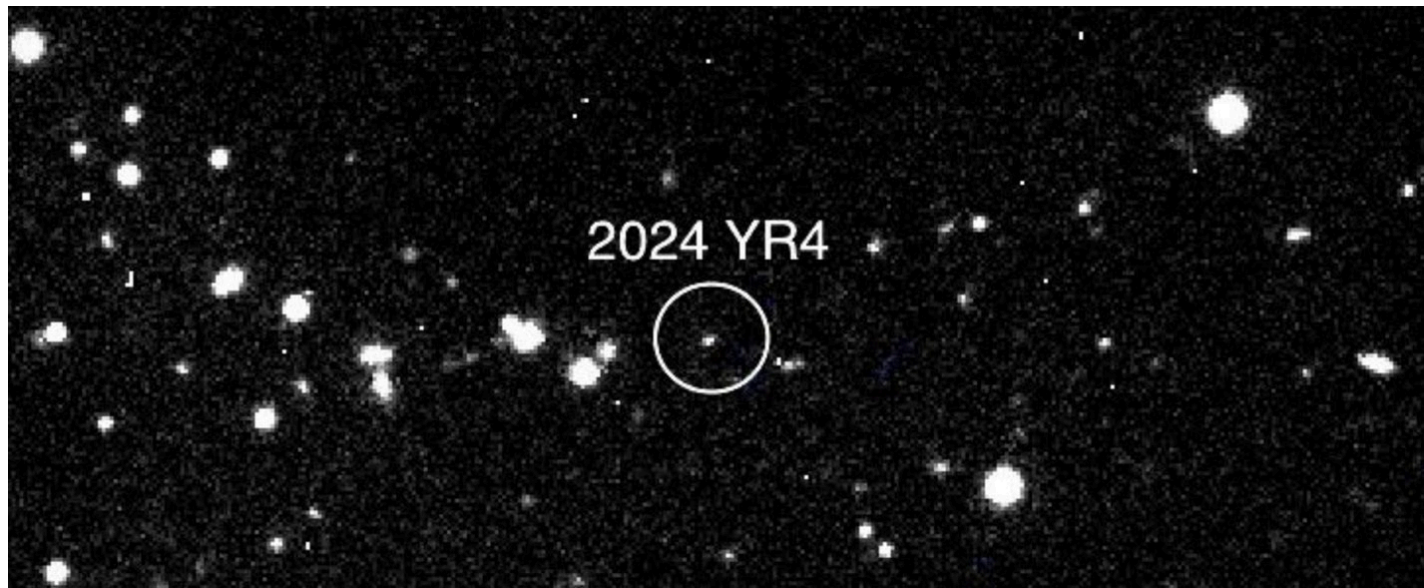


EL POTENCIAL DAÑO A LA RED DE SATELITES SI SE LLEGA A PRODUCIR UN IMPACTO DEL ASTEROIDE 2024 YR4 CONTRA LA LUNA

JHONNY E. CASAS¹

¹ Escuela de Petróleo y Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela



El asteroide 2024 YR4 es el objeto más pequeño observado por el telescopio Webb hasta la fecha

INTRODUCCION

El asteroide 2024 YR4, que durante varias semanas ocupó los titulares mundiales por su potencial amenaza a la Tierra, ha redirigido su atención hacia la Luna. Un reciente ajuste en su órbita, gracias a una última y oportuna observación del telescopio James Webb, ha elevado la probabilidad de impacto contra nuestro satélite del 3,8% al 4,3%. El incremento del 20% en la precisión de su trayectoria para el 22 de diciembre de 2032 proviene de una única observación adicional, obtenida justo antes de que el objeto se desvaneciera de la vista de los telescopios terrestres y orbitales.

2024 YR4 es un asteroide de entre 40 y 90 metros de diámetro, clasificado como un objeto cercano a la Tierra de tipo Apolo (que cruza la órbita de la Tierra). Fue descubierto por la estación chilena del Sistema de Última Alerta de Impacto Terrestre de Asteroides (ATLAS) el 27 de diciembre de 2024. En fecha 23 de febrero de 2025, 2024 YR4 tenía una calificación de 3 en la escala de Turín con una probabilidad de 1 en 26.000 (0.0039%) de impactar en la Tierra el 22 de diciembre de 2032. Sin embargo, a medida que se realizaron más observaciones del asteroide y se agregaron esos datos a los cálculos de su órbita, comenzó a aumentar

levemente la probabilidad de impacto, pero pocos días después los cálculos más precisos indicaban que 2024 YR4 no tenía ninguna probabilidad significativa de impactar contra la Tierra ni en 2032 ni en años subsiguientes.

El diámetro de 2024 YR4 no ha sido posible medirlo, pero se puede estimar a partir de su brillo (magnitud absoluta) utilizando un rango de valores plausibles para su reflectividad superficial (albedo geométrico). Si 2024 YR4 refleja entre el 5% y el 25% de la luz visible, entonces su diámetro está entre 40 y 100 m.

El asteroide tiene un período orbital de aproximadamente 4,05 años y una inclinación orbital de 3,45 grados con respecto a la órbita de la Tierra. Su futura aproximación en el 2028 brindará a los astrónomos la oportunidad de realizar observaciones adicionales y extender el arco de observación por cuatro años. Esto mejorará en gran medida los cálculos de la órbita de 2024 YR4 en preparación para su aproximación a nuestro planeta, alrededor del 22 de diciembre de 2032.

POSIBLE IMPACTO LUNAR?

Para marzo de 2025, los astrónomos habían descartado un impacto con la Tierra en el 2032. Sin embargo, las observaciones finales del asteroide no lograron descartar otra posibilidad intrigante: un impacto lunar. Según los últimos cálculos, el 22 de diciembre de 2032, el asteroide 2024 YR4 tiene un oco más de 4% de probabilidad de impactar la Luna a una velocidad de 13 Km/seg. Sin embargo, viendo el lado optimista, esto significa que hay un 96% de posibilidades de que el asteroide no impacte la Luna.

Dicho impacto podría liberar 6,5 MT de energía equivalente a TNT y produciría un cráter de aproximadamente 1 km de diámetro. Wiegert et al. (2025), estiman que en dicho impacto, podrían liberarse hasta 10^8 kg de material lunar al superar la velocidad de escape de nuestro satélite. Dependiendo de la ubicación real del impacto en la Luna, hasta un 10% de este material podría alcanzar la Tierra en escalas de tiempo de unos pocos días. La afluencia de partículas asociadas a la eyección lunar, con tamaños de 0,1 a 10 mm, podría producir algunos años, o incluso una década, de exposición equivalente al impacto de meteoroides en satélites, en el espacio cercano a la Tierra. Estos resultados alertan que las consideraciones de defensa planetaria que se han estado implementando y planificando las ultimas décadas, deberían extenderse más ampliamente al espacio lunar y no limitarse únicamente al espacio alrededor de la Tierra.

La principal preocupación de los científicos son las partículas eyectadas que superan el umbral de riesgo de impacto (0,1 mm) para satélites ubicados directamente en la órbita terrestre baja (LEO) en escalas de tiempo relativamente cortas (de días a algunos meses), y que también podrían representar un peligro para las naves espaciales. El trabajo de Wiegert et al. (2025), proporciona una estimación de un orden de magnitud, del efecto esperado a corto plazo de la eyección lunar en el espacio cercano a la Tierra, debido a un hipotético impacto de 2024 YR4 a finales del 2032.

Existen enormes incertidumbres de varios ordenes de magnitud, en el análisis de Wiegert et al. (2025), particularmente con respecto a las distribuciones de frecuencia de tamaño de la eyección en tamaños pequeños y la fracción de masa de la eyección, capaz de superar la velocidad de escape lunar. Dichos autores, para evaluar la población de partículas que podría

alcanzar la Tierra si 2024 YR4 impacta la Luna, tomaron en cuenta parámetros como:

1. La variedad de lugares en la Luna donde podría ocurrir el impacto.
2. El tamaño del cráter producido por el impacto.
3. La cantidad de material expulsado en el impacto, cuya velocidad es superior a la de escape lunar.
4. La distribución de frecuencias de tamaño de la eyección que escape.
5. La eficiencia de la eyección que escapa al espacio cercano a la Tierra.

En general, los impactos en la Luna producen eyección de material, una parte del cual puede escapar de la gravedad lunar. El trabajo de Melosh (1985) demostró que la separación de fragmentos debido a una onda compresiva cerca de la superficie durante los impactos lunares puede elevar una pequeña porción (~0,01%) de material por encima de las velocidades de escape. Estudios posteriores demostraron que la mayor parte de la masa del material eyectado a alta velocidad se encuentra en forma de fragmentos de tamaño entre μm y mm. Para un cráter de 1 kilómetro de diámetro, Wiegert et al. (2025), estiman que se desplacen $\sim 10^{11}$ kilogramos de masa del cráter. Utilizando el formalismo de la velocidad del material eyectado y un exponente de velocidad de ese mismo material de $\mu=0,41$, apropiado para material arenoso, los autores observan que solo entre el 0,02% y el 0,2% del material eyectado superaría la velocidad de escape lunar, lo que implica una liberación de $\sim 10^{7-8}$ kilogramos durante el impacto.

PROBABILIDAD DE IMPACTO

Para determinar la probabilidad de impacto lunar de 2024 YR4, se calcularon y simulon las trayectorias. Las simulaciones efectuadas por Wiegert et al. (2025), incluyeron los efectos del Sol, la Luna y todos los planetas con sus posiciones iniciales, a fin de calcular el rango de aproximación (Figura 1). Se ignoraron las fuerzas de radiación, ya que sus efectos son pequeños en partículas de estos tamaños, en estas escalas de tiempo. La solución orbital para 2024 YR4 fue obtenida por los mismos autores de la Base de Datos de Cuerpos Pequeños (SBDB) del Centro de Estudios de Objetos Cercanos a la Tierra (CNEOS) el 5 de junio de 2025. Esta solución incorpora observaciones del Telescopio Espacial James Webb (JWST), tomadas el 11 de mayo de 2025, probablemente las últimas observaciones que se pudieron realizar, y que aumentaron ligeramente la probabilidad de que 2024 YR4 impacte la Luna del 3,8 % al 4,3 %.

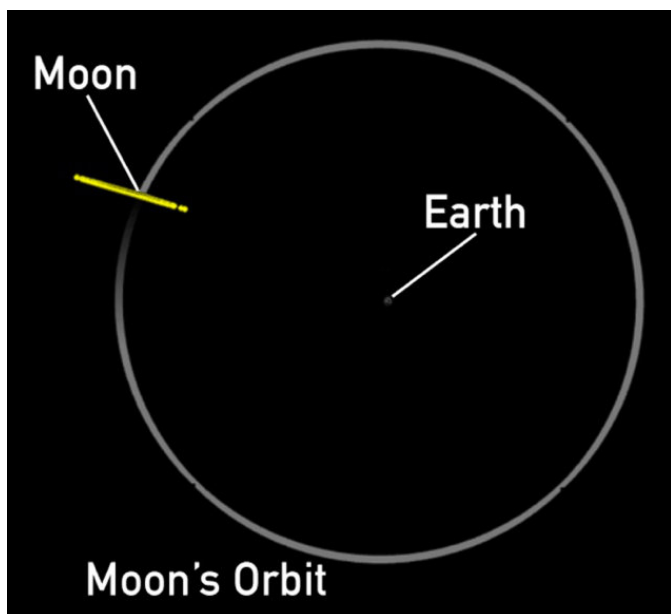


Figura 1. El rango de posibles ubicaciones, representadas por puntos amarillos, de 2024 YR4 para el 22 de diciembre de 2032. Fuente: NASA/JPL Center For Near-Earth Object Studies.

EL IMPACTO

Las simulaciones hechas por Wiegert et al. (2025), arrojan una probabilidad de impacto del 4,1 %, consistente con el valor mencionado y calculado anteriormente. El corredor de impacto, visto desde la Tierra, se presenta en la Figura 2; es decir, se representan 410 clones o posibilidades que impactan la Luna. El plano de la órbita de 2024 YR4 (Figura 3) es bien conocido, por lo que la dispersión a lo largo de la trayectoria es escasa, y la longitud de la trayectoria se debe a la incertidumbre sobre su ubicación precisa a lo largo de su órbita. Si se produce un impacto, este ocurrirá en el hemisferio sur, aproximadamente entre las latitudes 30S y 40S, y principalmente en la cara anterior de la Luna, aunque existe un 14 % de probabilidad de impacto en la cara posterior.

Sin embargo, el material expulsado del impacto en la Luna no ocurrirá isotrópicamente. La fracción que podría llegar directamente a la Tierra es muy sensible a la ubicación del impacto. Esta sensibilidad puede comprenderse cualitativamente. Dado que la Luna orbita la Tierra a aproximadamente 1 km/s, para que el material expulsado llegue rápidamente a la Tierra, el objeto impactante debe chocar con el borde de salida de la Luna de tal manera que la velocidad del material expulsado tras ascender del pozo gravitacional lunar anule en gran medida su velocidad orbital. Esto deja una partícula expulsada casi estacionaria con respecto a

la Tierra, lo que le permite caer directamente hacia nuestro planeta. Las partículas también pueden ser expulsadas en órbitas hiperbólicas que se dirijan directamente hacia la Tierra. Wiegert et al. (2025), demuestran que existe una probabilidad significativa de que 2024 YR4 (Figura 3), impacte en una porción de la Luna con una eficiencia de entrega a la Tierra superior al 10 % del material total expulsado, y que estos escombros se desplacen rápidamente en el espacio cercano a nuestro planeta.

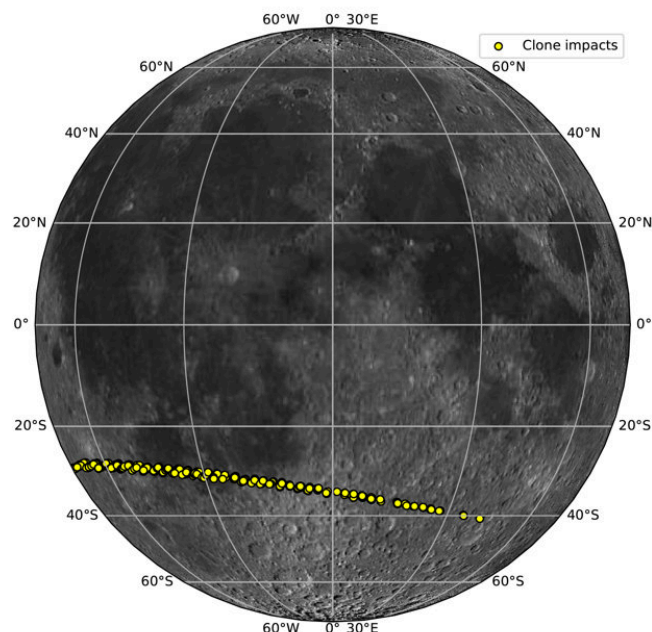


Figura 2. El corredor de impacto actual para 2024 YR4 (amarillo) proyectado en un mapa de la cara visible de la Luna desde el Orbitador de Reconocimiento Lunar. Fuente: Wiegert et al. (2025).

POSIBLES EFECTOS

La eyección de material de la Luna podría representar un grave peligro para naves espaciales en órbita lunar, pero probablemente representaría peligros aún mayores en caso de que hipotéticamente existiera cualquier operación desarrollada sobre la superficie lunar, dado que la mayor parte de la masa eyectada se acumulará en una amplia franja del satélite. Además del aumento del flujo eyectado en pocos días, también existe material que se alojara en órbitas terrestres de larga duración (meses o años) y que podría representar una preocupación constante para los activos espaciales.

Esto podría afectar las operaciones de plataformas espaciales sensibles a meteoroides durante períodos más largos, aunque cabe destacar que el Telescopio Espacial James Webb (JWST), que se espera que aún

permanezca operativo en el 2032, se encuentra en el punto L2 Sol-Tierra, que probablemente no sea afectado.

Wiegert et al. (2025), observan que la producción de eyecciones de tamaño centimétrica, y que puede ser la más dañina, es la más incierta, ya que se ve muy afectada por la elección del exponente de la ley de potencia de la densidad de flujo (SFD) de las eyecciones. Dados los valores de fluencia estimados por los mismos autores, la probabilidad de impacto de eyecciones lunares de tamaño centimétrico en cualquier superficie satelital se mantendría en el orden del 10 % o menos. Pero advierten que cuantificar con más precisión este rango superior en los restos de eyección es importante, ya que estos grandes impactos generalmente se consideran eventos que ponen fin a cualquier misión que esté en desarrollo y, en algunos escenarios, también podrían provocar la destrucción de satélites.

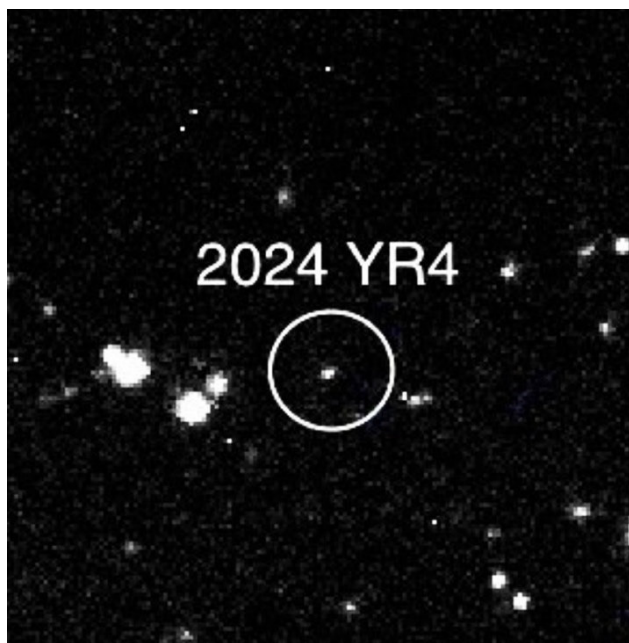


Figura 3. El 26 de marzo de 2025, el Telescopio Espacial James Webb de la NASA capturó imágenes del asteroide 2024 YR4 que indican que tiene el tamaño aproximado de un edificio de 15 pisos. Los investigadores también afirman que la superficie del asteroide podría estar dominada por rocas del tamaño de un puño o incluso mayores. El asteroide 2024 YR4 es el objeto más pequeño observado por el telescopio Webb hasta la fecha. Fuente: science.nasa.gov

Finalmente, la eyección lunar de velocidad relativamente baja que impactará la atmósfera podría brindar la oportunidad de tomar muestras atmosféricas

de estos escombros. Sin embargo, las simulaciones hechas por Wiegert et al. (2025), no esperan cantidades significativas de eyecciones de mayor tamaño (decimétrico-métrico) causadas por el impacto de 2024 YR4, dado el pequeño tamaño del cráter, por lo que es improbable (aunque no imposible) la presencia de meteoritos. Sin embargo, la masa aportada durante una semana por el impacto, de 10^{3-4} toneladas, superaría en varios órdenes de magnitud la masa diaria promedio de meteoroides que recibe el planeta, que es del orden de 10 a 50 toneladas. En este escenario, es probable que casi cualquier residuo acumulado en la atmósfera sea de origen lunar durante el período de sedimentación del polvo en la superficie terrestre. La lluvia de meteoros resultante podría durar varios días y ser de carácter espectacular, aunque la cantidad de meteoros visibles podría verse algo atenuada por la baja velocidad de entrada de la eyección en la atmósfera.

CONCLUSIONES

Si 2024 YR4 impacta la Luna (Figura 4) en 2032, será estadísticamente hablando, el mayor impacto en aproximadamente los últimos 5.000 años. La liberación de material eyectado que podría escapar de la Luna al espacio cercano a la Tierra es muy sensible a la ubicación precisa del impacto, pero el corredor de impacto, tal como lo ha modelado Wiegert et al. (2025), permite eficiencias de liberación de hasta un 10 %. Esto resultaría en flujos de partículas en la Tierra de 10 a 1.000 veces sobre los valores normales que recibe la Tierra, y podría producir exposiciones efectivas equivalentes a años en el espacio, en tan solo unos días. La lluvia de meteoros resultante en la Tierra podría ser llamativa, con tasas órdenes de magnitud superiores a las tasas de fondo habituales, pero la producción de luz de los meteoros se verá reducida por sus velocidades relativamente bajas al ingresar en la atmósfera.

El tiempo de viaje desde el impacto lunar hasta la Tierra suele ser de varios días, pero depende de la ubicación precisa del impacto, lo cual probablemente no se pueda determinar hasta que el asteroide vuelva a ser visible en el 2028. La persistencia de material en la órbita terrestre durante períodos más prolongados seguramente podría representar un peligro. El análisis efectuado por Wiegert et al. (2025), destaca que los problemas de defensa planetaria van más allá de los efectos de los impactos en la superficie terrestre. Los impactos en la Luna pueden generar partículas que interfieran con los satélites en órbita baja alrededor de la Tierra.

La historia del 2024 YR4 continuara por algunos años mas. Desde mediados de abril, se encuentra demasiado distante para ser detectado, y la NASA anticipa una nueva oportunidad de observación en 2028, cuando su órbita alrededor del Sol lo aproxime de nuevo a nuestro planeta. Será entonces cuando el acercamiento brindará a los científicos otra oportunidad de observarlo y refinar aún más su órbita utilizando tanto el Telescopio Espacial James Webb (JWST), como telescopios terrestres. En particular, los científicos buscarán recopilar más datos sobre su forma y composición, factores clave para comprender tanto su comportamiento como los posibles efectos de un eventual impacto y, con suerte, eliminar o confirmar definitivamente cualquier posibilidad de impacto con nuestro satélite.



Figura 4. Diferentes fases progresivas de nuestro satélite. Como curiosidad, en la primera imagen a la izquierda, se observa a Júpiter en la parte superior.
Fotografía del autor.

REFERENCIAS

- Melosh, H. 1989. Impact Cratering. A Geologic Process. Oxford Monographs on Geology and Geophysics Series, Oxford, Clarendon Press. no. 11. ix + 245 pp.
- Wiegert, P., Brown, P., Lopes, and Martin Connors. 2025. The Potential Danger to Satellites due to Ejecta from a 2032 Lunar Impact by Asteroid 2024 YR4. AASS Journal, 1-9.
- <https://science.nasa.gov/solar-system/asteroids/2024-yr4/>



jcasas@geologist.com

Jhonny E. Casas es Ingeniero Geólogo graduado de la Universidad Central de Venezuela, y con una maestría en Sedimentología, obtenida en McMaster University, Canadá. Tiene 38 años de experiencia en geología de producción y exploración, modelos estratigráficos y secuenciales, caracterización de yacimientos y estudios integrados para diferentes cuencas en Canadá, Venezuela, Colombia, Bolivia, Ecuador y Perú.

Autor/Co-autor en 61 publicaciones para diferentes boletines y revistas técnicas, como: Bulletin of Canadian Petroleum Geology, Geophysics, The Leading Edge, Asociación Paleontológica Argentina, Paleontology, Journal of Petroleum Geology, Academia de Ciencias, Academia de Ingeniería y Caribbean Journal of Earth Sciences; incluyendo presentaciones en eventos técnicos: AAPG, SPE, CSPG-SEPM y Congresos Geológicos en Venezuela y Colombia, así como artículos históricos en el boletín AAPG Explorer. Autor de mas de 41 artículos de divulgación científica.

Profesor de Geología del Petróleo (1996-2004). Profesor de materias de postgrado tales como: Estratigrafía Secuencial, Modelos de Facies y Análogos de afloramiento para la caracterización de yacimientos (2003-2025), en la Universidad Central de Venezuela. Mentor en 12 tesis de maestría. Representante regional para la International Association of Sedimentologist (2020-2026) y ExDirector de Educación en la American Association of Petroleum Geologists (AAPG) para la región de Latinoamérica y del Caribe (2021-2023). Advisory Counselor para AAPG LACR (2023-2026).