

ELISA SIMÓ SOLER
ELOY PEÑA ASENSIO
(*Coordinación*)

DEFENSA PLANETARIA

AUTORÍA:

ALBA SORIANO ARNAZ
ALBERT RIMOLA
ALBERTO CORONEL TARANCÓN
ANNA GARCIA HOM
CATIA FÁRIA
ELISA SIMÓ SOLER
ELISA CELIA GONZÁLEZ FERREIRO
ELOY PEÑA ASENSIO
JORDI SOLÉ I OLLÉ
JOSÉ IGNACIO ROBLES SÁNCHEZ
JOSEP MARIA TRIGO-RODRÍGUEZ
JUAN MANUEL DE FARAMIÑÁN GILBERT
JUAN MIGUEL SÁNCHEZ LOZANO
JULIA DE LEÓN
NADJEJDA VICENTE CABAÑAS
RAMON J. MOLES PLAZA

Dykinson, S. L.

No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea este electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (art. 270 y siguientes del Código Penal).

Diríjase a Cedro (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra. Puede contactar con Cedro a través de la web www.conlicencia.com o por teléfono en el 917021970/932720407.

Este libro ha sido sometido a evaluación por parte de nuestro Consejo Editorial
Para mayor información, véase www.dykinson.com/quienes_somos

© Copyright by
Los autores
Madrid, 2023

Editorial DYKINSON, S.L. Meléndez Valdés, 61 - 28015 Madrid
Teléfono (+34) 91 544 28 46 - (+34) 91 544 28 69
e-mail: info@dykinson.com
<http://www.dykinson.es>
<http://www.dykinson.com>

ISBN: 978-84-1122-441-3
Depósito Legal: M-31318-2023
DOI: 10.14679/2271

ISBN electrónico: 978-84-1170-831-9

Maquetación:
german.balaguer@gmail.com

CAPÍTULO 3. DECISIONES CRUCIALES: METODOLOGÍAS MULTI-CRITERIO APLICADAS A LA DEFENSA PLANETARIA

JUAN MIGUEL SÁNCHEZ LOZANO¹

*Ingeniero Industrial. Doctor especialista en Teorías de la Decisión
Centro Universitario de la Defensa. Academia General del Aire*

DOI: 10.14679/2275

Sumario: 1. INTRODUCCIÓN. 2. FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS DE DECISIÓN MULTI-CRITERIO. 2.1. Antecedentes: de la economía a la astronomía. 3. DECISIONES EN DEFENSA PLANETARIA. 3.1. Clasificación de objetos próximos a la Tierra potencialmente peligrosos. 3.2. La conexión con las fechas de impacto. 3.3. Una primera evaluación de técnicas de desvío de asteroides. 4. CONCLUSIONES.

Vamos a ubicarlo, y en el caso de que vaya a colisionar tenemos que predecir dónde va a caer, y en el peor de los casos, habría que iniciar una evacuación, este sería nuestro último recurso, pero si fuera necesario habría que hacerlo².

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, los avances en el ámbito aeroespacial permiten detectar continuas amenazas y desafíos a los que se enfrenta la comunidad científica internacional. Entre ellos cabe destacar aquellos que pueden ser perjudiciales y dañinos para la humanidad y, los grandes asteroides y cometas, cuyas órbitas se cruzan con la órbita de la Tierra generando un riesgo real de impacto, son manifiestas pruebas de ello.

¹ Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) en 2004 con el título de Doctor Europeo en Energías Renovables en 2013. Posee un Máster en Energías Renovables (2010) por la UPCT y un Máster en Astronomía y Astrofísica (2018) por la Universidad Internacional de Valencia. Actualmente ejerce su labor como profesor contratado doctor en el Centro Universitario de la Defensa, en la Academia General del Aire de San Javier (Murcia), compaginando su actividad docente con su labor investigadora. Su investigación está enfocada en la aplicación de la teoría de la decisión y la lógica difusa en el ámbito de las energías renovables, astronomía y astrofísica, ingeniería aeroespacial y las ciencias medioambientales.

² Declaraciones de Rüdiger Jehn (Jefe de la Oficina de Defensa Planetaria de la ESA) ante la amenaza del posible impacto del asteroide 2006 QV89, en septiembre de 2019.

Aunque es poco probable que los Objetos Cercanos a la Tierra (OCT o comúnmente denominados NEOs por su notación anglosajona *Near-Earth Objects*) de tamaño moderado, es decir, de cientos de metros de diámetro, alcancen nuestra órbita, el impacto de uno de dichas dimensiones en el futuro afectaría drásticamente la vida y el clima en nuestro planeta. ¿Cómo debemos afrontar los encuentros con dichos objetos?, ¿cómo podemos cuantificar el tiempo de reacción para organizar un sistema paliativo de defensa planetaria?, ¿cómo puede la amenaza de un impacto cósmico de tales características afectar a los flujos migratorios de una zona geográfica concreta?, ¿cuáles serán sus consecuencias ecológicas, políticas, económicas y demográficas? Si un evento de semejante magnitud pudiera tener lugar, habría infinidad de cuestiones que plantearse a las que se debería dar respuesta, en definitiva; habría llegado el momento de tomar decisiones cruciales de escala planetaria.

Cada una de las preguntas planteadas es en realidad un problema de decisión. En cada cuestión surgen una serie de opciones a evaluar y, normalmente, a la hora de seleccionar la alternativa idónea es necesario considerar un número finito y determinado de factores o criterios, creándose de esta manera un problema de toma de decisiones multi-criterio.

Para hacerse una idea basta con tratar de responder algunos de los interrogantes que la humanidad podría formularse ante una situación real de defensa planetaria: en el caso de que un objeto de cientos de metros fuese a impactar contra la Tierra y la zona geográfica potencial de impacto estuviese densamente poblada, ¿qué decisiones inmediatas habría que adoptar? (**Perna, Barucci y Fulchignoni 2013**) ¿qué actores entrarían en juego y cómo se relacionarían entre ellos? (**Simó-Soler y Peña-Asensio 2022**). A simple vista parecería evidente que las personas que habitasen la zona afectada ocuparían la primera posición en la lista de prioridades: ¿hacia dónde y cómo habría que dirigir el desplazamiento de la población?, aspectos como la seguridad, sanidad, desarrollo o cercanía de las diferentes alternativas entrarían a formar parte del problema de decisión.

Es también bastante habitual plantearse cuestiones que incluso parecen ser extraídas de la ciencia ficción como las relativas al modo en el que se debería desviar la trayectoria de un asteroide en riesgo de colisión contra la Tierra: ¿cuál sería la técnica de deflexión idónea? A la hora de responder a dicha pregunta surgen varios factores o criterios que influyen en el proceso de evaluación de las potenciales alternativas. Obviamente el tamaño del objeto es un elemento a tener en cuenta, pero también resulta conveniente considerar parámetros tales como el nivel de madurez de la tecnología, el tiempo para construirla (sobre todo si el margen de maniobra es escaso) o incluso el riesgo de la misión, entrando en escena por tanto un mayor número de factores, generándose nuevamente un problema de toma de decisiones de múltiples criterios.

La disciplina de las teorías de decisión se ha postulado como una rama de conocimiento que permite sintetizar y optimizar tareas en cualquier ámbito de la actividad intelectual humana facilitando su resolución. Englobadas en dicha disciplina, cabe resaltar las metodologías de toma de decisiones multi-criterio (comúnmente denominadas MCDM por su notación anglosajona *Multi-Criteria Decision Making*)

(**Triantaphyllou 2000**), cuyo uso se ha extendido en numerosos campos de aplicación tan diversos como la ingeniería, economía, ciencias sociales, etc., (**Mardani et al. 2015**). Dada su contrastada utilidad, corroborada y verificada por un elevado número de problemas de decisión y casos de estudio resueltos con éxito, estas metodologías emergen como herramientas de gran relevancia a considerar para la formulación de estrategias de defensa planetaria.

En este capítulo veremos cómo, aunque estos algoritmos de optimización se han aplicado en numerosas áreas de conocimiento, su aparición en el ámbito de la astronomía y la astrofísica es aún reciente, y más aún si cabe en el extraordinario desafío que suponen las posibles acciones para mitigar o paliar un impacto cósmico. Se demostrará, a través de la descripción detallada de diversos casos de estudio, la utilidad de estas metodologías y técnicas a la hora de tomar decisiones en el ámbito de la defensa planetaria.

2. FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS DE DECISIÓN MULTI-CRITERIO

Con frecuencia, de manera inconsciente debido a la naturaleza rutinaria de nuestras actividades diarias, las personas nos vemos obligadas a abordar situaciones en las que se debe elegir entre múltiples alternativas para determinar cuál es la opción óptima. Es bastante común además que, en el proceso de selección, sea necesario tener en cuenta un número determinado de factores o criterios. De hecho, según **Simon (1960)**: «La toma de decisiones es un proceso de selección entre cursos alternativos de acción, basado en un conjunto de criterios, para alcanzar uno o más objetivos». Por tanto, se podría decir que un problema de decisión surge cuando para dar respuesta a una situación planteada existen dos o más alternativas entre las que, de manera individual o colectiva, es necesario escoger una de ellas, o al menos indicar una serie de preferencias.

Una decisión se considera acertada si con el transcurso del tiempo los efectos de la misma son favorables en función de la métrica establecida con la que se evalúe. Por lo tanto, resulta de suma importancia comprender en detalle el proceso de toma de decisiones, ya que esto permitirá determinar de manera concluyente si la elección inicial fue la opción más adecuada.

La importancia de recurrir a los procesos de toma de decisiones se incrementa cuando su aplicación traspasa el ámbito académico alcanzando el profesional. En el campo de los proyectos de ingeniería de cualquier área de conocimiento (industrial, civil, aeroespacial, etc.), a consecuencia de la complejidad y la trascendencia de la decisión, los procesos de toma de decisiones constituyen una actividad intelectual imprescindible, sin la cual los actuales y complejos proyectos tecnológicos no podrían progresar.

Originariamente, los procesos de toma de decisiones se fundamentaban en el conocimiento y la experiencia de un grupo decisor ante situaciones similares ocurridas con anterioridad. Sin embargo, con el transcurso del tiempo, este clásico concepto ha ido cambiando de manera que, en nuestros días, resulta bastante habitual recurrir además al uso de alguna metodología o herramienta que permita ayudar en la toma de decisión.

El esquema fundamental de un proceso de toma de decisión multi-criterio consta de las siguientes cuatro etapas:

Etapas 1.- Estructuración del problema de decisión. El proceso da comienzo ordenándose a través de diversas tareas:

- Definición del problema: Paso inicial para la toma de decisión, sin un problema correctamente definido no es posible obtener una solución válida, ya que el objetivo no está claramente definido.
- Identificación de las alternativas: Captura y recopilación de la cantidad de opciones que tiene el sujeto decisor para llevar a cabo la decisión.
- Determinación de criterios: Selección de aquellas características o factores que los individuos decisores han considerado relevantes para determinar la alternativa que resulta más conveniente. Los criterios pueden presentar diversa naturaleza (cuantitativa o cualitativa).

Etapas 2.- Análisis del problema de decisión. Es en esta etapa cuando se desarrolla la parte metodológica del proceso de toma de decisión, comprende las siguientes fases:

- Evaluación de alternativas: Depende de la metodología o técnica de evaluación utilizada en cada caso.
- Elección de una opción o ranking de alternativas: En función de la evaluación de las alternativas, se obtiene una opción con mejor valoración que el resto.

Etapas 3.- Implementación de la decisión. Una vez identificada la alternativa más favorable, se lleva a cabo su ejecución.

Etapas 4.- Evaluación de los resultados. Ya estando en ejecución o habiendo sido ejecutada, los resultados que genera la alternativa pasan a ser evaluados.

Gracias a dichas etapas no sólo es posible determinar todas las variables que están involucradas en el proceso, sino además analizar las diversas soluciones en función de la metodología que resulte más idónea y efectiva.

2.1. Antecedentes: de la economía a la astronomía

La decisión multi-criterio aparece en el campo de la economía a finales del siglo XIX y principios del XX al analizar el comportamiento de las y los consumidores a la hora de elegir la compra de un producto. La formulación adoptada en esta época consistía en postular que los agentes económicos buscaban maximizar sus funciones de utilidad, las cuales expresaban la elección de la persona consumidora. Sin embargo, Pareto mostró en 1896 que en situaciones en las que varios agentes económicos realizan elecciones diferentes y en conflicto, éstos no pueden obtener su satisfacción máxima al mismo tiempo; «siendo los recursos limitados, lo que uno gana lo hace en detrimento de otro», creándose de este modo los denominados óptimos de Pareto. Las técnicas de decisión multi-criterio surgieron con el objeto de resolver esta problemática intentando alcanzar un equilibrio entre diferentes intereses.

Los inicios de estas metodologías se remontan a la década de los cuarenta. En 1944, el economista austriaco Oscar Morgenstern y el padre de la física cuántica, John Von Neumann, publicaron la primera edición de juegos de estrategia desde una perspectiva económica analizando el comportamiento del individuo en una situación de riesgo (**Von Neumann y Morgenstern 1944**). En las décadas siguientes fueron surgiendo diferentes escuelas (destacando la europea y la norteamericana) y números desarrolladores. De forma breve cabe mencionar al matemático francés Bernad Roy, inspirador de la escuela francesa y padre de la familia de métodos multi-criterio llamados de sobreclasificación (relaciones «*outranking*»), en los que destacan las metodologías ELECTRE (*ELimination Et Choix Traduisant la Réalité*) (**Roy 1968**) y PROMETHEE (*Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation*) (**Brans, Mareschal y Vincke 1984**), o **Keeney y Raiffa (1976)**, impulsores de la denominada escuela norteamericana a través de su célebre Teoría de la Utilidad Multi-Atributo (MAUT).

Fue a finales del siglo XX cuando las metodologías MCDM comenzaron a trascender del ámbito académico extendiéndose al mundo empresarial. Hoy en día estas técnicas se emplean con múltiples y diversas finalidades: localización de empresas, selección de maquinaria, optimización de infraestructuras, etc. (**Mardani et al. 2015**). Aunque son numerosas las aplicaciones que aún quedan por explotar, su uso en el ámbito de la industria espacial no es reciente, de hecho, hay que remontarse más de dos décadas en el tiempo.

En el año 1995, el ingeniero norteamericano Michael V. Franck recurrió a la metodología MCDM más extendida en la actualidad, el Proceso Analítico Jerárquico o AHP (*Analytic Hierarchy Process*) desarrollado por Thomas Saaty en la década de los ochenta, para evaluar el riesgo y tomar decisiones sobre las selección de estrategias de mejora de la seguridad en una nave espacial, vehículos de lanzamiento e infraestructuras en tierra de la NASA (**Franck 1995**). Criterios tales como la viabilidad técnica, planificación, masa, rendimiento o coste entraron en juego en dicho estudio.

Ya a comienzos del siglo XX, desde la Universidad de La Salle en el estado de Pensilvania (EE. UU.), un reconocido investigador en el marco de proyectos de la NASA, Madjid Tavana, aplicó técnicas y metodologías MCDM en diversos estudios del ámbito aeroespacial. Cabe destacar entre ellos los siguientes problemas de decisión:

- Evaluación desarrollada en el *Johnson Space Center* (NASA) de tres escenarios complejos para abordar la misión de exploración humana a Marte. Recurrió entre otras técnicas al uso de la metodología AHP. Los criterios escogidos para ello fueron las diferentes etapas de la misión, desde el lanzamiento hasta el retorno de la nave al planeta Tierra (**Tavana 2004**).
- Análisis multi-criterio de las complejidades inherentes a las futuras misiones de vuelos espaciales tripulados (**Tavana y Hatami-Marbini 2011**), realizado también en el *Johnson Space Center* (NASA). Otra de las metodologías MCDM más extendidas, la metodología TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) (**Hwang y Yoon 1981**), fue aplicada para evaluar diferentes simuladores con vistas a abordar misiones tripuladas de exploración

más allá de la órbita terrestre baja. Además, a través de la metodología AHP fue posible incorporar información subjetiva en el proceso de decisión, analizando de este modo las posibles discrepancias entre los diferentes sujetos decisores.

- Estudio de priorización de proyectos de tecnología avanzada en el Kennedy Space Center (NASA). En este trabajo la decisión a tomar iba enfocada a establecer un ranking entre 10 proyectos (Hubble, Airlock, Planet-Finder, etc.) con vistas a desarrollar estrategias de planificación (**Tavana, Khalili-Damghani y Abtahi 2013**). La principal novedad de este estudio no sólo es la incorporación de una metodología MCDM que permite analizar las relaciones de dependencia entre los criterios que influyen en la decisión, el Proceso Analítico en Red o ANP (*Analytic Network Process*) (**Saaty 1996**), sino también la aplicación de técnicas como la lógica difusa (**Zadeh 1965**) capaz de manejar la incertidumbre que puede generar el riesgo de imprecisión de dichos criterios.

En la última década el uso de estas metodologías a nivel de investigación se ha extendido a otros países como por ejemplo China, donde se recurrió al método TOPSIS para escoger, de entre varios diseños, el vehículo de lanzamiento espacial idóneo (**Ullah et al. 2013**), o Malasia (**Almahdi et al. 2019**) donde diversos sistemas de vigilancia remota de pacientes fueron evaluados mediante otras dos metodologías MCDM ampliamente extendidas: el enfoque BWM (*Best Worst Method*) (**Rezaei 2015**) y la metodología VIKOR (*Vlsekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje*) (**Opricovic 1968**). En este caso, a la hora de tomar la decisión, quedó seleccionado en primera posición un sistema de monitoreo desarrollado conjuntamente por la Universidad de Yale y la NASA.

Observando dichos antecedentes, se podría inferir que estas herramientas y metodologías están fuertemente vinculadas al ámbito de la ingeniería y la industria aeroespacial, sin establecerse un nexo de unión claro y manifiesto con la astronomía y astrofísica *per se*. Impresión muy alejada de la realidad ya que incluso se ha recurrido a estas técnicas para abordar problemas de decisión puramente astrofísicos como, por ejemplo, qué objetos o residuos espaciales son los más peligrosos y, por ende, por los que habría que comenzar a priorizar su eliminación (**Bazzocchi, Sánchez-Lozano y Hakima 2021**). Parámetros de los objetos como su órbita, masa, tamaño, probabilidad de colisión y tiempo de decaimiento son susceptibles de ser considerados en el proceso de evaluación recurriendo a versiones difusas de metodologías híbridas MCDM.

Es más, bajo un enfoque de habitabilidad planetaria: ¿sería posible establecer un ranking a la hora de decidir sobre en qué exoplanetas habría que centrar la atención para la búsqueda de biomarcadores? Gracias a las metodologías de toma de decisión la respuesta a la anterior pregunta es afirmativa. Empleando la versión difusa de una técnica MCDM de reciente creación: RIM (*Reference Ideal Method*) (**Cables, Lamata y Verdegay 2018**), un grupo de investigadores españoles (**Sánchez-Lozano, Moya y Rodríguez Mozos 2021**) analizaron el potencial de habitabilidad de 1798 exoplanetas empleando la única opción que realmente conocemos, el planeta Tierra. Criterios como la composición, atmósfera, energía, tipo de planeta o presencia de agua líquida fueron algunos de los factores que se consideraron en el proceso de decisión, resultando clasificado en la primera posición del ranking el planeta TRAPPIST-1e.

Con este breve repaso a la literatura se confirma cómo el uso de este tipo de metodologías y procesos, estrechamente vinculadas al ámbito empresarial e industrial en sus inicios, se ha ido extendiendo a otras áreas de conocimiento como el caso de las ciencias del espacio.

Este es sólo el comienzo y la defensa planetaria no es una excepción. En las próximas secciones se detallará la utilidad de estas herramientas para la toma de decisiones, las cuales pueden resultar cruciales frente a la amenaza de un impacto cósmico en nuestro planeta.

3. DECISIONES EN DEFENSA PLANETARIA

Un hecho ha quedado ya demostrado durante el transcurso de este capítulo: las teorías de la decisión se han postulado como excelentes asesoras en el momento de elegir la mejor opción. No obstante, también es necesario reconocer que, bajo la perspectiva de la defensa planetaria, las metodologías de decisión multi-criterio aún se encuentran dando sus primeros pasos. Tener que afrontar decisiones en conflicto y escoger cuál es la mejor opción para defender nuestro planeta ante un asteroide potencialmente peligroso es un paso que, afortunadamente, aún no es necesario dar. Sin embargo, ¿por qué no anticiparnos?, ¿por qué no aprovechar las ventajas que estas metodologías ofrecen a la comunidad científica y repercutir el resultado a su vez en la sociedad?

En este apartado se van a mostrar los primeros avances en el uso de las metodologías MCDM para la toma de decisiones en el campo de la defensa planetaria. Para ello, tres estudios conectados entre sí, formando a su vez una trilogía, tratarán de responder a las siguientes preguntas:

- 1) ¿Cuáles son los asteroides más peligrosos?
- 2) ¿Hay alguna fecha de impacto próxima a la que se debiera prestar especial atención?
- 3) ¿Cuál es la técnica de deflexión idónea para desviar un OCT?

Las respuestas a tales cuestiones se pueden hallar bajo el enfoque de las teorías de decisión multi-criterio. De hecho, para poder abordarlas no sólo surgen alternativas a priorizar o evaluar, sino también factores o criterios que es necesario considerar en el proceso, generándose así tres problemas de decisión de criterios múltiples (Sánchez-Lozano y Fernández-Martínez 2016; Sánchez-Lozano, Fernández-Martínez y Lama-ta 2019; Sánchez-Lozano et al. 2020), los cuales van a ser detallados a continuación.

3.1. Clasificación de objetos próximos a la Tierra potencialmente peligrosos

Los asteroides o pequeños cuerpos rocosos cuyos tamaños varían desde unas decenas de metros a cientos de kilómetros constituyen una potencial amenaza (Trigo-Rodríguez 2022). Mientras la mayoría de ellos podrían impactar contra la Tierra con una probabilidad muy escasa, próxima al 0,5% según Rabinowitz et al (2000),

conviene estar alerta ya que es lógico afirmar que con el transcurso del tiempo dicha probabilidad podría aumentar, siendo del orden del 1% en el caso impactos superiores a mil megatonnes (equivalente a 100 eventos tipo Tunguska). La frecuencia de impactos de esta magnitud es del orden de una vez cada 100 años (**Chapman y Morrison 1994**).

La comunidad astronómica ha establecido medidas que permiten clasificar a los OCT en función de su riesgo potencial de impacto. De esta manera, escalas como la de Torino (**Barucci y Fulchignoni 2005**) o la escala de Palermo (**Chesley et al. 2002**) hicieron su aparición a comienzos de este siglo. La primera, escala de Torino, evalúa la prioridad de riesgo combinando la probabilidad estadística de impacto y la energía cinética asociada al posible impacto. La escala de Palermo también compara ambos parámetros (probabilidad de impacto y energía cinética estimada) pero de una forma más técnica, empleando una escala logarítmica.

Además de dichas escalas, existen otros parámetros que pueden ser considerados a la hora de cuantificar el riesgo de impacto de OCT. No sólo factores tan habituales como el diámetro estimado, su magnitud absoluta, el número potencial de impactos, la energía y velocidad de impacto, etc., sino que existen además otros incluso menos conocidos como, por ejemplo, el Ratio de Purgatorio³, que también podrían tener cabida con vistas a generar una medida de riesgo de impacto de este tipo de objetos.

La información de todos los criterios anteriormente mencionados, ya sea de forma directa o indirecta, está recopilada en la consolidada tabla de riesgo denominada Sentry, dentro del programa NEO Search Program de la NASA. De hecho, todos los posibles impactos contra la Tierra aparecen registrados en dicha tabla una vez que el sistema JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) Sentry los ha detectado a partir de las observaciones actualmente disponibles.

Desde la perspectiva de la teoría de la decisión, la tabla Sentry constituye una clásica matriz de decisión, en cuyas filas aparecen las alternativas a evaluar (OCT en este caso), y en sus columnas los valores de los diferentes criterios que influyen en el proceso de evaluación para cada alternativa. Por tanto, analizando dicha tabla bajo el enfoque de las metodologías MCDM es posible obtener un ranking de OCT en función de su riesgo de impacto, generando un listado de Objetos Potencialmente Peligrosos (OPP). Cabe mencionar entre los criterios a considerar en la evaluación los valores para cada objeto de impactos potenciales (número de veces que interseca la órbita de un objeto con la de la Tierra), probabilidad de impacto, parámetro V_{∞} (o velocidad de entrada a la atmósfera relativa a la de la Tierra), magnitud absoluta (medida del brillo intrínseco del objeto y su magnitud aparente a una unidad astronómica de distancia⁴), diámetro

³ El término refiere a una relación de parámetros temporales que comprende desde la primera hasta la última observación de un OCT, así como el tiempo transcurrido desde el presente hasta la próxima posible fecha futura de impacto.

⁴ Una unidad astronómica (AU) equivale a la distancia aproximada existente entre el Sol y la Tierra, $1,4960 \cdot 10^{11}$ metros o 150 millones de km.

estimado del objeto (asumiendo que se trata de un cuerpo uniforme esférico), escala de Palermo o incluso la energía cinética de impacto (medida en megatonnes de TNT⁵).

Una vez definidos todos y cada uno de los valores de la matriz de decisión de alternativas y criterios, es cuando entra en juego el uso de estas técnicas, otorgándole solidez y rigor matemático a la decisión que finalmente se adopte. De hecho, el primer paso es evidente: si fuera necesario evaluar y/o priorizar una serie de OCT en función de su peligrosidad a partir de un conjunto de criterios, ¿tendrían todos los criterios la misma importancia? Dependiendo de la respuesta a dicha pregunta este primer paso se podría obviar o forzaría la necesidad de determinar el peso o coeficiente de importancia de cada uno de los criterios.

A la hora de decidir, la experiencia y el *know-how* de un grupo de asesoramiento compuesto por un equipo experto en la materia es de suma importancia. Precisamente, el proceso AHP, la metodología multi-criterio más extendida, permite recurrir a un sistema de especialistas y estructurar el problema de decisión en forma jerárquica de manera que en el nivel superior de la jerarquía se sitúa el objetivo o meta a alcanzar, el siguiente nivel lo ocupan los criterios que influyen en el proceso, pudiendo existir a su vez diferentes subniveles y, finalmente, en la base de la jerarquía se reflejan las alternativas objeto de evaluación.

A través de dicho proceso y mediante el uso de una escala de comparación denominada escala de Saaty, en honor al creador de dicha metodología (**Saaty 1980**), un conjunto de personas expertas es capaz de comparar entre sí y de forma pareada los criterios situados en cada uno de los niveles de la jerarquía por medio de la cumplimentación de un cuestionario.

En el caso de la clasificación de OPP, personal altamente cualificado en proyectos de la NASA procedentes del Departamento Lunar y de Ciencias Planetarias de la Universidad de Arizona (EEUU), cumplieron el cuestionario basado en la metodología AHP siendo posible determinar los pesos o coeficientes de importancia de los criterios anteriormente mencionados. La escala de Palermo y el número de potenciales impactos de cada objeto resultaron ser los criterios más relevantes, mientras que el parámetro magnitud absoluta (esto es, el brillo) obtuvo el menor peso.

Una vez conocidos los pesos de los criterios, ya resulta posible resolver el problema de decisión planteado abordando el proceso de priorización/evaluación de alternativas (OCT con mayor riesgo de impacto en nuestro caso). Entre las diferentes técnicas de análisis multi-criterio a emplear, la metodología TOPSIS resulta idónea para este supuesto por diversos motivos: no sólo permite evaluar un número elevado de alternativas incluyendo los pesos de los criterios en el proceso, sino también utilizar criterios que presentan diferentes unidades de medida (km/s, %, m, etc.), facilitando de esta forma la inclusión de todos aquellos criterios susceptibles de ser considerados.

⁵ Trinitrotolueno: Compuesto químico obtenido por la reacción del tolueno con ácido nítrico y ácido sulfúrico a temperatura elevada, constituyendo por tanto un potente explosivo.

Sin la intención de profundizar en exceso en los entresijos matemáticos del algoritmo TOPSIS, resulta imprescindible mencionar al menos sus fundamentos. Esta técnica de análisis multi-criterio está basada en las distancias de cada una de las alternativas a una solución ficticia ideal y a otra anti-ideal, denominadas comúnmente Solución Ideal Positiva (PIS) y Solución Ideal Negativa (NIS), respectivamente. Mediante la generación de un coeficiente de proximidad relativa a la solución o alternativa ideal es posible obtener un valor para cada opción y generar un ranking de las mismas.

Por tanto, una vez determinados los pesos de los criterios y aplicado el algoritmo TOPSIS a la matriz de decisión de alternativas y criterios, el coeficiente de proximidad relativa a la alternativa ideal permite generar la clasificación de OCT en función de su riesgo de impacto. Es de destacar entre los primeros clasificados, por su coincidencia actual con la tabla Sentry, a los objetos 101955 Bennu (1999 RQ36) y 29075 (1950 DA). Mencionaremos a continuación sus detalles y características más significativas.

El asteroide 101955 Bennu (1999 RQ36) fue descubierto por el programa LINEAR (*Lincoln Near-Earth Asteroid Research*) en septiembre de 1999. Se ha ido desplazando hacia el espacio cercano a la Tierra debido a las interacciones gravitatorias con los planetas gigantes y, cada 6 años, tiene un acercamiento con nuestro planeta. Respecto a su peligrosidad, cabe resaltar que presenta el mayor valor de la escala de riesgo de impacto de Palermo, se considera que su mayor probabilidad de impacto tendrá lugar a finales del siglo XXII. Tiene un diámetro estimado de 490 metros y al tener una densidad baja, sólo un 30% mayor que la del agua, se estima que está compuesto por una colección de rocas, como si se tratase de una pila de escombros. Esta suposición lo convierte en aún más peligroso ya que, en el caso de que se dirigiera realmente hacia la Tierra y entrase en la atmósfera del planeta, podría fragmentarse incrementando aún más si cabe los daños, al aumentar el área afectada.

El asteroide 29075 (1950 DA), descubierto en febrero de 1950, es el OPP de mayor tamaño, con un diámetro estimado de 1,3 km. Se observó durante 17 días y luego desapareció de la vista durante medio siglo, hasta que fue de nuevo avistado y reconocido en diciembre del año 2000. Se ha descubierto que únicamente se producirá un acercamiento en marzo de 2880 estimándose la probabilidad máxima de impacto en 0.33%. Este objeto tiene un tamaño tan elevado que, efectuando simulaciones de impacto de un cuerpo de similares dimensiones y velocidad en el océano Atlántico norte (**Ward y Asphaug 2003**), se encontró que, cuatro horas después de una colisión de este tipo, la costa este de EEUU se vería afectada por tsunamis con olas de más de 60 metros de altura. Europa, vería por primera vez los tsunamis transcurridas ocho horas desde el impacto y estos, devastarían la mayoría de las costas durante más de seis horas, alcanzando olas de 15 a 20 m de altura.

Con el objetivo de no generar alarmismos motivados por los resultados de simulaciones informáticas, merece la pena mencionar un caso opuesto: el asteroide 410777 (2009 FD); este OCT ocupaba la primera posición del ranking TOPSIS y la tercera posición de la tabla Sentry (ordenada en función del riesgo de impacto), confiriéndole por tanto un probabilidad de impacto muy elevada. Es un asteroide de 470 metros de tamaño estimado que, aunque inicialmente estaba catalogado como potencialmente

peligroso debido a la proximidad de su órbita con la Tierra, cálculos posteriores han demostrado que no existe ninguna probabilidad de colisión futura (**Mou y Webster 2021**).

Por tanto, a la hora de tomar decisiones y centrar la atención en aquellos OPP que puedan impactar contra nuestro planeta, las metodologías basadas en análisis multi-criterio pueden ser un gran apoyo, constituyendo un complemento adicional eficaz para la comunidad astronómica internacional.

3.2. La conexión con las fechas de impacto

Tras el problema de decisión mostrado en la sección anterior, fueron tres los OPP que captaron la atención y el interés al coincidir sus primeras posiciones en el ranking TOPSIS y la tabla Sentry de riesgo de impacto (101955 Bennu (1999 RQ36), 29075 (1950 DA) y 410777 (2009 FD)), aunque como ya ha sido anotado, uno de ellos (410777 (2009 FD)) un lustro más tarde dejó de ser considerado potencialmente peligroso.

Se dispone de cuantiosa información para el seguimiento y monitorización de esos tres objetos, incluyendo entre otros parámetros las fechas de impacto potenciales que, tal y como se ha indicado en la sección anterior, corresponden con dos finales de siglo: septiembre de 2182 para el OPP 1999 RQ36 y marzo de 2880 para el OPP 1950 DA, dejando ya al margen por su nulo riesgo de colisión al asteroide OCT 2009 FD.

Para identificar posibles amenazas de impacto, y predecir aproximaciones cercanas a la Tierra, sigue siendo una necesidad la monitorización de los objetos denominados no pequeños, es decir, OCT con diámetros estimados mayores o iguales a 50 m (**Chapman y Morrison 1994**). Dado que el sistema NASA JPL Sentry continúa escaneando las trayectorias de los OCT, actualizando además sus parámetros orbitales, la observación de las fechas de impacto de los OPP 1999 RQ36 y 1950 DA ha motivado una nueva cuestión bajo la perspectiva de la defensa planetaria; dado que para cada fecha potencial de impacto se dispone de una serie de parámetros relacionados con el riesgo de impacto (probabilidad de impacto, energía de impacto, etc.), ¿sería posible buscar las fechas de impacto más preocupantes de OCT de diámetro superior a 50 m a partir de las fechas de impacto de los OPP mencionados? De nuevo, la respuesta a dicha pregunta se puede encontrar en la aplicación de metodologías multi-criterio.

Mientras se estaba ultimando el problema de decisión de clasificación de OPP (**Sánchez-Lozano y Fernández-Martínez 2016**), surgió un nuevo algoritmo de decisión denominado Método de Referencia Ideal o *Reference Ideal Method* (RIM), desarrollado conjuntamente por grupos de investigación de las Universidades de Cuba y Granada (**Cables, Lamata y Verdegay 2016**). Esta nueva técnica, similar en sus fundamentos matemáticos a la metodología TOPSIS, presenta la novedad de que permite clasificar alternativas en función de un número determinado de criterios a partir de una alternativa ideal, la cual se establece como referencia.

La aparición de esta nueva metodología multi-criterio, el enfoque RIM, posibilita dar respuesta a la pregunta anteriormente formulada, ¿por qué no usar las fechas de

impacto de los OPP más peligrosos, según el ranking TOPSIS y la tabla Sentry, y clasificar el resto de fechas de impacto de OCT de diámetro superior a 50 m en función de su peligrosidad? De esta manera es posible utilizar como referencia los parámetros relacionados con las fechas de impacto de los OPP 1999 RQ36 y 1950 DA, para clasificar las fechas de impacto más preocupantes del resto de OCT conocidos del tamaño mencionado.

Las alternativas por tanto son conocidas, fechas de impacto de OCT de diámetro superior a 50 m, resta identificar los criterios que van a formar parte del proceso de priorización. Tales criterios pueden ser obtenidos nuevamente a través del programa NEO de la NASA (**Chodas y Baalke 2017**). Los procedimientos para analizar el riesgo de impacto de la tabla Sentry han ido diseñándose en función de diferentes técnicas de monitoreo de impacto y, antes de julio de 2021, la técnica utilizada se basaba en la Línea de Variaciones, conocida por su notación anglosajona *Line Of Variations* (LOV). Respecto a esta técnica cabe resaltar que mediante integraciones numéricas es posible detectar aproximaciones cercanas a la Tierra a través de una región de incertidumbre. Si asumimos que la región de incertidumbre de un asteroide en particular es un cilindro tridimensional estirado a lo largo de su órbita, entonces una proyección sobre un plano denominado objetivo⁶ reducirá la región de incertidumbre a una franja bidimensional (Línea LOV) situada a una cierta distancia del centro de la Tierra. Si esta distancia es inferior a 1 radio terrestre, uno de los asteroides virtuales podría impactar con nuestro planeta.

Con la intención de no dificultar la comprensión del texto con definiciones de parámetros excesivamente técnicos, únicamente precisar que, relacionados con dicha región de incertidumbre, se distinguen los siguientes parámetros: la distancia desde el centro de nuestro planeta a la línea LOV, la anchura de dicha región medida desde el eje hasta la generatriz del cilindro y la velocidad del objeto virtual a lo largo del plano objetivo. Por su relevancia para el caso de estudio planteado, criterios como la energía y la probabilidad de impacto también se añaden al proceso de forma que la matriz de decisión queda compuesta por los cinco criterios expuestos y por una serie de alternativas a evaluar, correspondientes con las fechas potenciales de impacto de los 118 OCT registrados en la tabla Sentry de riesgo de impacto en la fecha del estudio (enero de 2018).

Para la resolución de este nuevo problema de decisión, resulta idóneo contar con especialistas en el ámbito del problema en cuestión. En este caso se recurre nuevamente a la colaboración del grupo de asesoramiento del Departamento Lunar y de Ciencias Planetarias de la Universidad de Arizona (EEUU) que intervino en el estudio de clasificación de OPP (**Sánchez-Lozano y Fernández-Martínez 2016**). Mediante la cumplimentación de un cuestionario basado en la metodología AHP es posible obtener los pesos o coeficientes de importancia de los criterios, siendo la distancia desde el centro de nuestro planeta a la línea LOV y la probabilidad de impacto los criterios más relevantes, mientras que la energía de impacto presenta el menor peso.

⁶ Plano que pasa por el centro de la Tierra y es perpendicular al vector de velocidad entrante del OCT.

Tras obtener los coeficientes de importancia de los criterios se está en disposición de resolver el problema de decisión planteado: la clasificación de las fechas de impacto de los OCT registrados hasta el momento (de diámetro superior a 50 m) en función a su riesgo de impacto. Con el objetivo de abordar este análisis y dada su idoneidad, el algoritmo RIM va a ser aplicado tomando como alternativas de referencia ideales los parámetros relacionados con las fechas de impacto de los OPP más preocupantes indicados anteriormente (1999 RQ36 y 1950 DA). Este algoritmo de toma de decisiones proporciona un índice relativo de proximidad de cada alternativa (fecha de impacto de cada OCT) a la solución o alternativa ideal de forma que, a partir del valor de dicho índice, es posible generar un ranking de fechas de impacto de OCT en función de su riesgo de impacto.

Una vez determinados los pesos de los criterios, y aplicada la metodología RIM a la matriz de decisión de alternativas y criterios, el índice de proximidad relativa a la solución ideal proporciona una clasificación donde, en las diez primeras posiciones, es de destacar varias fechas de impacto correspondientes a dos OPP: 2008 UB7 y 2008 EX5, y a un OCT muy notorio: 99942 Apophis (2004 MN4).

Según la tabla Sentry de monitoreo de impacto con la Tierra, el objeto 2008 UB7, de diámetro estimado 58 metros, presenta un total de 50 potenciales impactos. Aunque la fecha de impacto más próxima tendrá lugar en octubre del año 2044 (**Chodas 2022a**), según la clasificación RIM, la que presenta más riesgo de impacto es octubre de 2060, coincidiendo además con la fecha más próxima con mayor riesgo de este OPP de acuerdo a la información proporcionada en la tabla Sentry.

Situación similar presenta el OPP 2008 EX5. Este objeto de tamaño estimado de 59 metros, tiene menor número de potenciales impactos que el OPP 2008 UB7, en concreto se aproximará a nuestro planeta en 28 ocasiones durante este siglo. Aunque en este caso la fecha de impacto más próxima, la cual tendrá lugar en octubre del año 2056 (**Chodas 2022b**), no corresponde con la fecha de mayor riesgo según la clasificación RIM. De hecho, las fechas que presentan mayor riesgo de acuerdo a la metodología multi-criterio RIM son coincidentes con las proporcionadas por la tabla Sentry de monitoreo de impacto: mes de octubre de los años 2072 y 2083.

Por tanto, en el caso de estos dos objetos (2008 UB7 y 2008 EX5) no se debería generar preocupación ni alarmismo. Aún disponemos de más de tres décadas para realizar un monitoreo y seguimiento detallado de las trayectorias de sus órbitas. Además, técnicas de desviación recientes han demostrado cómo es posible variar la trayectoria de objetos de incluso mayor tamaño (**Daly et al. 2023**).

Un análisis diferente presenta el caso del asteroide 99942 Apophis (2004 MN4). La fecha de impacto de dicho objeto en abril de 2068 ocupa la décima posición en el ranking RIM de riesgo de impacto. Este objeto, de 350 m de diámetro estimado, ha estado acaparando titulares y debates en los medios durante años, en los que la comunidad científica ha tratado de determinar su órbita y la posibilidad de un impacto futuro de manera precisa. De hecho, poco después de su detección en 2004, se predijeron dos posibilidades de impacto reales en 2029 y 2036, pero las observaciones adicionales

del programa NEO las descartaron. Se aproximará mucho a nuestro planeta en abril de 2029, pasando a solo 31.000 km de la superficie de la Tierra, altitud cercana a la órbita geostacionaria donde se sitúan los satélites de comunicaciones convencionales (**Rivkin y Cheng 2023**).

Quedaba aún la preocupante posibilidad de impacto en el año 2068, coincidente con su fecha de impacto de mayor riesgo según el enfoque RIM. Sin embargo, nuevas observaciones de radar realizadas recientemente (marzo de 2021) en los observatorios Goldstone y Green Bank de la NASA, han proporcionado suficientes datos sobre su órbita como para descartar con certeza cualquier impacto en la Tierra durante al menos los próximos 100 años (**European Space Agency 2021**).

Una vez más, se constata la utilidad de emplear algoritmos de toma de decisiones multi-criterio en el ámbito de la defensa planetaria. Con este problema de decisión ha sido posible analizar las fechas de impacto más preocupantes de OCT de tamaño superior a 50 m registrados hasta la fecha (algunos de ellos incluso potencialmente peligrosos), tomando como referencia los OPP de mayor riesgo de impacto.

3.3. Una primera evaluación de técnicas de desvío de asteroides

Clasificados los OPP y analizadas las fechas de impacto más preocupantes de OCT de diámetro superior a 50 metros, queda dar un paso más: en el caso de que un asteroide u objeto potencialmente peligroso se dirija hacia nuestro planeta, ¿qué técnica de desvío sería la idónea?

Lógicamente, una pregunta como la planteada debe reflejar diversas premisas. En primer lugar, es necesario definir un rango máximo del tamaño del OPP, estimándose en este caso un diámetro que podrá variar entre 140 m (valor límite mínimo para que un asteroide se considere potencialmente peligroso⁷) y 250 m. En segundo lugar, se establece un tiempo de alerta (más conocido por su notación anglosajona *warning time*⁸) con un horizonte temporal de entre 5 y 30 años. Finalmente, en tercer lugar, descartamos la opción nuclear para evitar fragmentarlo en un enjambre de pequeños objetos que podría resultar aún más dañino y perjudicial, así como para no generar tensiones por el uso de esta tecnología. No obstante, esta estrategia de mitigación podría ser la única opción posible si apenas existe margen de maniobra temporal o si el OPP es de tamaño superior al rango asumido.

Bajo la perspectiva de la teoría de la decisión, una vez establecidas esas consideraciones, ya se está en condiciones de seleccionar el listado de alternativas a priorizar o evaluar, esto es, las técnicas de desvío de asteroides que se estén analizando en la actualidad y que reúnan las condiciones indicadas. Estudios realizados por la comunidad astronómica internacional, basta citar a modo de ejemplo los realizados por **Thiry y**

⁷ Un asteroide se considera potencialmente peligroso si presenta una Distancia de Intersección de la Órbita Mínima de la Tierra (MOID) igual o inferior a 0,05 AU y una magnitud absoluta (H) igual o menor a 22 (equivalente a diámetro estimado superior o igual a 140 m).

⁸ Tiempo que transcurre desde la detección de la amenaza hasta la fecha esperada de colisión.

Vasile (2017), Weisbin et al. (2015) y Perna, Barucci y Fulchignoni (2013), destacan las siguientes técnicas de deflexión o desviación de asteroides: impacto cinético, haz de iones, tractor de gravedad y ablación por láser. Manteniendo la intención de no abrumar con conceptos y términos excesivamente técnicos, se describirán a continuación de manera muy sencilla cada una de estas tecnologías.

La técnica de impacto cinético (*Kinetic Impactor*; KI) está basada en situar una nave espacial no tripulada en una trayectoria específica que permita impactar contra un objeto cósmico a una velocidad relativamente alta, modificando así tanto la velocidad como el impulso de ese objeto (**Rumpf et al. 2020**). Es la técnica que presenta mayor madurez tecnológica. De hecho, con la misión Deep Impact en 2005, la NASA demostró que una nave espacial puede impactar de manera autónoma un asteroide o un cometa en el espacio profundo (**Wissler, Rocca y Kubitschek 2005; A’Hearn et al. 2005**). Es más, muy recientemente se ha demostrado el éxito de esta técnica a través de la denominada misión DART (por su notación anglosajona *Double Asteroid Redirection Test*) (**Cheng et al. 2023**), haremos mención a ella más adelante. Análisis posteriores derivados de la misión Hera desarrollada por la agencia espacial europea, proporcionarán información detallada de los resultados de DART.

La tecnología basada en la desviación por haz de iones (*Ion Beam Deflection*; IBD) se fundamenta en la propulsión de un haz de iones de alta energía desde una nave espacial hacia la superficie del OPP. El haz incidiría sobre la superficie del objeto de tal forma que el impulso de los iones se transmitiría al mismo, impartiendo una aceleración comparable a la que ocurriría si el propulsor de iones estuviera sobre la propia superficie del asteroide, impulsándolo hacia el exterior (**Weisbin et al. 2015**). Entre las ventajas de esta tecnología en detrimento de la técnica KI apuntar que la nave espacial podría enviarse hacia las proximidades del OPP con anticipación, permitiendo no sólo reducir la incertidumbre con respecto a la órbita del objeto, sino también precisar el punto de incidencia del haz sobre la superficie. Por el contrario, los principales inconvenientes de esta tecnología son el nivel aún insuficiente de autonomía de la nave espacial y la imprecisión con respecto a la orientación del haz de iones (**Bombardelli, Calero y Gonzalo 2019**).

El tractor de gravedad consiste en una nave espacial que se cierne sobre un OPP con la finalidad de redirigir su trayectoria aprovechando la atracción gravitatoria entre el objeto y la nave espacial. Si, además, la nave espacial es capaz de extraer regolito o rocas del asteroide, aumentando así su propia masa, dicha cantidad de masa puede estar calculada de modo que sus propulsores a máxima potencia (y en la dirección general del asteroide) no aumenten la distancia entre la nave espacial y el OPP. Este último enfoque se denomina tractor de gravedad mejorado (*Enhanced Gravity Tractor*; EGT). La fuerza gravitacional del tractor sobre el cuerpo del objeto provoca su redirección (**McInnes 2007**). El rango de diámetros estimado en las consideraciones iniciales (entre 140 y 250 metros) facilita el uso de esta tecnología, ya que los OPP de este tamaño exhiben en su mayoría una estructura de pila de escombros en la que es técnicamente factible extraer masa de grandes rocas en su superficie.

Finalmente, la última técnica de deflexión a evaluar se corresponde con la técnica de ablación por láser (*Laser Ablation*; LA). De forma muy resumida se podría indicar que a través de esta técnica se hace incidir un rayo láser sobre la superficie del OPP, vaporizando el material de la misma y provocando un movimiento de retroceso del objeto. En este caso específico la comunidad científica ha analizado diversas configuraciones: una nave aislada o una formación en serie de amplificadores láser sincronizados (**Vasile y Maddock 2012**). En el estudio realizado asumiremos que dicha técnica involucra únicamente una nave espacial.

Una vez que estas cuatro técnicas de desvío de asteroides han sido identificadas, llega el momento de seleccionar cuáles son los criterios que se deberían considerar para abordar el problema de decisión planteado. Aquí surge un dilema que, como veremos más adelante, corrobora la idoneidad de aplicar estas metodologías MCDM a través de una serie de variantes basadas en técnicas de inteligencia artificial. Pero no nos adelantemos, dada la envergadura y dificultad del problema planteado es conveniente no dejar en el tintero ningún criterio susceptible de ser considerado por muy complicado que pueda parecer en principio su puesta en escena.

Bajo la premisa anteriormente formulada, a través de la literatura científica (**Weisbin et al. 2015**) y de equipos expertos en el ámbito de la defensa planetaria, se seleccionaron los siguientes criterios: tiempo de construcción de la técnica, duración estimada de desvío de la trayectoria, rotación, composición, estructura y forma del objeto, nivel de madurez de la tecnología y riesgo de la misión. Parecería lógico pensar que ya disponemos de la matriz de decisión para resolver el problema de decisión, puesto que se proponen evaluar cuatro técnicas de desvío de asteroides (las alternativas) en función de ocho criterios ya identificados. No obstante, como se puede apreciar, esta serie de ocho criterios no sólo presenta diferentes unidades de medida, sino que además en la mayoría de los casos reúne parámetros complejos, difíciles de cuantificar por la imprecisión inherente que supone valorarlos de manera cuantitativa.

En este punto, vamos a presentar una herramienta basada en inteligencia artificial denominada lógica difusa. Esta técnica fue ideada por el matemático e ingeniero Lofti A. Zadeh en 1965 con el objetivo de modelar el nivel de vaguedad e incertidumbre del pensamiento humano. De hecho, es habitual recurrir a la experiencia previa cuando se debe tomar una decisión; las situaciones nuevas pueden parecer similares, pero no exactamente iguales, a un contexto previo. La lógica difusa ofrece una alternativa a la lógica clásica permitiendo la introducción de un cierto nivel de ambigüedad e incertidumbre cuando se deben evaluar objetos o situaciones difíciles de cuantificar.

Observando los criterios mencionados, se puede intuir la dificultad en obtener un valor preciso real para cada criterio. A modo de ejemplo se podría citar el tiempo de construcción, un criterio que a simple vista es cuantitativo. Sin embargo, dados los imprevistos que pueden surgir durante el desarrollo de tecnologías de este tipo, estimar un tiempo determinado y concreto para cada una de las técnicas de desvío se antoja cuanto menos presuntuoso. Otros de los criterios seleccionados presentan incluso mayor complejidad; ¿de qué manera se puede cuantificar con un valor real la rotación, composición, estructura y forma del objeto?, ¿o incluso la madurez y el riesgo

de cada tecnología? La combinación de metodologías MCDM con técnicas como la lógica difusa proporciona la respuesta.

Es posible representar esa imprecisión mediante el concepto de etiquetas lingüísticas (Zadeh 1975), las cuales están a su vez asociadas con números difusos con el objetivo de poder valorar cada alternativa (o técnica de desvío de asteroides) para cada criterio. Al otorgar un valor para el tiempo de construcción, especialistas en este campo podrían evaluar dicho criterio mediante etiquetas lingüísticas de tiempo (muy breve, breve, medio, largo, muy largo). Criterios tales como la rotación, composición, estructura y forma del objeto pueden estar definidos en grados de importancia (poco importante, moderadamente importante, importante, muy importante o extremadamente importante). La pregunta en cuestión que habría que formular podría ser la siguiente: ¿Cómo de importante es el criterio rotación del objeto para cada una de las técnicas de desvío? De igual modo se podría proceder con los criterios de madurez y riesgo de las tecnologías de desvío, asignándoles etiquetas lingüísticas desde muy bajo a muy alto.

Para poder abordar el problema de decisión de este modo es realmente importante contar con la colaboración de un grupo de asesoramiento experto en el ámbito concreto del problema, es decir, en defensa planetaria. Un grupo formado por 10 personas especializadas de instituciones de renombre cumplimentó una serie de cuestionarios basados en versiones difusas de las metodologías multi-criterio AHP y TOPSIS, realizando así valiosas comparativas entre alternativas y criterios. Sus áreas de especialización incluyen OCT, así como las técnicas de deflexión a evaluar, perteneciendo a las siguientes instituciones: Langley Research Center y Jet Propulsion Laboratory de NASA, Oficina de Defensa Planetaria de la Agencia Espacial Europea (ESA), Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins, Instituto de Estudios Aeroespaciales de la Universidad de Toronto, Instituto de Ciencias del Espacio del Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España, Departamento de Física Aplicada a la Ingeniería Aeronáutica de la Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Matemáticas de la Universidad de Pisa y la compañía aeroespacial SpaceDyS.

Al igual que en las secciones anteriores, la cumplimentación de un cuestionario por este grupo de asesoramiento basado en la metodología AHP proporciona el peso o coeficientes de importancia de los criterios que influyen en la evaluación de alternativas. Dos criterios destacaron por encima del resto, el criterio tiempo de construcción de la técnica y la duración estimada de desvío de la trayectoria, ambos presentaron los mayores pesos. Por el contrario, los criterios de menor importancia fueron la rotación y la forma del objeto.

El grupo de asesoramiento, en este problema de decisión en concreto, no sólo cumplimentó un cuestionario basado en la metodología AHP, sino que también efectuó valoraciones cualitativas de cada uno de los ocho criterios para cada una de las cuatro alternativas, empleando para ello las etiquetas lingüísticas especificadas. La matriz de decisión obtenida, representada mediante números difusos asociados a las etiquetas lingüísticas, constituye el punto de partida para la aplicación de la versión difusa de la metodología multi-criterio TOPSIS. Por tanto, una vez determinados los pesos de los

criterios y aplicada la versión difusa del algoritmo TOPSIS a la matriz de decisión de alternativas y criterios, la relación de proximidad relativa a la solución ideal proporciona un ranking donde el orden de alternativas es el siguiente: 1^a.- Impacto cinético, 2^a.- Haz de iones, 3^a.- Tractor de gravedad mejorado y 4^a.- Ablación por láser.

Tras proporcionar estos resultados a las personas expertas en defensa planetaria que intervinieron en la cumplimentación de los cuestionarios, estas coincidían con la clasificación obtenida afirmando que, bajo las condiciones de un marco de tiempo de construcción limitado y la inexistencia de ensayos prácticos reales de dichas técnicas de deflexión, la técnica Impacto cinético es la que ofrece mayores garantías de éxito, siendo además la que se ha analizado con mayor detalle en los últimos años. Precisamente la misión DART probó su eficacia impactando contra el asteroide Dimorfos el 26 de septiembre de 2022, siendo capaz de variar la órbita del mismo alrededor de su asteroide compañero binario Didymos (**Rivkin y Cheng 2023**).

La segunda posición del Haz de iones en detrimento del Tractor de gravedad mejorado también fue apoyada por el grupo de asesoramiento. Argumentaron que, aunque ya se ha analizado la capacidad de la técnica EGT para lograr reducciones significativas en la duración de la deflexión en comparación con un tractor de gravedad tradicional (Mazanek et al., 2015), es necesario verificar la fuerza neta real sobre el asteroide a partir de la masa del EGT. De hecho, se necesita una gran cantidad de masa para realizar incluso pequeños cambios netos en la trayectoria.

Aunque la última posición de la técnica de Ablación por láser no sorprendió a las personas expertas por la falta de demostración de un sistema láser de alta potencia en el espacio lo suficientemente potente, la incertidumbre de su efecto sobre los parámetros de los asteroides y la disponibilidad de esa tecnología, destacaron aún así que la técnica LA tiene algunas ventajas significativas: sin interacción directa con la superficie, eficaz contra varias composiciones de objetivos y escalable en potencia a través de múltiples sistemas láser. La postularon como una tecnología prometedora para una futura capacidad de defensa planetaria, en el caso incluso de OPP de tamaños superiores a 300 metros.

Con este tercer caso de estudio se constata de nuevo la utilidad de este tipo de metodologías a la hora de tomar decisiones en defensa planetaria, combinándolas incluso con herramientas del ámbito de la inteligencia artificial como las técnicas de lógica difusa. Esta vez ha sido posible abordar un problema de decisión de gran interés para la humanidad, la evaluación de cuatro técnicas de desvío de asteroides, que puede servir como precedente para realizar análisis más exhaustivos con vistas a una mejor preparación y desarrollar sistemas paliativos de defensa planetaria.

4. CONCLUSIONES

Se ha iniciado este capítulo alertando sobre la gran amenaza y las graves consecuencias que podría acarrear para el planeta Tierra el impacto de un objeto procedente del exterior. Un impacto de esta naturaleza podría forzar a la humanidad a tomar deci-

siones cruciales con consecuencias de escala planetaria; ¿es un objeto potencialmente peligroso?, ¿qué técnica de desvío es la más eficaz? En caso de que vaya a colisionar, ¿podemos priorizar y/o predecir en qué zona va a impactar? En el peor de los casos, ¿cuáles serían los desplazamientos óptimos para efectuar la evacuación de la población?, ¿de qué manera se deberían abordar los movimientos migratorios?

Se ha demostrado a su vez cómo metodologías del ámbito de la teoría de la decisión, comúnmente denominadas de toma de decisión multi-criterio, permiten resolver este tipo de problemas de decisión proporcionando respuestas a dichos interrogantes. Metodologías como el enfoque AHP o las técnicas TOPSIS y RIM han permitido no sólo determinar los pesos o coeficiente de importancia de los parámetros que entran en juego (los criterios), sino también evaluar y/o priorizar las diferentes opciones (las alternativas) en el campo de la defensa planetaria.

Incluso se han dado los primeros pasos referentes a combinar estas metodologías ampliamente contrastadas con técnicas basadas en inteligencia artificial tales como la lógica difusa, permitiendo de este modo resolver problemas de decisión cuyos parámetros son difíciles de cuantificar y posibilitando la incorporación de criterios de naturaleza cualitativa.

Este es sólo el comienzo, demostrada su utilidad, es el momento de aprovechar al máximo el rendimiento que estos algoritmos y técnicas nos brindan. Aún hay mucho camino por recorrer y muchas decisiones que tomar, pero si queremos prepararnos ante el extraordinario desafío que supondrá la mitigación de un impacto cósmico, no queda más remedio que perseverar y continuar profundizando en las metodologías que más nos puedan ayudar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A'Hearn, M., et al. (2005). Deep Impact: Excavating Comet Tempel 1, *Science*, 310, 258-264.
- Almahdi, E.M., Zaidan, A.A., Zaidan, B.B., Alsalem, M.A., Albahri, Q.S. y Albahri, A.S. (2019). Mobile-based patient monitoring systems: A prioritisation framework using multi-criteria decision-making techniques. *Journal of Medical Systems*, 43, 219.
- Barucci, M.A. y Fulchignoni, M. (2005). The Near Earth Objects: possible impactors of the Earth. *Comptes Rendus Physique*, 6(3), 283-289.
- Bazzocchi, M. C., Sánchez-Lozano, J. M. y Hakima, H. (2021). Fuzzy multi-criteria decision making approach to prioritization of space debris for removal. *Advances in Space Research*, 67(3), 1155-1173.
- Bombardelli, C., Calero, E.J. y Gonzalo, J.L. (2019). Deflection of fictitious asteroid 2017 PDC: Ion beam vs. kinetic impactor. *Acta Astronautica*, 156, 301-307.
- Brans, J.P., Mareschal B. y Vincke Ph. (1984). PROMETHEE: a new family of outranking methods in multicriteria analysis. En: JP., Brans (Ed.), *Operational research* (pp. 477-490). Amsterdam: North-Holland.

- Cables, E., Lamata, M.T. y Verdegay, J.L. (2016). RIM-reference ideal method in multicriteria decision making. *Information Sciences*, 337-338, 1-10.
- Cables, E., Lamata, M.T. y Verdegay, J.L., (2018). FRIM-Fuzzy Reference Ideal Method in Multicriteria Decision Making. En M., Collan y J., Kacprzyk (Eds.), *Soft Computing Applications for Group Decision-Making and Consensus Modeling* (pp. 305-317). Springer International Publishing AG.
- Chapman, C.R. y Morrison, D. (1994). Impacts on the Earth by asteroids and comets: assessing the hazard. *Nature*, 367, 33-40.
- Cheng, A.F., Agrusa, H.F., Barbee, B.W. et al. (2023). Momentum transfer from the DART mission kinetic impact on asteroid Dimorphos. *Nature*, 616, 457-460.
- Chesley, S.R., Chodas, P.W., Milani, A., Valsecchi, G.B. y Yeomans, D.K. (2002). Quantifying the Risk Posed by Potential Earth Impacts. *Icarus* 159(2), 423-432.
- Chodas, P.W. y Baalke, R. (2017). Sentry Risk Table at the NASA Near Earth Object Program (Impact Risk). National Aeronautics and Space Administration. <https://cneos.jpl.nasa.gov/sentry/intro.html> (Acceso: 21 de febrero de 2021).
- Chodas, P.W. (2022a). Sentry: Earth Impact Monitoring. Near Earth Object Program (Impact Risk). National Aeronautics and Space Administration. <https://cneos.jpl.nasa.gov/sentry/details.html#des=2008%20UB7> (Acceso: 06 de junio de 2023).
- (2022b). Sentry: Earth Impact Monitoring. Near Earth Object Program (Impact Risk). National Aeronautics and Space Administration. <https://cneos.jpl.nasa.gov/sentry/details.html#des=2008%20EX5> (Acceso: 06 de junio de 2023).
- Daly, R.T., Ernst, C.M., Barnouin, O.S. et al. (2023). Successful kinetic impact into an asteroid for planetary defence. *Nature*, 616, 443-447.
- European Space Agency, (2021). Apophis impact ruled out for the first time. https://www.esa.int/Space_Safety/Planetary_Defence/Apophis_impact_ruled_out_for_the_first_time (Acceso: 26 de marzo de 2021).
- Frank, M.V. (1995). Choosing Among Safety Improvement Strategies: A Discussion with Example of Risk Assessment and Multi-criteria Decision Approaches for NASA. *Reliability Engineering and System Safety*, 49(3), 311-324.
- Hwang, C.L. y Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision methods and applications*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Keeney, R. y Raiffa, H. (1976). *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Values Tradeoffs*, Wiley, New York.
- Mardani, A., Jusoh, A., Nor, K., Khalifah, Z., Zakwan, N. y Valipour, A. (2015). Multiple criteria decision-making techniques and their applications—a review of the literature from 2000 to 2014. *Economic research-Ekonomska istraživanja*, 28(1), 516-571.
- Mazanek, D. D., Reeves, D. M., Hopkins, J. B., Wade, D. W., Tantardini, M. y Shen, H. (2015, April). Enhanced gravity tractor technique for planetary defense. In IAA Planetary Defense Conference (No. IAA-PDC-15-04-11).
- McInnes, C.R. (2007). Near earth object orbit modification using gravitational coupling. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 30(3), 870-873.
- Mou, J. y Webster, I. (2021). 410777 (2009 FD) Very small Apollo-class Asteroid. <https://www.spacereference.org/asteroid/410777-2009-fd>.

- Opricovic, S. (1998). Multi-criteria optimization of civil engineering systems [PhD Thesis] Faculty of Civil Engineering, Belgrade.
- Perna, D., Barucci, M. A., y Fulchignoni, M. (2013). The near-Earth objects and their potential threat to our planet. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 21, 1-28.
- Rabinowitz, D., Helin E., Lawrence, K. y Pravdo, S. (2000). A reduced estimate of the number of kilometre-sized near-Earth asteroids. *Nature*, 403, 165-166.
- Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49-57.
- Rivkin, A.S. y Cheng, A.F. (2023). Planetary defense with the Double Asteroid Redirection Test (DART) mission and prospects. *Nature Communications*, 14, 1003.
- Roy, B. (1968). Classement et choix en presence de points de vue multiples (la method ELECTRE). *Revue informatique et recherché opérationnelle*, 8, 57-75.
- Rumpf, C.M., Mathias, D.L. Wheeler, L.F., Dotson, J.L., Barbee, B., Roa, J., Chodas, P. y Farnocchia, D. (2020). Deflection driven evolution of asteroid impact risk under large uncertainties. *Acta Astronautica*, 176, 276-286.
- Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.
- (1996). *Decision making with dependence and feedback: the analytic network process*. Pittsburgh (PA, USA): RWS Publications.
- Sánchez-Lozano, J.M., Moya, A. y Rodríguez-Mozos, J.M. (2021). A fuzzy multi-criteria decision making approach for exo-planetary habitability. *Astronomy y Computing*, 36, 100471.
- Sánchez-Lozano, J.M. y Fernández-Martínez, M. (2016). Near-Earth object hazardous impact: A multi-criteria decision making approach. *Scientific Reports*, 1-10.
- Sánchez-Lozano, J.M., Fernández-Martínez, M., y Lamata, M.T. (2019). Near-Earth Asteroid impact dates: A Reference Ideal Method (RIM) approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 81, 157-168.
- Sánchez-Lozano, J.M., Fernández-Martínez, M., Saucedo-Fernández, A.A. y Trigo-Rodríguez, J.M. (2020). Evaluation of NEA deflection techniques, a fuzzy multicriteria decision making analysis for planetary defense. *Acta Astronautica*, 176, 383-397.
- Simó-Soler, E. y Peña-Asensio, E. (2022). From impact refugees to deterritorialized states: Foresighting extreme legal-policy cases in asteroid impact scenarios. *Acta Astronautica*, 192, 402-408.
- Simon, H.A. (1960). *The New Science of Management Decision*. New York: Harper and Brothers Publishers.
- Tavana, M. (2004). A subjective assessment of alternative mission architectures for the human exploration of Mars at NASA using multi-criteria decision making. *Computers y Operations Research*. 31(7), 1147-1164.
- Tavana, M. y Hatami-Marbini, A. (2011). A Group AHP-TOPSIS Framework for Human Spaceflight Mission Planning at NASA. *Expert Systems with Applications*, 38(11), 13588-13603.
- Tavana, M., Khalili-Damghani, K. y Abtahi, A.R. (2013). A Hybrid Fuzzy Group Decision Support Framework for Advanced-Technology Prioritization at NASA. *Expert Systems with Applications*, 40(2), 480-491.

- Thiry, N. y Vasile, M. (2017). Statistical multi-criteria evaluation of non-nuclear asteroid deflection methods. *Acta Astronautica*, 140, 293-307.
- Triantaphyllou, E. (2000). *Multi-Criteria Decision Making: A Comparative Study*. Dordrech. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Trigo-Rodríguez, J.M. (2022). *Asteroid Impact Risk. Impact Hazard from Asteroids and Comets*. Impact Studies series. Springer Cham.
- Ullah, R., Zhou, D.Q., Zhou, P., Sohail, M.A. y Husain, M. (2013). An approach for space launch vehicle conceptual design and multi-attribute evaluation. *Aerospace Science and Technology*, 25(1), 65-74.
- Vasile, M. y Maddock, C.A. (2012). Design of a formation of solar pumped lasers for asteroid deflection. *Advances in Space Research*, 50(7), 891-905.
- Von Neumann, J. y Morgenstern, O. (1944). *Theory of games and economic behaviour*. Princeton University Press.
- Ward, S.N. y Asphaug, E. (2003). Asteroid impact tsunami of 2880 March 16. *Geophysical Journal International*, 153(3), 6-10.
- Weisbin, C., Lincoln, W., Wilcox, B., Brophy, J., Chodas, P. y Muirhead, B. (2015). Comparative Analysis of Asteroid-Deflection Approaches. *IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, USA, 1-16.
- Wissler, S., Rocca, J. y Kubitschek, D. (2005). Deep impact comet encounter: design, development, and operations of the big event at Tempel 1, First Annual Space Systems Engineering Conference, 1-20. Atlanta, GA <http://hdl.handle.net/2014/38642>.
- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, 338-353.
- Zadeh, L.A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning–I. *Information Sciences*, 8(3), 199-249.