

Temperatura, calor y expansión



Ellyn Daugherty pide a sus alumnos que predigan si el agujero del anillo se agrandará o se contraerá al calentarlo.

Toda la materia (sólida, líquida y gaseosa) está formada por átomos o moléculas en constante movimiento. A causa de su movimiento aleatorio, las moléculas y los átomos de la materia tienen energía cinética. La energía cinética promedio de las partículas individuales influye en lo caliente que se sienta algo. Siempre que algo se calienta sabemos que aumenta la energía cinética de sus átomos y moléculas. Golpea una moneda con un martillo, y se calentará porque el golpe del martillo hace que los átomos en el metal se muevan con mayor rapidez. Si pones un líquido sobre una llama, éste se calentará. Si comprimes con rapidez aire en una bomba de neumático el aire en el interior se calentará. Cuando un sólido, líquido o gas se calienta, sus átomos o moléculas se mueven con más rapidez: tienen más energía cinética.

Temperatura



FIGURA 15.1

¿Podemos confiar en nuestro sentido de lo caliente y lo frío? ¿Ambos dedos sentirán la misma temperatura al sumergirlos después en el agua tibia?

La cantidad que indica lo caliente o frío que está un objeto con respecto a una norma se llama **temperatura**. El primer “medidor térmico” para medir la temperatura, el *termómetro*, fue inventado por Galileo en 1602 (la palabra *térmico* proviene del término griego para indicar “calor”). El uso del popular termómetro de mercurio en vidrio se difundió 70 años después. (Es posible que los termómetros de mercurio caigan en desuso durante los próximos años, por el riesgo de envenenamiento con mercurio.) La temperatura de la materia se expresa con un número que corresponde a lo caliente o frío que está algo, según determinada escala.

Casi todos los materiales se dilatan, o expanden, cuando se elevan sus temperaturas, y se contraen cuando éstas bajan. Así, la mayoría de los termómetros miden la temperatura debido a la expansión o contracción de un líquido, que suele ser mercurio, o alcohol teñido, en un tubo de vidrio con escala.

En la escala internacional, la que se usa más comúnmente en la actualidad, se asigna el número 0 a la temperatura de congelación del agua, y el número 100 a su temperatura de ebullición (a la presión atmosférica normal). El espacio entre las dos marcas se divide en 100 partes iguales llamadas *grados*; en consecuencia, un termómetro calibrado como acabamos de describir se llama *termómetro centígrado* (de *centi*, “centésimo”; y *gradus*, “medida”). Sin embargo, ahora se llama *termómetro Celsius*, en honor al científico que sugirió dicha escala, el astrónomo sueco Anders Celsius (1701-1744).



FIGURA 15.2

Inscripción en memoria de Fahrenheit afuera del lugar donde vivió (Gdansk, Polonia).



Bajas temperaturas
con nitrógeno líquido

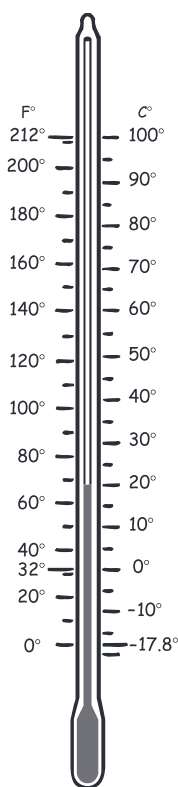


FIGURA 15.3

Escalas Fahrenheit y Celsius en un termómetro.

En Estados Unidos hay otra escala muy popular. En ella, se asigna el número 32 a la temperatura de congelación del agua, y el número 212 a su temperatura de ebullición. Esa escala la tiene un termómetro Fahrenheit, en honor de su ilustre creador, el físico alemán Gabriel Daniel Fahrenheit (1686-1736). La escala Fahrenheit quedará obsoleta cuando Estados Unidos termine de adoptar el sistema métrico.¹

Los científicos favorecen otra escala de temperaturas más, la escala Kelvin, en honor del físico inglés Lord William T. Kelvin (1824-1907). Esta escala no se calibra en función de puntos de congelación ni de ebullición del agua, sino en términos de la energía misma. El número 0 se asigna a la mínima temperatura posible, el **cero absoluto**, en la cual una sustancia no tiene ninguna energía cinética que ceder.² El cero absoluto corresponde a $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la escala Celsius. Las unidades de la escala Kelvin tienen el mismo tamaño que los grados de la escala Celsius, y así la temperatura del hielo que se funde es 273 kelvins. En la escala Kelvin no hay números negativos. Ya no veremos esta escala, sino hasta que estudiemos la termodinámica en el capítulo 18.

Para convertir las temperaturas de Fahrenheit a Celsius y de Celsius a Fahrenheit hay fórmulas muy usadas en los exámenes. Esos ejercicios de aritmética en realidad no son de física, y es poco probable que alguna vez tengas que hacer las conversiones; por lo tanto, no las describiremos aquí. Además, esta conversión se puede aproximar mucho con sólo leer la temperatura correspondiente en las escalas de la figura 15.3.

La temperatura se relaciona con el movimiento aleatorio de los átomos y las moléculas de una sustancia. (Para abreviar, en lo que resta de este capítulo sólo diremos *moléculas*, en vez de *átomos y moléculas*.) En forma más específica, la temperatura es proporcional a la energía cinética de “traslación” promedio del movimiento molecular (el que lleva a la molécula de un lugar a otro). Las moléculas también pueden girar o vibrar, con su energía cinética de rotación y vibración correspondiente, aunque tales movimientos no afectan directamente la temperatura.

El efecto de la energía cinética de traslación en función de la energía cinética de vibración y de rotación se demuestra ampliamente con un horno de microondas. Las microondas que bombardean los alimentos hacen que ciertas moléculas de éstos, principalmente las moléculas de agua, vibren y oscilen con gran cantidad de energía cinética de rotación. Sin embargo, las moléculas que oscilan no cuecen los alimentos. Lo que eleva la temperatura y cuece el alimento es la energía cinética de traslación impartida a las moléculas vecinas que rebotan contra ellas. (Para que lo entiendas mejor, imagina un puñado de canicas que salen despedidas en todas direcciones al encontrarse con las aspas giratorias de un ventilador.) Si las moléculas vecinas no interactuaran con las moléculas de agua en oscilación, la temperatura del alimento no cambiaría respecto a la que tenía cuando se encendió el horno.

¹ La conversión a Celsius mantendrá a Estados Unidos en la tendencia del resto del mundo, donde la norma es la escala Celsius. Los estadounidenses son reacios a cambiar. Resulta difícil cambiar una costumbre largamente establecida, y la escala Fahrenheit tiene ciertas ventajas en el uso cotidiano. Por ejemplo, sus grados son más pequeños ($1\text{ }^{\circ}\text{F} = 5/9\text{ }^{\circ}\text{C}$), con lo cual se consigue más exactitud en los informes del clima, en temperaturas con número entero. Además también las personas atribuyen una importancia especial a los números que aumentan en un dígito más, así que cuando la temperatura de un día caluroso sea $100\text{ }^{\circ}\text{F}$, se comunica con mayor énfasis la idea de calor, que cuando se dice que es $38\text{ }^{\circ}\text{C}$. Al igual que mucho del sistema de unidades inglesas, la escala Fahrenheit está relacionada con los seres humanos.

² Hasta en el cero absoluto, una sustancia tiene lo que se llama “energía de punto cero”, que es energía no disponible que no se puede transferir a una sustancia distinta. El helio, por ejemplo, tiene movimiento suficiente en sus átomos para que no se congele en el cero absoluto. Para explicarlo se necesita de la teoría cuántica.

EXAMÍNATE

¿Cierto o falso? La temperatura es una medida de la energía cinética total de una sustancia.

Resulta interesante el hecho de que lo que en realidad muestra un termómetro es su *propia* temperatura. Cuando un termómetro está en contacto térmico con algo cuya temperatura se desea conocer, entre los dos se intercambiará energía hasta que sus temperaturas sean iguales y se establezca el equilibrio térmico. Si conocemos la temperatura del termómetro, conoceremos la temperatura de lo que se está midiendo. Un termómetro debería ser lo suficientemente pequeño para que no influya significativamente en la temperatura de lo que mida. Si mides la temperatura del aire en una habitación, tu termómetro será del tamaño adecuado. Pero si debes medir la temperatura de una gota de agua, el contacto entre ella y el termómetro cambiaría la temperatura de la gota; es un caso clásico de cuando el proceso de medición cambia lo que se está midiendo.

Calor



FIGURA 15.4

Hay más energía cinética molecular en la cubeta llena de agua tibia, que en la pequeña taza llena de agua más caliente.

Si tocas una estufa caliente, entrará energía a tu mano, porque la estufa está más caliente que tu mano. Por otro lado, cuando tocas un cubito de hielo, la energía sale de la mano y entra al hielo, que está más frío. La dirección de la transferencia espontánea de energía siempre es del objeto más caliente al objeto más frío que lo toca. La energía transferida de un objeto a otro debida a una diferencia de temperatura entre ellas se llama **calor**.

Es importante destacar que la materia no *contiene* calor. La materia contiene energía cinética molecular, y quizás energía potencial molecular, pero *no calor*. El calor es *energía en tránsito* de un cuerpo de mayor temperatura hacia otro con menor temperatura. Una vez transferida, la energía cesa de calentar. (Como analogía recuerda que el trabajo también es energía en tránsito. Un cuerpo no *contiene* trabajo. *Efectúa* trabajo o el trabajo se efectúa sobre él.) En los capítulos anteriores llamamos *energía térmica* a la que resulta del flujo de calor, para aclarar su relación con el calor y la temperatura. En este capítulo usaremos el término que prefieren los científicos: *energía interna*.

La **energía interna** es el gran total de las energías en el interior de una sustancia. Además de la energía cinética de traslación de las moléculas en movimiento en una sustancia, hay energía en otras formas. Existe energía cinética de rotación de moléculas, y energía cinética debida a movimientos internos de los átomos dentro de las moléculas. También hay energía potencial debida a las fuerzas entre las moléculas. Se ve entonces que una sustancia no contiene calor: contiene energía interna.

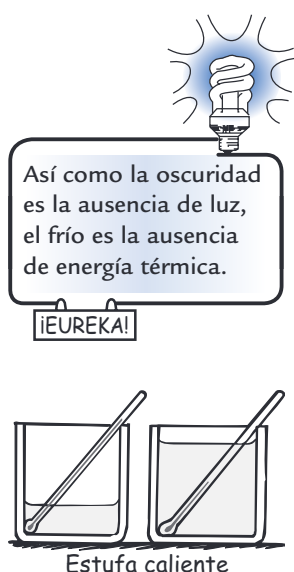


La temperatura se mide en grados; el calor se mide en joules.

¡EUREKA!

COMPRUEBA TU RESPUESTA

Falso. La temperatura es una medida de la energía cinética de traslación *promedio* (¡no total!) de las moléculas de una sustancia. Por ejemplo, hay el doble de energía cinética molecular en 2 litros de agua hirviendo que en 1 litro, pero las temperaturas son iguales en los dos casos, porque la energía cinética de traslación *promedio* por molécula es igual en ambos casos.

**FIGURA 15.5**

Aunque a los dos recipientes se agregue la misma cantidad de calor, la temperatura aumenta más en el recipiente con menor cantidad de agua.

FIGURA 15.6

Así como el agua de las ramas del tubo en U busca un nivel común (donde las presiones sean iguales a cualquier profundidad), el termómetro y su cercanía alcanzan una temperatura común (a la cual la EC molecular promedio sea igual para ambos).

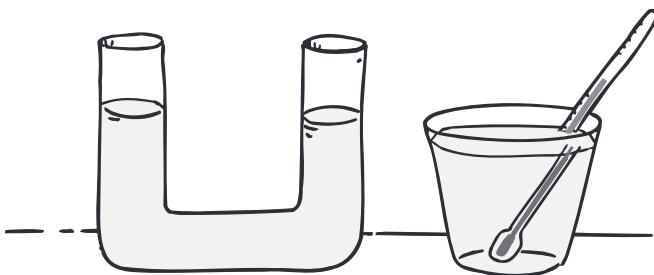
Cuando una sustancia absorbe o emite calor, aumenta o disminuye la energía interna que hay en ella. En ciertos casos, como cuando se funde el hielo, el calor agregado no aumenta la energía cinética molecular, sino que se convierte en otras formas de energía. La sustancia sufre un cambio de fase, que describiremos con detalle en el capítulo 17.

Cuando las cosas están en contacto térmico, el flujo de calor es de la que tiene mayor temperatura a la que tiene menor temperatura; aunque no necesariamente es de una sustancia que contenga mayor energía interna a otra que contenga menos energía interna. Hay más energía interna en un vaso de agua tibia que en un alfiler calentado al rojo. Si ese alfiler se sumerge en el agua, el flujo de calor no es del agua tibia al alfiler: es del alfiler al agua, que está más fría. El calor nunca fluye espontáneamente de una sustancia con menor temperatura a otra con mayor temperatura.

La cantidad de calor que transfiera no sólo depende de la diferencia de temperatura entre las sustancias, sino también de la cantidad del material. Por ejemplo, un barril de agua caliente transferirá más calor a una sustancia más fría, que una taza de agua a la misma temperatura. Hay más energía interna en volúmenes mayores de agua.

EXAMÍNATE

1. Imagina que pones 1 L de agua durante cierto tiempo sobre una llama, y que su temperatura aumenta 2°C . Si pones 2 L de agua al mismo tiempo sobre la misma llama, ¿cuánto subirá su temperatura?
2. Si una canica en movimiento rápido golpea un grupo de canicas en movimiento lento, ¿la canica rápida normalmente aumentaría o disminuiría su rapidez? ¿Cuál(es) pierde(n) energía cinética y cuál(es) gana(n) energía cinética, la canica que al principio se movía con rapidez, o las lentas? ¿Cómo se relacionan estas preguntas con la dirección del flujo del calor?



COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Su temperatura sólo subirá 1°C , porque hay el doble de moléculas en 2 L de agua, y cada una sólo recibe en promedio la mitad de la energía.
2. La canica que se mueve rápido pierde rapidez al golpear a las que se muevan más lento. Cede algo de su energía cinética a las más lentas. Así sucede con el flujo de calor. Las moléculas con más energía cinética, al estar en contacto con moléculas con menos energía cinética, les ceden algo de su exceso de energía a las menos energéticas. La dirección de la transferencia de energía es de caliente a frío. Sin embargo, tanto para las canicas como para las moléculas, la energía *total* antes y después del contacto es la misma.

**FIGURA 15.7**

Para quien cuida su peso, el cacahuate contiene 10 calorías; para el físico, desprende 10,000 calorías (o 41,480 joules) de energía cuando se quema o se consume.

Medición del calor

Entonces, el calor es el flujo de energía de una cosa a otra, debido a una diferencia de temperaturas. Como el calor es una forma de energía, se mide en joules. Existe una unidad más común de calor, la *caloría*, que se define como la cantidad de calor necesaria para cambiar 1 grado Celsius la temperatura de 1 gramo de agua.³

Los valores energéticos de los alimentos y combustibles se determinan quemándolos y midiendo la energía que desprenden. (Tu organismo “quema” el alimento en forma gradual.) La unidad de calor que se emplea para clasificar los alimentos es en realidad la kilocaloría, que equivale a 1,000 calorías (y es el calor necesario para aumentar 1 °C la temperatura de 1 kg de agua). Para diferenciar entre las dos unidades, es común que a la utilizada para los alimentos se le llama *Caloría*, escrita con mayúscula. Es importante recordar que la *caloría* y la *Caloría* son unidades de energía. Esos nombres son vestigios de la idea antigua de que el calor es un fluido invisible llamado *calórico*. Esta creencia persistió hasta el siglo XIX. Ahora sabemos que el calor es una forma de energía y no una sustancia aparte, por lo que no necesita su unidad aparte. Algún día la *caloría* cederá su lugar al joule, la unidad SI, como unidad común de medición de calor. (La relación entre calorías y joules es 1 *caloría* = 4.184 joules.) En este libro estudiaremos el calor mediante la *caloría*, que es conceptualmente más sencilla; no obstante, en el laboratorio quizás utilices el joule equivalente, donde una aportación de 4.148 joules eleva 1 °C la temperatura de 1 gramo de agua.

EXAMÍNATE

De un horno se sacan al rojo vivo un alfiler y un tornillo grande, ambos de acero. Ambos tienen la misma temperatura y se dejan caer en recipientes idénticos con la misma cantidad de agua a la misma temperatura. ¿Cuál aumentará más la temperatura del agua?

Capacidad calorífica específica

**FIGURA 15.8**

El relleno de un pay caliente de manzana puede estar demasiado caliente, aun cuando la cubierta no lo esté.

Es probable que ya hayas notado que algunos alimentos permanecen calientes mucho más tiempo que otros. Si sacas del tostador una rebanada de pan tostado y, al mismo tiempo, viertes sopa caliente en un tazón, luego de pocos minutos la sopa estará caliente y deliciosa, mientras que el pan se habrá enfriado considerablemente. Asimismo, si esperas un poco antes de comer una pieza de carne asada y una cucharada de puré de papa, que inicialmente tenían la misma temperatura, verás que la carne se enfrió más que el puré.

Las sustancias distintas tienen distintas capacidades de almacenamiento de energía interna. Si calentamos una olla de agua en una estufa, veríamos que tarda

COMPRUEBA TU RESPUESTA

El trozo más grande de acero (el tornillo) tiene más energía interna para ceder al agua, y la calienta más que el alfiler. Aunque tienen la misma temperatura inicial (la misma energía cinética *promedio* por molécula), el tornillo, con más masa, tiene más moléculas y, por lo tanto, mayor energía *total* (energía interna). Este ejemplo resalta la diferencia entre temperatura y energía interna.

³ Una unidad menos común de calor es la unidad térmica británica (BTU, british thermal unit), que se define como la cantidad de calor para cambiar 1 grado Fahrenheit la temperatura de 1 libra de agua. Un BTU equivale a 1,054 J.

15 minutos para pasar desde la temperatura ambiente hasta su temperatura de ebullición. Pero si pusieramos una masa igual de acero en la misma llama, veríamos que su temperatura aumentaría lo mismo sólo en 2 minutos. Para la plata, el tiempo sería menor que un minuto.

Los diversos materiales requieren distintas cantidades de calor para elevar una cantidad especificada de grados la temperatura de determinada masa de material. Los diversos materiales absorben energía en formas diferentes. La energía puede aumentar la rapidez del movimiento de las moléculas, y con ello aumentar su temperatura. O bien, aumentar la cantidad de vibración interna en las moléculas y transformarse en energía potencial, con lo cual no se eleva la temperatura. El caso general es una combinación de los dos anteriores.

Mientras que un gramo de agua requiere 1 caloría de energía para subir 1 grado Celsius su temperatura. Sólo se necesita más o menos la octava parte de esa energía para elevar lo mismo la temperatura de 1 gramo de hierro. Para el mismo cambio de temperatura, el agua absorbe más calor por gramo que el hierro. Se dice que el agua tiene una **capacidad calorífica específica** (que a veces simplemente se llama *calor específico*).⁴

La capacidad calorífica específica de cualquier sustancia se define como la cantidad de calor requerida para cambiar 1 grado la temperatura de una unidad de masa de sustancia.

Podemos imaginar que la capacidad calorífica específica es una inercia térmica. Recuerda que la inercia es un concepto que se usa en mecánica para indicar la resistencia de un objeto a cambiar su estado de movimiento. La capacidad calorífica específica es como una inercia térmica, porque representa la resistencia de una sustancia a cambiar su temperatura.

EXAMÍNA TE

¿Qué tiene más capacidad calorífica específica, el agua o la arena?

Alta capacidad calorífica específica del agua

El agua tiene una capacidad mucho mayor para almacenar energía que todas las demás sustancias, excepto algunas poco conocidas. Una cantidad relativamente pequeña de agua absorbe una gran cantidad de calor, con un aumento de temperatura relativamente pequeño. Por lo anterior, el agua es un enfriador muy útil, y se usa en los sistemas de enfriamiento de los automóviles y otros motores. Si se usara un líquido con menor capacidad calorífica específica en los sistemas de enfriamiento, su temperatura aumentaría más para lograr la misma absorción del calor.

También el agua se enfría con mucha lentitud, lo cual explica por qué antes se usaban botellas con agua caliente en las noches invernales frías. (En la actualidad

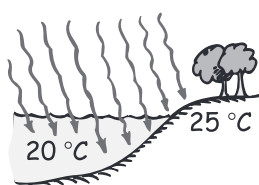


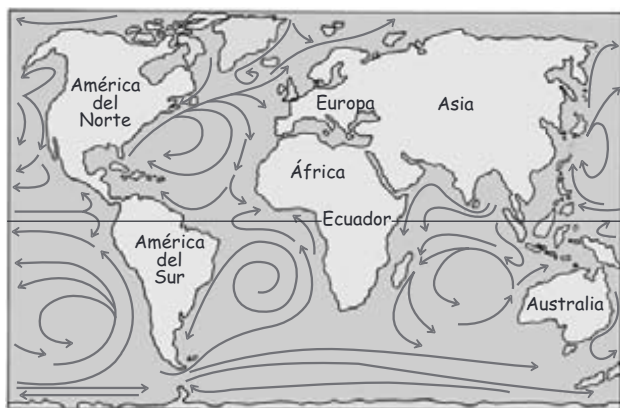
FIGURA 15.9

Como el agua tiene una gran capacidad calorífica específica y es transparente, se necesita más energía para calentarla que para calentar terrenos secos. La energía solar que incide sobre el terreno se concentra en la superficie, pero la que llega al agua penetra bajo la superficie y se “diluye”.

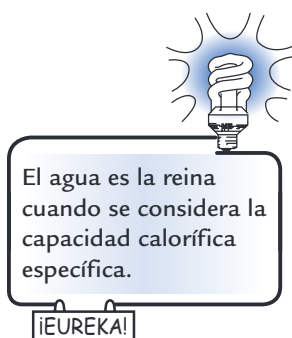
COMPRUEBA TU RESPUESTA

El agua tiene la mayor capacidad calorífica específica, tiene mayor inercia térmica, y le toma mayor tiempo entibiarse a la luz solar y enfriarse en una noche fría. La arena tiene menor capacidad calorífica, lo cual se manifiesta en la rapidez con la que se calienta la playa con el Sol durante el día, y en la rapidez con que se enfría por la noche. (A medio día, caminar o correr descalzo por arena muy caliente es una experiencia muy diferente que hacerlo durante la puesta del Sol.)

⁴ Si se conoce la capacidad calorífica específica c , la fórmula para calcular la cantidad de calor Q cuando una masa m de una sustancia sufre un cambio de temperatura ΔT es $Q = cm\Delta T$. O bien, calor transferido = capacidad calorífica específica $\times$ masa $\times$ cambio de temperatura.

**FIGURA 15.10**

Muchas corrientes oceánicas, que se representan con flechas, distribuyen el calor de las regiones ecuatoriales más cálidas, hacia las regiones polares más frías.



El agua es la reina cuando se considera la capacidad calorífica específica.

¡EUREKA!

**FIGURA 15.11**

La temperatura de las chispas es muy alta, cercana a los 2,000 °C. Es mucha energía por molécula en la chispa. Pero como hay pocas moléculas en la chispa, la energía interna es seguramente pequeña. La temperatura es una cosa; y otra la transferencia de energía.

se sustituyen con mantas eléctricas.) Esa tendencia del agua a resistir cambios de su temperatura mejora el clima de muchos lugares.

La próxima vez que veas un globo terráqueo, observa que Europa está muy al norte. Si el agua no tuviera una capacidad calorífica específica tan alta, los países europeos serían tan fríos como las regiones nororientales de Canadá, ya que Europa y Canadá reciben más o menos la misma cantidad de luz solar por kilómetro cuadrado. En el Atlántico, la Corriente del Golfo conduce agua tibia desde el Caribe hacia el noreste. Conserva gran parte de su energía interna el tiempo suficiente para alcanzar el Atlántico Norte en las costas de Europa, donde se enfría. La energía que desprende, aproximadamente 1 caloría por grado por cada gramo de agua que se enfría, pasa al aire, de donde es arrastrada por los vientos del oeste hacia el continente europeo.

En Estados Unidos hay un efecto parecido. Los vientos de las latitudes de América del Norte vienen del oeste. En la costa occidental, el aire entra del Océano Pacífico al continente. Debido a la gran capacidad calorífica específica del agua, la temperatura del océano no varía mucho entre el verano y el invierno. El agua es más caliente que el aire en el invierno, y más fría que el aire en el verano. El agua está más caliente que el aire en el invierno y lo contrario sucede en verano. En invierno, el agua calienta al aire que pasa sobre ella, y el aire calienta las regiones costeras de Norteamérica. En verano, el agua enfría al aire, que a la vez refresca las regiones costeras. En la costa oriental, el aire pasa del continente al Océano Atlántico. El continente tiene menor capacidad calorífica específica y se calienta en el verano; pero se enfría con rapidez en el invierno. Como resultado de la gran capacidad calorífica específica del agua, y de las direcciones de los vientos, San Francisco, ciudad de la costa oeste, es más cálida en invierno y más fría en verano que Washington, D.C., ciudad en la costa oriental que está más o menos a la misma latitud.

Las islas y las penínsulas que están rodeadas por agua en mayor o menor grado no tienen las mismas temperaturas extremas que se observan en el interior de un continente. Cuando el aire está caliente en los meses de verano, el agua lo enfría. Cuando el aire está frío en los meses de invierno, el agua lo calienta. El agua modera los extremos de temperatura. Son comunes las altas temperaturas de verano y bajas temperaturas de invierno en Manitoba y en las Dakotas, por ejemplo, y se debe en gran parte a la ausencia de grandes cuerpos de agua. Los europeos, los isleños y quienes viven cerca de las corrientes de aire cerca de los mares deberían estar felices de que el agua tenga esa capacidad calorífica específica tan alta. ¡Los habitantes de San Francisco sí lo están!

EXAMÍNA TE

¿Por qué una rebanada de sandía permanece fría durante más tiempo que los emparedados, si ambos se sacan al mismo tiempo de una hielera en el picnic de un día caluroso?

COMPRUEBA TU RESPUESTA

El agua de la sandía tiene más “inercia térmica” que los ingredientes de los emparedados, y se resiste mucho más a los cambios de temperatura. Esta inercia térmica es su capacidad calorífica específica.