



www.astrosociety.org/uitc

No. 28 - Fall 1994

© 1994, Astronomical Society of the Pacific, 390 Ashton Avenue, San Francisco, CA 94112.

El trastorno de los planetas, de las estrellas y de las chimeneas de lava

por George Musser, Astronomical Society of the Pacific

Fundamentos de la Convección

Las estrellas presentan el fenómeno, las heladas lunas también, aún las tazas de café lo muestran. Desde lo pequeño a lo de mayor tamaño, las cosas sufren convección. La convección, el movimiento del calor producido por el movimiento de la materia, es un tema recurrente en ciencias, y un recordatorio vívido de que los objetos astronómicos no son en realidad muy diferentes de los objetos de todos los días. Pueden ser más grandes, más calientes y más lejanos, pero las mismas leyes de la física determinan su comportamiento.

La convección es una consecuencia de uno de los mecanismos más básicos en la naturaleza: las cosas calientes tienden a enfriarse. Si la cosa es un fluido (aire, agua, algo que pueda fluir) ésta puede enfriarse por movimiento. El aire caliente sube, el aire frío desciende: se trata de sentido común. Es convección. De esta idea básica puede devenir algún fenómeno interesante.

La próxima vez que Ud. ponga a hervir agua, llene el jarro con agua caliente y note cuanto más liviano es que un jarro con agua fría (si Ud. no confía en Ud. mismo, ponga los jarros sobre una balanza). Esta diferencia en el peso mantiene el proceso de convección. Si Ud. pone agua en una olla sobre la hornilla de la estufa, el agua en el fondo de la olla se calentará primero. El fluido más frío, que está por arriba, es más pesado, por lo tanto fuerza al fluido de mayor temperatura, que está por debajo, a desplazarse hacia la superficie. La hornilla calienta y produce la ascensión del agua que se encuentra en el fondo; el aire enfría el agua caliente en la superficie. Por lo que, nuevamente, hay un intercambio de lugares en las masas de agua, y así siguiendo. Se inicia un ciclo, como se muestra en la Figura 1. El mismo, produce el transporte de calor desde la hornilla hacia arriba, al aire.

Enfriándose

¡Oh, un día con smog!

El deseo de agitación

De chimeneas de lava a torrentes de lava

Actividades en la clase

Enfriándose

Sucede que la convección es una excelente manera de mover el calor de un lugar al otro. Las estrellas y los planetas usan este tipo de ciclo para llevar el calor desde su interior al exterior. La pérdida del calor es el



Figura 1

Convección en una olla. Las llamas debajo de la olla calientan el agua en el fondo. Al calentarse el agua, se expande y se eleva. El agua fría situada en la superficie se hunde hacia abajo, donde comienza, asimismo, a calentarse. El proceso continúa hasta que Ud. apaga la hornilla. El ciclo convectivo distribuye el calor de la estufa uniformemente en toda el agua en la olla.

mayor problema de las superficies de las estrellas y planetas. Las estrellas generan calor a partir de reacciones nucleares; los planetas lo hacen por radioactividad. Dentro de las estrellas y planetas hace calor. Si Ud. bajara dentro de una mina de oro a unos 3 kilómetros de profundidad, el termómetro ascendería a más de 75 grados C. El calor debe escapar de algún modo.

Hay tres posibles maneras para que esto suceda. Primero, el calor puede moverse por *conducción*: las moléculas se golpean en su entorno y transfieren calor en una especie de efecto dominó. Cuando Ud. pone su mano contra una ventana helada en un día de invierno, la ventana extrae calor de su mano por conducción.

Segundo, el calor puede moverse por *radiación*. Usualmente, cuando la gente piensa en radiación, piensa en armas o plantas de energía nuclear, en mutantes, en Chernobyl. Pero para los científicos, radiación sólo significa algún tipo de rayos de luz, visible o invisible (tal como la infrarroja o ultravioleta). Las cosas calientes brillan, produciendo luz que transporta el calor hacia afuera. Este es el motivo por el cual el Sol brilla y calienta la Tierra. Es también el fenómeno que explica por qué Ud. siente calor cuando está sentado frente a una chimenea o un calefactor eléctrico. El desierto es muy frío durante la noche porque Ud. y el aire en torno de su cuerpo están emitiendo radiación en el infrarrojo, perdiendo calor hacia el espacio externo. Los equipos de supervivencia contienen "mantas espaciales", que básicamente son grandes hojas de papel de aluminio, y éstas ayudan a mantener la temperatura del cuerpo por reflejo de la radiación infrarroja del mismo, que retorna a él.

La convección es la tercera manera por la cual el calor puede moverse. En lugar del efecto dominó molecular, o corriente de rayos calóricos, la convección se basa en el movimiento del fluido. Cuando un fluido caliente se mueve, arrastra el calor con él. Se puede pensar en las tres maneras por las cuales el calor se mueve si imaginamos una nota de amor a su enamorado o enamorada circulando a lo largo del salón de clases. Puede pasársela a la persona sentada a su lado y solicitarle que la haga circular (como en el caso de la conducción), puede usar una señal de linterna (radiación), o bien puede pararse, caminar a lo largo de la clase y entregar la nota a la persona interesada directamente (como en el caso de la convección).

La convección es la última forma de liberar el calor; es difícil de iniciar, por lo que el calor prefiere escaparse por conducción o radiación. Pero la conducción es lenta y la radiación no actúa en un medio opaco: dentro de un planeta y en ciertas regiones de una estrella. En esos casos, sólo la convección puede hacer el trabajo.

El mecanismo de pérdida del calor determina el aspecto de los planetas. Los planetas interiores del sistema solar están compuestos por rocas. Normalmente pensamos en las rocas como cuerpos sólidos, pero éstas pueden comportarse como un líquido si Ud. espera lo suficiente; digamos, millones de años. Las rocas pueden transportar el calor por conducción o convección; son opacas, por lo que bloquean la radiación. Los planetas fríos y pequeños, tales como la Luna o Marte, pierden su calor por conducción. La Tierra y Venus prefieren la convección (ver Figura 2). La convección es mucho más emocionante. Ella suministra energía a las placas tectónicas y a otros fantásticos aspectos de la geología que presentan tanto la Tierra como Venus.

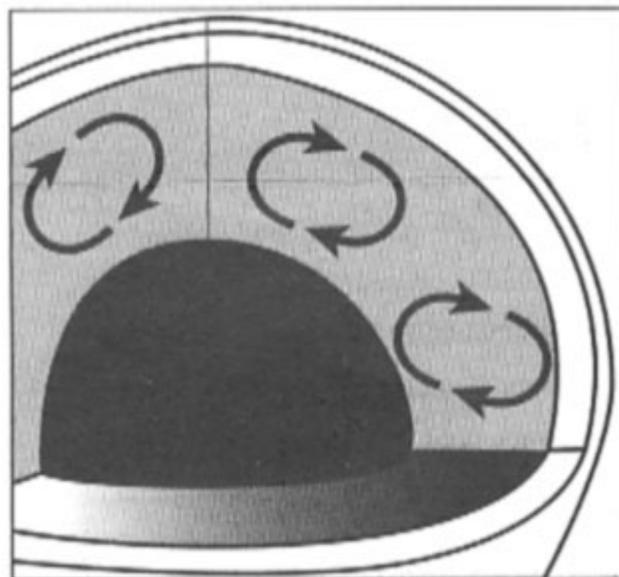


Figura 2

El interior de la Tierra o de Venus. Construimos nuestros edificios y comemos nuestros alimentos sobre una delgada corteza de roca sólida, como espuma sobre un estanque. Por debajo hay un vasto mar de roca fluida llamado manto, agitado continuamente por convección. El manto mismo se encuentra sobre un núcleo compuesto por hierro fundido.

Dentro de una estrella, la conducción no puede actuar debido a que las moléculas están muy separadas unas de otras, por lo que el calor se mueve por radiación o convección. La radiación opera donde el gas de la estrella es transparente, cosa que sucede cuando ella está especialmente caliente. En estrellas de dimensiones intermedias, como el Sol, la radiación transporta el calor muy adentro en el interior de la estrella, donde es más caliente (ver Figura 3), y la convección opera hacia el exterior, donde es más fría. En estrellas pequeñas y frías, la convección es el mecanismo predominante; en estrellas grandes y de mayor temperatura, la radiación es el mecanismo principal.

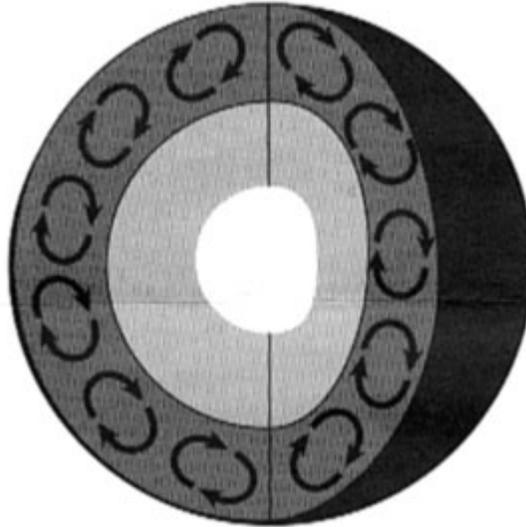


Figura 3

El interior del Sol. Sólo una pequeña parte del Sol, su núcleo, genera energía. El resto del gas estorba al calor que trata de salir. La mayor parte del interior del Sol está lleno de un gas transparente, y la energía pasa a través de él en forma de radiación. Pero hacia la superficie, el gas es más frío y opaco, por lo que la radiación no puede atravesarlo. La convección es la que se encarga de transportar el calor.

La convección le da a nuestro Sol el aspecto "granuloso", tal como lo ven los astrónomos cuando observan el Sol con telescopios diseñados especialmente para ello (ver Figura 4). Cada uno de los pequeños gránulos en la figura 4 marcan un lugar donde la convección produce un burbujeo desde abajo hacia arriba. La convección eleva los átomos manufacturados en el centro de las estrellas. A los astrónomos les encanta esto, porque les da una idea de qué es lo que pasa dentro de las estrellas, donde no es posible la observación.

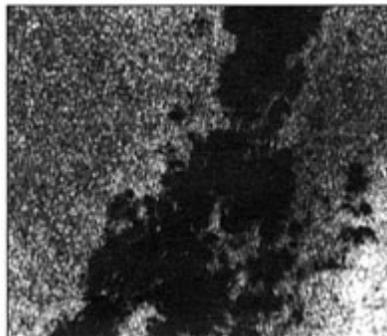


Figura 4

Fuego y burbujas incandescentes. Esta imagen muy ampliada de la superficie del Sol muestra una mancha solar (manchones oscuros en el

centro) y granulaciones (granos iluminados). Cada gránulo, pequeño como se lo ve, tiene el tamaño aproximado de Texas. Los gránulos fluctúan rápidamente, haciendo que el Sol luzca como la burbujeante pócima de una bruja. Las granulaciones son la parte superior del ciclo convectivo que transporta material desde el interior del Sol a la superficie. La foto es cortesía del Observatorio de Sacramento Peak.



El trastorno de los planetas, de las estrellas y de las chimeneas de lava

¡Oh, un día con smog!

No todos los flúidos calientes sufren convección. Un día con smog en Los Angeles o cualquier otra gran ciudad ilustra lo que sucede cuando hay cosas que no conveccionan. El aire sólo se asienta y no se mueve. ¿Por qué no?

La convección no puede ocurrir a menos que ciertas condiciones sean las adecuadas. La condición más importante es el perfil de temperatura. Normalmente, el aire es más caliente cerca del suelo y se hace más frío a medida que ascendemos. Afuera de la ventana de un avión a 9000 metros de altura, el aire baja a -40 grados C. La razón es sólo una: debido a la transparencia del aire, la luz del Sol lo atraviesa y calienta el suelo. El suelo, por su parte, calienta el aire cercano a él. El aire que se encuentra a mayor distancia del piso no es calentado directamente por el Sol.

Debido a que el aire se hace cada vez más frío a medida que ascendemos, la atmósfera necesita producir convección. El aire frío está arriba del aire caliente. El aire caliente desea ascender, el aire frío, descender, el ciclo convectivo comienza.

Algunas veces, sin embargo, el suelo se vuelve más frío que el aire que se encuentra sobre él. Esto puede ocurrir después de una noche clara durante la cual el suelo se haya enfriado más de lo usual, cosa que puede suceder en valles donde el piso se vea modulado por colinas que atrapen el aire frío cerca de la superficie. En estos casos, el aire es frío cerca del suelo y se hace más caliente a medida que ascendemos. Esta situación se denomina *inversión* de la temperatura. No puede producirse convección debido a que el aire caliente se sitúa sobre el aire frío. El aire frío ya está sumergido, el aire caliente ya está elevado. La atmósfera está feliz; no hay razón para cambiar el status quo.

Sin convección, el aire se estanca, al igual que cualquier cosa suspendida en él, tal como el humo. Usualmente, la convección arrastra lejos el humo de los coches. Cuando ocurre una inversión de temperatura, el humo no tiene lugar a dónde ir, excepto dentro de los ojos y los pulmones.

Afortunadamente, esto no es lo habitual. Los 10 kilómetros inferiores de la atmósfera terrestre, el aire que se sitúa debajo de Ud. cuando vuela en avión o escala el monte Everest, son casi siempre convectivos. Esta agitada región, conocida como *tropósfera*, es donde las variaciones del clima tienen lugar (ver Figura 5). Todos los planetas tienen tropósfera.

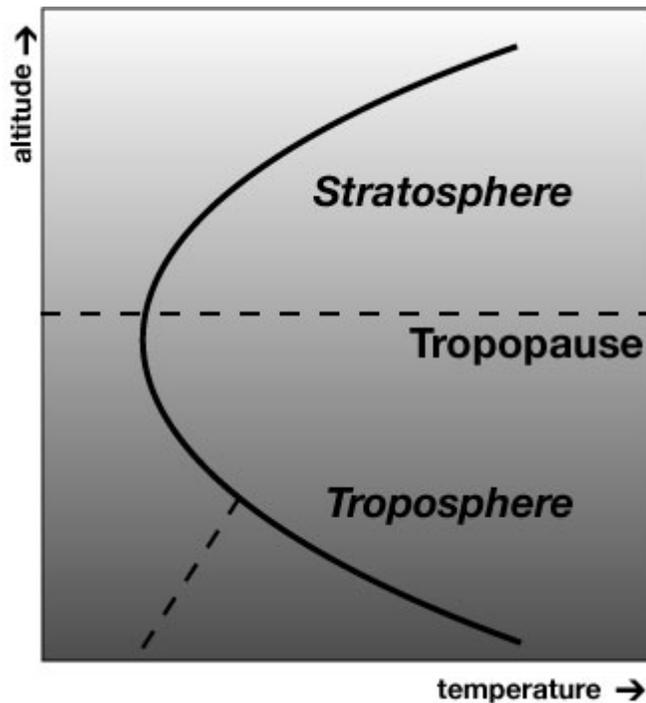


Figura 5

Perfil de temperatura de la atmósfera terrestre. Tornados, tormentas y otras características climáticas tienen lugar en la tropósfera, la capa inferior de la atmósfera. La convección es responsable de una gran parte de la meteorología. Si no fuera por el perfil de temperatura, la convección no podría ocurrir: debido a que la temperatura decrece con la altura, el aire frío se sitúa sobre el aire caliente, permitiendo la convección. Pero si por alguna razón la temperatura se incrementara con la altura (línea punteada), la convección se quebrantaría hasta detenerse. Esto sucede en días con humo en áreas urbanas y, siempre, en la estratósfera.

Muchas de las características climáticas en la tropósfera ocurren debido a la convección. Las brisas marinas son un buen ejemplo. Durante el día, la tierra se calienta más rápidamente que el mar. El aire sobre el suelo es caliente, el aire sobre el agua, frío. El aire caliente sobre la tierra y el aire frío sobre el mar se "pelean" por intercambiar sus lugares. Esto produce viento que sopla desde el océano hacia la tierra, la brisa marina. En la noche, la situación se revierte, la tierra se enfría más rápidamente que el mar, por lo que el aire sobre el suelo está a menor temperatura que el aire sobre el agua. El aire caliente sobre el agua asciende, el aire frío desde la tierra entra precipitadamente en el mar y se produce una brisa terrestre.

La misma cosa ocurre a escala global. Los trópicos son más cálidos que los polos y esta discrepancia suministra energía a los ciclos convectivos "gigantes" llamados *Celdas de Hadley*. En tales ciclos, el aire asciende en latitudes bajas y cálidas, moviéndose hacia los polos, se hunde en latitudes altas y se precipita a lo largo de la superficie regresando hacia el ecuador (estas corrientes convectivas no presentan direcciones netas hacia el norte o el sur; varían su curso debido a la rotación de la Tierra, creando corrientes con dirección este en los trópicos y aquellas con dirección prevaleciente al oeste en latitudes templadas). Los hemisferios norte y sur tienen, cada uno, tres juegos de Celdas de Hadley, uno en los trópicos, uno para latitudes templadas y otro para las regiones polares. En el hemisferio norte, el límite entre la celda del Ártico y la emplada, llamado *frente polar*, rara vez permanece quieto. Entrelaza el norte con el sur, y sus movimientos son responsables de las características climáticas en Europa, América del Norte y norte de Asia. Venus y Marte también tienen celdas de Hadley, pero un solo conjunto de ellas.

Por arriba de la inquieta tropósfera está la amortiguada *estratósfera*. En la estratósfera, distinta de la tropósfera, el aire se hace más caliente a medida que ascendemos. En la Tierra esto es debido al hecho de que la capa de ozono absorbe la radiación solar ultravioleta. El ozono no sólo impide que estos rayos mortales alcancen la superficie, también calienta la estratósfera. Como resultado, la estratósfera está estática. El aire no puede circular demasiado.

Jupiter, Saturno y Titán también tienen estratósferas. En estos mundos la estratósfera debe su existencia a la absorción de radiación solar por el metano y el polvo, en vez de por el ozono. Venus tiene una especie de estratósfera---la temperatura se mantiene aproximadamente constante con la altura, en lugar de incrementarse---debido a las peligrosas nubes de ácido sulfúrico hasta una altura de unos 65 kilómetros. Estas nubes delgadas absorben prácticamente toda la luz solar que llega a Venus y nos impiden ver la superficie del planeta.



El trastorno de los planetas, de las estrellas y de las chimeneas de lava

El deseo de agitación

El perfil de temperatura no es el único requerimiento para la convección. La fuerza que impulsa la convección--la diferencia de peso entre un fluido caliente y uno frío---debe vencer la resistencia natural del fluido al movimiento, conocida como *viscosidad*.

Los comerciales de salsa *catsup Heinz*, lo muestran rápidamente. Si Ud. cree en ellos, Heinz es más viscosa que sus competidoras. Es difícil sacarla de la botella. Debe ser más difícil comenzar la convección en una cuba de salsa catsup Heinz que en otra llena con cualquier otra salsa catsup.

El aire, también, es viscoso. Su resistencia al movimiento es lo que hace que lentas gotas de lluvia y paracaidistas caigan a una velocidad razonable. Si la viscosidad del aire fuera menor, las gotas de lluvia caerían más rápido y podrían destrozar los techos de los autos y matar pequeños perros. Pero la viscosidad del aire es lo suficientemente pequeña como para no detener la convección en la atmósfera.

En algunos casos, la viscosidad es *demasiado* pequeña, y la convección se escapa de control, y los lindos y ordenados patrones de la Figura 1 degeneran en inestables e impredecibles turbulencias. En la convección turbulenta, el fluido asciende en haces formados por remolinos espirales. Estos remolinos aparecen sin aviso, tal como los pasajeros de un avión que han estado en un vuelo agitado podrán testificar. Las caóticas volutas del humo de un cigarrillo, o su proyección sobre una pared detrás de un calefactor eléctrico, es convección turbulenta. Así como hay remolinos en la nubes de Júpiter (ver Figura 6).

Profundamente, bajo el suelo, el problema no es la viscosidad demasiado pequeña, sino la demasiado grande. Los continentes y el piso oceánico de la Tierra flotan en un mar de roca caliente, conocido con el nombre de *manto* (ver Figura 2). La viscosidad del manto es enorme, tan grande que parecería que el manto no se moviera en absoluto. Pero durante miles y millones de años, el manto se mueve. Esta lenta deriva creó muchas de las formas continentales que vemos hoy en día.

Una manera de saber que el manto se mueve es mediante la observación de cómo ha respondido el suelo desde la finalización de la última era glaciár. Durante la Edad de Hielo, Escandinavia y otras tierras del norte estuvieron cubiertas por glaciares de kilómetros de espesor. El enorme peso de los glaciares presionó sobre la tierra. Cuando el hielo se derritió, la tierra esperaba saltar nuevamente hacia arriba. Pero como reacción, el manto por debajo debía estar preparado para fluir. Se necesitan 150 años para que la tierra se mueva hacia arriba 30 centímetros, y midiendo esto, los geólogos han calculado la viscosidad del manto.

Debido a que el manto es fluido y caliente, puede moverse por convección. Para vencer la alta viscosidad se necesita mucho calor, que es provisto por uranio, torio, y potasio radioactivos, en un tipo de reactor nuclear a fuego lento. El manto se agita en ciclos convectivos gigantes de 725 kilómetros de profundidad y 1500 kilómetros de ancho. Haciendo esto, arrastra las placas que forman la superficie de la Tierra. Cuando esas



Figura 6

Tapiz planetario. Como la crema en el café, las nubes en el planeta gigante Júpiter se doblan, retuercen y ondulan en configuraciones psicodélicas. Estos sistemas de tormentas empequeñecen la Tierra, superpuesta para comparación en escala. Tal turbulencia es lo que acontece cuando se produce convección. La gran mancha roja es la forma oval en el borde superior derecho. Foto cortesía de la NASA.

placas se rozan unas contra otras, causan los terremotos; cuando las placas chocan una contra otra, se ondulan formando montañas. Los terremotos y los volcanes son sólo una manera de enfriar la Tierra.

Otros planetas también poseen mantos. En Venus, el manto no arrastra placas horizontalmente. En cambio, el manto venusino parece empujar la superficie verticalmente. En algunas áreas, este empujón vertical ha creado colinas. Miranda, una de las lunas de Urano, parece tener un manto de hielo, más que de roca. La convección en este manto helado contornea la superficie en nudosos patrones de montañas, colinas y valles (ver Figura 7).

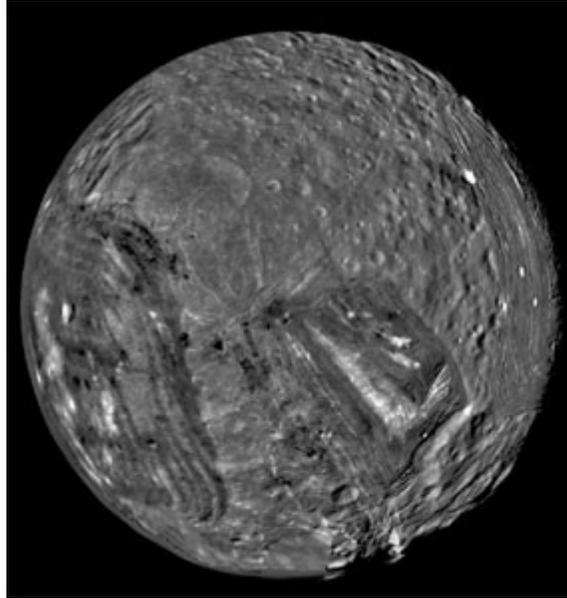


Figura 7

La luna con galón. Miranda, uno de los satélites de Urano, luce más como una insignia militar que como una luna. El pequeño satélite, de alrededor de 500 kilómetros de diámetro, está estampado con misteriosas formas parecidas a diamantes. Esta imagen del *Voyager 2* muestra tres de estas formas: Elsinor (izquierda), Inverness (centro) y Arden (derecha). Estas figuras pueden ser el resultado de la convección dentro de la atormentada luna. Foto cortesía del Jet Propulsion Laboratory.

De chimeneas de lava a torrentes de lava

La urgencia del manto por perder calor puede también ser causa de que la roca burbujee hacia la superficie. Las burbujas son más pequeñas y de menor vida que los ciclos gigantes de convección completa, pero también ayudan a los planetas a enfriarse.

Las lámparas de lava funcionan sobre el mismo principio. El calor produce burbujas que flotan hacia arriba. Si Ud. da vuelta una botella de almíbar de arriba a abajo, puede ver burbujas de aire subir lentamente. Básicamente, la misma cosa sucede en los planetas, excepto por el hecho de que las burbujas están hechas de roca caliente en lugar de aire. De hecho, los científicos han observado burbujas en almíbar con el objeto de comprender el efecto de las burbujas rocosas en la superficie de los planetas. Debido a que las burbujas transportan roca caliente desde el interior del planeta hacia la superficie, ellas abastecen a los volcanes con lava. Esto es lo que sucede en los volcanes de Hawaii y en el este de Africa. El 10 por ciento del calor terrestre escapa de esta manera.

En Venus, las burbujas son aún más importantes que en la Tierra. La superficie venusina está cubierta de volcanes y terrazas circulares llamadas *coronas*. Las coronas tienen varios cientos de kilómetros de diámetro y parecen formarse cuando burbujas calientes empujan y estiran la superficie (ver Figura 8).

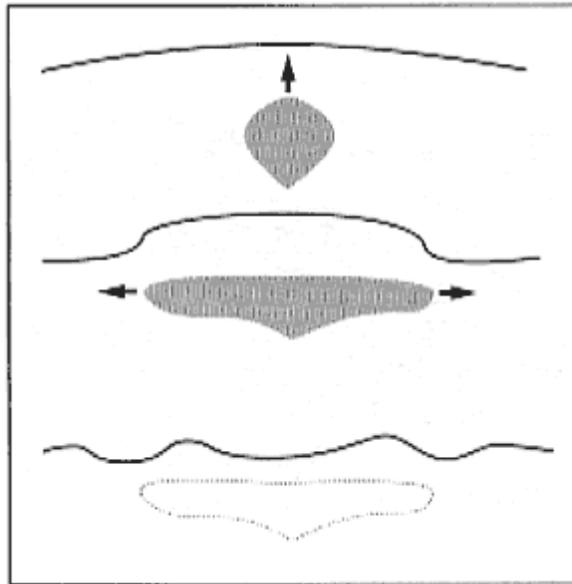


Figura 8

Burbujeo en Venus. Burbujas ascendentes de roca caliente, de cientos de kilómetros de diámetro, pueden empujar la superficie venusina y formar montañas. Cuando la burbuja está aún muy por debajo del suelo, comprime el fluido entre ella y la superficie, causando que la superficie se deforme hacia arriba (imagen superior). Conforme la burbuja se aproxima a la superficie, comienza a aplastarse como la masa de una pizza redonda (imagen del centro). Después de lo cual la burbuja se enfría y la superficie se hunde (imagen inferior). Dibujo por cortesía de Steve W. Squyres, Universidad de Cornell.

Los ciclos convectivos pueden tener miles de kilómetros de altura, como sucede en las estrellas, cientos de kilómetros de altura, como se presentan en los planetas; o sólo unos pocos centímetros de alto, como sucede en una tetera. Pero no importa si son pequeños o grandes, la idea básica es la misma. Recuérdelo la próxima vez que haga hervir el agua.

Actividades en la clase

Corrientes convectivas en el agua

Esta demostración requiere una jarra de vidrio y una estufa, mechero bunsen, u otro calentador. Una cafetera automática de goteo es perfecta. Llene la jarra con agua y agregue aserrín, limaduras de hierro, granos de pimienta u otras partículas pequeñas al agua. Dele tiempo a las partículas para que se asienten en el fondo y entonces encienda la hornilla. El agua comenzará el ciclo convectivo y las partículas seguirán las corrientes convectivas.

Si enciende la luz de un proyector de diapositivas y la hace pasar a través del agua caliente y la proyecta sobre una pantalla, puede ver vívidas sombras producidas por la convección del vapor de agua que asciende.

Corrientes convectivas en el aire

Sostenga un molinete sobre una vela o un mechero. La llama caliente producirá corrientes convectivas en el aire, induciendo el giro del molinete.

Traducido por Beatriz García