

Del Viento Divino a las máquinas térmicas: sobre la física de los huracanes

Sergio Cuevas García

Sergio Cuevas García es investigador del Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México y miembro de la Academia de Ciencias de Morelos.

Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.

Kamikaze

Entre las devastaciones causadas por fenómenos naturales, es difícil pensar en una calamidad mayor que el paso de un huracán. Comúnmente las afectaciones por estos fenómenos pueden abarcar extensas regiones de un país y destruir su infraestructura, causando daños que perduran por largo tiempo, como ocurre en los conflictos bélicos. Resulta por tanto inaudito que un huracán se agradezca como un regalo de los dioses. El profesor Kerry Emmanuel relata en su libro "Viento Divino" [1], la historia de la invasión mongola a Japón en el siglo XIII comandada por Kublai Khan, nieto de Gengis Khan, quien, al convertirse en emperador de Mongolia, conquistó el norte de China y la península coreana, proyectando su ánimo expansionista hacia Japón. Después de que sus demandas de sometimiento fueron rechazadas por los japoneses, el 19 de noviembre de 1274, Kublai Khan comandó una primera invasión a Japón con una armada de 40,000 hombres transportada desde Corea en cerca de 900 barcos construidos y piloteados por expertos coreanos. Al desembarcar en las costas japonesas, el ejército mongol, superior en tropas y armamento, hizo retroceder fácilmente a los defensores hacia el interior, quienes ansiaban un retraso en la invasión mongola que permitiera el arribo de refuerzos. Al anochecer, los marinos coreanos sintieron que una tormenta se aproximaba y rogaron a los comandantes mongoles ordenar el regreso de las tropas invasoras al mar antes de quedar atrapados en la costa y sus barcos anclados destruidos. Por la mañana, los japoneses se regocijaron al ver a la armada mongola luchando por llegar a mar abierto en medio de un gran tifón que ocasionó alrededor de 13,000 muertos y la destrucción de gran parte de la flota. El segundo intento de invasión mongola a Japón ocurrió después de que Kublai Khan logró someter a las provincias rebeldes del sur de China, unificando el inmenso territorio bajo su dominio. Nuevamente Kublai trató de intimidar a Japón mediante el envío de emisarios que fueron ejecutados por los japoneses, haciendo inminente una nueva invasión. Los japoneses se prepararon construyendo fortificaciones en las costas para contener a una armada que esta vez escaló a 40,000 mongoles, coreanos y chinos que partieron de Corea y una segunda fuerza de cerca de 100,000 hombres que zarparon de distintos puertos al sur de China. Aunque el plan era unir a las dos armadas en primavera antes de la temporada de tifones, el retraso de la armada sureña pospuso la invasión hasta

finales de junio de 1281. Al arribar a las costas japonesas encontraron una feroz resistencia de los guerreros samuráis quienes mantuvieron a raya a los invasores durante seis semanas hasta que el 15 y 16 de agosto se repitió la historia cuando un tifón golpeó la costa. En su intento por alcanzar el mar de forma descoordiada, la mayor parte de la flota fue destruida por el tifón y aunque Kublai logró escapar, dejó morir a sus hombres a merced de la tormenta y los samuráis. Nunca más intentó una nueva invasión. Las derrotas de Kublai Khan ocasionadas por los tifones llevaron a los japoneses a considerar estos fenómenos como un "viento divino", o kamikaze, enviado por los dioses para vencer a los invasores [1].

Ciclones tropicales

Los tifones son ciclones tropicales que se desarrollan en el sur y occidente del océano Pacífico, así como en el océano Índico, mientras que se denomina huracanes a los ciclones tropicales que se forman en el norte del océano Atlántico, el noreste del Pacífico, el mar Caribe y el Golfo de México. Aunque la humanidad ha enfrentado a estas tormentas desde hace miles de años, en las últimas décadas han cobrado mayor importancia debido al incremento en su número y a su creciente poder devastador. Dentro de la comunidad científica existe un acuerdo casi unánime de que éste es uno de los muchos efectos causados por la alteración del clima ocasionada por la acumulación de dióxido de carbono o CO₂ en la atmósfera producto de la actividad humana, lo que conocemos como cambio climático antropogénico. Siendo el clima un sistema complejo [2], comprender su dinámica y ser capaces de modelarlo se ha convertido en una tarea científica de importancia vital para predecir los escenarios que se vislumbran a corto y mediano plazo, con el fin de concientizar a la población e influir en los tomadores de decisiones sobre las medidas que requieren implementarse para mitigar lo que se vislumbra como un desastre planetario si no se actúa de manera correcta. En el caso particular de los huracanes, en la medida en que comprendamos su comportamiento y podamos hacer mejores predicciones sobre su formación, intensidad y trayectoria seremos capaces de tomar medidas de precaución, alertar a la población y reducir al mínimo los daños ocasionados.

Las máquinas térmicas

Pero ¿cómo adentrarse en el estudio de un sistema tan complejo como lo es el clima de nuestro planeta y entender fenómenos tan intrincados como son los huracanes? La

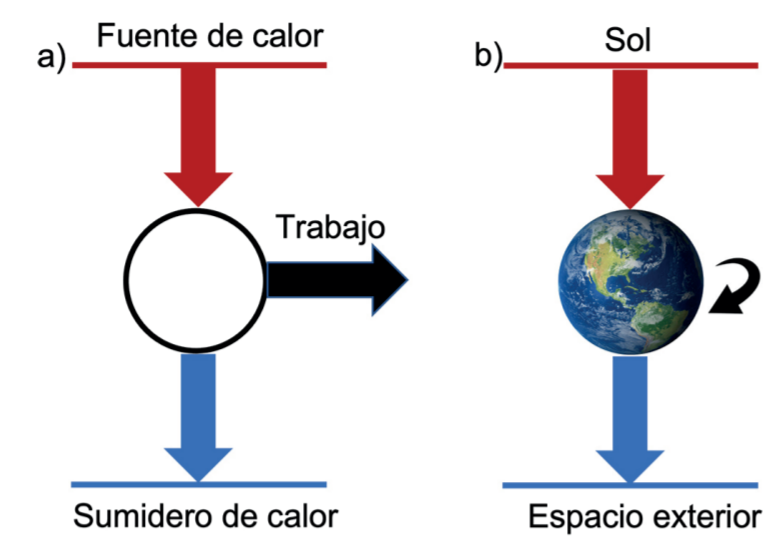


FIGURA 1. A) Una máquina térmica común transforma el calor en trabajo (por ejemplo, movimiento) y desecha parte del calor. **b)** La máquina térmica terrestre recibe calor del Sol y realiza trabajo internamente, produciendo la circulación atmosférica y las corrientes oceánicas y emitiendo calor hacia el espacio exterior. Para mantener una temperatura promedio constante en la Tierra, el calor recibido debe igualarse con el calor irradiado. (Diseño personal)

puesta se encuentra, en parte, en el poder de abstracción de la ciencia. Si bien es la observación detallada y la recopilación de datos lo que permite caracterizar un fenómeno físico, su comprensión profunda y la posibilidad de realizar predicciones solo se presenta cuando la observación se expresa en términos abstractos. Además, una abstracción puede ser útil para la comprensión de múltiples fenómenos, lo que le confiere una característica de generalidad. Tal es el caso de un concepto surgido de la termodinámica durante la Revolución Industrial: las máquinas térmicas. En esencia, una máquina térmica es un dispositivo que transforma el calor en energía utilizable, por ejemplo, energía de movimiento o energía eléctrica. Comúnmente, este concepto se asocia con las máquinas de vapor, que le dieron origen en el Siglo XIX, o bien con los motores de combustión interna y las plantas termoeléctricas. De manera general, una máquina térmica se compone de tres elementos: una fuente de energía de alta temperatura, un dispositivo que convierte el calor en trabajo (válvulas, pistones, turbina, etc.) a través de un fluido de trabajo (por ejemplo, el vapor o los gases de combustión) y un sumidero frío a donde se descarta la energía no utilizada en forma de calor, que podría ser el mismo medio circundante a la máquina. Una característica fundamental de las máquinas térmicas es su funcionamiento cíclico, que involucra una secuencia de procesos que implican la transferencia de calor y trabajo, regresando eventualmente el sistema a su estado inicial. Así, en el motor de un automóvil ordinario, por ejemplo, la energía liberada en forma de calor mediante la combustión de la gasolina se transforma en trabajo, es decir, en movimiento del auto, cada

vez que los gases de la combustión se comprimen y expanden dentro de los pistones, mientras que las diversas piezas del motor que elevan su temperatura durante el proceso ceden su calor hacia el ambiente.

Sadi Carnot

Durante las primeras décadas del Siglo XIX, cuando la superioridad inglesa se desplegaba en la industrialización y el desarrollo tecnológico con grandes ventajas económicas y militares, un joven ingeniero francés llamado Sadi Carnot (1796-1832), deseoso de mejorar la competitividad de su país, se adentró en el estudio de las máquinas de vapor, en particular, tratando de comprender las restricciones en la eficiencia de dichas máquinas. Entre las calderas, válvulas, tubos y pistones, Carnot fue capaz de abstraer la esencia del funcionamiento del sistema que estaba analizando para lo que ideó una máquina térmica perfecta -que ahora conocemos como la máquina de Carnot- que funciona entre dos fuentes de temperatura constantes en donde un gas realiza un proceso cíclico de compresión y expansión, absorbiendo calor de la fuente de alta temperatura, convirtiendo parte de ese calor en trabajo útil y desechando parte del calor hacia la fuente fría siguiendo un ciclo termodinámico denominado el ciclo de Carnot. Encontró que la eficiencia de una máquina térmica perfecta depende únicamente de la temperatura a la cual se aporta el calor de la fuente caliente y de la temperatura a la cual se desecha en el sumidero frío y, además, determinó la máxima eficiencia a la que puede trabajar la máquina operando entre estas dos temperaturas. La máquina de Carnot es la máquina térmica más eficiente teóricamente posible [3].

El resultado de Carnot se aplica a todas las máquinas térmicas, no solo a las de vapor, incluidas aquellas que no han sido creadas por la humanidad. De hecho, esta abstracción es extremadamente útil para entender el funcionamiento de la Tierra. A escala planetaria, el clima puede entenderse como una enorme máquina térmica que es calentada por la absorción de radiación solar y enfriada por la emisión de radiación hacia el espacio exterior [4]. A diferencia de una máquina térmica común que transforma parte del calor en un trabajo útil que se suministra a un sistema exterior (por ejemplo, a las ruedas de un vehículo o a las aspas de una turbina), la Tierra no impulsa ningún sistema externo, sino que los océanos y la atmósfera realizan trabajo sobre sí mismos y entre sí, dando lugar a la circulación atmosférica y a las corrientes oceánicas [4] (ver figura 1). Veamos con más detalle el balance de energía que hace funcionar a la máquina térmica atmosférica y particularmente a los huracanes.

El efecto invernadero

Nuestra principal fuente de energía proviene del Sol, la cual se transporta a la Tierra mediante radiación electromagnética, en parte manifestada como luz visible. Pero si la Tierra no perdiera parte de la energía recibida por el Sol, se calentaría indefinidamente. Al igual que todos los objetos, la Tierra irradia energía y lo hace emitiendo radiación infrarroja, que es una forma de luz con longitud de onda mayor que la que puede percibir el ojo humano. Para que la temperatura de la Tierra permanezca constante, un simple balance planetario establece que la energía irradiada por la Tierra debe ser igual a la energía que absorbe proveniente del Sol. De este balance

se obtiene una temperatura terrestre muy baja, del orden de -23 C (250 K). A esta temperatura la vida en la Tierra como la conocemos no sería posible ni tampoco la presencia de los huracanes. Existe por tanto otro mecanismo atmosférico que nos permite gozar de una temperatura promedio más alta: el efecto invernadero. Veamos cómo funciona. El oxígeno y el nitrógeno, los principales componentes de la atmósfera, constituyen juntos el 98% del aire y no tienen ningún efecto sobre el paso de la luz visible o la radiación infrarroja. La absorción y emisión de radiación en la atmósfera se debe a unos pocos gases llamados gases de invernadero, tales como el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano y el óxido nítrico, que forman menos del 1% del aire. Cuando estos gases absorben radiación infrarroja, principalmente de la proveniente de la superficie terrestre y las capas bajas de la atmósfera, la reemiten en todas direcciones. Mientras que la radiación emitida hacia arriba abandona la atmósfera, la que se emite hacia abajo se absorbe por la superficie de la Tierra. De hecho, la superficie terrestre recibe energía radiante de dos fuentes, por un lado, directamente del Sol, y por otro, de la radiación reemitida por los gases de invernadero y las nubes. Por tanto, para que la superficie de la Tierra irradie suficiente calor que equilibre tanto la radiación del Sol como la reemitida por la atmósfera y las nubes, se debe calentar a una temperatura suficientemente alta. El calentamiento de la superficie terrestre por la radiación de rebote o retro-radiación de la atmósfera es lo que se denomina efecto invernadero [5].

El vapor de agua es el gas de invernadero más importante y su concentración tiene un límite superior

determinado por la temperatura del aire. Cuando la temperatura se incrementa, la cantidad de vapor de agua también aumenta y por ser gas de invernadero, se incrementa también la retro-radiación, lo que eleva la temperatura de la superficie terrestre. Pero el ciclo del agua es relativamente rápido ya que ésta se intercambia constantemente entre la atmósfera y la superficie de la Tierra a través de la evaporación y la precipitación. Por su parte, el ciclo natural del dióxido de carbono o CO₂, que es el gas de invernadero que sigue en importancia, va de decenas a cientos de millones de años. Aunque el CO₂ se intercambia entre la atmósfera, los océanos y las plantas terrestres en una escala de tiempo mucho menor, no es posible absorberlo en su totalidad y el remanente puede tomar miles de años en ser removido del aire. Por tanto, los gases de invernadero de vida larga, como el dióxido de carbono, tienen una influencia muy importante en el clima [4,5].

Los huracanes como máquinas térmicas

La formación de un huracán requiere de condiciones particulares de temperatura de la superficie del océano (mayor a 26 C) y velocidad de las corrientes atmosféricas, las cuales están relacionadas con la rotación de la Tierra. Estas condiciones se presentan en regiones cercanas a los trópicos donde corrientes atmosféricas de pequeña escala se pueden organizar y dar lugar a remolinos o vórtices que eventualmente pueden llevar a la formación de un huracán. Cuando la velocidad máxima del viento de una tormenta tropical supera los 32 m/s (116 km/h) se le denomina huracán. La anchura de un huracán puede variar de decenas a cientos de kilómetros

y puede extenderse a una altura de 10 a 18 km, atravesando el espesor completo de la troposfera. Los huracanes tienen una zona central de baja presión, conocida como el ojo del huracán, donde la velocidad del viento es relativamente baja. Rodeando el ojo se encuentra un anillo profundo de nubes espesas llamado la pared del ojo donde se presentan los vientos más fuertes y la lluvia más intensa.

La mayor parte de la masa en rotación de nubes espesas está cubierta por un delgado velo de nubes muy altas. Por debajo de ella existen bandas profundas en forma de espiral de nubes cumulonimbus que producen fuertes lluvias y ráfagas de viento muy intensas lejos de la pared del ojo del huracán [1].

De acuerdo con el profesor Kerry Emanuel, un huracán maduro es un ejemplo casi perfecto de una máquina térmica de Carnot cuyo fluido de trabajo lo conforman una mezcla de aire seco, vapor de agua y agua condensada suspendida [6]. Esta máquina es alimentada por el flujo de calor que se presenta debido a que la superficie del océano y la atmósfera no se encuentran a la misma temperatura. Esta diferencia surge ya que, gracias al efecto invernadero, el océano debe transferir calor directamente a la atmósfera para equilibrar la absorción de la radiación solar y la radiación de retorno de la atmósfera y las nubes. Principalmente, es la evaporación del agua de mar, que transfiere energía del mar al aire, lo que impulsa la tormenta. Como resultado de esta transferencia de calor, el aire gira en espiral desde fuera hacia adentro incrementando su rapidez, mientras se mantiene en contacto con la superficie del océano y su temperatura permanece aproximadamente constante. La mayor parte del aire converge al ojo donde abruptamente asciende dentro de la pared, expandiéndose prácticamente sin recibir calor. Lejos del centro de la tormenta, en la región superior, parte del calor que se adquirió de la superficie del océano se emite en forma de radiación infrarroja al espacio, manteniendo su temperatura constante. Finalmente, el aire sufre una compresión sin absorber calor y desciende hacia la superficie del mar. Este proceso que se repite cíclicamente se asemeja al Ciclo de Carnot [1,6].

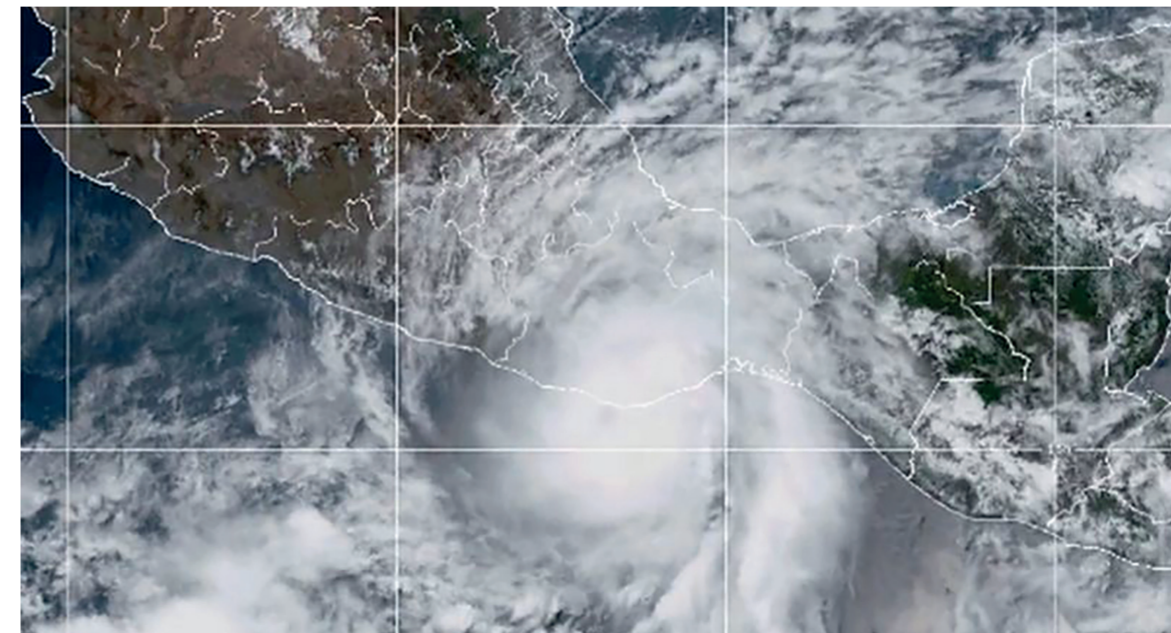
Comprender la física de los huracanes va más allá de un mero interés científico pues conforme se incrementa la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, la presencia de huracanes cada vez más destructivos será frecuente. La intensificación de los huracanes es solo una de las múltiples consecuencias del cambio climático, y siendo México un país particularmente susceptible a estos fenómenos, se trata de un asunto prioritario de seguridad nacional que requiere la formación de un mayor número de especialistas y el desarrollo de infraestructura para afrontar esta amenaza permanente.

Esta columna se prepara y edita semana con semana, en conjunto con investigadores morelenses convencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo social y económico de Morelos. Desde la Academia de Ciencias de Morelos externamos nuestra preocupación por el vacío que genera la extinción de la Secretaría de Innovación, Ciencia y Tecnología dentro del ecosistema de innovación estatal que se debilita sin la participación del Gobierno del Estado.

La velocidad máxima de un huracán
Visualizando al huracán como una máquina de Carnot, el profesor Emanuel ha logrado estimar un límite superior para la velocidad del viento durante un huracán [1,6]. Como mencionamos, la fuente de



IMAGEN SATELITAL DE un huracán en el Golfo de México (cortesía de Pixabay)



SE ACERCA YA la temporada de huracanes 2023. En esta noticia del 30 de mayo 2022 se ve a Agathá, el primer huracán de la temporada en el Pacífico, que tocó tierra en el sur de México, donde se reportaron fuertes vientos e intensas lluvias. [HTTPS://WWW.BBC.COM/MUNDO/NOTICIAS-AMERICA-LATINA-6164055](https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-6164055)



ESTA PUBLICACIÓN FUE REVISADA POR EL COMITÉ EDITORIAL DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS

Para actividades recientes de la academia y artículos anteriores puede consultar: www.acmor.org.mx
¿Comentarios y sugerencias?, ¿Preguntas sobre temas científicos? [CONTÁCTANOS: editorial@acmor.org.mx](mailto:editorial@acmor.org.mx)

[1] Kerry Emanuel, Divine Wind: The History and Science of Hurricanes, Oxford, 2005.

[2] Premio Nobel de Física 2021. ¿Qué son los sistemas complejos? <https://www.bbc.com/mundo/noticias-58800340>

[3] Peter Atkins, The laws of thermodynamics, A very short introduction. Oxford, 2010.

[4] Martin S. Singh and Morgan E. O'Neil, Thermodynamics of the climate system, Physics Today, 75, 7, 30 (2022). <https://doi.org/10.1063/PT.3.5038>

[5] Kerry Emanuel, Climate Science and Climate Risk: A Primer, Massachusetts Institute of Technology (2006). <https://climateprimer.mit.edu/climate-primer.pdf>

[6] Kerry Emanuel, Hurricanes: Tempests in a greenhouse, Physics Today, 59, 8, 74 (2006).

<https://pubs.aip.org/physicstoday/article/59/8/74/398244/Hurricanes-Tempests-in-a-greenhouse-Greenhouse>

[7] Falko Judt, How strong can a hurricane get? Physics Today, 8 de Septiembre 2017. <https://doi.org/10.1063/PT.6.1.20170908a>