

# El giro de los huracanes y la gravedad n

**Alejandro Ramírez Solís**  
Facultad de Ciencias, Universidad  
Autónoma del Estado de Morelos.  
Miembro de la Academia de Ciencias  
de Morelos.

Siendo físico, ocurre que amigos o conocidos me preguntan cómo es posible que los astronautas en el Transbordador Espacial (TE) o en la Estación Espacial Internacional (EEI) estén en gravedad cero y si el hecho de que ésta sea nula se debe a que se encuentran en donde ya no hay atmósfera. Esta pregunta, bastante frecuente entre el público en general, tiene una respuesta que tiene que ver con las leyes de Newton, en particular con la primera y la segunda ley que relacionan la fuerza total sobre un objeto con su aceleración (o la ausencia de ésta). Para empezar es necesario aclarar que la ausencia de atmósfera no tiene absolutamente nada que ver con la ausencia de gravedad. Un ejemplo de esto es el caso de la Luna que carece de atmósfera, y donde la gravedad sobre su superficie es de aproximadamente 1/6 de la que existe sobre la superficie de la Tierra. Como Isaac Newton lo describió por primera vez, la aceleración de la gravedad, o simplemente gravedad (que se denota por  $g$  y se mide en  $m/s^2$ ) surge de la fuerza de atracción que ocurre entre un par de objetos con masa y decrece con el cuadrado de la distancia entre los objetos. Aquí

es necesario decir que la gravedad en el TE no es estrictamente cero; es realmente muy pequeña, del orden de 0.00001 veces la gravedad al nivel del mar ( $g=9.81 m/s^2$ ), pero no es exactamente cero. Sin embargo, para simplificar la explicación, supondremos que sí es cero. Ahora la pregunta es ¿cómo se logra anular la gravedad? Para responder a la pregunta tenemos que entrar en detalles más finos como la altura y la velocidad a la que vuela el TE ya que éstas están íntimamente ligadas y de ellas depende que la gravedad se anule o no.

Ahora viene un dato que resulta una sorpresa para la mayoría de la gente: el TE vuela realmente muy bajo, ya que orbita la Tierra a sólo 380 millas (608 km) de su superficie. ¿Por qué esto resulta realmente muy bajo? Por la sencilla razón de que el radio de la Tierra es de 6,384 km, lo que significa que la órbita tiene un radio sólo un décimo mayor que el radio terrestre. Así que, si consideramos que el tamaño de la Tierra es el mismo que el tamaño de un limón, el TE estaría volando sobre éste a sólo una altura de la piel del limón! Sin embargo, para lograr mantenerse a esta altura, el TE debe volar a la sorprendente velocidad de 28,286 km/h, o sea 7.86 km/s. Esto corresponde a darle una vuelta completa a la Tierra cada 90 minutos, por lo que los astronautas pueden disfrutar de 16 amaneceres y 16



Figura 1. Un huracán sobre Islandia en el hemisferio norte.

## CARTELERA CINES

VIGENCIA DEL VIERNES 19 AL JUEVES 25 DE AGOSTO DE 2011

### DIANA

LOCO Y ESTUPIDO AMOR 12:45 / 15:15 / 17:40 / 20:05 / 22:30  
LINTERNA VERDE ING 11:40 / 14:00 / 16:20 / 18:40 / 21:00  
ASI ES LA SUERTE 11:50 / 13:50 / 15:55 / 17:55 / 19:55 / 21:55  
MEDIA NOCHE EN PARIS 11:00 / 13:00 / 15:00 / 17:20 / 19:20 / 21:20  
EL REY LEON 3D 12:15 / 14:10 / 16:10 / 18:20 / 20:20 / 22:15  
LINTERNA VERDE 3D ESP 11:25 / 13:45 / 16:05 / 18:25  
LINTERNA VERDE 3D ING 20:40 / 23:00  
LOS PITUFOS 12:30 / 14:40 / 16:50 / 19:00  
QUIERO MATAR A MI JEFE 21:10  
LOS PITUFOS 3D ESP 11:00 / 13:10 / 15:20 / 17:30 / 19:40 / 21:50  
LINTERNA VERDE ESP 12:00 / 14:30 / 17:00 / 19:30 / 22:00  
LINTERNA VERDE ESP 11:00 / 13:15 / 15:45 / 18:15  
PERSECUCION MORTAL 20:45 / 22:50  
CAPITAN AMERICA ESP 11:30 / 14:05 / 16:35 / 19:05  
CAPITAN AMERICA ING 21:35  
SUPER 8 ESP 11:20  
SUPER 8 ING 13:40 / 16:00 / 18:30 / 20:50 / 23:05

### JACARANDAS

LOS PITUFOS 3D ESP 12:00 / 14:20 / 16:40 / 19:00 / 21:20  
LOCO Y ESTUPIDO AMOR 11:20 / 14:00 / 16:30 / 18:55 / 21:40  
LINTERNA VERDE 3D ESP 11:35 / 14:05 / 16:35 / 19:05 / 21:35  
LOS PINGUINOS DE PAPA ESP 11:40  
CAPITAN AMERICA ESP 14:15 / 16:50 / 19:30 / 22:00  
HARRY POTTER 7 FINAL ESP 20:15 / 22:45  
LOS PITUFOS 11:05 / 13:25 / 15:45 / 18:05  
SUPER 8 ESP 12:15 / 14:45 / 17:15  
LINTERNA VERDE ESP 19:45 / 22:15  
LINTERNA VERDE ESP 11:00 / 13:30 / 16:00 / 18:30 / 21:00  
ASI ES LA SUERTE 11:30 / 13:45 / 16:10 / 18:15 / 20:20 / 22:30  
ACTIVIDAD PARANORMAL EL ORIGEN 11:10 / 13:10 / 15:10 / 17:10 / 19:10 / 21:10  
LA LEYENDA DEL TESORO 11:00 / 13:00 / 15:00 / 17:00 / 19:10 / 21:05 / 23:00

### CINEMEX CUAUTLA

SUPER 8 ESP 12:20 / 14:45 / 17:10  
SUPER 8 ING 19:25 / 21:50  
LOS PITUFOS 3D ESP 11:30 / 13:40 / 15:50 / 18:05 / 20:10 / 22:20  
LA LEYENDA DEL TESORO 11:15 / 13:10 / 15:00 / 17:00 / 19:00 / 20:55 / 22:50  
HARRY POTTER 7 FINAL ESP 21:55  
LOS PITUFOS 11:05 / 13:15 / 15:25 / 17:35 / 19:45  
LOS PITUFOS 12:00 / 14:30 / 16:30 / 18:40 / 20:50  
QUIERO MATAR A MI JEFE 23:00  
LINTERNA VERDE ESP 11:00 / 13:20 / 15:40 / 18:00 / 20:20 / 22:40  
LINTERNA VERDE ESP 12:10 / 14:30 / 16:50  
LINTERNA VERDE ING 19:10 / 21:30  
LINTERNA VERDE 3D ESP 11:40 / 14:00 / 16:15 / 18:30 / 21:00  
ACTIVIDAD PARANORMAL EL ORIGEN 12:30 / 14:20 / 16:10 / 18:00 / 19:50 / 21:40  
ASI ES LA SUERTE 11:35 / 13:30 / 15:30 / 17:30 / 19:30 / 21:40  
LOS PINGUINOS DE PAPA ESP 11:50  
CAPITAN AMERICA ESP 14:15 / 16:40 / 19:05 / 21:35  
LOCO Y ESTUPIDO AMOR 11:10 / 13:30 / 15:55 / 18:15 / 20:30 / 22:45

puestas de sol al día. Para saber cómo esta velocidad es capaz de anular la gravedad a esa altura es necesario recordar que cualquier objeto que sigue una trayectoria curva siente la conocida "fuerza centrífuga". Esta "fuerza" tiende a sacar al objeto de su trayectoria curva para hacerlo seguir una línea recta en cada punto de la curva. En realidad la fuerza centrífuga no es una fuerza real, sino una fuerza ficticia o *pseudofuerza*, ya que sólo "aparece" cuando describimos la situación desde un sistema de referencia no inercial respecto al cual se mueve el objeto. Se le denomina no inercial porque se trata de un sistema de referencia acelerado ya que sigue una trayectoria curvilínea, a dife-

rencia de un sistema inercial que se encuentra en reposo o bien se mueve en línea recta a velocidad constante. Cuando describimos un movimiento desde la Tierra, en constante rotación y traslación, lo hacemos desde un sistema no inercial. Si describimos lo que sucede desde un sistema inercial, por ejemplo en reposo, bastaría con decir que la fuerza centrípeta (que sí es real) le impide al objeto seguirse en línea recta. El ejemplo más parecido (y cercano a nuestra experiencia) al TE en órbita es el de una piedra amarrada a una cuerda en una honda. Podemos hacer girar la piedra en una órbita circular sin que la piedra se acerque o se aleje de nosotros porque la fuerza TOTAL a la que está sujeta (desde

el sistema no inercial en rotación) es cero: la fuerza de tensión que ejerce la cuerda hacia el centro se anula exactamente con la fuerza centrífuga creada por la rotación alrededor de nosotros. En el caso del TE ocurre lo mismo, con la diferencia de que la fuerza de tensión de la cuerda está substituida por el peso del TE. La fuerza que ejerce la Tierra sobre el TE (su peso) hacia abajo se cancela exactamente por la fuerza centrífuga (opuesta) que genera la rotación alrededor de la Tierra. El peso es simplemente el producto de la masa del TE por el valor de la gravedad a 608 km de altura ( $8.83 m/s^2$  y que equivale a 0.9 veces  $g$  en la superficie de la Tierra) mientras que la fuerza centrífuga es el producto de la masa por el cuadrado de la velocidad

# ula en órbita: pseudofuerzas en acción



punto que se mueve en el cielo que, además, desaparecería de nuestra vista la mitad del tiempo. La geoestacionareidad implica que el satélite debe tener la misma velocidad de rotación que la Tierra (una vuelta completa cada 24 horas) para estar siempre sobre un mismo punto en la Tierra. Esto es lo que lleva a la necesidad de poner los satélites mucho más alto, a 35,786 km sobre la superficie pero volando menos rápido (3.07 km/s) que el TE, lo que mantiene al satélite a la misma altura todo el tiempo.

Aquí podemos ligar nuestra historia de la fuerza centrífuga con otra pseudofuerza que tal vez sea menos conocida por el público, pero no por eso es menos importante. Esta fuerza es la responsable de que los huracanes giren en contra de las manecillas del reloj en el hemisferio norte, mientras que lo hacen en sentido contrario en el hemisferio sur (figura 1). Se trata de la "fuerza de Coriolis", nombrada así en honor del científico francés Gaspard Gustave Coriolis. Coriolis observó de manera sistemática que los cañonazos tirados a larga distancia terminaban siempre a la derecha de donde se había apuntado el cañón y que la desviación respecto al blanco aumentaba con el tiempo de vuelo de la bala. Poco después de su observación, Coriolis publicó la expresión matemática de esta pseudofuerza en 1835. Como en el caso

de la fuerza centrífuga, la fuerza de Coriolis es también una pseudofuerza pues sólo hay que considerarla cuando el movimiento se describe desde un sistema de referencia no inercial, como es el de la Tierra rotando sobre su eje. Esta fuerza es proporcional a la velocidad de rotación angular del sistema de referencia así como a la velocidad del objeto que se mueve; además resulta ser perpendicular a las direcciones de ambas velocidades, que se caracterizan mediante vectores. Dado que la Tierra gira de oeste a este, el vector de velocidad angular de la Tierra apunta del polo sur al polo norte pero tiene una magnitud muy pequeña (0.0000727 radianes/s). El valor tan pequeño viene del hecho de que la Tierra da una vuelta cada día ( $360^\circ$  o  $2\pi$  radianes en 86,400 segundos), por lo que la fuerza de Coriolis es despreciable en la mayoría de los casos. Sin embargo, cuando los objetos se mueven muy rápido o los periodos del movimiento son muy largos, el efecto de Coriolis se acumula, haciéndolo visible. El primer caso lo cumplen las balas de cañón y misiles de mediano y largo alcance intercontinentales (volando a más de 3-5 km/s) y, el segundo, lo cumplen las masas de aire de la atmósfera que, aunque son mucho más lentas, se mueven durante días o semanas sobre la Tierra.

En 1908 el físico Austríaco Otto Tumlirz describió experimentos

cuidadosos que demostraron el efecto de la rotación de la Tierra en el flujo de agua saliendo de un recipiente por un orificio central. Años más tarde, el artículo que popularizó el efecto de Coriolis fue publicado en la revista *Nature* y describía una serie de experimentos donde todas las fuerzas, excepto la de Coriolis, fueron anuladas. Se llenó un tanque de 1.8 m de altura con 1,100 litros de agua y se le dejó reposar por 24 horas (para asegurar que no había movimiento alguno del agua al iniciar el experimento) en un cuarto donde la temperatura y la presión fueron estabilizadas. El pequeño tapón del fondo fue removido verticalmente con una velocidad mínima controlada y se colocaron pequeños trozos de corcho en la superficie para observar la rotación del líquido. Durante los primeros 12-15 minutos, ninguna rotación fue observada. Luego un vórtice o remolino apareció y en todos los experimentos giraba en contra de las manecillas del reloj (el experimento fue hecho en el hemisferio norte, en Boston, EUA). El experimento fue repetido muchas veces y los resultados se promediaron para asegurarse que el efecto observado fuera real. La diferencia en la dirección de rotación del agua saliendo de una tina en ambos hemisferios ha sido popularizada de manera poco realista en la TV por las series "Los Simpsons" y los "Archivos-X". Aquí debemos

hacer énfasis en que el efecto de Coriolis ocasionado por la rotación de la Tierra, por ser tan pequeño para velocidades bajas, puede ser anulado por muchos otros factores, como la forma del recipiente, la velocidad inicial del líquido y las posibles asimetrías o imperfecciones del recipiente, lo que hace imposible verificarlo realmente en nuestra tina en casa. De hecho, los resultados de estos experimentos suelen ser muy polémicos cuando no se toman las medidas necesarias para realizarlos de manera científica. Sin embargo existe una forma muy sencilla en la cual todos podemos verificar el efecto Coriolis, simplemente aumentando la velocidad de rotación del sistema no inercial. Para esto es necesario subirse a un carrusel y lanzar desde la orilla una pelota hacia el centro del carrusel. Si el carrusel no gira la bola irá directamente al centro, pero si el carrusel está girando, veremos que la pelota irá desviándose hacia la derecha o a la izquierda, dependiendo si el carrusel gira con o en contra de las manecillas del reloj. La figura 2 muestra un esquema del experimento visto desde afuera (figura izquierda) o desde dentro del carrusel (figura derecha). Las páginas [http://www.youtube.com/watch?v=\\_36MiCUS1ro](http://www.youtube.com/watch?v=_36MiCUS1ro) y <http://www.youtube.com/watch?v=nDhOKR6gKzc&feature=r> elated muestran claramente el efecto de Coriolis.

tangencial dividido entre el radio de la órbita. Este producto anula exactamente el peso cuando se vuela a 608 km de altura y la velocidad es de 7.86 km/s, lo que produce la sensación de gravedad nula en el TE.

Como hemos visto, la anulación de la gravedad requiere del balance fino entre el radio de la órbita y de la velocidad a la cual se vuela, por lo que para poner un satélite geoestacionario en órbita, se requiere de mucha mayor altura pero menor velocidad. La condición de geoestacionareidad es crucial para la mayoría de los satélites, dado que es mucho más simple apuntar las antenas en Tierra a un mismo punto en el espacio que andar siguiendo un

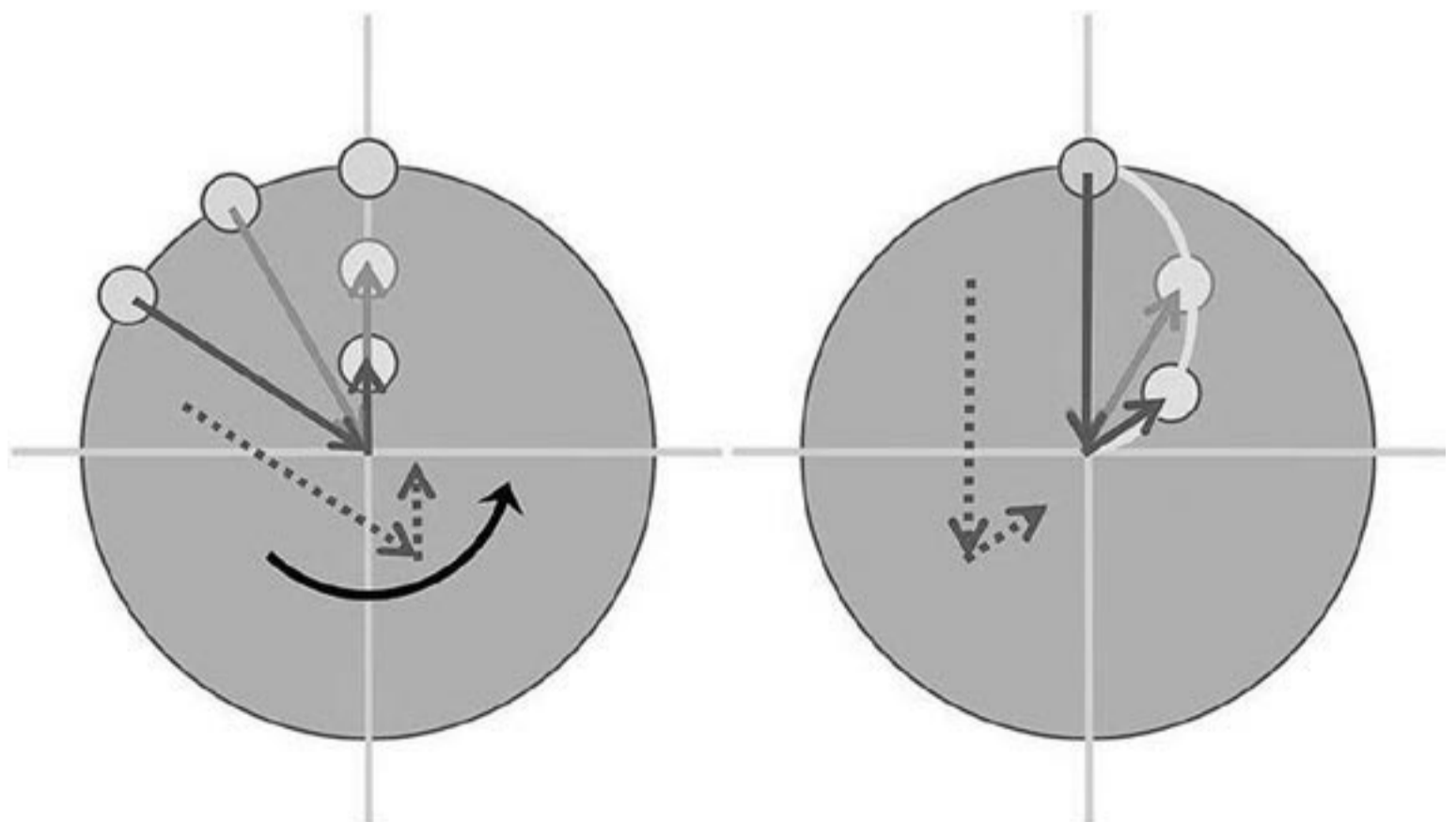


Figura 2. El efecto de Coriolis mostrado con pelota rodando sobre un carrusel.