

Jornadas de Automática

Localización de emisiones de metano combinando un sensor TDLAS y un robot móvil

Ojeda, P.^{a,*}, Monroy, J.^a, Gonzalez-Jimenez, J.^a

^aMachine Perception and Intelligent Robotics (MAPIR). Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática. Instituto Universitario de Investigación en Ingeniería Mecatrónica y Sistemas Ciberfísicos (IMECH.UMA). Universidad de Málaga. España.

To cite this article: Ojeda, P., Monroy, J., Gonzalez-Jimenez, J. 2024. Localization of Methane Emission Sources with a TDLAS Sensor and a Mobile Robotic Agent.

Jornadas de Automática, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10893>

Resumen

Este trabajo aborda el problema de la localización eficiente de emisiones de metano en espacios abiertos mediante el uso de robótica móvil. En contraposición a los métodos convencionales que emplean detectores puntuales, o que empleando medidores de rango dependen del suelo como reflector natural (los cuales conllevan largos tiempos e ineficientes trayectorias de inspección), se propone un enfoque robótico que aumenta la eficiencia de la toma de datos. Para ello se monta un detector de rango sobre una unidad pan-tilt que apunta continuamente a un robot móvil que actúa como reflector artificial, permitiendo tomar medidas sobre el plano horizontal. Este enfoque permite abarcar grandes superficies en cortos espacios de tiempo sin perder resolución espacial. Los resultados obtenidos en un área experimental de 140 m² validan la efectividad de este enfoque para la rápida detección y localización de fuentes de emisión de gas metano.

Palabras clave: Robótica móvil, Robótica de campo, Percepción y detección, Percepción cooperativa, Teleoperación, Modelado e identificación de sistemas medioambientales.

Localization of Methane Emission Sources with a TDLAS Sensor and a Mobile Robotic Agent

Abstract

This work addresses the problem of the efficient localization of methane emissions in open spaces using mobile robotics. In contrast to conventional methods using point detectors, or range finders that rely on the ground as a natural reflector (both of which lead to long times and inefficient survey trajectories), a robotic approach is proposed that increases the efficiency of data collection. In our proposal, a range detector is mounted on a pan-tilt unit that continuously points at a mobile robot acting as an artificial reflector, allowing measurements to be taken on the horizontal plane. This approach makes it possible to cover large areas in short inspection times. Results obtained in an experimental area of 140 m² validate the effectiveness of this approach for the rapid detection and localization of methane gas emission sources.

Keywords: Mobile robots, Field robotics, Perception and sensing, Cooperative perception, Teleoperation, Modeling and identification of environmental systems.

1. Introducción

El metano (CH₄) es un gas de potente efecto invernadero que contribuye significativamente al calentamiento global y al cambio climático. En una escala temporal de 20 años, el metano tiene un potencial de calentamiento 84 veces mayor que el dióxido de carbono (CO₂) (Kupers et al., 2023). Es tal su

impacto que la Unión Europea ha comenzado a legislar para reducir las emisiones de metano del sector energético en Europa y en nuestras cadenas de suministro mundiales. Es cuestión de tiempo que esta legislación, que por ahora solo incumbe a las principales fuentes de emisión de metano (ver Figura 1), sea ampliada a otros sectores productivos como la agricultura o la gestión de residuos orgánicos (Themelis and Ulloa, 2007).

*Autor para correspondencia: ojedamorala@uma.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

La detección y el control preciso de las emisiones de metano es, por tanto, un aspecto crucial para reducir el impacto ambiental y aprovechar su potencial energético para la generación de electricidad. Sin embargo, el metano es un compuesto gaseoso inodoro, incoloro y más ligero que el aire, lo que dificulta enormemente su detección. Esta dificultad es especialmente acentuada en entornos al aire libre, en los que deben controlarse grandes áreas y donde el metano asciende de forma natural, disipándose en la atmósfera. Casos de aplicación son los vertederos (Themelis and Ulloa, 2007), entornos industriales de generación, tratamiento y distribución de compuestos derivados del petróleo (Corbett and Smith, 2022), y zonas naturales como los humedales (Bridgham et al., 2013).

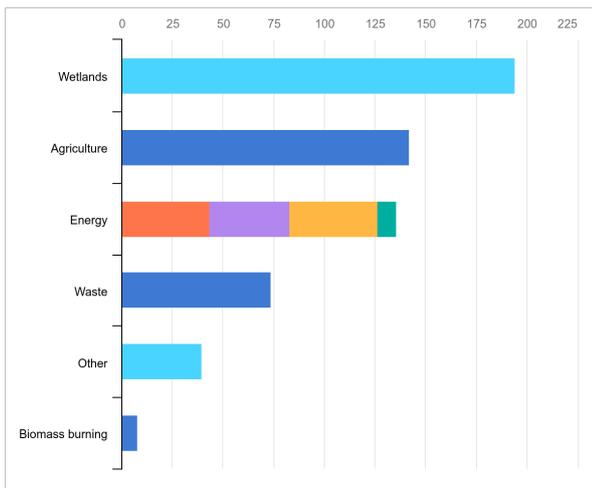


Figura 1: Estimación de emisiones globales de metano (10^9 Kg/año) de las cinco principales categorías para el periodo 2008-2017. Fuente (Saunio et al., 2019).

Existen diversas tecnologías para la detección de metano: sensores ópticos, calorimétricos, piroeléctricos, de óxido metálico semiconductor o sensores electroquímicos (Aldhafeeri et al., 2020). Entre ellas, para mediciones continuas sobre el terreno, destacan las tecnologías ópticas como TDLAS (Espectroscopia de Absorción Láser de Diodo Sintonizable) por su alta sensibilidad, selectividad y su capacidad de proporcionar mediciones a lo largo de la trayectoria del rayo (medición de rango distribuido) (Kwaśny and Bombalska, 2023; Mønster et al., 2019). La tecnología TDLAS funciona según el principio de la espectroscopia de absorción láser, utilizando radiación electromagnética en el rango del infrarrojo cercano. La luz pulsada se emite en dos longitudes de onda: una que es fácilmente absorbida por CH_4 , y otra, en una longitud de onda cercana, que no se ve afectada por CH_4 y que es usada a modo de referencia. Esta tecnología encuentra aplicaciones en diversas industrias y entornos, como en gaseoductos e instalaciones de almacenamiento de gas natural (Corbett and Smith, 2022).

A pesar de sus ventajas, el principio de funcionamiento del TDLAS impone la necesidad de disponer de un fondo reflectante (como cualquier otro sistema láser). Además, dado que cada medición proporciona la concentración de gas acumulada a lo largo de la trayectoria del rayo (*densidad de columna*), se requieren múltiples lecturas desde diferentes posiciones y orientaciones para determinar la distribución espacial del gas, o para localizar las fuentes de emisión (Bennetts et al., 2014).

Es por ello que esta tecnología se ha usado típicamente en interiores, donde las paredes, suelo o techo actúan como reflectores (Li et al., 2020), o en exteriores empleando el detector mirando hacia abajo (configuración top-down) para utilizar el terreno como reflector natural (Neumann et al., 2017; Gålfalk et al., 2021).

Utilizar el suelo como reflector es el enfoque más convencional debido a la simplicidad de su configuración, siendo solo necesario un robot con el sensor TDLAS para realizar las medidas (típicamente un dron). No obstante, este enfoque requiere numerosas mediciones y tediosas trayectorias de inspección para barrer con la necesaria resolución el área de trabajo (Arain et al., 2021). Dada la limitada autonomía de los vehículos aéreos no tripulados (UAV) o de los robots móviles autónomos (AMR), este enfoque resulta ineficaz en la práctica, especialmente para inspeccionar grandes espacios abiertos.

Este artículo presenta un enfoque robótico para la toma de medidas sensoriales de metano utilizando rayos paralelos al suelo. Como se ilustra en la Figura 2, esta técnica permite mapear el área de trabajo de manera eficiente, incluyendo un reflector artificial al sistema de medidas. Similar al enfoque presentado en (Monroy et al., 2024) en el que dos robots móviles se coordinan para inspeccionar el entorno, en este trabajo se propone una versión más simple y aplicable, empleando un único robot móvil. Concretamente, el detector de metano se monta sobre un sistema de giro e inclinación automático, diseñado para apuntar continuamente hacia un robot móvil que actúa como reflector del láser que mide la concentración de metano.

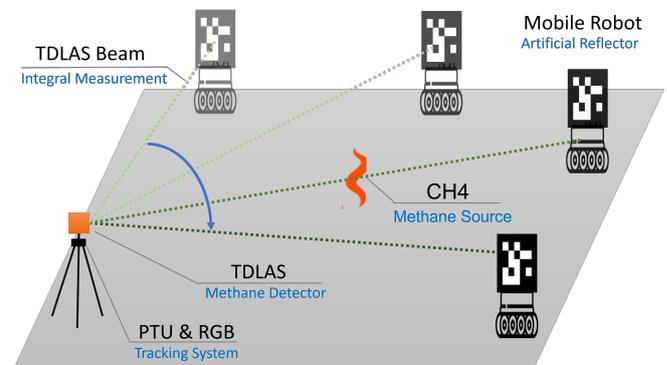


Figura 2: Propuesta de inspección empleando haces horizontales paralelos al suelo para la detección y localización de metano. El detector TDLAS se monta en una unidad pan-tilt que apunta a un reflector artificial móvil, en este caso un robot.

Este método de medición tiene varias ventajas:

- Adaptabilidad:** La configuración puede ajustarse para realizar mediciones en disposiciones tanto bidimensionales (como son los experimentos mostrados en este trabajo), como tridimensionales (empleando un dron a modo de reflector artificial). Esta flexibilidad es crucial para adaptarse a diferentes estructuras y características del entorno que se está inspeccionando.
- Eficiencia:** Al poder realizar mediciones a lo largo de rayos paralelos al suelo y seguir continuamente un robot reflector, el sistema reduce considerablemente el tiempo

Mapa de ocupación

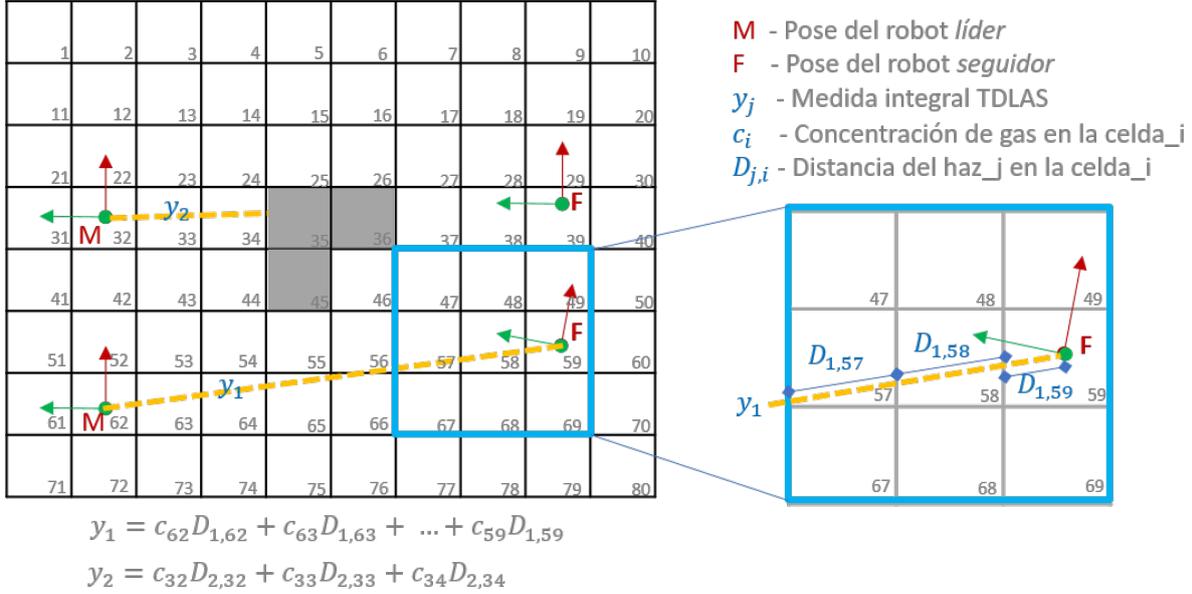


Figura 3: Ilustración del proceso de proyección de rayos para dos medidas integrales y_1 y y_2 . Cada medición se expresa como la suma ponderada de las concentraciones de gas en las celdas atravesadas (c_i), empleando como peso la distancia recorrida por el haz óptico dentro de cada celda ($D_{j,i}$).

necesario para inspeccionar grandes áreas. Esto es especialmente útil en situaciones donde la detección rápida de metano es crítica.

- Cobertura:** La capacidad de tomar mediciones integrales paralelas al suelo favorece que no se omitan puntos críticos.

El código utilizado para la reconstrucción del mapa y los diversos archivos de configuración se encuentran disponibles al público en el siguiente repositorio *online*¹.

2. Mapeo de la Distribución de Metano a partir de Mediciones Integrales

Como en la mayoría de los trabajos anteriores sobre mapeo de distribución de gases (*GDM*) (Gongora et al., 2020; Monroy et al., 2016) simplificamos el problema estimando un mapa discreto bidimensional, dividiendo el espacio en una rejilla rectangular de celdas $\mathbf{c} = \{c_i\}_{i=1}^N$. Cada variable escalar c_i representa la concentración de gas dentro de la celda i con coordenadas (x_i, y_i) . Nótese que este modelo se asemeja a los mapas de ocupación típicos en robótica, con la diferencia de no tener una distribución discreta (ocupado vs. libre) sino una magnitud continua, la concentración de gas.

Mientras se inspecciona la zona de trabajo, las medidas integrales recogidas por el detector de metano $\mathbf{y} = \{y_j\}_{j=1}^p$ se procesan para estimar el mapa de concentración 2D \mathbf{c} , que puede utilizarse posteriormente para localizar las fuentes de emisión presentes. Como el detector TDLAS aporta mediciones integrales sin información sobre la longitud del haz, localizamos el haz óptico utilizando las poses estimadas de ambos elementos (detector-robot) y el mapa de ocupación del entorno \mathbf{m} en caso de que hubiese obstáculos que interfiriesen con el haz.

En general, el conjunto de celdas afectadas por el haz óptico de una medición integral y_j se obtiene mediante la proyección de rayos en el mapa de ocupación. El punto inicial de cada rayo corresponde a la posición 2D del detector TDLAS, mientras que el punto final corresponde a la posición del reflector portado por el robot móvil, o un obstáculo caso de haber obstáculos presentes en el entorno. Ambas posiciones son obtenidas en este trabajo a través de un sistema GPS+RTK. Una ilustración del procedimiento de proyección de rayos se presenta en la Figura 3. Para tener en cuenta el segmento de intersección entre el haz óptico y cada celda del mapa, definimos la matriz de distancias \mathbf{D} , donde D_{ji} representa la distancia recorrida por el haz óptico y_j en la celda c_i .

Siguiendo esta notación, una medición integral de metano puede expresarse como la suma ponderada de concentraciones sobre el conjunto de celdas que atraviesa:

$$y_j = \sum_{i=1}^N D_{ji}c_i + \epsilon, \quad (1)$$

que se puede generalizar para el conjunto de todas las medidas como:

$$\mathbf{y} = \mathbf{D}\mathbf{c} + \epsilon, \quad (2)$$

donde ϵ representa el ruido del sensor.

Enmarcándolo como un problema de optimización, utilizamos el enfoque de mínimos cuadrados presentado en (Bennetts et al., 2014) para estimar el vector de concentraciones de gas \mathbf{c} que maximiza la verosimilitud de las mediciones (tomografía). La entrada al algoritmo es el conjunto de medidas integrales del detector TDLAS y debidamente localizadas, junto con la matriz de distancias de intersección \mathbf{D} , mientras que la salida es el vector de concentraciones de gas estimadas $\hat{\mathbf{c}}$. Específicamente:

¹https://github.com/PepeOjeda/tdlas_mapping

$$\min_{\mathbf{c}} \|\mathbf{Dc} - \mathbf{y}\|_2^2 \quad \text{subject to } \mathbf{c} \geq 0 \quad (3)$$

Un problema común en este tipo de optimización es la falta de medidas sensoriales que abarquen todo el entorno de trabajo, o la correlación de medidas sobre un conjunto de celdas. Esto conlleva generalmente a una indeterminación del problema y, por tanto, es útil introducir un término de regularización que es análogo a asumir un prior gaussiano con media cero sobre la concentración media de las celdas:

$$\min_{\mathbf{c}} \|\mathbf{Dc} - \mathbf{y}\|_2^2 + \lambda \|\mathbf{c}\|_2^2 \quad \text{subject to } \mathbf{c} \geq 0 \quad (4)$$

donde el hiperparámetro λ controla la fuerza del prior impuesto. En este trabajo λ es fijado heurísticamente $\lambda = 10^{-2}$.

3. Configuración Experimental

El objetivo principal al realizar la detección de metano con TDLAS sin emplear el suelo como reflector natural es asegurar, en el momento de la medición, que el haz emitido por el medidor TDLAS es reflejado correctamente por el reflector artificial portado por el robot móvil.

Independientemente del método de localización empleado (en este trabajo GPS+RTK), la incertidumbre en la localización tanto del detector como del reflector deben tenerse en cuenta a la hora de alinear ambos sistemas. Esto es especialmente relevante cuando la distancia entre ellos es grande (decenas de metros), ya que pequeños errores en la estimación de la orientación hacen que el rayo láser no alcance su objetivo, imposibilitando la medición de metano.

Para alinear correctamente y de forma continua ambos sistemas (detector-reflecter) se monta el medidor de metano en una unidad de giro e inclinación (*PTU*), que integra además una cámara RGB. Añadiendo en el robot un marcador visual de referencia (*ArUco*), se permite una estimación precisa de la posición relativa entre ambos (ver Figura 2). Mediante un bucle de control, se realiza un seguimiento visual del robot, asegurando que el TDLAS apunta al reflector en el momento de la medición sensorial.

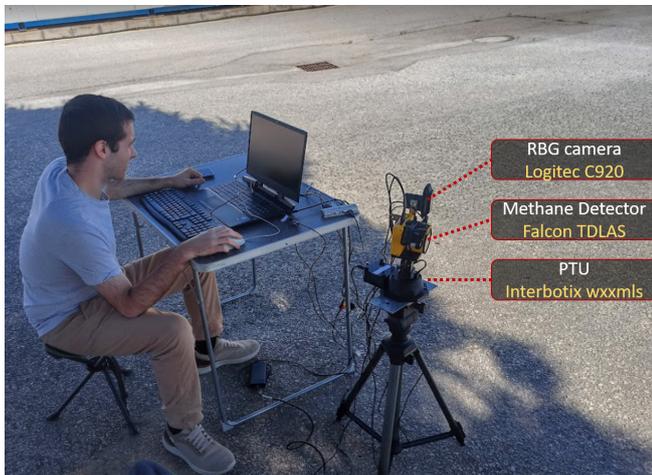


Figura 4: Configuración para la toma de datos y detalle de los componentes empleados en el lado del medidor de metano.

3.1. Materiales

La Figura 4 muestra los componentes empleados en el lado del detector de metano. La unidad pan-tilt es una Interbotix wxxmls, sobre la que se monta un medidor TDLAS de metano modelo Falcon de Pergram Technical Services, Inc., junto a una cámara RGB Logitech C920 (1920x1080 px) para la detección del reflector. El rol de robot *reflector* lo desempeña una base robótica de exteriores modelo Hunter 2.0 de AgileX (ver Figura 5), equipado con un sencillo marcador Aruco (0,18 x 0,18 m) y una superficie plana bajo este a modo de reflector artificial. Para la localización se empleó el GPS Emlid Reach RS2+ que proporciona medidas con correcciones RTK. Para los experimentos mostrados en este trabajo, la base robótica se teleoperó moviendo el robot por la periferia del área de inspección.

Dos fuentes de gas fueron colocadas dentro del perímetro de inspección. La primera fuente de metano la compone un bote de cristal sellado, en cuyo interior se encuentra metano a una concentración relativa del 40 %, aproximadamente. La segunda fuente es un bote de plástico sellado en cuyo interior hay una pequeña cantidad de estiércol bovino. Esta segunda fuente, más desafiante de detectar y localizar por la baja concentración de metano que contiene, es usada para comprobar la sensibilidad del TDLAS.

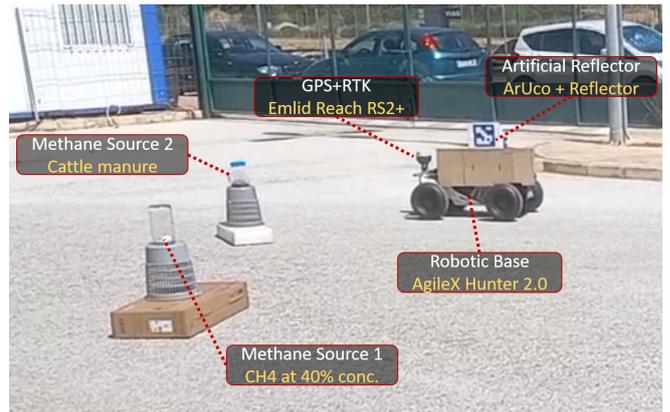


Figura 5: Configuración experimental con detalle del robot móvil que actúa como reflector artificial y las fuentes de gas metano.

3.2. Entorno de Pruebas

Para validar el enfoque propuesto en este trabajo, se realizan un conjunto de experimentos en un área al aire libre dentro del recinto de la Universidad de Málaga. La Figura 6 muestra una imagen aérea del entorno, detallando las medidas del área a inspeccionar (140m² aprox.), las posiciones desde las que se toman medidas con el TDLAS y las posiciones reales de las fuentes de metano.

Para la generación del mapa de distribución de gas se selecciona una resolución de 0.2 m/celda, y se colocan las fuentes de metano a una altura de 0,45m, correspondiente a la altura del detector TDLAS. Durante la inspección, una vez activado el seguimiento del ArUco, se teleopera el robot por la periferia del área a monitorizar, no siendo necesario detener el robot para obtener mediciones, aspecto fundamental para reducir el tiempo de inspección.

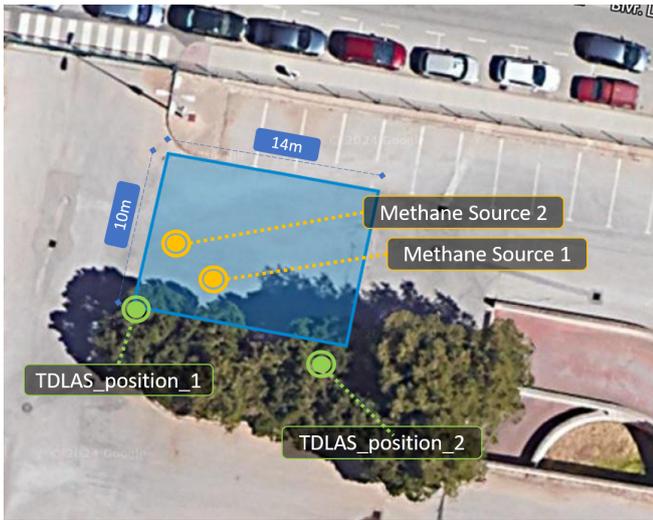


Figura 6: Imagen aérea del entorno de trabajo, con medidas aproximadas de la zona a inspeccionar, así como posiciones desde las que se realizan las medidas con el TDLAS.

4. Resultados y Discusión

Esta sección evalúa los resultados obtenidos en cuanto a la rápida detección y localización de emisiones de metano, mostrando inicialmente los datos sensoriales recogidos, para luego obtener una estimación del mapa de concentraciones y finalmente inferir la localización de la fuente.

4.1. Medidas Sensoriales

Como se discute en (Arain et al., 2021), la tarea de modelar la distribución de un gas mediante la reconstrucción tomográfica de los conjuntos de mediciones integrales, requiere el muestreo de la zona de interés con una cobertura de detección superpuesta y con diferentes puntos de vista (Byer and Shepp, 1979).

Dado que todas las medidas son radiales respecto a la posición del medidor TDLAS, los datos obtenidos desde un único punto de vista permiten una rápida detección de las emisiones de metano presentes, pero no permiten su localización. Tan solo considerando las medidas integrales desde, al menos, dos puntos de vista, se consigue una localización aproximada de las fuentes de metano presentes, tal y como se ilustra en la Figura 7. En este caso, los puntos de cruce de los haces con mayor concentración integral desde ambos puntos de medida señalan las posiciones candidatas a contener una fuente de metano.

Es importante remarcar que usando estas medidas sensoriales es posible localizar posibles fuentes de emisión de forma muy rápida, pero no es posible determinar su concentración. Además, el número de posiciones desde las que tomar medidas con el TDLAS depende del número de fuentes presentes. A mayor número de fuentes o zonas con presencia de metano, mayor es el número de puntos desde los que es necesario tomar medidas integrales para poder identificar las fuentes sin ambigüedad. Este aspecto, no trivial, será estudiado con más profundidad en trabajos futuros.

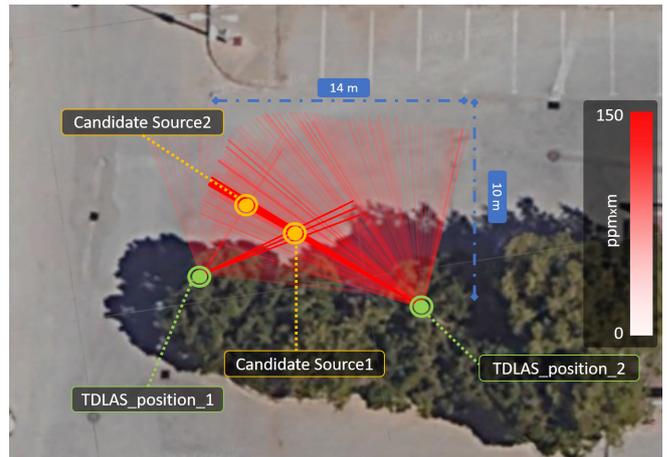


Figura 7: Haces del láser TDLAS tomados durante la inspección del entorno de trabajo, coloreados en rojo con transparencia según la medición integral (ppm.xm). Se muestran superpuestos todas las medidas integrales, correspondientes a los dos puntos de medida del TDLAS.

4.2. Mapa de Concentración

A partir de los datos sensoriales, estimamos el mapa de distribución de metano tal y como se aprecia en la Figura 8, que muestra el resultado de la fase de optimización por mínimos cuadrados y representa la concentración de gas estimada (ppm) para cada celda del mapa.

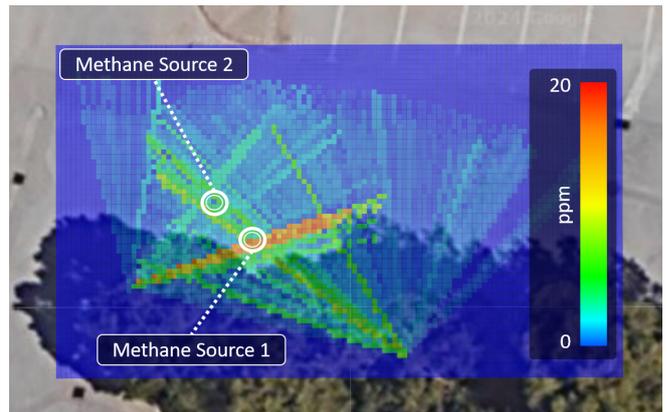


Figura 8: Mapa de concentración de gas estimado a partir del conjunto de muestras integrales. La concentración de gas estimada de cada celda se muestra en escala de colores.

Cabe destacar que aunque cerca de las posiciones reales de las fuentes (marcadas en la imagen con un círculo blanco) la concentración estimada es relativamente alta, el mapa también otorga altas concentraciones a otras celdas que no contienen metano. Esta falta de precisión en la estimación del mapa de concentraciones se debe a que el proceso de minimización es fuertemente dependiente de las medidas sensoriales y su distribución espacial. Desde la perspectiva de un sistema de ecuaciones, la falta de medidas sensoriales propiamente distribuidas representaría el caso de un sistema indeterminado, donde el número de incógnitas (las concentraciones de cada celda) es mayor que el número de ecuaciones linealmente independientes (representadas por las medidas integrales). En esta situación no es posible determinar una única solución.

Esto hace pensar que, si bien una inspección rápida con pocos puntos de medida con el TDLAS puede ser suficiente

para localizar las fuentes de metano presentes, no se puede extrapolar esta técnica al problema de crear mapas de concentración. La reconstrucción del mapa de concentraciones es un proceso más complejo que requiere de un mayor número de medidas integrales, asegurando que se alcanza un sistema de ecuaciones determinado.

5. Conclusiones y Trabajo Futuro

En este trabajo hemos analizado el caso práctico de emplear un robot móvil para asistir en la detección, mapeo y localización de fugas de metano con un detector de gases remoto basado en tecnología TDLAS. Se han analizado las ventajas y dificultades técnicas asociadas a este enfoque, designando el robot móvil como reflector artificial. Se ha demostrado experimentalmente cómo un pequeño número de medidas integrales, tomadas desde un reducido número de localizaciones, es suficiente para estimar la localización de las fuentes de metano presentes. Igualmente, se ha observado como la reconstrucción espacial de la distribución del gas es un proceso más complejo que requiere de un mayor número de medidas integrales para poder ser estimado con precisión.

Como trabajo futuro se estudiará el modelado del problema para intentar determinar el mínimo número de puntos de medida y el mínimo número de medidas integrales necesarios para localizar y mapear la presencia de metano en el entorno.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de investigación *ARPEGIO* (PID2020-117057GB-I00) del Ministerio de Ciencia e Innovación, y por la beca para la formación de investigadores predoctorales en Andalucía (24653).

Referencias

Aldhafeeri, T., Tran, M.K., Vrolyk, R., Pope, M., Fowler, M., 2020. A review of methane gas detection sensors: Recent developments and future perspectives. *Inventions* 5, 28.

Arain, M.A., Hernandez Bennetts, V., Schaffernicht, E., Lilienthal, A.J., 2021. Sniffing out fugitive methane emissions: autonomous remote gas inspection with a mobile robot. *The International Journal of Robotics Research* 40, 782–814. doi:10.1177/0278364920954907.

Bennetts, V.H., Schaffernicht, E., Stoyanov, T., Lilienthal, A.J., Trincavelli, M., 2014. Robot assisted gas tomography — localizing methane leaks in outdoor environments, in: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 6362–6367. doi:10.1109/ICRA.2014.6907798.

Bridgman, S.D., Cadillo-Quiroz, H., Keller, J.K., Zhuang, Q., 2013. Methane emissions from wetlands: biogeochemical, microbial, and modeling perspectives from local to global scales. *Global change biology* 19, 1325–1346. doi:10.1111/gcb.12131.

Byer, R.L., Shepp, L.A., 1979. Two-dimensional remote air-pollution monitoring via tomography. *Optics Letters* 4, 75–77. doi:10.1364/OL.4.000075.

Corbett, A., Smith, B., 2022. A study of a miniature tdlas system onboard two unmanned aircraft to independently quantify methane emissions from oil and gas production assets and other industrial emitters. *Atmosphere* 13. doi:10.3390/atmos13050804.

Gålfalk, M., Nilsson Pålédal, S., Bastviken, D., 2021. Sensitive drone mapping of methane emissions without the need for supplementary ground-based measurements. *ACS Earth and Space Chemistry* 5, 2668–2676. doi:10.1021/acsearthspacechem.1c00106.

Gongora, A., Monroy, J., Gonzalez-Jimenez, J., 2020. Joint estimation of gas & wind maps for fast-response applications. *Applied Mathematical Modelling* doi:10.1016/j.apm.2020.06.026.

Kupers, R., et al., 2023. United Nations Environment Program. An Eye on Methane. Technical Report. International Methane Emissions Observatory (IMEO). doi:https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/44129.

Kwaśny, M., Bombalska, A., 2023. Optical methods of methane detection. *Sensors* 23. doi:10.3390/s23052834.

Li, F., Cai, H., Xu, J., Zhang, K., Feng, Q., Wang, H., 2020. Gas distribution mapping for indoor environments based on laser absorption spectroscopy: Development of an improved tomographic algorithm. *Building and Environment* 172, 106724. doi:10.1016/j.buildenv.2020.106724.

Monroy, J., Blanco, J.L., Gonzalez-Jimenez, J., 2016. Time-variant gas distribution mapping with obstacle information. *Autonomous Robots* 40, 1–16. doi:10.1007/s10514-015-9437-0.

Monroy, J., Ojeda, P., Gonzalez-Jimenez, J., 2024. A Feasibility Study of a Leader-Follower Multi-robot Formation for TDLAS Assisted Methane Detection in Open Spaces, in: Marques, L., Santos, C., Lima, J.L., Tardioli, D., Ferre, M. (Eds.), *Robot: Sixth Iberian Robotics Conference*, Springer Nature Switzerland. pp. 181–192. doi:10.1007/978-3-031-58676-7_15.

Mønster, J., Kjeldsen, P., Scheutz, C., 2019. Methodologies for measuring fugitive methane emissions from landfills – a review. *Waste Management* 87, 835–859. doi:10.1016/j.wasman.2018.12.047.

Neumann, P.P., Kohlhoff, H., Hüllmann, D., Lilienthal, A.J., Kluge, M., 2017. Bringing mobile robot olfaction to the next dimension — uav-based remote sensing of gas clouds and source localization, in: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3910–3916. doi:10.1109/ICRA.2017.7989450.

Saunio, M., Stavert, A.R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J.G., Jackson, R.B., Raymond, P.A., Dlugokencky, E.J., Houweling, S., Patra, P.K., et al., 2019. The global methane budget 2000–2017. *Earth System Science Data Discussions* 2019, 1–136.

Themelis, N.J., Ulloa, P.A., 2007. Methane generation in landfills. *Renewable energy* 32, 1243–1257. doi:10.1016/j.renene.2006.04.020.