

Análisis de Viabilidad Económica para Prospección Multi-Asteroide mediante Optimización de Rutas Espaciales

Autor/Autores:

Braulio Ulises Antayhua Ylave
Alonso Manuel Pérez Guanilo
Flavio Cesar Corvetto Nieto
Cristhian Horacio Gupioc Olivares
Luis Alejandro Asto Rivera

Resumen- Este trabajo aborda el problema de la viabilidad económica de la minería espacial, analizando la transición desde el enfoque inicial en metales preciosos hacia la explotación de agua en asteroides para mercados in-situ. Se propone un modelo de optimización que integra algoritmos de búsqueda R^* con criterios económicos y técnicos para diseñar rutas de prospección comercialmente viables. El objetivo es identificar secuencias óptimas de asteroides que maximicen el retorno de inversión considerando costos de misión, operación minera y valor de mercado del agua en el espacio. Los resultados demuestran que la optimización económica multi-objetivo supera los enfoques puramente técnicos, identificando rutas que alcanzan punto de equilibrio en plazos compatibles con inversión privada.

1. Introducción

■ Descripción del problema:

La minería de asteroides ha capturado la imaginación científica y empresarial durante décadas, evolucionando significativamente en su enfoque estratégico. Inicialmente, pioneros como Kargel (1996) [4] y Elvis (2014) [5] visualizaron los asteroides como fuentes de metales preciosos, particularmente del grupo del platino (PGMs), argumentando que el alto valor de mercado (~\$70,000/kg) justificaría los enormes costos de las misiones espaciales. Kargel [4] calculó que un solo asteroide metálico podría contener hasta 7,500 toneladas de platino, representando un valor potencial de billones de dólares.

Sin embargo, los análisis técnico-económicos más recientes, particularmente el trabajo de Hein et al. (2019) en Acta Astronautica, han demostrado que este enfoque enfrenta obstáculos económicos casi insuperables a corto y medio plazo. La minería de platino requiere tasas de procesamiento órdenes de magnitud superiores debido a su baja concentración ($\sim 10^{-5}$), y la inyección de incluso pequeñas cantidades en el mercado terrestre provocaría una caída drástica de precios, eliminando la rentabilidad.

El nuevo paradigma se centra en la minería de volátiles, especialmente agua, para su uso en el espacio. Este enfoque es significativamente más viable porque:

- Crea un mercado in-situ donde el agua se vende como propelente para satélites y naves, compitiendo con el alto costo de lanzamiento desde Tierra (~\$20,000/kg)
- Es técnicamente menos exigente, ya que la concentración de agua en asteroides tipo-C es mucho mayor (5-10%)
- Sirve como catalizador para una economía espacial sostenible

El problema técnico central radica en la optimización de rutas de prospección multi-asteroide. Investigaciones fundamentales como Olimpo (2011) [3] demostraron que visitar múltiples asteroides en una misión reduce costos y aumenta el retorno. Sobre estos cimientos, Yang et al. (2015) desarrollaron métodos avanzados usando asistencias gravitatorias y algoritmos de optimización como PSO para diseñar rutas de bajo delta-V.

Explicar: ¿qué son? ¿por qué es un problema?

¿Qué es?

Solo (Olimpo, 2011). Ya no necesitaría el [3].



¿Qué tanto puede afectar?

Sin embargo, persiste una brecha crítica: estos modelos se optimizan para mínimo costo técnico (delta-V), pero no consideran integralmente la viabilidad económica comercial que debe incluir costos de operación minera, modelo de negocio in-situ e ingresos potenciales.

Hipótesis:

La optimización de rutas de prospección multi-asteroide mediante el algoritmo de búsqueda R^* , que integre transferencias de bajo costo con asistencias gravitatorias y un modelo económico de mercado in-situ, permitirá identificar misiones comercialmente viables que superen las limitaciones de los modelos de optimización puramente técnicos.

Objetivos:

General:

Diseñar y evaluar un modelo de optimización para rutas de prospección de asteroides que, mediante la combinación del algoritmo R^* [7], transferencias orbitales de bajo costo y un modelo económico de mercado in-situ, demuestre la viabilidad comercial de un servicio de prospección y suministro de agua en el espacio.

Específicos:

1. Desarrollar un Modelo de Evaluación Económica para Mercado In-Situ
 - a. Integrar costos de minería y transporte a mercados orbitales (Estación Lunar Gateway, órbitas cis-lunares)
 - b. Crear función de evaluación que maximice el Retorno de Inversión (ROI) basado en precios de venta espaciales
2. Implementar el Algoritmo de Búsqueda R^* para Optimización de Rutas Multi-Asteroide
 - a. Adaptar R^* para explorar secuencias de asteroides con criterios económicos
 - b. Utilizar el marco de transferencias orbitales y asistencias gravitatorias para cálculo de delta-V
3. Validar contra Enfoques Tradicionales de Planificación de Misiones

- a. Comparar desempeño de R^* frente a PSO de Yang[2] et al.
- b. Utilizar una base de datos de NEOs conocidos y criterios establecidos en la literatura (delta-V, tipo espectral, contenido de agua).

4. Identificar Rutas Comercialmente Viables

- a. Aplicar el modelo integrado para encontrar rutas con punto de equilibrio alcanzable
- b. Realizar análisis de sensibilidad de parámetros críticos en viabilidad económica

2. Trabajos relacionados

Hein et al. (2019) - "A techno-economic analysis of asteroid mining"

- Establece la superioridad económica de la minería de agua sobre metales preciosos
- Identifica tasa de procesamiento y uso de naves pequeñas como factores críticos
- Demuestra que el retorno a Tierra no es económicamente viable

Yang et al. (2015) - "Low-cost transfer between asteroids with distant orbits using multiple gravity assists"

- Desarrolla framework para optimización de rutas multi-asteroide usando PSO
- Implementa asistencias gravitatorias para reducir delta-V
- Enfoque en minimización de costos técnicos sin criterios económicos

Olympio (2011) - "Optimal control problem for low-thrust multiple asteroid tour missions"

- Establece bases técnicas para misiones multi-asteroide
- Demuestra que visitar múltiples asteroides reduce costos y aumenta retorno
- Desarrolla métodos de control óptimo para trayectorias de bajo empuje

Likhachev y Stentz (2005) - R^* Search: Algoritmo de búsqueda heurística para problemas de planificación complejos

- Desarrolla R^* como algoritmo de búsqueda subóptima pero altamente escalable
- Mecanismo clave: Divide el problema en una serie de búsquedas de corto alcance, cada una guiada hacia un objetivo aleatorio

Esta sección no debe ser un simple listado de papers. Deben analizarlos (presentar sus fortalezas/debilidades/puntos de mejor), compararlos entre ellos y determinar cómo van a influir en su propio proyecto.



- Innovación principal: Evita mínimos locales usando reevaluación aleatoria de objetivos

Izzo (2014) - "Revisiting Lambert's Problem"

- Algoritmo robusto para cálculo de transferencias orbitales
- Base para nuestra función **lambert_transfer**

3. Metodología

Enfoque Propuesto

Se propone un algoritmo de búsqueda R adaptado* que integra optimización técnica orbital con criterios económicos para resolver el problema de planificación de rutas de prospección multi-asteroide comercialmente viables.

Formulación Formal del Problema

Definición del Espacio de Estados:

- Estado
 $s = \langle seq, current, \Delta V_{used}, m_{water}, t_{current}, date \rangle$
 - $seq = [a_0, a_1, \dots, a_k]$: secuencia de asteroides visitados
 - $current \in A$: asteroide actual
 - $\Delta V_{used} \in \mathbb{R}^+$: delta-V consumido acumulado
 - $m_{water} \in \mathbb{R}^+$: masa total de agua recolectada (kg)
 - $t_{current} \in \mathbb{R}^+$: tiempo de misión transcurrido (días)
 - $date \in \mathbb{R}$: fecha absoluta (días desde época de referencia)

¿Cómo se calcula?

Estado Inicial:

$$s_0 = \langle [a_{base}], a_{base}, 0, 0, 0, date_{launch} \rangle$$

Donde:

- a_{base} : es la estación orbital de partida (ej: Gateway Lunar)
- $date_{launch}$: es la fecha de lanzamiento específica

¿Está asumiendo que la estación orbital es también un asteroide?

Estado Objetivo:

$GOAL(s) = TRUE$ si:

- Posición final correcta: $s.current = L2_{Station}$
- Retorno de inversión suficiente: $ROI(s) \geq ROI_{min}$
- Consumo de dentro del presupuesto: $s.\Delta V_{used} \leq DV_{BUDGET}$
- Tiempo total dentro del límite permitido: $s.t_{current} \leq TIME_{MAX}$
- Al menos un asteroide visitado: $s.asteroids_visited() \geq 1$

Si la lista tiene un solo elemento (la base/estación orbital), ¿sería aceptable la solución?

¿Cómo se define delta_V?

Funciones de Acciones:

$$ACTIONS(s) = \{a \in A \mid a \notin s.seq \wedge \Delta V(s.current, a, s.date) \leq \Delta V_{budget} - s.\Delta V_{used}\}$$

Modelo de Transición:

$$RESULT(s, a) = s' = \langle seq \oplus [a], a, \Delta V', m'_{water}, t'_{current}, date' \rangle$$

Donde:

- $t_{current} = s.t_{current} + t_{transfer} + t_{mining}$
- $t_{transfer} = t_{flight}(s.current, a, s.date)$
- $\Delta V' = s.\Delta V_{used} + \Delta V(s.current, a, s.date) + \Delta V_{mining} + \Delta V_{return}(a, date')$
- $m'_{water} = s.m_{water} + V_a \cdot \eta_{mining}$
- $date' = s.date + t_{transfer} + t_{mining}$

Prueba de Objetivo:

$$GOAL - TEST(s) = \{$$

$TRUE$ si $ROI(s) \geq ROI_{min} \wedge s.\Delta V_{used} \leq \Delta V_{budget} \wedge |s.seq| \geq k_{min}$
 $FALSE$ en otro caso

Función de Costo de Camino:

$$g(s) = -ROI(s) = -(I_{total}(s) - C_{total}(s)) / (C_{dev} + C_{launch})$$

Comportamiento Entrada/Salida

Entradas

- $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$: Conjunto de asteroides candidatos con parámetros orbitales
- Efemérides planetarias para cálculo de posiciones.
- Parámetros económicos:
 - $P_{water} = 20000$: Precio agua en espacio (\$/kg)
 - $ROI_{min} = 0.15$: ROI mínimo aceptable (15%)
 - $C_{dev} = 5 * 10^8$: Costo desarrollo (\$)
 - $C_{launch} = 2 * 10^7$: Costo lanzamiento (\$)
- Restricciones operativas
 - $V_{budget} = 15$: Presupuesto total delta-V (km/s)
 - $t_{max} = 1825$: Tiempo máximo misión (días, ~5 años)
 - $Asteroids_{MAX} = 10$

Deben justificar cada uno de estos parámetros.

¿Qué representa?

Salidas

- s^* : Estado objetivo que maximiza ROI
- $ROI(s^*)$: Retorno de inversión óptimo
- $Reporte = \langle ruta, \Delta V_{total}, m_{water}, t_{total}, ROI \rangle$

Operadores y Funciones Desarrolladas

Función de Transición de Estado - RESULT(s, a).

```
def result(self, state: State, action: str) -> State:
    ast_from = self.asteroids[state.current]
    ast_to = self.asteroids[action]

    # Cálculo de transferencia orbital
    dv_transfer, transfer_time =
self._calculate_transfer_dv_with_tof(ast_from, ast_to, state.date_abs)

    # Posición y velocidad actualizadas
    new_position = ast_to.orbital_position(state.date_abs + transfer_time)
    new_velocity = self._calculate_orbital_velocity(new_position)

    # Minería solo en asteroides (no en L2)
    if ast_to.is_lagrange_station:
        mining_time, water_collected = 0, 0
    else:
        mining_time = MINING_TIME
        water_collected = ast_to.available_water_kg(mining_time)

    # Costo real del paso
    cost_step = self._calculate_real_step_cost(state, dv_transfer,
                                              transfer_time, ast_to)

    return state.clone_and_add(action, dv_transfer, water_collected,
                              transfer_time + mining_time, new_position,
                              new_velocity, cost_add=cost_step)
```

Algoritmo R Adaptado para Optimización Orbital.

```
class RStar:
def _generate_directed_successors(self, node: RStarNode) ->
List[RStarNode]:
    current_state = node.state
    current_direction = node.direction
    available_actions = self.env.actions(current_state)

    # Scoring de acciones considerando dirección orbital
    scored_actions = []
    for action in available_actions:
        score = self._score_action_with_direction(
            current_state, current_direction, action)
        scored_actions.append((score, action))

    # Selección de mejores K sucesores
    scored_actions.sort(reverse=True, key=lambda x: x[0])
    successors = []

    for score, action in scored_actions[:self.K]:
        succ_state = self.env.result(current_state, action)
        new_direction = self._calculate_new_direction(node, succ_state,
action)

        edge_cost = self._estimate_edge_cost(current_state, succ_state)
        new_g = node.g + edge_cost
        succ_node = RStarNode(state=succ_state, g=new_g,
                              parent=node, direction=new_direction)
        successors.append(succ_node)

    return successors
```

Función de Score con Dirección Orbital

```
def _score_action_with_direction(self, current_state: State,
                                current_direction: Tuple[float, float, float],
                                action: str) -> float:
    if action == "L2_STATION":
        # Prioridad alta para retorno con agua
        return 1000 + current_state.m_water / 1000

    asteroid = self.env.asteroids[action]
    current_ast = self.env.asteroids[current_state.current]

    # Score base por agua potencial
    water_potential = asteroid.available_water_kg()
    water_score = water_potential * P_WATER / 1000000

    # Penalización por delta-V
    dv_est = self.env._estimate_dv(current_ast, asteroid,
current_state.date_abs)
    dv_penalty = dv_est / 1000

    # Bonus por dirección orbital similar
    direction_bonus = self._calculate_direction_bonus(
        current_state, current_direction, action)

    return water_score - dv_penalty + direction_bonus
```

Cálculo de Trayectorias Continuas que Evitan el Sol

```
class ContinuousTrajectoryCalculator:
def _generate_solar_avoiding_trajectory(self, start_pos, end_pos,
num_points):
    start_vec = np.array([start_pos[0], start_pos[1]])
    end_vec = np.array([end_pos[0], end_pos[1]])

    # Detectar si pasa muy cerca del Sol
    min_distance = self._line_min_distance_to_sun(start_vec, end_vec)

    if min_distance < AU * 0.3: # Menos de 0.3 AU del Sol
        return self._elliptical_avoidance_trajectory(start_vec, end_vec,
num_points)
    else:
        return self._smooth_curved_trajectory(start_vec, end_vec,
num_points)
```

Modelo Económico Integrado

```
def calculate_roi(self, state: State) -> float:
    revenue = state.m_water * P_WATER

    # Costos detallados
    cost_development = C_DEV
    cost_launch = C_LAUNCH

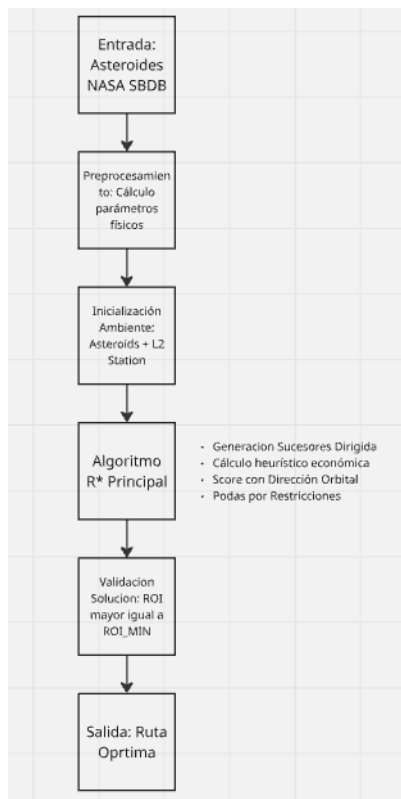
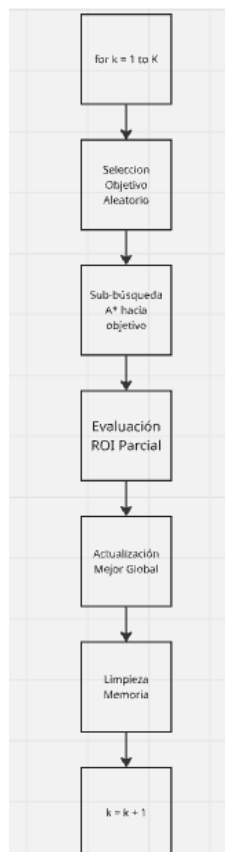
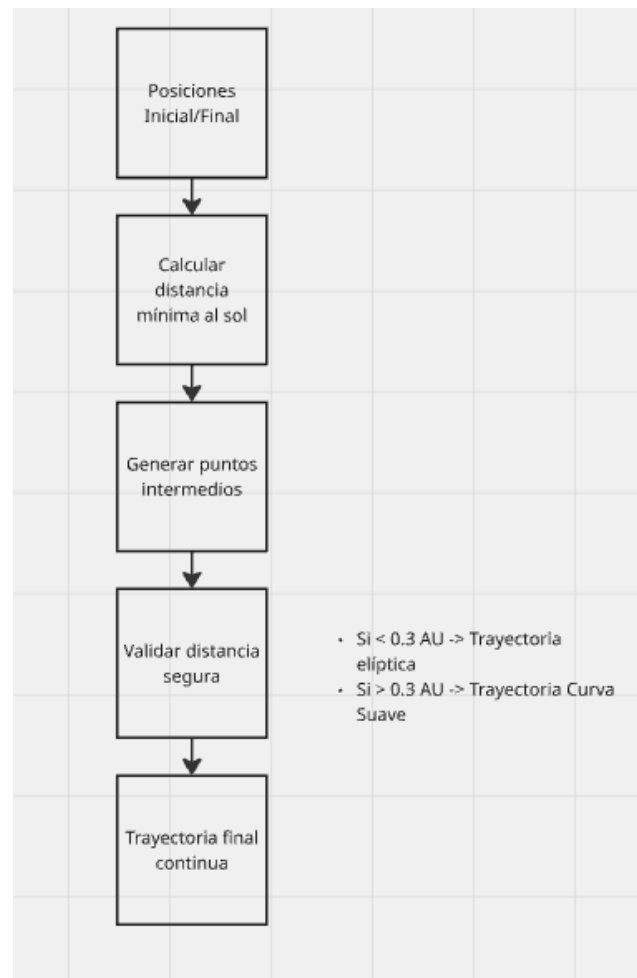
    # Costo de propelente (basado en ΔV real)
    if state.delta_v_used > 0:
        mass_ratio = math.exp(-state.delta_v_used / (ISP * G0))
        m_prop = M0_WET * (1.0 - mass_ratio)
        cost_propellant = m_prop * C_FUEL
    else:
        cost_propellant = 0.0

    cost_operations = state.t_current * 10000.0 # OPEX por día
    cost_mining = state.asteroids_visited() * 1000000.0 # Costo por
asteroide

    total_cost = (cost_development + cost_launch + cost_propellant +
cost_operations + cost_mining)

    return (revenue - total_cost) / total_cost if total_cost > 0 else 0.0
```



Figura 1: Arquitectura del Sistema R Adaptado**Figura 2: Ciclo de Búsqueda R por Objetivos Intermedios****Figura 3: Cálculo de Trayectorias con Evitación Solar****Innovaciones Clave Desarrolladas:**

1. **Integración Orbital-Económica:** Primera formulación que combina mecánica orbital con ROI comercial en espacio de estados unificados.
2. **Dirección Orbital en Búsqueda:** Incorporación de vectores dirección para guiar la exploración hacia rutas orbitalmente eficientes.
3. **Evitación Solar Proactiva:** Algoritmo que genera trayectorias continuas manteniendo distancia segura del Sol.
4. **Modelo de Costos Realista:** Considera desarrollo, lanzamiento, operaciones, minería y retorno de forma independiente.
5. **Selección Adaptativa de Sucesores:** Combinación de criterios de agua, delta-V y dirección orbital para poda inteligente.

Esta metodología representa un avance significativo al resolver simultáneamente las complejidades técnicas orbitales y los requisitos de viabilidad económica

comercial en la planificación de misiones de minería espacial.

4. Experimentación y Resultados

■ Setup experimental:

Para el experimento se pondrá a prueba el algoritmo R^* propuesto contra soluciones vistas en clase como A^* aplicadas al caso. Se tomarán en cuenta las siguientes métricas: la velocidad del algoritmo para encontrar una solución, la eficiencia medida mediante la cantidad de nodos abiertos y el retorno de inversión (ROI) obtenido bajo el mismo presupuesto (delta-V en m/s). Los datos de cuerpos celestes utilizados son extraídos de una API proveída por la NASA llamada SDBD (Small-Body DataBase), lo que permite trabajar con parámetros orbitales realistas para la simulación.

En cuanto a los parámetros que afectan directamente a los resultados tenemos

Delta-V: Controla la distancia que puede viajar la nave

K: Controla la cantidad de nodos que va a explorar el algoritmo R^*

W: Controla el peso de la heurística, un valor muy alto exige demasiada precisión.

Mining time: Controla el tiempo que puede pasar la nave en el mismo asteroide extrayendo agua

Mining rate: Controla la velocidad con la que se extrae el agua

Roi min: Controla el mínimo retorno de inversión que requiere la misión para ser considerada exitosa

Se trabajó con cuatro configuraciones distintas, iniciando con un caso pequeño compuesto por 5 asteroides y un presupuesto de 25 000 m/s. En este escenario ambos algoritmos alcanzaron exactamente el mismo ROI y tiempos muy similares, pero R^* mostró una exploración más eficiente al abrir solo 4826 nodos frente a los 4929 de A^* . Posteriormente, en el caso medio con 8 asteroides y 30 000 m/s, R^* mostró una mejora de 18.5% en el ROI, aunque A^* logró un tiempo menor. Aun así, R^* volvió a destacar en eficiencia al reducir en un 31% la cantidad de nodos abiertos.

En el caso grande, con 12 asteroides y 40 000 m/s, nuevamente se tiene un empate en el ROI y tiempo de ejecución. Sin embargo R^* muestra una reducción notable (cerca del 50%) en apertura de nodos. Finalmente, en el caso restrictivo ambos algoritmos fallaron bajo las limitaciones extremas de recursos, por lo que este escenario se consideró solo para evaluar robustez y no para comparaciones cuantitativas.

¿Han ejecutado 1 sola vez cada algoritmo? Para ser significativo, se recomienda repetir varias veces cada uno y comparar estadísticamente los resultados.

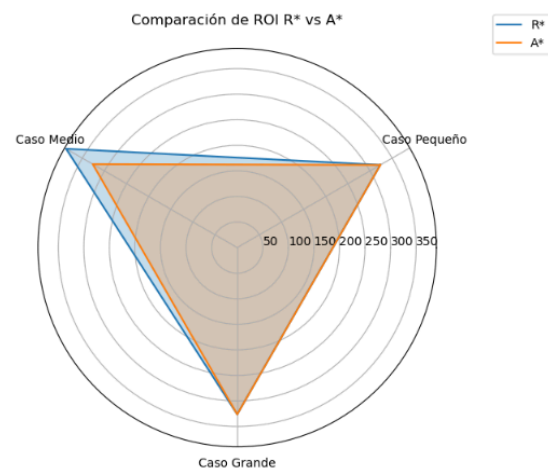


Figura 2: Comparación del ROI para el modelo R^* y A^*

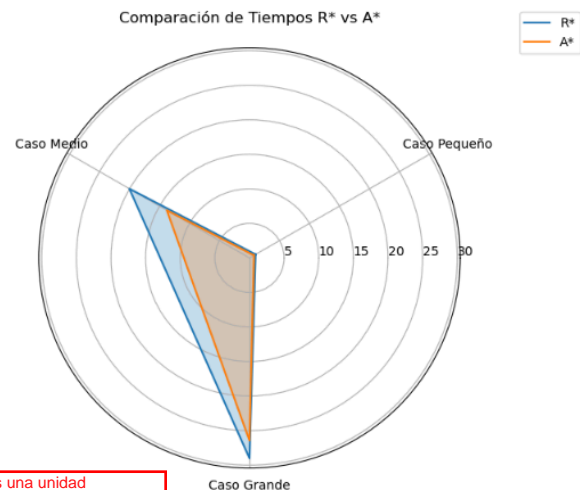


Figura 3: Comparación de tiempos de ejecución entre los modelos R^* y A^*

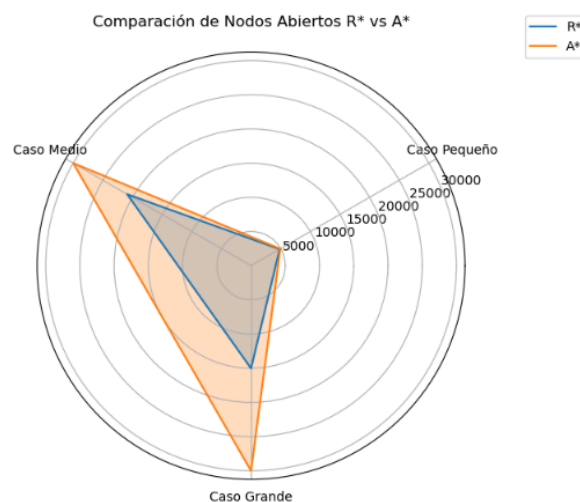


Figura 4: Comparación de Nodos abiertos entre los modelos R^* y A^*

Respecto a si el enfoque desarrollado resuelve siempre el problema, los resultados muestran que R^* y A^* tienen el mismo nivel de éxito: ambos resuelven los 3 de prueba y fallan bajo las mismas condiciones restrictivas. En términos de eficiencia, R^* demuestra consistentemente explorar menos nodos en todos los casos exitosos, lo que indica una ventaja clara en esta dimensión. Sobre el desempeño, los datos muestran que A^* tiende a ser, en promedio, más rápido. En términos del ROI R^* muestra una tendencia ser mejor para misiones de 4 asteroides con un presupuesto medio, en el resto de condiciones ambos algoritmos tienen el mismo rendimiento.

5. Conclusión

Los experimentos realizados permiten caracterizar de manera sólida el comportamiento del algoritmo R^* frente al enfoque clásico A^* en el contexto de planificación de misiones de minería de agua en asteroides. En todos los escenarios donde ambos algoritmos lograron encontrar una solución, R^* mostró una ventaja consistente en eficiencia, reduciendo la cantidad de nodos abiertos de forma significativa y manteniendo un desempeño estable incluso a medida que se incrementa la complejidad del problema. Esta reducción en exploración sugiere que R^* aprovecha mejor la estructura del espacio de búsqueda, lo cual es especialmente relevante para aplicaciones espaciales donde el costo computacional y energético es crítico.

En cuanto al retorno de inversión, los resultados muestran que R^* solo supera a A^* en escenarios de complejidad media, manteniéndose equivalente en los casos pequeño y grande. Esto indica que la mejora en eficiencia del algoritmo no necesariamente se traduce en soluciones con mayor beneficio económico. Por otro lado, A^* tiende a ser más rápido en promedio, lo cual evidencia que su simplicidad estructural aún ofrece ventajas cuando la prioridad es minimizar el tiempo de cómputo.

En conjunto, los resultados sugieren que R^* es una alternativa prometedora cuando se busca eficiencia en la exploración y estabilidad en problemas de creciente complejidad, mientras que A^* conserva ventajas en tiempo y simplicidad operativa. La elección del enfoque más adecuado dependerá, en última instancia, de las prioridades de la misión: maximizar eficiencia computacional o maximizar velocidad de respuesta.

6. Sugerencias de trabajos futuros

¿Qué tan crítica es la velocidad del algoritmo? Si normalmente se usarían en una etapa de planificación, sería poco relevante si es que la diferencia de velocidades es poca o mediana. Si se quiere integrar el algoritmo a algún sistema de navegación o similares, esta velocidad adquiere mayor importancia.

Se sugiere conectar el algoritmo con la api Horizons proveída por la NASA, teniendo en cuenta que esta api brinda información más precisa pero más lenta, se recomienda buscar la manera de mejorar el tiempo de respuesta o la capacidad predictiva del modelo para poder manejar ventanas de 2 o 3 segundos entre consulta.

7. Implicancias éticas

Si el modelo propuesto es elevado a la planificación y optimización de misiones de minería de asteroides en el contexto de una economía espacial emergente, las principales implicancias éticas son:

Gobernanza internacional y propiedad de los recursos espaciales:

En el marco legal vigente ningún Estado puede reclamar propiedad sobre cuerpos celestes. Sin embargo, no se especifica con claridad la situación legal de recursos extraídos, lo que genera un vacío legal que distintos Estados y empresas intentan interpretar a su favor. Dado que no existe un mecanismo internacional de priorización de misiones, la preservación de ciertos cuerpos o la distribución equitativa de recursos, se vuelve fundamental que el uso de herramientas de optimización se utilice bajo principios de cooperación internacional y lineamientos globales de gobernanza espacial. Además, los resultados del modelo deben utilizarse como apoyo técnico, mas no como criterio único de explotación de recursos con el fin de garantizar un uso sostenible y pacífico del entorno espacial.

Sesgos del modelo

El modelo desarrollado depende de parámetros económicos y heurísticas que podrían generar sesgos no intencionados en la priorización de asteroides. Por ejemplo, la optimización basada en retorno económico podría favorecer cuerpos fácilmente accesibles o altamente rentables, ignorando asteroides relevantes para investigación científica. Esto podría conducir a decisiones sesgadas a partir de un modelo que, aunque funcional bajo sus propias métricas, no es totalmente representativo. Por ello, el desarrollo y la aplicación del sistema deben complementarse con análisis de sensibilidad y revisión interdisciplinaria que garanticen que las recomendaciones resultantes no comprometan objetivos científicos, ambientales o de sostenibilidad a largo plazo.

Privacidad y manejo de información:



Aunque los parámetros orbitales son en general públicos, en aplicaciones reales este modelo podría acoplarse a información operativa sensible, como ventanas de lanzamiento, capacidades tecnológicas y rutas de misión de agencias y empresas espaciales. La gestión inadecuada de este tipo de información podría comprometer la seguridad operacional, exponer vulnerabilidades y generar tensiones geopolíticas. Por ello, cualquier implementación futura debe realizarse bajo estrictos protocolos de ciberseguridad con el fin de garantizar que la información no sea utilizada fuera de contexto o para fines distintos a los diseñados para el sistema.

Intervención de ecosistemas celestes

La extracción de recursos en asteroides tiene el potencial de alterar cuerpos de valor científico e introducir perturbaciones en su órbita. Además, se introduce el riesgo de generar desechos espaciales. Para mitigar estos riesgos, es necesario complementar la planificación de misiones con evaluaciones de impacto ambiental espacial con el fin de identificar cuerpos que deben preservarse por su relevancia científica o riesgo potencial para la Tierra ante desviaciones de órbita.

4. Link del repositorio del trabajo

ODIS30:

<https://github.com/UlisesYlave/ODIS30>

5. Declaración de contribución de cada integrante

- **Alonso Manuel Pérez Guanilo:** Conclusión, Sugerencias para trabajos a futuro e implicaciones éticas.
- **Braulio Ulises Antayhua Ylave:**
Aporte en la introducción y metodología
Búsqueda de papers
Aporte profundo en el desarrollo del código: mejoras de algoritmo R*, visualización e implementación de A* para comparaciones.
- **Flavio Cesar Corvetto Nieto:**
Aporte en el desarrollo de la implementación del algoritmo: conexiones con API, mejora de heurísticas y aporte en comparaciones.
- **Cristhian Horacio Gupioc Olivares:**
- **Luis Alejandro Asto Rivera:**
Primera implementación del algoritmo, comparación de modelos e implicaciones éticas.

6. Referencias

- [1]. Hein, A. M., et al. "A techno-economic analysis of asteroid mining." *Acta Astronautica* (2019)
- [2]. Yang, H., et al. "Low-cost transfer between asteroids with distant orbits using multiple gravity assists." *Advances in Space Research* (2015)
- [3]. Olympio, J.T. "Optimal control problem for low-thrust multiple asteroid tour missions." *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* (2011)
- [4]. Kargel, J.S. "Market value of asteroidal precious metals in an age of diminishing terrestrial resources." *Engineering, Construction, and Operations in Space V* (1996)
- [5]. Elvis, M. "How many ore-bearing asteroids?" *Planetary and Space Science* (2014)
- [6]. Izzo, D. "Revisiting Lambert's Problem." *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 121(1), 2014.
- [7] Likhachev, M., & Stentz, A. "R* Search." *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence*, 2005.

