

# Estrategias para la exploración coordinada multi-VANT

Luis Alberto Ballado Aradias

CINVESTAV UNIDAD TAMAULIPAS

Cd. Victoria, Tamaulipas - 10 de noviembre de 2023

# Contenido

- ① Descripción del proyecto
- ② Planteamiento del problema
- ③ Hipótesis y Objetivos
- ④ Metodología
- ⑤ Cronograma
- ⑥ Estado del Arte
- ⑦ Contribuciones o resultados esperados

# Descripción del proyecto



- **Aplicaciones** en lugares inaccesibles o peligrosos.
- **Múltiples VANT** pueden reducir el tiempo de exploración y aumentar la confianza del sistema.
- **Limitaciones** en carga, procesamiento y batería influyen en el tiempo de vuelo.

## Antecedentes

Principales preguntas que un robot autónomo debe responder

- ¿Dónde estoy?  $\Rightarrow$  Localización
- ¿A dónde voy?  $\Rightarrow$  Cognición
- ¿Cómo llego hasta ahí?  $\Rightarrow$  Planificación de trayectoria

## Antecedentes

Principales preguntas que un robot autónomo debe responder

- ¿Dónde estoy?  $\Rightarrow$  Localización
- ¿A dónde voy?  $\Rightarrow$  Cognición
- ¿Cómo llego hasta ahí?  $\Rightarrow$  Planificación de trayectoria

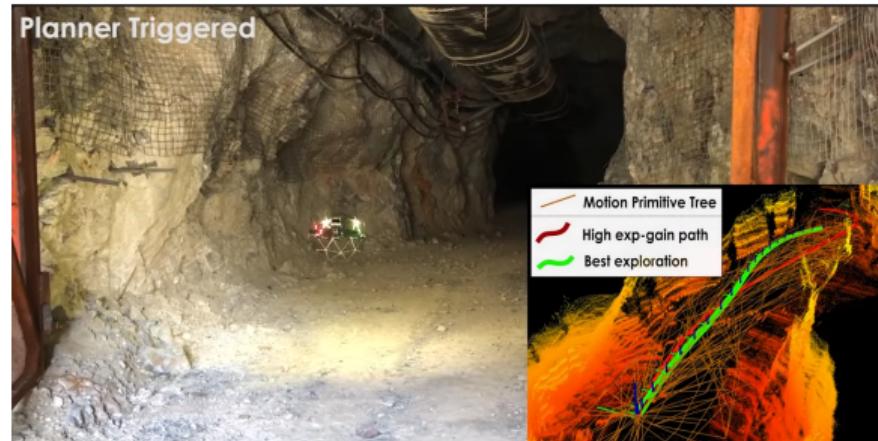
Para resolver estas preguntas, el robot debe:

- Tener un modelo del ambiente (dados, o autónomamente construido)
- Localizarse dentro del ambiente
- Planear y ejecutar los movimientos

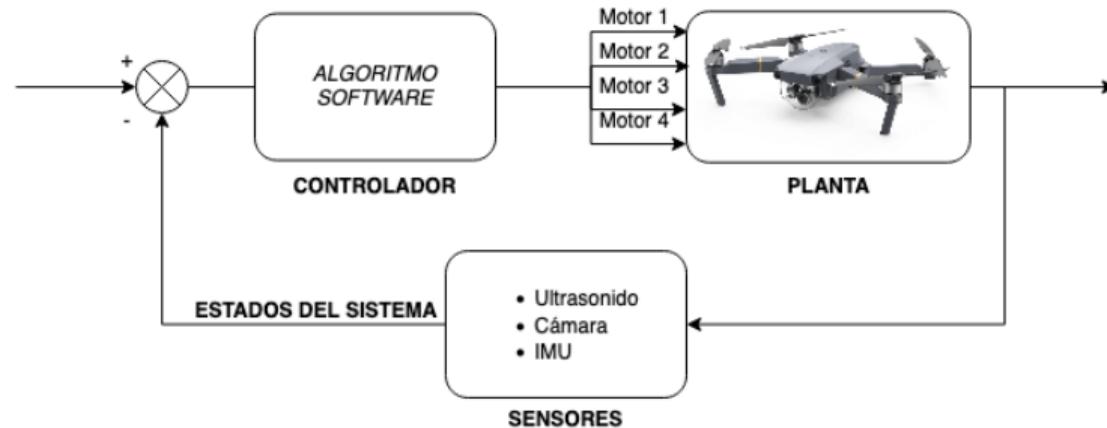
# Localización - ¿Dónde estoy?

- **VER**: El Robot utiliza la lectura de sus sensores para encontrarse a el mismo.
- **ACTUAR**: El Robot, se mueve hacia adelante
  - Movimiento estimado a partir de las lecturas de la odometría.
  - Acumulación de incertidumbre.
- **VER**: El Robot utiliza la lectura de sus sensores nuevamente para localizarse a si mismo

Belief update (Fusión de información)

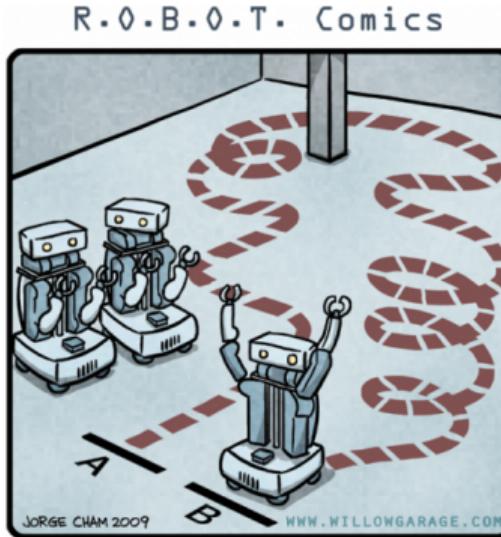


# Cognición - ¿A dónde voy?



# Planificación de trayectoria - ¿Cómo llego hasta ahí?

- Planificador de trayectoria global
  - Búsqueda por grafos
- Planificador de trayectoria local
  - Campos de potencial artifical
  - Algoritmos Bug



"HIS PATH-PLANNING MAY BE  
SUB-OPTIMAL, BUT IT'S GOT FLAIR."<sup>†</sup>

# Motivaciones

La meta de este trabajo es la creación de una estrategia para la exploración de ambientes desconocidos de manera coordinada con múltiples vehículos aéreos no tripulados (VANTS).

- Búsqueda y rescate.
- Seguridad e Inspección



† Ilustración Drone en Mina  
<https://dronevideos.com/>

†

# Contenido

- ① Descripción del proyecto
- ② Planteamiento del problema
- ③ Hipótesis y Objetivos
- ④ Metodología
- ⑤ Cronograma
- ⑥ Estado del Arte
- ⑦ Contribuciones o resultados esperados

## Planteamiento del problema

Dado un volumen de interés desconocida en un espacio cerrado que se desea explorar denotada como  $\mathcal{E}$ , tal que  $\mathcal{E} \subset \mathbb{R}^3$ .

El espacio  $\mathcal{E}$  puede ser representado usando una estructura de datos tridimensional de tipo árbol. A partir de los valores de una cámara RGB-D basada en un modelo de ocupación probabilístico que puede tomar los valores de libre, ocupado y desconocido o no explorado de notados como  $v_{libre}$ ,  $v_{ocup}$ ,  $v_{desc}$ .

- Un conjunto de VANTS denotado como  $\mathcal{V} = \{\mathcal{V}_1, \mathcal{V}_2, \mathcal{V}_3, \dots, \mathcal{V}_n\}$  siendo  $n$  el número total de VANTS disponibles.
- Una configuración inicial  $q$  cuya cardinalidad es el número de VANTS disponibles denotado como  $q = \{q_1, q_2, q_3, \dots, q_n\}$ .

El problema se basa en la propuesta de una estrategia que incluya las habilidades de autonomía, para tareas de exploración de forma coordinada dividiendo la carga de trabajo de exploración entre el grupo.

# Preguntas de investigación

Con base en lo anterior, surgen las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Es posible que el uso de una estructura de datos como octree para representar la ocupación de un volumen, sea más eficiente que una representación en una matriz cúbica?
- ¿Qué efectiva será en seguir una estrategia de exploración basada en asignación de tareas en comparación con los resultados reportados en la literatura?
- ¿Qué características de la dinámica del robot se deben considerar en el simulador, para que los resultados en el mundo real se aproximen a los del simulador?

# Contenido

- ① Descripción del proyecto
- ② Planteamiento del problema
- ③ Hipótesis y Objetivos
- ④ Metodología
- ⑤ Cronograma
- ⑥ Estado del Arte
- ⑦ Contribuciones o resultados esperados

## Hipótesis

Una estrategia de coordinación y asignación de tareas en combinación con una arquitectura de software (que resuelve los problemas de planificación de rutas, evasión de obstáculos y localización) puede mejorar la exploración de múltiples VANTS en entornos desconocidos tomando un enfoque descentralizado.

# Objetivos generales y específicos del proyecto

## 1 General

Desarrollar una arquitectura de software que resuelva los problemas de localización, mapeo, navegación y coordinación multi-VANT en ambientes desconocidos para tareas de exploración en interiores.

# Objetivos generales y específicos del proyecto

## 1 General

Desarrollar una arquitectura de software que resuelva los problemas de localización, mapeo, navegación y coordinación multi-VANT en ambientes desconocidos para tareas de exploración en interiores.

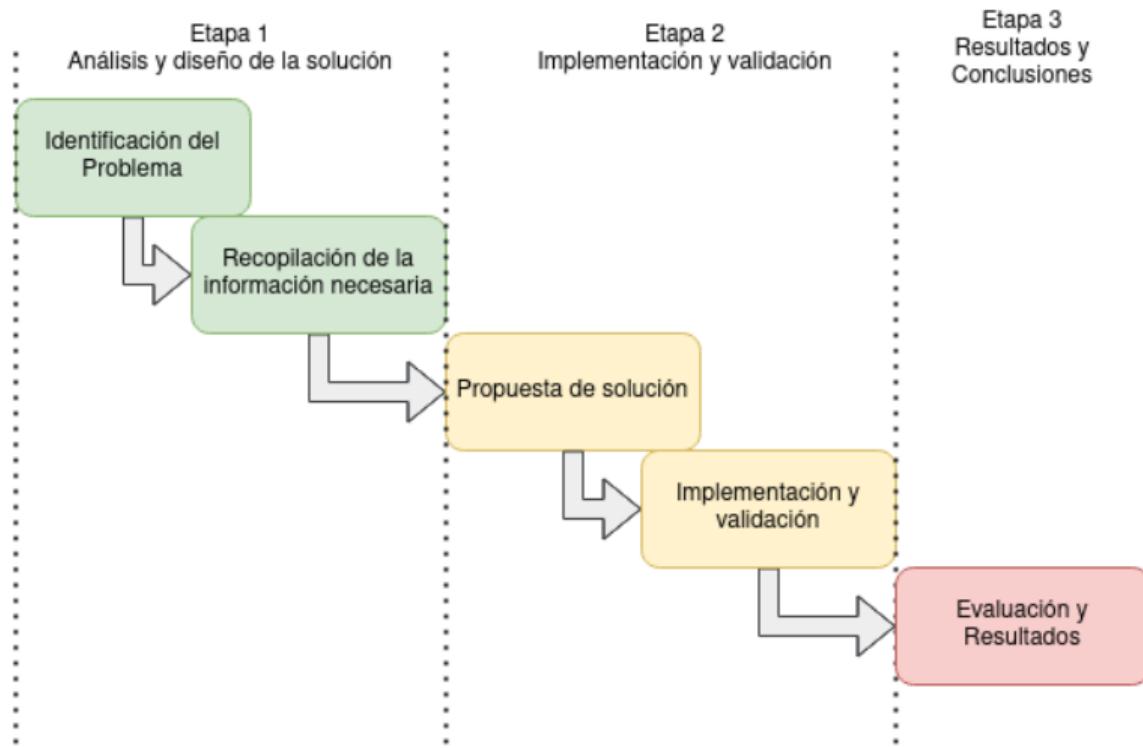
## 2 Particulares

- Elegir la representación del ambiente en 3D que nos ayude en crear trayectorios para los VANTS.
- Evaluar y comparar diferentes algoritmos de coordinación y planificación de vuelo para la exploración coordinada multi-VANT.
- Realizar pruebas y simulaciones de la solución propuesta en entornos complejos, analizando métricas como tiempo de exploración y cobertura del área de interés.

# Contenido

- ① Descripción del proyecto
- ② Planteamiento del problema
- ③ Hipótesis y Objetivos
- ④ Metodología
- ⑤ Cronograma
- ⑥ Estado del Arte
- ⑦ Contribuciones o resultados esperados

# Metodología



# Contenido

- ① Descripción del proyecto
- ② Planteamiento del problema
- ③ Hipótesis y Objetivos
- ④ Metodología
- ⑤ Cronograma
- ⑥ Estado del Arte
- ⑦ Contribuciones o resultados esperados

# Cronograma

	Cuarto trimestre 1				Cuarto trimestre 2				Cuarto trimestre 3			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
<b>Etapa 1</b>												
E1.A1. Revisión literatura relevante												
E1.A2. Selección de algoritmos												
E1.A3. Diseño de la arquitectura de software												
E1.A4. Documentación Etapa 1												
E1.A5. Revisión de tesis Etapa 1												
<b>Etapa 2</b>												
E2.A1. Selección Simulador												
E2.A2. Visualización de datos												
E2.A3. Control de desplazamientos												
E2.A4. Desarrollo de algoritmo de exploración												
E2.A5. Implementación y simulación												
E2.A6. Desarrollo de coordinación												
E2.A7. Implementación y simulación												
E2.A8. Documentación Etapa 2												
E2.A9. Revisión de tesis Etapa 2												
<b>Etapa 3</b>												
E3.A1. Experimentación de solución												
E3.A2. Recopilación resultados												
E3.A3. Documentación Etapa 3												
E3.A4. Revisión de tesis												
E3.A5. Divulgación												
E3.A6. Proceso de titulación												

# Estrategia

Buscar que cada VANT se dirija hacia las fronteras más cercanas tratando de minimizar las distancias recorridas.

Explotación

Buscar la separación de los VANTS con la finalidad de minimizar el trabajo redundante y la interferencia entre ellos.

Exploración

Mantener los VANTS en comunicación con los demás miembros del equipo actualizados y en caso de falla de algún VANT evitar que se pierda la información.

Cohesión

# Algoritmos

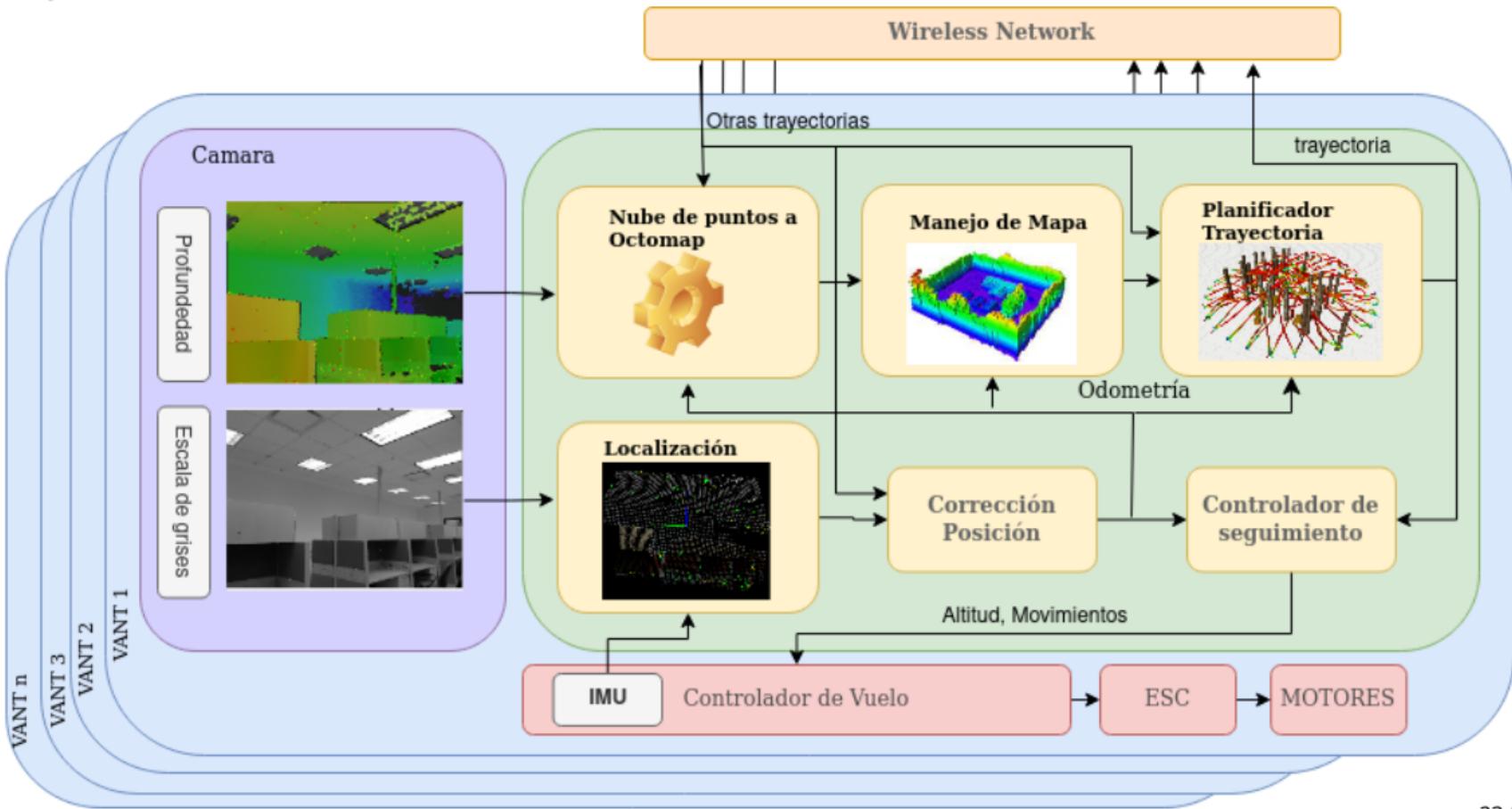
- PRM
- RGB-D  $\Rightarrow$  Voxels  $\Rightarrow$  Octomap
- Estrategia coordinada y basada en fronteras que aproveche la dinámica del VANT para obtener movimientos agresivos.



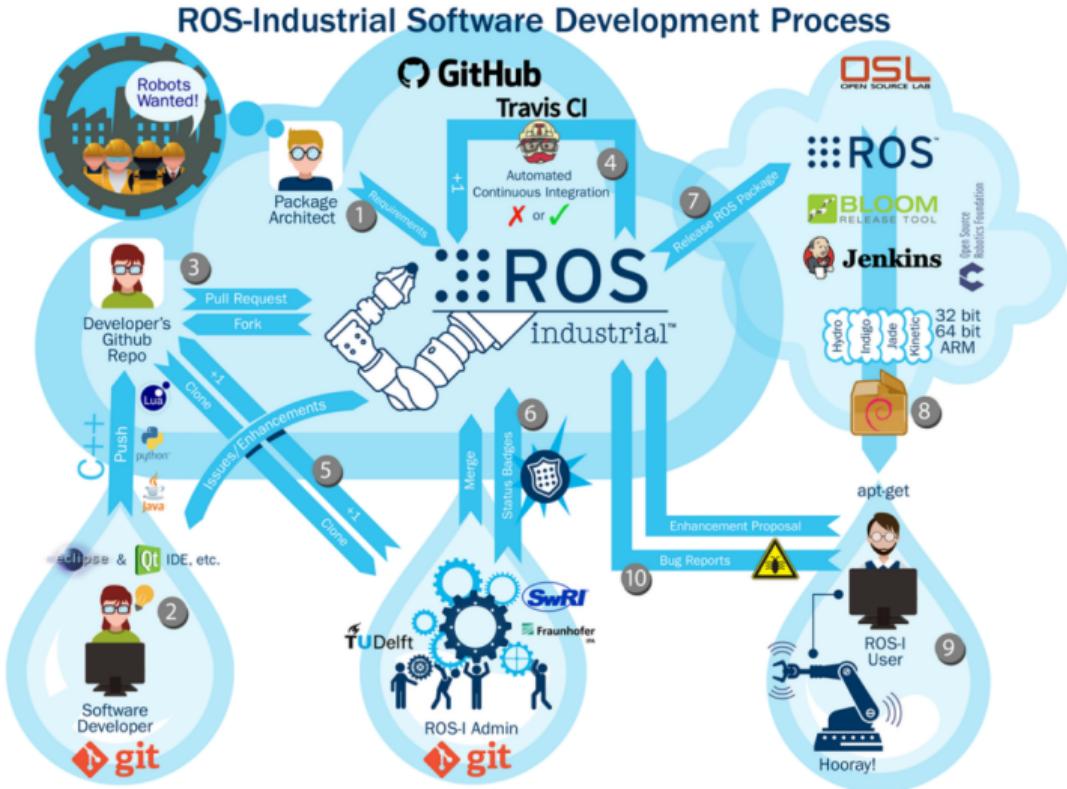
† Ilustración Drone en Mina  
<https://dronevideos.com/>

†

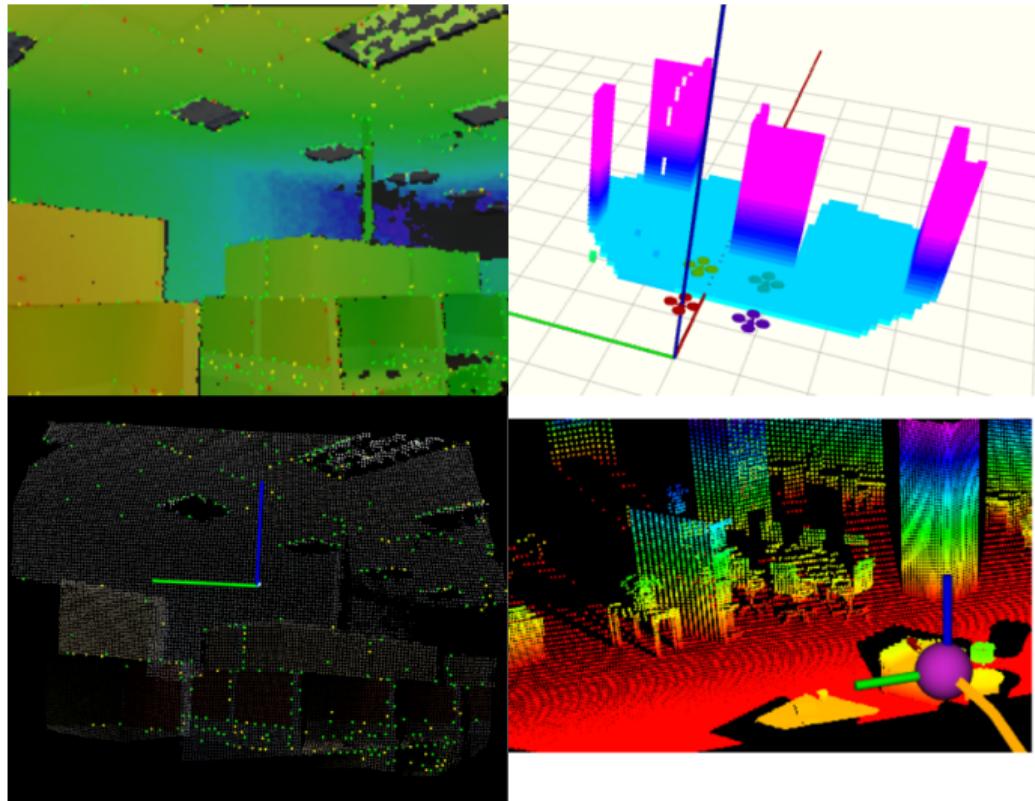
# Arquitectura



# Simulador



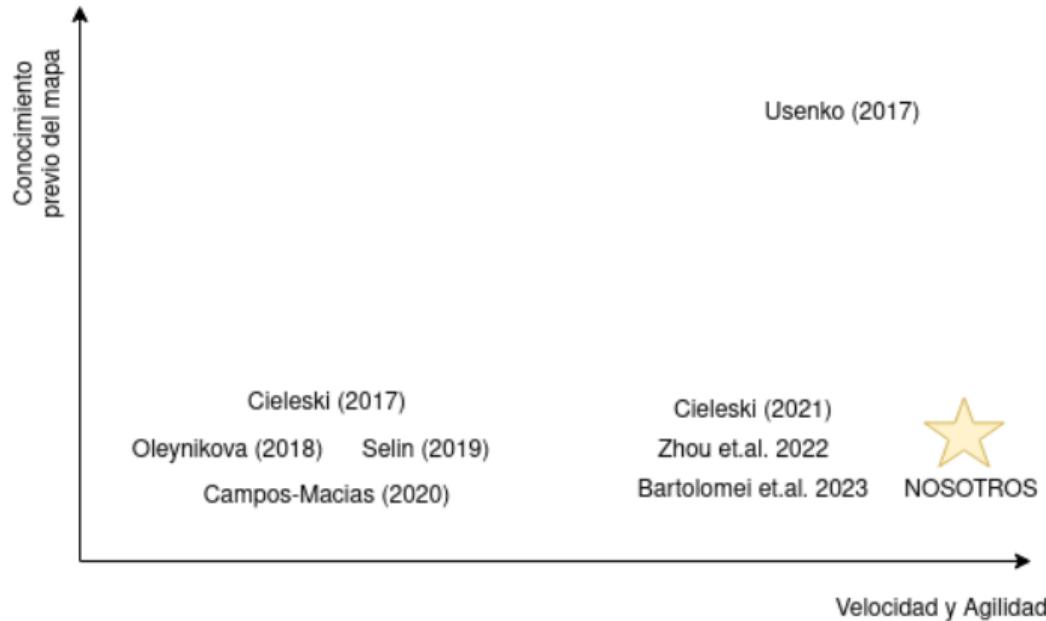
# Visualización de datos



# Contenido

- ① Descripción del proyecto
- ② Planteamiento del problema
- ③ Hipótesis y Objetivos
- ④ Metodología
- ⑤ Cronograma
- ⑥ Estado del Arte
- ⑦ Contribuciones o resultados esperados

# Estado del Arte



# Contenido

- ① Descripción del proyecto
- ② Planteamiento del problema
- ③ Hipótesis y Objetivos
- ④ Metodología
- ⑤ Cronograma
- ⑥ Estado del Arte
- ⑦ Contribuciones o resultados esperados

## Contribuciones o resultados esperados

Se espera que un mecanismo de coordinación en tareas de exploración con múltiples VANTS produzcan mejoras significativas en eficiencia, cobertura y adaptabilidad en la exploración.

### 1 Documentación y códigos liberados

- Algoritmo para la asignación de tareas de exploración multi-VANT.
- Arquitectura de software que resuelva los problemas de autonomía para un vehículo aéreo no tripulado.
- Protocolo de comunicación y coordinación multi-VANT que formaran parte de la arquitectura de software

# Contribuciones o resultados esperados

Se espera que un mecanismo de coordinación en tareas de exploración con múltiples VANTS produzcan mejoras significativas en eficiencia, cobertura y adaptabilidad en la exploración.

## 1 Documentación y códigos liberados

- Algoritmo para la asignación de tareas de exploración multi-VANT.
- Arquitectura de software que resuelva los problemas de autonomía para un vehículo aéreo no tripulado.
- Protocolo de comunicación y coordinación multi-VANT que formaran parte de la arquitectura de software

## 2 Validación de la solución en un simulador

- Análisis comparativo de la cobertura alcanzada por la estrategia propuesta.
- Evaluación de mecanismos de evasión de obstáculos.

# Contribuciones o resultados esperados

Se espera que un mecanismo de coordinación en tareas de exploración con múltiples VANTS produzcan mejoras significativas en eficiencia, cobertura y adaptabilidad en la exploración.

## 1 Documentación y códigos liberados

- Algoritmo para la asignación de tareas de exploración multi-VANT.
- Arquitectura de software que resuelva los problemas de autonomía para un vehículo aéreo no tripulado.
- Protocolo de comunicación y coordinación multi-VANT que formaran parte de la arquitectura de software

## 2 Validación de la solución en un simulador

- Análisis comparativo de la cobertura alcanzada por la estrategia propuesta.
- Evaluación de mecanismos de evasión de obstáculos.

## 3 Tesis impresa

# Bibliografía I

- L. Bartolomei, L. Teixeira, and M. Chli. Fast multi-uav decentralized exploration of forests. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(9):5576–5583, 2023. doi: 10.1109/LRA.2023.3296037.
- L. Campos-Macías, R. Aldana-López, R. Guardia, J. I. Parra-Vilchis, and D. Gómez-Gutiérrez. Autonomous navigation of MAVs in unknown cluttered environments. *Journal of Field Robotics*, 38(2):307–326, may 2020. doi: 10.1002/rob.21959. URL <https://doi.org/10.1002/rob.21959>.
- T. Cieslewski, E. Kaufmann, and D. Scaramuzza. Rapid exploration with multi-rotors: A frontier selection method for high speed flight. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 2135–2142, 2017. doi: 10.1109/IROS.2017.8206030.
- M. Collins and N. Michael. Efficient planning for high-speed mav flight in unknown environments using online sparse topological graphs. In *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 11450–11456, 2020. doi: 10.1109/ICRA40945.2020.9197167.
- S. K. Debnath, R. Omar, S. Bagchi, E. N. Sabudin, M. H. A. S. Kandar, K. Foysol, and T. K. Chakraborty. Different cell decomposition path planning methods for unmanned air vehicles-a review. In *Lecture Notes in Electrical Engineering*, pages 99–111. Springer Nature Singapore, July 2020. doi: 10.1007/978-981-15-5281-6\_8. URL [https://doi.org/10.1007/978-981-15-5281-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5281-6_8).
- P. R. Florence, J. Carter, J. Ware, and R. Tedrake. Nanomap: Fast, uncertainty-aware proximity queries with lazy search over local 3d data, 2018.
- F. Gao, W. Wu, Y. Lin, and S. Shen. Online safe trajectory generation for quadrotors using fast marching method and bernstein basis polynomial. In *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 344–351, 2018. doi: 10.1109/ICRA.2018.8462878.
- A. Hornung, K. M. Wurm, M. Bennewitz, C. Stachniss, and W. Burgard. OctoMap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees. *Autonomous Robots*, 2013. doi: 10.1007/s10514-012-9321-0. URL <https://octomap.github.io>. Software available at <https://octomap.github.io>.
- Y. Lin, F. Gao, T. Qin, W. Gao, T. Liu, W. Wu, Z. Yang, and S. Shen. Autonomous aerial navigation using monocular visual-inertial fusion. *Journal of Field Robotics*, 35(1):23–51, July 2017. doi: 10.1002/rob.21732. URL <https://doi.org/10.1002/rob.21732>.
- K. N. McGuire, C. D. Wagter, K. Tuyls, H. J. Kappen, and G. C. H. E. de Croon. Minimal navigation solution for a swarm of tiny flying robots to explore an unknown environment. *Science Robotics*, 4(35):eaaw9710, 2019. doi: 10.1126/scirobotics.aaw9710. URL <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/scirobotics.aaw9710>.
- K. Mohta, M. Watterson, Y. Mulgaonkar, S. Liu, C. Qu, A. Mäkinen, K. Saulnier, K. Sun, A. Zhu, J. Delmerico, K. Karydis, N. Atanasov, G. Loianno, D. Scaramuzza, K. Daniilidis, C. J. Taylor, and V. Kumar. Fast, autonomous flight in GPS-denied and cluttered environments. *Journal of Field Robotics*, 35(1):101–120, Dec. 2017. doi: 10.1002/rob.21774. URL <https://doi.org/10.1002/rob.21774>.
- H. Oleynikova, Z. Taylor, R. Siegwart, and J. Nieto. Safe local exploration for replanning in cluttered unknown environments for microaerial vehicles. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(3):1474–1481, jul 2018. doi: 10.1109/lra.2018.2800109. URL <https://doi.org/10.1109/lra.2018.2800109>.

# Bibliografía II

- C. Papachristos, S. Khattak, and K. Alexis. Uncertainty-aware receding horizon exploration and mapping using aerial robots. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 4568–4575, 2017. doi: 10.1109/ICRA.2017.7989531.
- M. Selin, M. Tiger, D. Duberg, F. Heintz, and P. Jensfelt. Efficient autonomous exploration planning of large-scale 3-d environments. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(2):1699–1706, 2019. doi: 10.1109/LRA.2019.2897343.
- V. Usenko, L. von Stumberg, A. Pangercic, and D. Cremers. Real-time trajectory replanning for MAVs using uniform b-splines and a 3d circular buffer. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, sep 2017. doi: 10.1109/iros.2017.8202160. URL <https://doi.org/10.1109/iros.2017.8202160>.
- J. O. Wallgrün. *Hierarchical Voronoi Graphs*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. doi: 10.1007/978-3-642-10345-2. URL <https://doi.org/10.1007/978-3-642-10345-2>.
- J. Westheider, J. Rückin, and M. Popović. Multi-uav adaptive path planning using deep reinforcement learning, 2023.
- B. Zhou, H. Xu, and S. Shen. Racer: Rapid collaborative exploration with a decentralized multi-uav system. *IEEE Transactions on Robotics*, 39(3):1816–1835, 2023. doi: 10.1109/TRO.2023.3236945.