendo i J.M. Gómez [FOED-GCP])



Figura 15. Aquesta imatge presa per la sonda Cassini el 25 de febrer del 2011, mostra l'expansió de la part davantera de la GWS de 2010-2011. (NASA/JPL. Composició en color i processat JM Gómez [FOED-GCP])

llarga foscor de l'hivern, s'observa un fons atapeït de petites tempestes. A mesura que augmenta la insolació es van deixant de veure i el fons és bastant uniforme, tal vegada perquè puja la boirina i les oculta o bé varia la transparència. Amb tot, el que més caracteritza Saturn són les gegantines tempestes blanques anomenades GWS (Great White Spot), que s'expandeixen progressivament per tota una zona fins ocupar part d'un hemisferi. Tenen la particularitat que se'n forma una cada any saturnià, és a dir, aproximadament cada 30 anys, precisament quan és estiu a l'hemisferi nord. Se n'han observat el 1876, 1903, 1933, 1960 i 1990. La periodicitat i el que

s'originin quan és estiu, és un fort indicatiu per pensar que el desencadenant és la calor acumulada del Sol durant la llarga estació.

La darrera GWS va esclatar el 5 de desembre del 2010 (9 mesos després encara és visible), també a l'hemisferi nord, però no pas a l'estiu, sinó en plena primavera. Ha pogut ser seguida com mai s'havia fet fins ara, dia a dia i gairebé hora a hora (figures 15 i 16). Per primera vegada, s'ha pogut determinar la temperatura de la seva font de calor i la profunditat, fent ús de la sonda Cassini en òrbita de Saturn i d'un telescopi gegant de 8 m a Xile (FETCHER et al. 2011). Per altra banda, l'estudi dinàmic i les simulacions numèriques han permès reproduir el fenomen, i ha mostrat que la velocitat no decau amb la profunditat, si més no fins al nivell dels 10-12 bars de pressió, que és on hi ha la capa de núvols d'aigua que alimenten la tempesta (SÁNCHEZ-LAVEGA et al. 2011b). A aquesta profunditat, ja no hi arriba la radiació solar.

Sembla contradictori que la calor del Sol no influeixi (o ho faci molt poc) en la meteorologia de Júpiter, i, per contra, ho pugui fer en la de Saturn, que rep 4 vegades menys calor. Cal considerar un factor molt important: la diferencia entre el màxim i el mínim d'insolació que rep Júpiter és inferior que en el cas de Saturn, com també la durada de la màxima insolació, 2,5 vegades més llarga en aquest últim. Això podria significar que a Saturn, el còmput total acumulat fos significativament major. De fet, està confirmada la relació entre la temperatura de l'estratosfera de Saturn i la insolació solar rebuda (ORTON et al. 2008).

Bé, fins aquí aquest petit repàs sobre l'estat de la recerca en alguns planetes del sistema solar. El juliol de

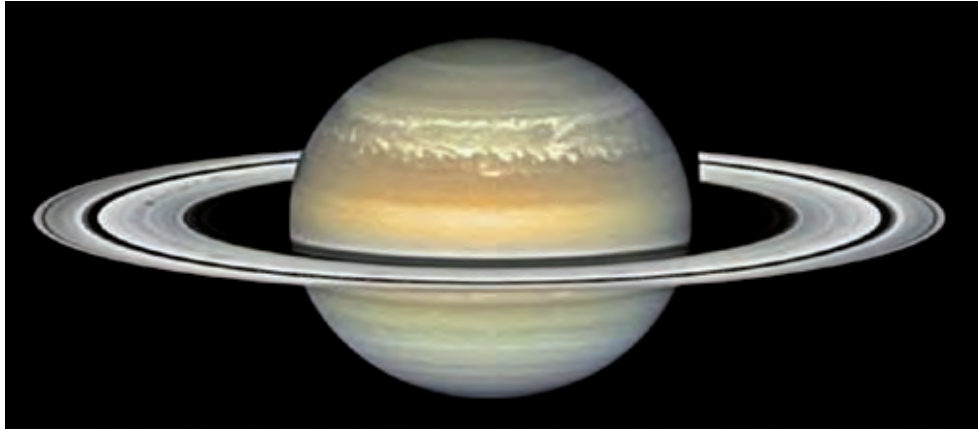


Figura. 16. Part central de la GWS el 12 de març del 2011 fotografiada amb el telescopi Hubble. (Hubble Space Telescope [NASA/ESA] i Grupo de Ciencias Planetarias [GCP/UPV])

70

2016 està previst que la sonda Juno se situï en l'òrbita de Júpiter. Després d'un any i 33 voltes al planeta, l'estavellaran contra l'atmosfera perquè se suposa que ja serà inservible a causa de la forta radiació rebuda dels cinturons magnètics de Júpiter. La seva missió és la d'obtenir dades per millorar els models teòrics. Intentarà determinar la quantitat d'oxigen que hi ha a l'atmosfera, que fins ara ha estat impossible de saber (és en forma d'aigua l'oxigen primigeni que hau-

ria de tenir i que mai s'ha detectat?). També tractarà de mesurar la composició, temperatura i moviments verticals dels núvols. De totes maneres, el programa principal és saber més sobre l'interior del planeta per mitjà de l'estudi del camp magnètic i de la gravetat. Al mateix temps, explorarà la magnetosfera prop del pols i, en particular, les aurores polars.

Mentrestant, des d'aquí a la Terra, ben segur que no s'aturaran les tasques de recerca.

Referències bibliogràfiques

- BUSSE, F.H. (1976). A simple model of convection in the Jovian atmosphere. *Icarus* 29, p.255-260.
- FLETCHER, L.N., HESMAN, B.E., IRWIN, P.G.J., BAINES, K.H., MOMARY, TH.W., SÁNCHEZ-LAVEGA, A., FLASAR, F. M., READ, P. L., ORTON, G.S., SIMON-MILLER, A., HUESO, R., BJORKAKER, G.L., MAMOUTKINE, A., DEL RÍO-GAZTELURRUTIA, T., GÓMEZ, J.M., BURATTI, B., CLARK, R.N., NICHOLSON, PH.D., SOTIN, CH. (2011), Thermal Structure and Dynamics of Saturn's Northern Springtime Disturbance, *Science* 332, p.1413-1417.
- GARCÍA-MELENDO, ARREGUI, E., ROJAS, J.F., HUESO, R., BARRADO-IZAGUIRRE, N., GÓMEZ-FORRELLAD, J.M., PÉREZ-HOYOS, S., SANZ-REQUENA, J.F., SÁNCHEZ-LAVEGA, A. (2011a). Dynamics of Jupiter's equatorial region at cloud top level from Cassini and HST images. *Icarus* 211, p.1242-1257.
- GARCÍA-MELENDO, PÉREZ-HOYOS, S., SÁNCHEZ-LAVEGA, A. i HUESO, R. (2011b). Saturn's zonal wind profile in 2004-2009 from Cassini ISS images and its long-term variability. *Icarus* 215, p.62-74.
- GÓMEZ, J.M., LECACHEUX, J., COLAS, F., LAQUES, P., ROUAN, D., TIPHENE, D., SÁNCHEZ-LAVEGA, A. (1994). Observations of the SL9 impact on Jupiter from 0.4 to 2.16 microns at Pic-du-Midi Observatory. *Bulletin of the American Astronomical Society* 26, n° 3.
- HOUGHTON, J. (2005). Global Warming. *Reports on Progress in Physics* 68, p.1343-1403.
- HUESO, R., LEGARRETA, J., PÉREZ-HOYOS, S., ROJAS,

- J.F., SÁNCHEZ-LAVEGA, A., MORGADO, A. (2010). The International Outer Planet Watch atmospheres node database of giant-planet images. *Planetary and Space Science* 58, p.1152-1159.
- HUESO, R., i SÁNCHEZ-LAVEGA, A. (2006). Methane storms on Saturn's moon Titan. *Nature*, 442, p.428-431.
- MOORE, J.M. i PAPPALARDO, R.T. (2011). Titan: An exogenic world?, *Icarus* 212, p. 790-806.
- ORTON, G.S., YANAMANDRA-FISHER, P.A., FISHER, B.M., FRIEDSON, A.J., PARRISH, P.D., NELSON, J.F., BAUERMEISTER, A.S., FLETCHER, L., GEZARI, D.Y., VAROSI, F., TOKUNAGA, A.T., CALDWELL, J., BAINES, K.H., HORA, J.L., RESSLER, M.E., FUJIYOSHI, T., FUSE, T., HAGOPIAN, H., MARTIN, T.Z., BERGSTRAHL, J.T., HOWETT, C., HOFFMAN, W.F., DEUTSCH, L.K., VAN CLEVE, J.E., NOE, E., ADAMS, J.D., KASSIS, M., TOLLESTRUP, E. (2008). Semi-annual oscillations in Saturn's low-latitude stratospheric temperatures. *Nature* 453, p.196-199.
- PORCO, C.C., WEST, R., SQUIRES, S., MCEWEN, A., THOMAS, P., MURRAY, C.D., DELGENIO, A., INGERSOLL, A.P., JOHNSON, T.V., NEUKUM, G., VEVERKA, J., DONES, L., BRAHIC, A., BURNS, J.A., HEMMERLE, V., KNOWLES, B., DAWSON, D., ROATSCHE, T., BEURLE, K., OWEN, W. (2004). Cassini Imaging Science: Instrument Characteristics and Anticipated Scientific Investigations at Saturn. *Space Science Reviews* 115, p.363-497.
- RASSOL, I., DE BERGH, C. (1970). The Runaway Greenhouse and the Accumulation of CO₂ in the Venus Atmosphere. *Nature* 226, p.1037-1039.
- SÁNCHEZ-LAVEGA, A., LECACHEUX, J., COLAS, F., GÓMEZ, J.M., LAQUES, P., MIYAZAKI, I., PARKER, D. (1995). Motions of the SL9 impact clouds. *Geophysical Research Letters* 22, p.1761-1764.
- SÁNCHEZ-LAVEGA, A. i GÓMEZ, J.M. (1996). The South Equatorial Belt of Jupiter. 1. Its life cycle. *Icarus* 121, p.1-17.
- SÁNCHEZ-LAVEGA, A., LECACHEUX, J., GÓMEZ, J.M., COLAS, F., LAQUES, P., NOLL, K., GILMORES, D., MIYAZAKI, I., PARKER, D. (1996). Large-Scale Storms in Saturn's Atmosphere During 1994. *Science* 271, p.631-634.
- SÁNCHEZ-LAVEGA, A., GÓMEZ, J.M., ROJAS, J.F., ACARRETA, J.R., LECACHEUX, J., COLAS, F., HUESO, R., ARREGUI, J. (1998). Temporal Evolution of the Features Created by the Collisions of the Comet Shoemaker-Levy 9 on Jupiter: July 1994-September 1996. *Icarus* 131, p.341-357.
- SÁNCHEZ-LAVEGA, A., ORTON, G.S., HUESO, R., GARCÍA-MELENDO, E., PÉREZ-HOYOS, S., SIMÓN-MILLER, A., ROJAS, F.J., GÓMEZ, J.M., YANAMANDRA-FISHER, P., FLETCHER, L., JOELS, J., KEMERER, J., HORA, J., KARKOSCHA, E., DE PATER, I., WONG, M.H., MARCUS, P.S., PINILLA-ALONSO, N., CARVALHO, F., GO, C., PARKER, D., SALWAY, M., VALIMBERI, M., WESLEY, A., PUJIC, Z. (2008). Depth of a strong jovian jet from a planetary-scale disturbance driven by storms. *Nature* 451, p.337-440.
- SÁNCHEZ-LAVEGA, A., WESLEY, A., ORTON, G., HUESO, R., PÉREZ-HOYOS, S., FLETCHER, L. N., YANAMANDRA-FISHER, P., LEGARRETA, J., DE PATER, I., HAMMEL, H., SIMON-MILLER, A., GÓMEZ-FORRELLAD, J. M., ORTIZ, J. L., GARCÍA-MELENDO, E., PUETTER, R. C., CHODAS, P. (2010). The Impact of a Large Object on Jupiter in 2009 July. *The Astrophysical Journal Letters* 715, p.L155-L159.
- SÁNCHEZ-LAVEGA, A., LEGARRETA, J., GÓMEZ, J.M., ROGERS, J.H. i PVOL-IOPW TEAM (2011a). Jupiter's 2010 South Equatorial Belt Disturbance: Observations in the visual range and non-linear models. *Geophysical Research Abstracts* Vol. 13, EGU-2104.
- SÁNCHEZ-LAVEGA, A., DEL RÍO-GAZTELURRUTIA, T., HUESO, R., GÓMEZ-FORRELLAD, J. M., SANZ-REQUENA, J.F., LEGARRETA, J., GARCÍA-MELENDO, E., COLAS, F., LECACHEUX, J., FLETCHER, L. N., BARRDO-NAVASCUES, D., PARKER, D. i l'IOPW TEAM: AKUTSU, T., BARRY, T., BELTRAN, J., BUDA, S. COMBS, B., CARVALHO, F., CASQUINHA, P., DELCROIX, GHOMIZADEH, M.S., GO, C., HOTERSHALL, J., IKEMURTA, T., JOLLY, G., KAZEMOTO, A., KUMAMORI, T., LECOMPTE, M., MAXSON, P., MELILLO, F. J., MILIKA, D. P., MORALES, E., PEACH, D., PHILLIPS, J. POUPEAU, J., SUSSENBACH, J., WALKER, G., WALKER, S., TRANTER, T., WESLEY, A., WILSON, T., YUNOKI, K. (2011b). Deep winds beneath Saturn's upper clouds from a seasonal long-lived planetary-scale storm. *Nature* 475, p.71-74.
- SÁNCHEZ-LAVEGA, A., ORTON, G.S., HUESO, R., PÉREZ-HOYOS, S., FLETCHER, L.N., GARCÍA-MELENDO, E., GÓMEZ-FORRELLAD, J.M., DE PATER, I., WONG, M., HAMMEL, H.B., YANAMANDRA-FISHER, P., SIMON-MILLER, A., BARRADO-IZAGUIRRE, N., MARCHIS, F., MOUSIS, O., ORTIZ, J.L., ROJAS, J.F., CECCONI, M., CLARKE, J.T., NOLL, K., PEDRAZ, S., WESLEY, A., KALAS, P., MCCONNELL, N., GOLISCH, W., GRIEP, D., SEARS, P., VOLQUARDSEN, E., REDDY, V., SHARA, M., BINZEL, R., GRUNDY, W., EMERY, J., RIVKIN, A., THOMAS, C., TRILLING, D., BJORKMAN, K., BURGASSER, A.J., CAMPINS, H., SATO, T.M., KASABA, Y., ZIFFER, J., MIRZOYAN, R., FITZGERALD, M., BOUY, H. (2011c). Long-term evolution of the aerosol debris cloud produced by the 2009 impact on Jupiter. *Icarus* 214, p.462-476.
- WILLIAMS, G.P. (1975). Jupiter's atmospheric circulation. *Nature* 257, p.778.
- ZAHNLEA, K. (2011). Is there methane on Mars?, *Icarus* 212, p. 493-503.