



# Space Meters

**Mapeo de gases de efecto invernadero en la atmósfera  
por medio de instrumentos de medición de bajo costo**

Ben Romarowski      Federico Sofio      Gabriel Torre      Camila Haene      Nahuel Letang  
Patricio Whittingslow      Yann Birnie Scott      Malena Müller      Carola Pedrosa  
Gonzalo Reina Kiperman

18 de marzo de 2022



## Resumen

En el presente trabajo se muestra el proceso de diseño de un espectrómetro para el análisis de gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre mediante instrumentos de medición de bajo costo. El proyecto será presentado a la competencia de Open-Space organizada por Satellogic.

La información obtenida con el espectrómetro será utilizada con fines educativos, quedando los datos bajo libre acceso con licencia *open-source*. Esto permitirá generar interés en otros jóvenes sobre la industria aeroespacial y el *know-how* sobre sistemas espectrales de bajo costo para contribuir a la comunidad open-source con las lecciones aprendidas durante el transcurso del proyecto.

## Agradecimientos

A Open Space y Satellogic, por organizar la competencia del programa espacial para jóvenes que permitió que desarrollemos este módulo satelital.

A Satellogic nuevamente, por ser nuestro mentor de proyecto.

Al Instituto Tecnológico de Buenos Aires, por ser un lugar donde se nos permite crecer tanto como personas así como profesionalmente, con profesores y personal altamente motivado para enseñar y dar lo mejor con sus alumnos.

A Nicolás Matías Nemirovsky, por estar con nosotros desde el principio del proyecto brindando sus conocimientos técnicos como también organizativos, ayudándonos a mejorar como equipo y como jóvenes profesionales.

A Horacio Daniel Rinaldi, por ayudarnos con sus amplios conocimientos de la física que logró muy claramente transmitir a sus alumnos a lo largo de los años de su carrera, brindándonos la posibilidad de realizar el presente trabajo y tener la chance de cumplir un sueño. Por mostrarnos lo que es enseñar desde la pasión y no desde la obligación, al día de hoy podemos decir que es nuestro honor y privilegio haber sido sus alumnos.

A Daniel Andrés Jacoby, por orientarnos en el análisis de señales en simulaciones que llevamos a cabo.

A Miguel Pablo Aguirre, por estar siempre apoyando a sus alumnos a realizar proyectos y actividades extracurriculares.

A Dietrich Feist, especialista en el uso de espectroscopía con Transformada de Fourier, por guiarnos en la relación de especificación técnica a construcción mecánica de un FTIR.

# Índice

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Introducción</b>   | <b>3</b>  |
| 1.1. Objetivo . . . . .  | 3         |
| <b>2. Planificación del proyecto</b>   | <b>4</b>  |
| 2.1. Arquitectura preliminar del módulo . . . . .                            | 4         |
| 2.2. Análisis de riesgos . . . . .   | 4         |
| <b>3. Análisis de gases</b>  | <b>5</b>  |
| 3.1. Selección de indicador . . . . .  | 5         |
| 3.2. Descripción Simulación . . . . .  | 6         |
| 3.3. Comparación con mediciones de otros satélites . . . . .                 | 7         |
| 3.4. Modelo teórico de cómo analizar y medir metano . . . . .                | 7         |
| 3.5. Simulación 6S . . . . .   | 7         |
| 3.6. Simulación Spectraplot . . . . .  | 7         |
| 3.7. Comparación de resultados entre 6S y Spectraplot . . . . .              | 8         |
| 3.8. Cálculo de señal recibida . . . . .                                     | 9         |
| <b>4. Misiones Espaciales estudiadas</b>                                     | <b>11</b> |
| 4.1. GOSAT (Greenhouse Gases Observing Satellite) . . . . .                  | 11        |
| 4.2. MERLIN (Methane Remote Sensing Lidar Mission) . . . . .                 | 12        |
| <b>5. Selección del Instrumento de sensado</b>                               | <b>13</b> |
| 5.1. FTS: Principio de Funcionamiento y Medición . . . . .                   | 13        |
| 5.2. Consideraciones de Especialistas . . . . .                              | 16        |
| 5.3. Conclusiones acerca del FTIR . . . . .                                  | 18        |
| <b>6. Diseño preliminar del módulo</b>                                       | <b>18</b> |
| 6.1. Consideraciones: Llevando un FTIR a un proyecto de bajo costo . . . . . | 18        |
| 6.2. Diseño preliminar del módulo . . . . .                                  | 19        |
| <b>7. Análisis de costos y viabilidad</b>                                    | <b>21</b> |
| <b>8. Conclusión</b>   | <b>22</b> |
| <b>9. Comentarios Finales</b>  | <b>22</b> |
| <b>10. Anexo</b>   | <b>24</b> |
| 10.1. Teoría de transferencia radiativa . . . . .                            | 24        |
| 10.2. Medición de indicadores . . . . .                                      | 25        |
| 10.3. Figuras . . . . .  | 25        |
| 10.4. Código de simulaciones . . . . .                                       | 26        |

# **1. Introducción**

Actualmente el cambio climático es el principal problema ambiental global al que se enfrenta la humanidad. Los fenómenos climáticos extremos, la disminución de la calidad del aire y la degradación o enrarecimiento de la capa de ozono estratosférico, entre otros, provocan una pérdida generalizada de biodiversidad. Por este motivo es que el estudio de gases de efecto invernadero en la atmósfera ha tomado importancia en la última década. Hoy en día hay gran interés en lograr una medición de indicadores de contaminación atmosférica a bajo costo. Por lo tanto, este trabajo refleja un gran interés en la obtención de mediciones relevantes de los gases de efecto invernadero de la atmósfera mediante una alternativa coste-efectiva a las opciones comunes espectrales.

## **1.1. Objetivo**

El objetivo del proyecto consiste en diseñar un sistema innovador coste-efectivo capaz de medir la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera para la puesta en órbita desde un satélite de la Empresa Satellogic.

## 2. Planificación del proyecto

En la siguiente sección se muestran los avances orientados a la organización y conceptualización del proyecto.

### 2.1. Arquitectura preliminar del módulo

El diagrama en bloques que se observa en la Fig.1 indica de manera preliminar todos los elementos a tener en cuenta para la realización del módulo para mapeo de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

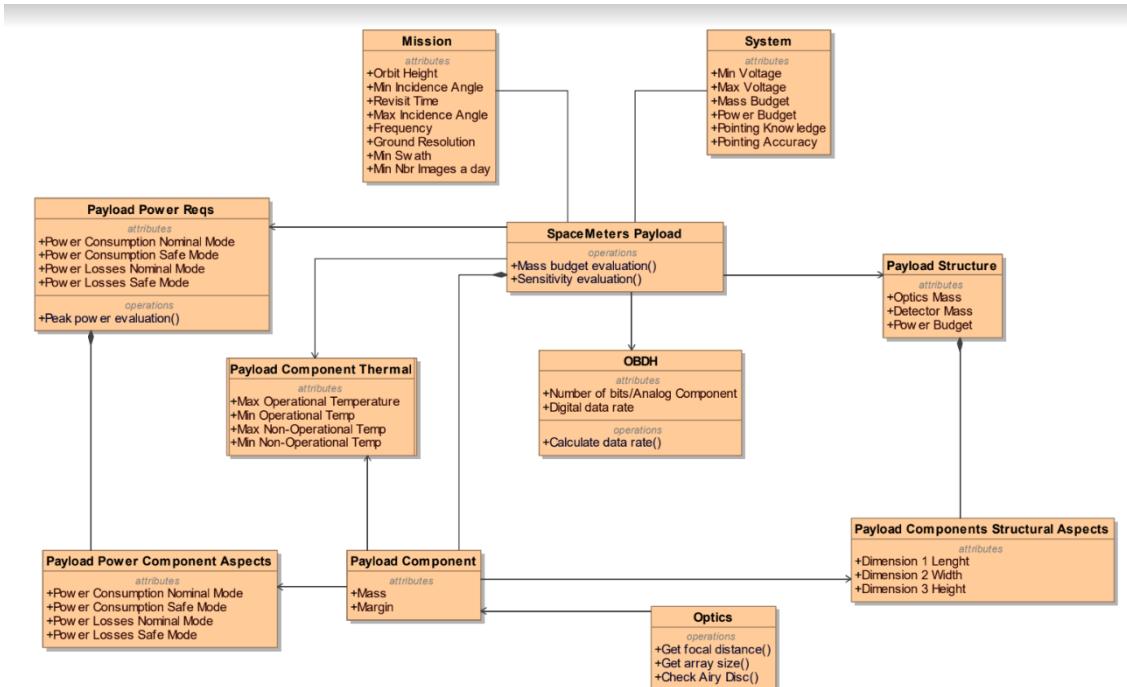


Figura 1: Diagrama en bloque de la arquitectura del módulo

### 2.2. Análisis de riesgos

Este análisis resulta de suma importancia a lo largo de todo el proyecto, ya que permite anticiparse a posibles fallas en el momento de diseño, permite ver en qué elementos del proyecto prestar mayor atención y, finalizada cada etapa, permite identificar las lecciones aprendidas. Para llevar a cabo esto, realizamos un análisis de las posibles problemáticas que se podrían generar durante la realización del proyecto y le asignamos una acción y un responsable para poder resolverla. El modo de cuantificar cada una de las tareas fue asignado un valor en función de la probabilidad de ocurrencia y la severidad de impacto, dando como resultado tres escalas representadas con tres colores diferentes:

### 3. Análisis de gases

En la presente sección se detallará como se realizó el estudio de gases, desde la selección de gases a estudiar como así también las simulaciones realizadas para el estudio de su concentración en la atmósfera.

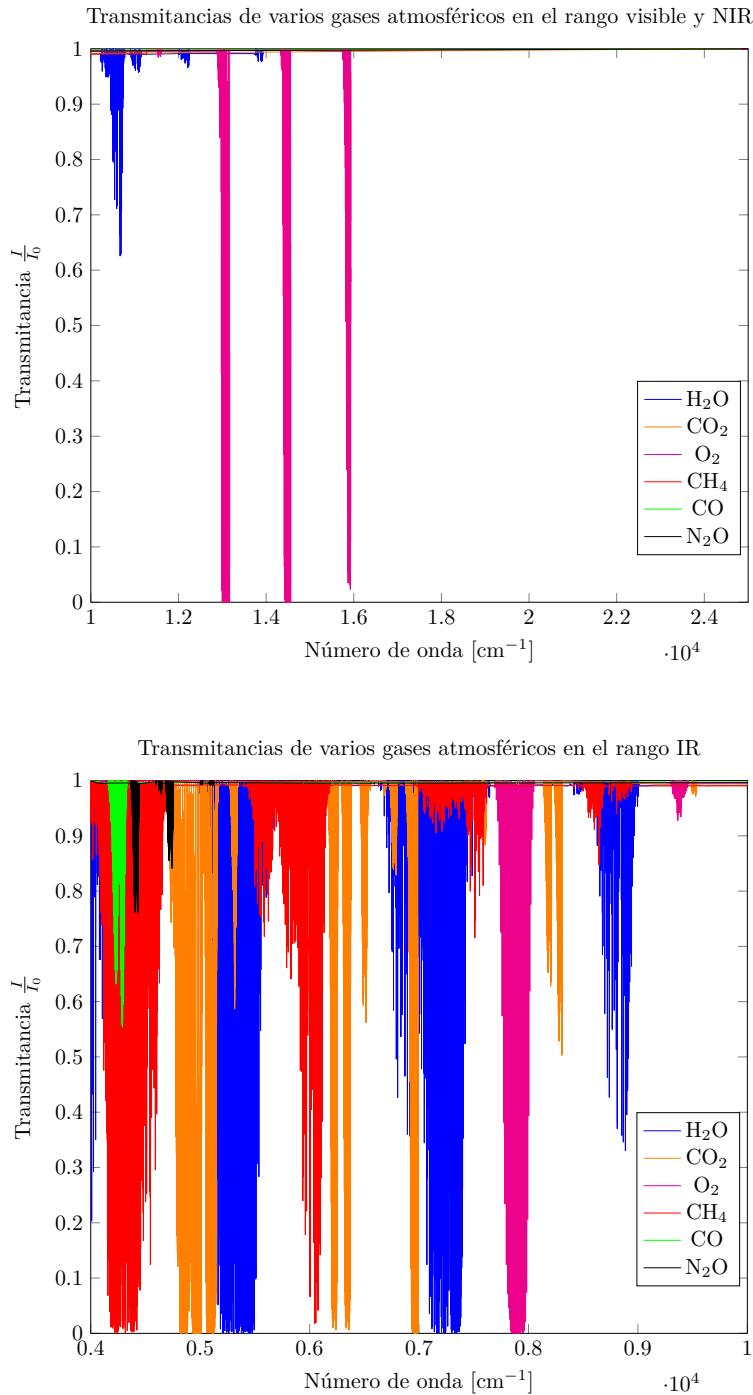


Figura 2: Datos obtenidos de Spectraplot. Notar que en el número de onda correspondiente a  $1,6\mu\text{m}$  ( $\approx 6000\text{cm}^{-1}$ ) no hay solapamiento entre la absorción del CH<sub>4</sub> y otros gases.

#### 3.1. Selección de indicador

Para conocer el estado de la atmósfera se necesita monitorear un buen indicador, es decir, una variable ambiental que refleje el estado de algún aspecto del medio ambiente en un momento y espacio

determinado. Por ende, el proyecto comienza evaluando los indicadores de la **Tabla 1** utilizados en Europa.

| Temas             | Indicadores disponibles   | Indicadores a medio plazo   |
|-------------------|---|---|
| Cambio climático  | Emisiones de CO <sub>2</sub> y CH <sub>4</sub>                        | Índices de emisión de gases de efecto invernadero   |
| Capa de ozono     | Índices de consumo aparente de sustancias que agotan la capa de ozono | Índices de consumo aparente de sustancias que agotan la capa de ozono e índice total agregado |
| Calidad del aire  | Emisiones de SO <sub>x</sub> y NO <sub>x</sub>                        | Exposición de la población a la contaminación del aire  |
| Recursos hídricos | Intensidad de uso de los recursos hídricos                            | Intensidad de uso de los recursos hídricos y a nivel sustancial                               |

Tabla 1: Principales indicadores de la OCDE relacionado con temas climáticos. Ref. [1]

Una forma de controlar la emisión de los gases de la **Tabla 1**, es teniendo un sensor capaz de medir los fotones que llegan al satélite y comparar la intensidad de cada banda con el espectro de absorción de dichos gases presentes en la atmósfera.

El presente trabajo concentra el análisis solamente en el metano. La del mismo varía entre 0.6 y 1.9 ppm dependiendo de la actividad industrial, altura y posición geográfica (figura 3).

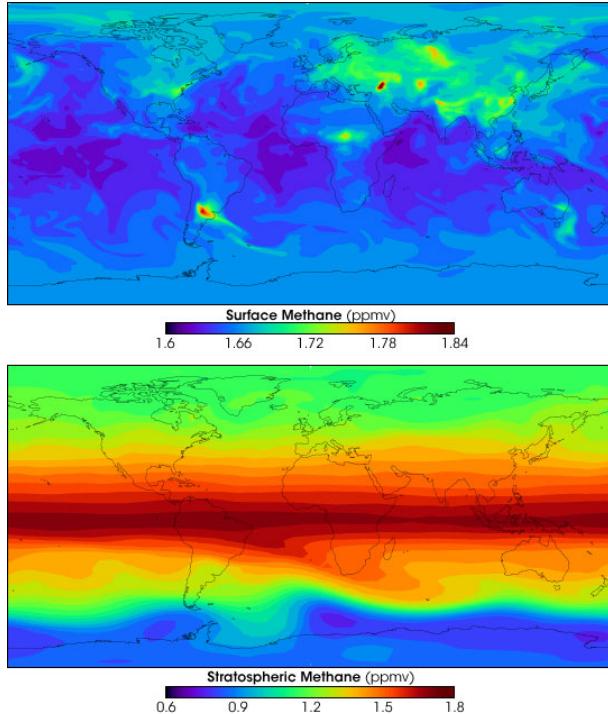


Figura 3: Simulaciones mostrando la concentración de metano cerca del suelo y metano estratosférico [2].

### 3.2. Descripción Simulación

Para simular la transferencia radiativa de la atmósfera de la tierra se usó de la librería `py6s` con Google Colab. Para utilizar `py6s` desde el Colab la primera vez, hay que correr el script desde el

principio para que se instalen todos los componentes y luego correr el código. La librería tiene perfiles atmosféricos precargados, por lo que solamente se tuvo que cargar el modelo de la atmósfera según nuestro caso. Con la siguiente función, especificamos las longitudes de onda para un gas determinado:

### 3.3. Comparación con mediciones de otros satélites

Un paper escrito por Daniel J. Jacob [de libre acceso \[3\]](#) hace un análisis del modelo teórico que emplean en distintas misiones espaciales para medir metano. La Tabla 1 del mismo especifica la resolución y el rango de longitud de onda empleado para dicho fin. Esto resulta de mucha utilidad para complementar con el análisis del punto anterior, con el objetivo de definir qué rango de longitud de onda es conveniente medir.

### 3.4. Modelo teórico de cómo analizar y medir metano

Resulta de suma importancia entender la base teórica de lo que se quiere medir para poder seguir avanzando con el análisis. En este documento se hace un mayor énfasis en la base teórica para medir metano en las diferentes misiones, considerando que las técnicas varían en función del rango de longitud de onda que se desea medir.

### 3.5. Simulación 6S

Para obtener una primera aproximación de la influencia de la concentración de metano sobre la radiancia se simuló el siguiente caso:

- Diurno, 11hs
- Sol cercano al zenit
- Vegetación verde. Superficie Lambertiana homogénea
- Clima tropical
- Altitud de fin de atmósfera 100 km
- Rango de longitud de onda estudiado  $\lambda \in \{1.62, 1.70\} \mu\text{m}$

Se varió la concentración de metano en la atmósfera entre 0 y 3 ppm en pasos de 0.5 ppm y se obtuvo la superficie mostrada en la figura [4](#).

### 3.6. Simulación Spectraplot

Se obtuvieron datos de absorción de luz para una columna de CH<sub>4</sub> utilizando la herramienta Spectraplot [\[4\]](#). Se quiso obtener la absorbancia del CH<sub>4</sub> como lo vé 6S. Las variables de entrada fueron

- Longitud de medio  $L = 100\text{km}$ . En concordancia con la longitud para la cual integra 6S.
- Concentración constante de CH<sub>4</sub> 3 ppm.
- Mismo rango de longitud de onda:  $\lambda \in \{1.62, 1.70\}$
- Temperatura constante 253K.

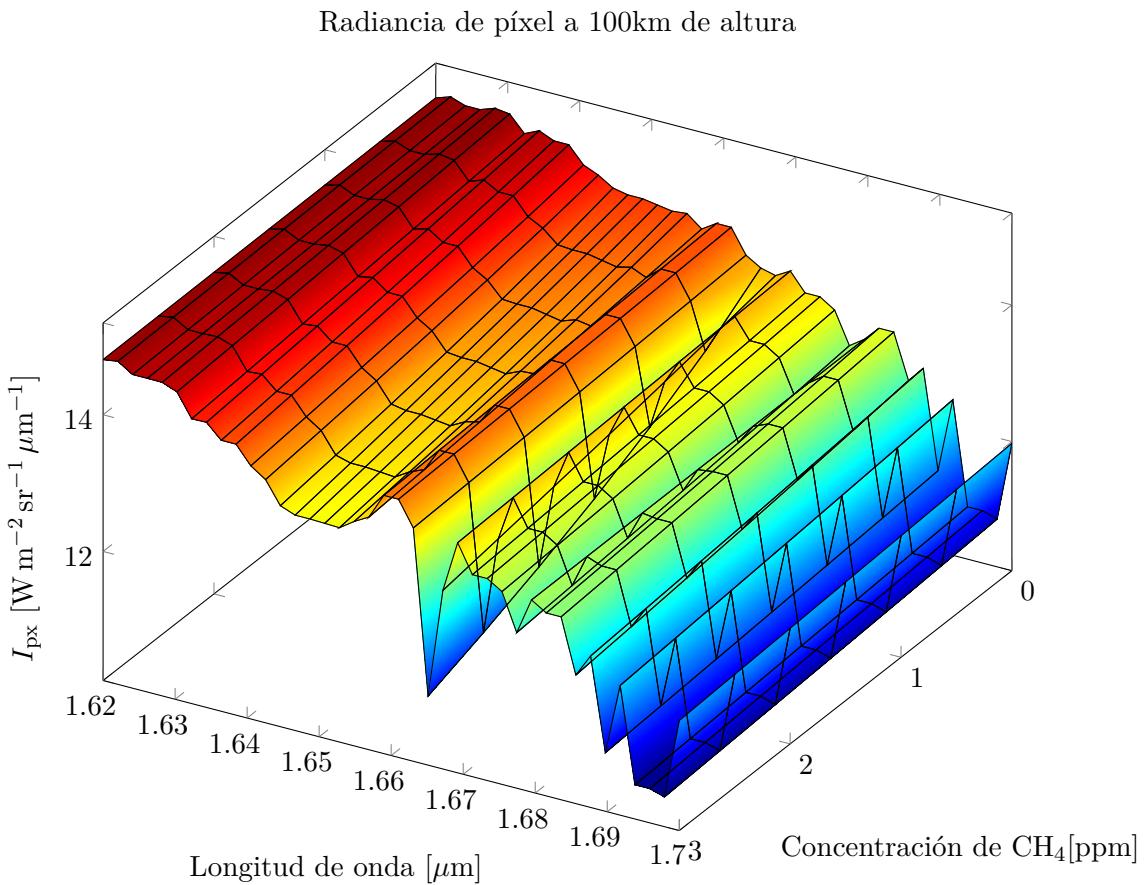


Figura 4: Grafico de radiancia de píxel en función de longitud de onda y concentración de CH<sub>4</sub>.

- Presión constante de 0.35 atm. Es un promedio efectivo de presión ya que la presión no varía linealmente entre 0 y 100 km. \*

con estos datos se obtuvo la transmitancia  $T = \frac{I}{I_0}$  (figura 5).

### 3.7. Comparación de resultados entre 6S y Spectraplot

Se busca comparar los resultados de superponer los efectos de la columna de CH<sub>4</sub> del Spectraplot con los del 6S. Para tal efecto se multiplica la intensidad obtenida del 6S para 0 ppm de CH<sub>4</sub> por la transmitancia obtenida del Spectraplot. Esto resultó en lo que llamaremos una radiancia de píxel modificada. Este perfil de radiancia de píxel fue comparado con la radiancia de píxel obtenida del 6S para 3 ppm haciendo una integración sobre el rango de longitud de onda para obtener la radiancia  $I_R$

$$I_R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{px}(\lambda)|_{3\text{ppm}} d\lambda \quad [\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}] \quad (1)$$

$$I_R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{px}(\lambda)|_{0\text{ppm}} \cdot T(\lambda) d\lambda \quad [\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}] \quad \text{Radiancia modificada} \quad (2)$$

Los valores obtenidos de radiancia nos dicen el área bajo las curvas de radiancia de píxel. Estos valores son una medida de la potencia que va recibir el sensor. Las radiancias de píxel se muestran en la figura 6 y las radiancias integradas se muestran en la tabla 2. Se puede observar que la disminución

---

\*Cabe destacar que la hipótesis de continuidad deja de ser válida a partir de los 60km y por ende no tiene sentido de hablar de una presión a partir de esta altura. Se podría tomar esto en cuenta para futuros análisis.

Transmitancia de una columna de CH<sub>4</sub> de 100km, 3ppm a 0.35atm

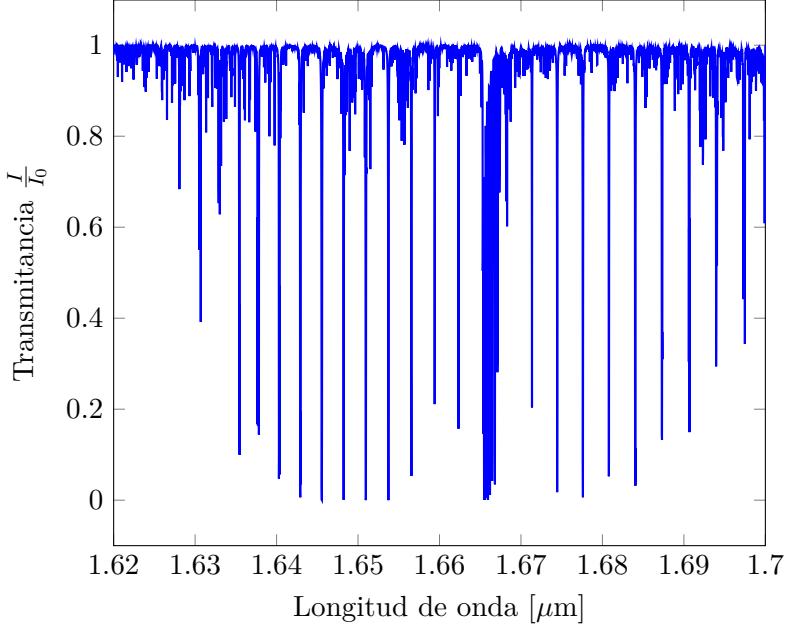


Figura 5: Gráfico obtenido combinando varios resultados del Spectraplot.

n/attenuación de radiancia es del mismo orden de magnitud y difiere poco. La rutina de python que efectuó el cálculo se puede encontrar en [github.com/spacemeters/radiometry](https://github.com/spacemeters/radiometry).

| Caso                       | $I_R[\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}]$ | Atenuación [%] |
|----------------------------|---------------------------------------|----------------|
| $I_{\text{px}}$ para 0ppm  | 1.0858                                | Referencia     |
| $I_{\text{px}}$ para 3ppm  | 1.0480                                | 3.5 %          |
| $I_{\text{px}}$ modificada | 1.0339                                | 4.8 %          |

Tabla 2: Radiancias para dos simulaciones de 6S y una simulación de 6S afectada por la transmitancia obtenida de Spectraplot.

### 3.8. Cálculo de señal recibida

Una vez obtenida la radiancia de píxel  $I_{\text{px}}$ , se calcula la intensidad que llega al sensor según la altura del satélite  $h_{\text{LEO}}$  y el tamaño de píxel  $A_{\text{px}}$ , el cual es el área observado sobre la tierra.

$$I_{\text{sens}}(\lambda) = \frac{A_{\text{px}}}{h_{\text{LEO}}^2} \cdot I_{\text{px}}(\lambda) \quad [\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}] \quad (3)$$

El sensor *convierte* fotones a electrones. Nos interesa obtener el flujo de fotones sobre la superficie según la longitud de onda. La energía de un fotón es dada por  $E_f = \frac{hc}{\lambda}$

$$\Phi_{\text{sens}}(\lambda) = \frac{I}{E_f} = \frac{I_{\text{sens}}(\lambda) \cdot \lambda}{hc} \quad [\text{fotones m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}] \quad (4)$$

Luego, multiplicando el valor  $\Phi_{\text{sens}}$  por el área del sensor se obtiene la cantidad de fotones que inciden sobre el sensor. Para obtener la cantidad de electrones generados en corriente se integra la expresión obtenida multiplicada por la **quantum efficiency**  $Q$  del sensor, la cual también depende de

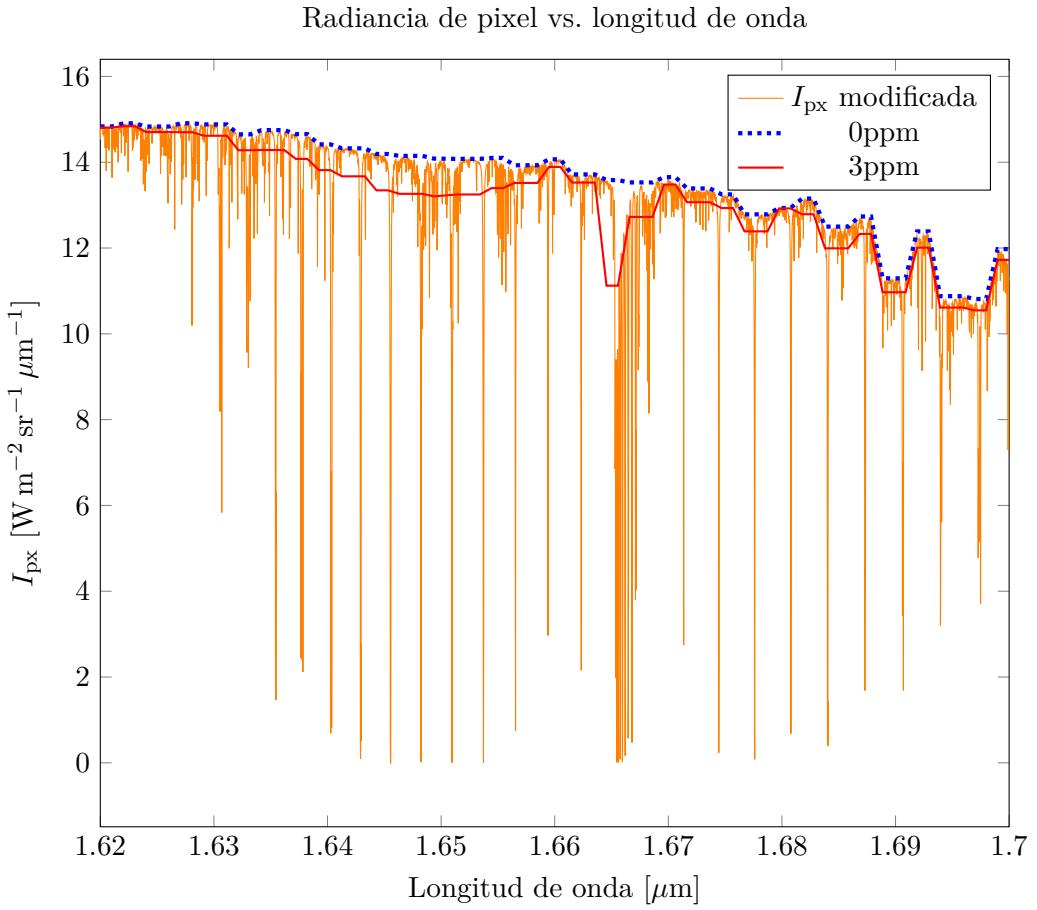


Figura 6: Resultados de simulación 6S para 0ppm/3ppm y una superposición del caso 0 ppm de 6S con los datos del Spectraplot ( $I_{\text{px}}$  modificada).

la longitud de onda del fotón incidente.

$$n_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A_{\text{sens}} \cdot \Phi_{\text{sens}}(\lambda) Q(\lambda) d\lambda \quad [\text{electrones s}^{-1}] \quad (5)$$

La señal obtenida va ser la corriente, dada por

$$i_{\text{sens}} = n_e \cdot q_e = n_e \cdot 1.602176634 \times 10^{-19} \quad [\text{Amperes}]$$

siendo  $q_e$  la carga del electrón. Es necesario aún efectuar el análisis de *signal to noise ratio* (S/N) partiendo del sensor elegido. A continuación se detalla un ejemplo del cálculo que se debería hacer suponiendo algunos valores

- Área de sensor  $50\text{mm}^2$
- Área de pixel observado de  $100\text{km}^2$  (área de Manhattan)
- Variación de 1% de la potencia recibida, que podría corresponder a una variación de 1ppm de  $\text{CH}_4$  en la atmósfera según la tabla 2
- Quantum efficiency igual a 50% constante

$$\Delta i_{\text{sens}} = \Delta n_e \cdot q_e = \frac{A_{\text{sens}} A_{\text{px}} \cdot q_e}{h c h_{\text{LEO}}^2} \cdot \int_{1,62}^{1,70} \lambda \cdot \Delta I_{\text{px}}(\lambda) Q(\lambda) d\lambda = 8.5363 \times 10^{-8} \text{A}$$

La corriente correspondiente a una variación del 1 % de CH<sub>4</sub> sería

$$\Delta i_{sens} = 1\% i_{sens} = 8.5363 \times 10^{-10} A \quad (6)$$

En base a este resultado creemos que para poder medir metano primero se tendría que comprobar un módulo preliminar. El objetivo de este módulo preliminar sería comprobar la idea detrás de un FTS y obtener un espectro de la tierra antes de intentar medir una intensidad del orden del nano-ampere.

## 4. Misiones Espaciales estudiadas

En la presente sección se mencionan las principales misiones espaciales estudiadas cuyo objetivo es la medición remota de gases en la atmósfera mediante un satélite, es decir que tienen un objetivo similar al buscado en este trabajo.

### 4.1. GOSAT (Greenhouse Gases Observing Satellite)

La primera misión espacial estudiada es la del satélite **GOSAT** cuyo objetivo consiste en medir la concentración de los principales gases de efecto invernadero del espacio (CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>).

Esta misión es un proyecto conjunto de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA), el Instituto Nacional de Estudios Ambientales de Japón (NIES) y el Ministerio del Medio Ambiente de Japón (MOE).

El GOSAT fue el primer satélite de observación terrestre dedicado a medir en forma regular los gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre y fue lanzado el 23 de enero de 2009.

#### 4.1.1. Instrumentos de medición

El GOSAT utiliza dos instrumentos de medición. El sensor de infrarrojo cercano y térmico para el especlómetro de transformada de Fourier de observación de carbono (**TANSO-FTS** de sus siglas en inglés) detecta los espectros de absorción de gas del infrarrojo de onda corta solar (**SWIR**) reflejado en la superficie de la tierra, así como el infrarrojo térmico (**TIR**) irradiado desde el suelo y la atmósfera. El TANSO Cloud and Aerosol Imager (**TANSO-CAI**) es un radiómetro ultravioleta (UV), visible, infrarrojo cercano y SWIR diseñado para determinar sondeos claros de las mediciones TANSO-FTS y para proporcionar propiedades ópticas de nubes y aerosoles.<sup>[5]</sup>.

#### 4.1.2. TANSO-FTS

El instrumento **TANSO-FTS** mide la radiancia espectral reflejada de la superficie terrestre. Mediante spectrometría por Transformada de Fourier puede medir la concentración de gases presentes en la atmósfera.

Los gases que estudia el **TANSO-FTS** son O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>. La concentración de O<sub>2</sub> se obtiene de la región de líneas de absorción correspondientes a 1.6 μm, en las cuales las intensidades son menos dependientes de la temperatura. La región de 2.0 μm puede usarse para la obtención de concentración de CO<sub>2</sub>. El CH<sub>4</sub> también se obtiene de la región de 1.6 μm.

Para el caso de O<sub>2</sub> también se utiliza una banda de 0.76 μm para estimar la longitud efectiva de la trayectoria óptica, que es un parámetro clave para la recuperación de la densidad de la columna. Como la concentración de O<sub>2</sub> es constante, bien conocida y distribuida uniformemente en toda la atmósfera, esto permite usarla como referencia.

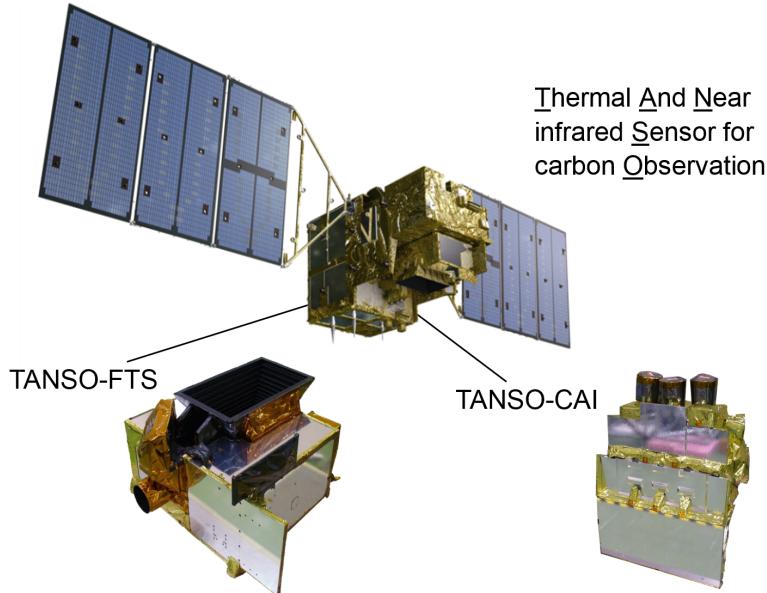


Figura 7: Fotos del TANSO-FTS, CAI y vista de diseño del satélite GOSAT en órbita. Ref. [5].

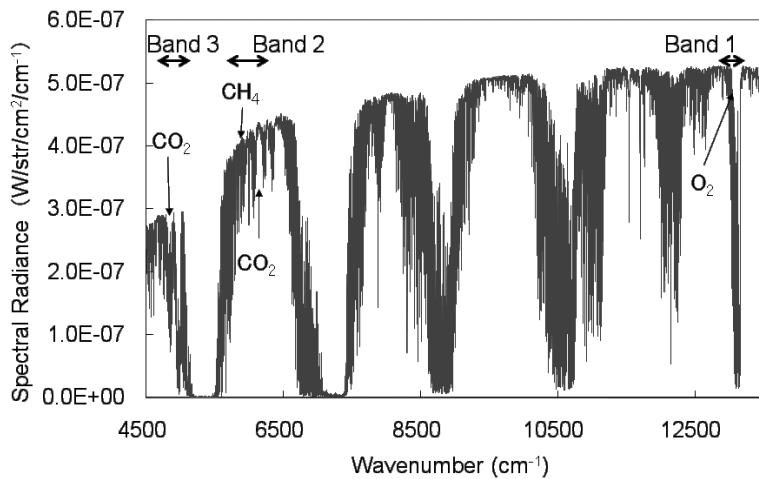


Figura 8: Cobertura espectral simulada para el TANSO-FTS en la región SWIR. Ref. [6].

#### 4.1.3. TANSO-CAI

El **TANSO-CAI** es un radiómetro utilizado para medir nubes y características de aerosoles para mejorar la precisión de los datos del **TANSO-FTS**. La longitud de onda central se determina a partir del análisis de un momento. Este instrumento tiene una cobertura espacial continua, un campo de visión más amplio y una resolución espacial más alta que el **TANSO-FTS**, lo cual permite detectar la distribución espacial de nubes y aerosoles.[7]

### 4.2. MERLIN (Methane Remote Sensing Lidar Mission)

Esta es una misión franco-alemana que busca poner en órbita a partir de 2023 un satélite capaz de medir CH<sub>4</sub> con una precisión sin precedentes para una misión de estas características. Si bien es una misión aun en desarrollo, entender su principio de medición puede ser de utilidad para el desarrollo del proyecto.

MERLIN se instalará en el bus satelital *Myriade Evolutions*, el cual fue desarrollado por CNES en

conjunto a la industria espacial francesa.

La carga útil del satélite, es un LiDAR activo que puede medir a través de nubes delgadas y durante la noche. La misma esta siendo desarrollada por la Administración Espacial DLR en Alemania.

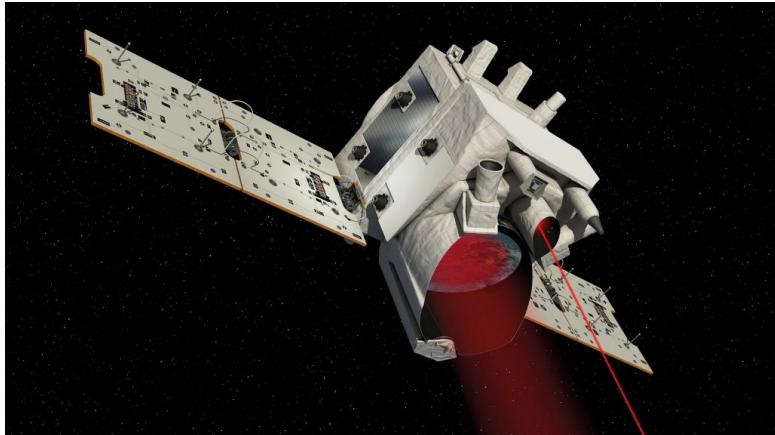


Figura 9: Representación del satélite MERLIN en órbita. Ref. [8].

#### 4.2.1. Principio de Funcionamiento

El Lidar de metano incluye un láser capaz de emitir luz en dos longitudes de onda diferentes, permitiendo realizar mediciones muy precisas de la concentración de metano en todas las latitudes, independientemente de la luz solar. Las longitudes de onda están en el rango infrarrojo y se eligen para que una sea absorbida por el metano, mientras que la otra no. El satélite envía dos pulsos simultáneamente al mismo lugar en el suelo y luego los captura y registra los pulsos reflejados con un telescopio. La presencia de metano en la atmósfera debilita solamente a uno de los pulsos. Esta diferencia permite a los científicos determinar la cantidad de metano entre el satélite y la superficie de la Tierra.

## 5. Selección del Instrumento de sensado

Posterior a la investigación sobre instrumentos de sensado de radiación, misiones espaciales de sensado remoto de gases e intercambios con especialistas en el área, se decide utilizar como instrumento de sensado un Espectrómetro por Transformada de Fourier (**FTS** de sus siglas en inglés). La elección de un FTS como instrumento de sensado para el proyecto se decidió debido a que permite obtener información sobre varias frecuencias de la radiación incidente y por el éxito del mismo en misiones como lo es la misión GOSAT.

### 5.1. FTS: Principio de Funcionamiento y Medición

Un Espectrómetro por transformada de Fourier se podría decir que es similar a un Interferómetro de Michelson, sin embargo tiene pequeñas diferencias y un objetivo distinto.

La principal diferencia entre este Espectrómetro y el Interferómetro es que el primero reemplaza la pantalla donde se ve el Patrón de interferencia por un fotodetector, también se necesita que un espejo permita generar una diferencia de camino óptico. Esto se puede lograr moviendo el espejo linealmente. En la **Figura 10** se puede observar un esquema de intererómetro de Michelson, mientras que en la **Figura 11** se puede observar el esquema de un FTS.

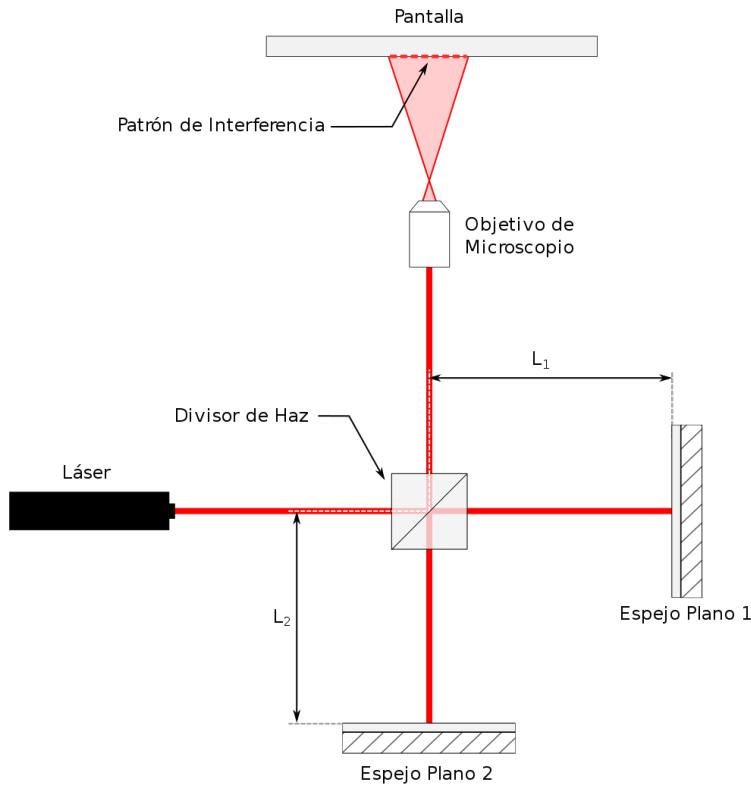


Figura 10: Esquema de un Interferómetro de Michelson. Ref. [9]

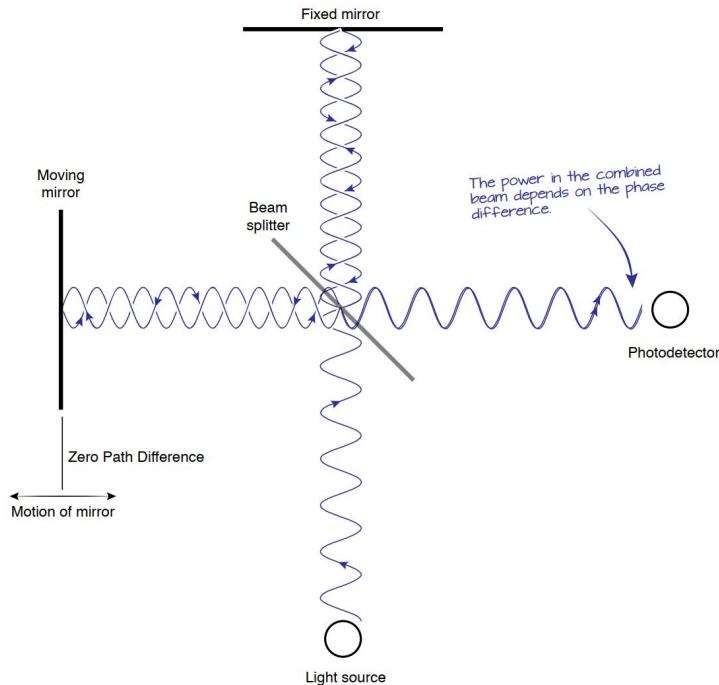


Figura 11: Esquema de un FTS. Ref. [10].

El principio de funcionamiento se explicará para el caso de una fuente de luz monocromática.

A medida que se mueve el espejo, va cambiando la diferencia de camino óptico entre los haces, lo cual genera máximos y mínimos por interferencia constructiva como también destructiva. Esto implica un haz, a la salida del divisor, que depende directamente de la diferencia de camino óptico, lo cual se traduce en una señal periódica (idealmente) en el fotodetector.

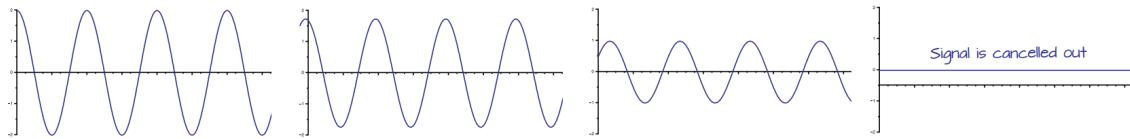


Figura 12: Amplitud del haz en función de la distancia. Ref. [10].

Cuando llega el haz al fotodetector, esto se traduce en una señal que va desde un valor máximo a un mínimo. El máximo es en un punto de interferencia constructiva, con una diferencia de camino óptico múltiplo de la longitud de onda y el mínimo en un punto de interferencia destructiva, con una diferencia de camino óptico de la mitad de la longitud de onda.

El fotodetector tiene una tasa de muestreo determinada y es por este motivo que debe moverse el espejo con una resolución pequeña y de forma precisa, para muestrear la señal en distintos puntos con distintas diferencias de camino óptico para reproducir la señal exitosamente.

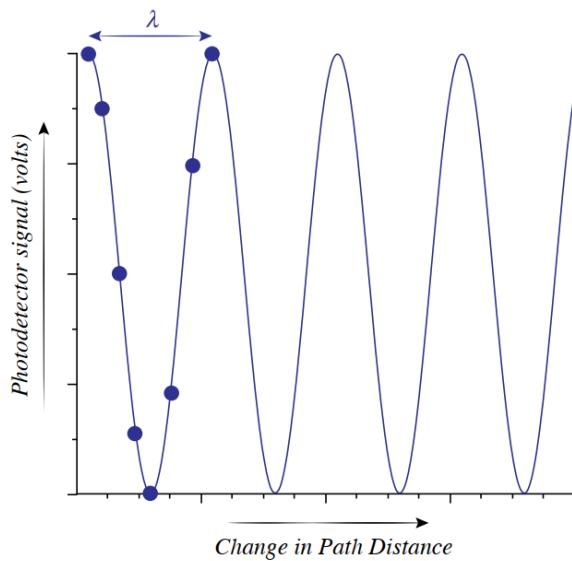


Figura 13: Señal en el fotodetector. Ref. [10].

De esta manera se obtiene con un interferómetro de Michelson una señal eléctrica con la misma longitud de onda que la de la fuente lumínica. Si a esta señal se le aplica una transformada de Fourier se puede obtener un interferograma donde se encuentran todas las frecuencias de la señal. Al ser la fuente lumínica de luz monocromática, la única frecuencia observable en el interferograma será la de la fuente lumínica.

Todo el análisis anterior es válido para una fuente lumínica con varias longitudes de onda presentes. Es decir, que mediante este método se puede obtener una señal eléctrica que contenga toda la información de las frecuencias en la fuente lumínica de manera *codificada*.

A continuación se muestra un ejemplo simulado donde la señal que llega al fotodetector contiene las frecuencias de 1 a 30, en la **Figura 14** se puede observar el resultado que se obtendría al transformar la señal.

Para el caso anterior pero simulando con la ausencia de la frecuencia correspondiente a 10, se obtiene un interferograma donde se observa justamente que dicha frecuencia no está presente. Dicho resultado se puede observar en **Figura 15**.

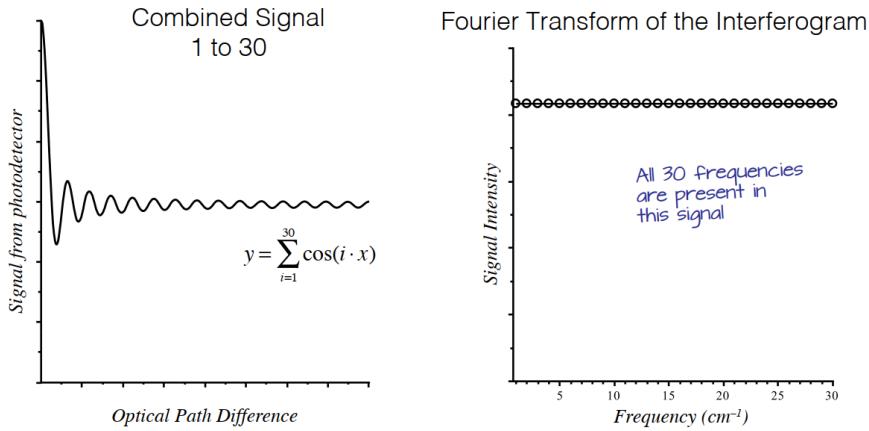


Figura 14: Señal y Transformada para un caso multifrecuencias. Ref. [10].

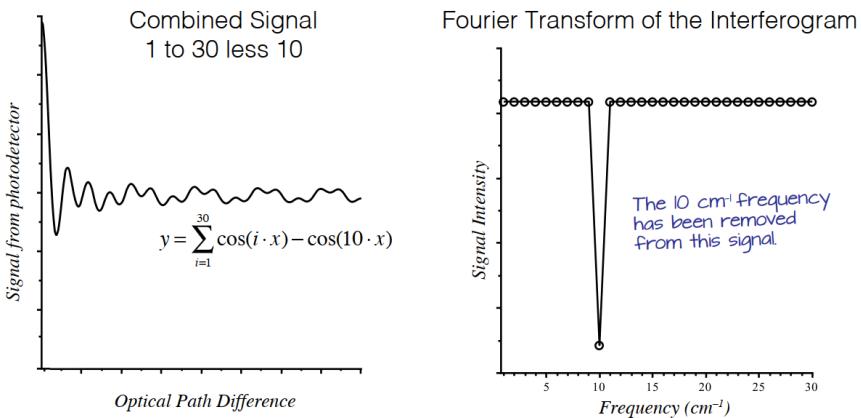


Figura 15: Señal y Transformada para otro caso multifrecuencias. Ref. [10].

Sin embargo para una medición real, entran en consideración otros efectos como la transmitancia y el impacto de la tasa de muestreo, por lo que un gráfico real sería algo diferente.

Para un caso considerando transmitancia no se tendría valores booleanos (presencia y ausencia de frecuencia), sino que el gráfico representaría valores intermedios, como se puede observar en la **Figura 16**.

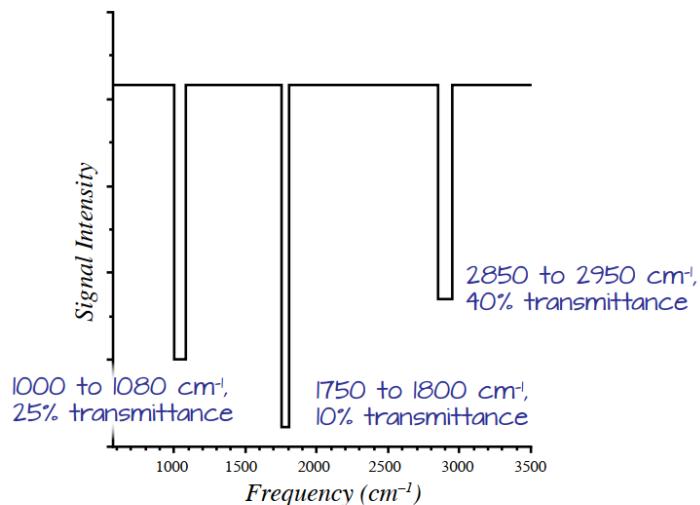
## 5.2. Consideraciones de Especialistas

Este proyecto busca medir gases de efecto invernadero, por lo que el rango de medición del espectrómetro será el infrarrojo. Es decir, mediremos los gases mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier o **FTIR** de sus siglas en inglés.

Debido al gran nivel técnico que requiere la medición por espectroscopía infrarroja y aún más en el espacio, se decidió contactar con personalidades de la industria aeroespacial como también con agencias espaciales, para que nos guíen con consideraciones a tener en cuenta en el desarrollo de nuestro proyecto. Principalmente se destacan las comunicaciones con dos personalidades:

- Dr. Guillermo Rozas de la **CNAE** (Comisión Nacional de Energía Atómica) quién trabaja en Espectroscopia.

### Fourier Transform of the Interferogram



$$y = \sum_{i=500}^{3500} \cos(i \cdot x) - 0.6 \sum_{i=2850}^{2950} \cos(i \cdot x) - 0.9 \sum_{i=1750}^{1800} \cos(i \cdot x) - 0.75 \sum_{i=1000}^{1080} \cos(i \cdot x)$$

Figura 16: Transformada para un caso considerando transmitancia. Ref. [10].

- Dr. Dietrich Feist de la **DLR** (Centro Aeroespacial Alemán) quién trabajó en el proyecto MERLIN y en el centro de investigación de gases de efecto invernadero de DLR.

Durante el intercambio de mensajes con el Dr. Rozas, se comentó sobre los cuidados que deben tenerse durante la construcción del mecanismo de espejo móvil. Dicho mecanismo tiene suma importancia ya que la resolución en un FTIR es inversamente proporcional a la diferencia de camino óptico máxima, además de que se debe pasar por la condición de caminos ópticos iguales (en inglés Zero Path Difference) para interpretar el cero de las mediciones.

Para lograr el movimiento del espejo se pensaron dos alternativas. La primera mover el espejo mediante un piezoelectrónico. El Dr. Rozas comentó que es una solución de buena estabilidad y velocidad, pero con baja resolución. Para solucionar esto se necesita un piezoelectrónico muy grande.

La segunda alternativa es mover el espejo linealmente, mediante una reducción con engranajes acopladas a un servomotor. Con esta solución se obtiene buena resolución pero es mecánicamente más frágil y susceptible a tener variaciones de velocidad.

La distancia entre puntos sampleados a lo largo del camino del espejo, define la longitud de onda mínima que se puede medir, ya que son inversamente proporcionales. El Dr. Rozas nos comentó que para que estos datos se puedan interpretar correctamente, se debe conocer la posición del espejo en dichos puntos con muy buena precisión, como mínimo media longitud de onda de lo que se busca medir e idealmente un cuarto.

También nos comentó que pueden haber señales espúreas superpuestas, si la fuente de luz tiene longitudes de onda menores al límite mínimo definido por el sampleo (frecuencia de Nyquist). Sin embargo esto se puede evitar utilizando un filtro pasa-largo.

Con el Dr. Dietrich Feist se realizó una videollamada para atender nuestras dudas sobre la tecnología FTS y la viabilidad de utilizarla en un satélite. Él nos comentó acerca de su trabajo en el proyecto MERLIN y varias consideraciones que hay que tener en cuenta para una misión de estas características.

Durante la llamada se pudieron obtener conclusiones y comentarios de gran utilidad. En primer

lugar se debe tener mucho cuidado con el armado de la unidad óptica, debido a que los espejos pueden desalinearse debido a vibraciones. Lo cual trae un problema de calibración. Aunque se haga una calibración previa al lanzado del satélite, las vibraciones durante su puesta en órbita pueden mover los espejos. Según lo que nos comentó el Dr. Feist es bastante común que se deban hacer calibraciones post lanzamiento a los instrumentos sensibles a las vibraciones. Para realizar este tipo de calibraciones se necesita mucho presupuesto y es por eso que las misiones espaciales de este tipo son muy costosas. Debido a esto, el Dr. Feist nos comentó que una calibración robusta no va a ser posible realizar con el presupuesto asignado al proyecto.

Sin embargo, utilizar un espejo con movimiento lineal no es la única opción, también puede utilizarse un *Corner Mirror* permitiendo un movimiento angular para generar diferencia de camino óptico.

Luego de la videollamada concluimos que para el rango de frecuencias que buscamos medir el orden de magnitud del recorrido que debería realizar nuestro espejo está en el orden de los cm.

### 5.3. Conclusiones acerca del FTIR

Luego de la presente investigación, tanto de tecnologías, misiones espaciales e intercambio con especialistas queda comprobado que la utilización de un FTIR como método de medición es el adecuado para una medición de concentración de gases en la atmósfera de forma remota. Este método además brinda gran flexibilidad ya que con un solo instrumento se pueden medir varias longitudes de onda y por ende la concentración de distintos gases que resultan de gran importancia para este proyecto.

## 6. Diseño preliminar del módulo

### 6.1. Consideraciones: Llevando un FTIR a un proyecto de bajo costo

Las misiones espaciales estudiadas presentadas comparten el mismo objetivo que este trabajo. Sin embargo, tienen una diferencia notable la cual es su alcance y su presupuesto. Mientras que el presente trabajo tiene como objetivo la construcción de un módulo de bajo costo capaz de medir la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, las misiones estudiadas buscan medir la concentración de gases de efecto invernadero con alta precisión y con un presupuesto muy elevado. Este es el principal motivo por lo cual nuestro módulo tendrá una precisión muy baja en comparación con las misiones estudiadas, ya que para lograr esos niveles de precisión se necesita un alto presupuesto.

Para reforzar la precisión de la medición obtenida, se puede realizar una calibración *on board*. Una opción es medir una fuente de luz conocida, para comparar lo que obtiene el FTIR con lo que debería obtener. Si se quiere tener la fuente de luz dentro del módulo, se puede usar un láser. Aunque también se puede utilizar una fuente de luz externa como el Sol, la Luna o el Mar, ya que se conocen sus espectros. Aunque esto mejoraría la robustez de la medición, no permitirá tener una medición con el mismo grado de precisión que las misiones estudiadas.

Debido a lo explicado anteriormente nuestro módulo obtendrá una medición del espectro más a nivel cualitativo que cuantitativo, es decir funcionará como un *proof of concept* de un FTIR como el del GOSAT. Sin embargo, el módulo permitirá obtener una imagen de la concentración de gases, mediante una *foto* del espectro en frecuencias, lo cual es el objetivo del presente trabajo.

## 6.2. Diseño preliminar del módulo

El diseño del módulo para nuestro *Proof of Concept* se encuentra en una etapa preliminar. Se utilizaron componentes reales pero todavía se deben ultimar los detalles en cuanto a sujeción de componentes en la mesa óptica.

Las siguientes piezas tienen un diseño hecho completo o parcial:

- Baffle óptico ( $1^\circ$  apertura)
- Colimador de luz
- Lente convergente del detector
- Mesa óptica
- Carcasa

El baffle óptico se diseño para captar un área de  $5 \times 5\text{km}$  ( $A_{px}$ ), con un ángulo de 0.6 grados medido desde nadir. El colimador de luz fue dibujado como un telescopio cassegrain por la simplicidad del colimador. Aún se tiene que ver si corresponde para la aplicación.

Aún faltan detallar aspectos constructivos de soportes de piezas y el actuador en sí.

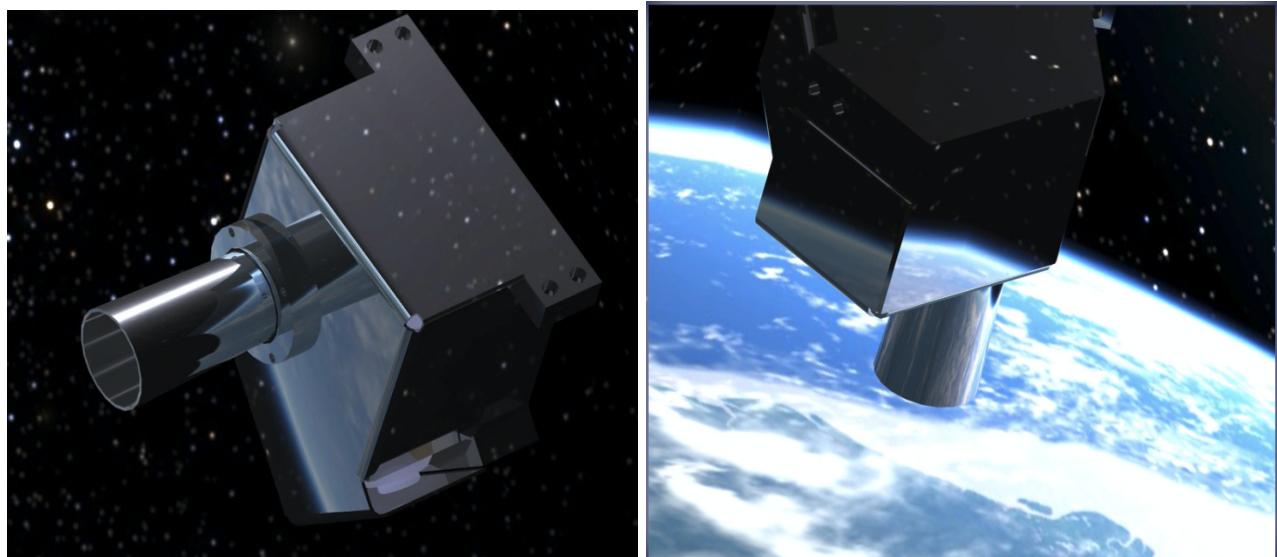


Figura 17: Renders del diseño preliminar del módulo en el espacio

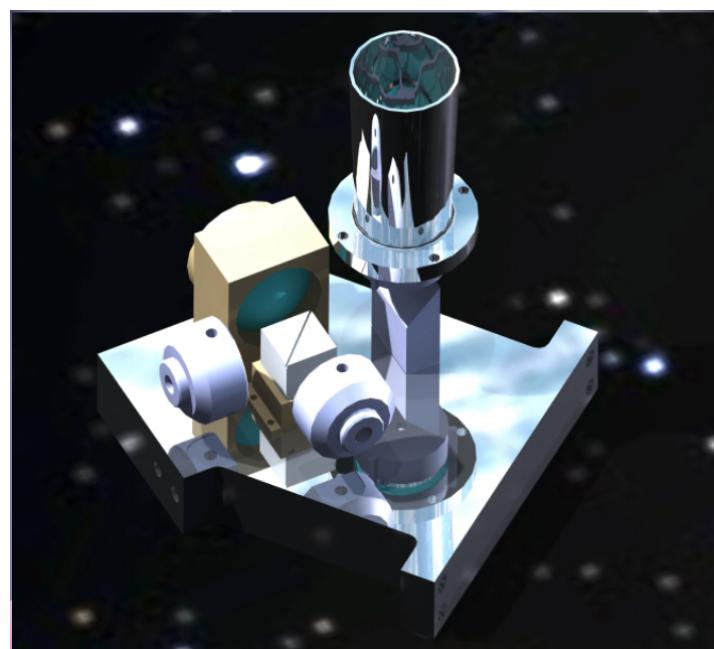


Figura 18: Render mostrando componentes

## 7. Análisis de costos y viabilidad

En la presente sección se detallará el análisis de costos y la viabilidad económica del proyecto hasta el grado de ejecución alcanzado.

El presente análisis se concentrará en el estudio de los componentes necesarios para el diseño de nuestro *Proof of concept* de FTIR.

Los principales componentes necesarios para el módulo se pueden desglosar en cuatro categorías principales: óptica, electrónica, estructura y actuador. A continuación se detallan los mismos. Dentro de la parte óptica, se puede encontrar un

- Corner cube mirror (2x US\$ 229)
- Mirrors & Lenses (US\$ 200)
- Beam Splitter (US\$ 350)

Para la parte electrónica, se encuentra un

- Ingaas Photodiode (US\$ 200)

En la sección de estructura, se tiene

- Bulonería (US\$ 50)
- Material (US\$ 200)

Finalmente, en la parte de actuador, se encuentra:

- Actuador lineal (US\$ 1250)

Al sumar estos costos parciales, se obtiene un total de US\$ 2708. Si bien este precio excede el pensando inicialmente, se debe tener en cuenta la alta complejidad tanto técnica como teórica de la propuesta planteada, así como también el hecho de que al tratarse de un espectrómetro, la precisión de los componentes es indispensable para el correcto funcionamiento del dispositivo y tener una medición efectiva.

Se puede observar el elevado precio del actuador lineal, ya que el mismo es una pieza fundamental del espectrómetro. Es él encargado de mover al espejo móvil en pasos del orden de los nanómetros, lo cual, en caso de fallar, afecta la relación rango- precisión. Teniendo estos factores en cuenta, se busca un actuador lineal que cumple con las características de precisión requeridas así como también tener la garantía del fabricante de que es un dispositivo *Vacuum ready*. Por otro lado, el sensor, en este caso un fotodiodo, debe ser sensible en el rango de las longitudes de onda de interés y es imprescindible que tenga un bajo ruido para garantizar el funcionamiento del dispositivo. Por los motivos expresados anteriormente, resulta evidente que algunos componentes presenten elevados precios, ya que son necesarios para el correcto funcionamiento del módulo.

## **8. Conclusión**

Ampliar el conocimiento acerca del ciclo del carbono y del impacto que tiene sobre la composición atmosférica se ha convertido en una necesidad no solo científica, sino también social. Hoy en día se pueden estimar flujos de estos gases a nivel continental, pero resultaría de extrema utilidad poder obtener información sobre sus concentraciones presentes en zonas específicas del planeta. Es decir, para lograr este cometido, se necesita mayor precisión y nuestra propuesta permitiría obtenerla empleando espectrómetros con un costo considerablemente inferior comparado a los que están actualmente en órbita en otras misiones espaciales.

## **9. Comentarios Finales**

La medición de gases de efecto invernadero en la atmósfera mediante un satélite en órbita resulta un problema de gran complejidad, tanto del punto de vista óptico, como técnico. En comparación a otros temas o proyectos, la bibliografía disponible es escasa y con un alto nivel de complejidad técnico. Para la realización de este trabajo, los autores debieron realizar una investigación exhaustiva, leyendo bibliografía especializada y contactando a personalidades de la industria de distintas agencias espaciales. Dicha investigación permitió entender los conceptos detrás del principio de medición y los instrumentos utilizados para una misión de estas características.

Sin embargo, los autores creen que la única manera de inspirar y preparar una generación de jóvenes para participar en una nueva revolución espacial sólo es posible abordando desafíos complejos donde los jóvenes tendrán que utilizar sus conocimientos y sus capacidades críticas para la resolución de proyectos. Es importante destacar que se busca inspirar a jóvenes interesados en la industria aeroespacial a que pongan en práctica sus conocimientos, así como también se busca fomentar el aprendizaje en esta área, bajo la filosofía de que por más que se trate de conocimientos complejos, cualquiera que se disponga a aprenderlos, puede hacerlo.

## Referencias

- [1] Ocde (1991): Environmental indicators. a preliminary set. ocde, parís. <https://www.oecd.org/site/worldforum/33703867.pdf>.
- [2] Lu Hu, Christoph A Keller, Michael S Long, Tomás Sherwen, Benjamin Auer, Arlindo Da Silva, Jon E Nielsen, Steven Pawson, Matthew A Thompson, Atanas L Trayanov, et al. Global simulation of tropospheric chemistry at 12.5 km resolution: performance and evaluation of the geos-chem chemical module (v10-1) within the nasa geos earth system model (geos-5 esm). *Geoscientific Model Development*, pages 4603–4620, 2018.
- [3] Daniel J Jacob, Alexander J Turner, Joannes D Maasakkers, Jianxiong Sheng, Kang Sun, Xiong Liu, Kelly Chance, Ilse Aben, Jason McKeever, and Christian Frankenberg. Satellite observations of atmospheric methane and their value for quantifying methane emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016.
- [4] Christopher S Goldenstein, Victor A Miller, R Mitchell Spearrin, and Christopher L Strand. Spectraplot. com: Integrated spectroscopic modeling of atomic and molecular gases. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 200:249–257, 2017.
- [5] Gosat mission overview. <https://www.eorc.jaxa.jp/GOSAT/mission.html>.
- [6] Gosat tanso-fts overview. [https://www.eorc.jaxa.jp/GOSAT/instrument\\_1.htm](https://www.eorc.jaxa.jp/GOSAT/instrument_1.htm), .
- [7] Gosat tanso-cai overview. [https://www.eorc.jaxa.jp/GOSAT/instrument\\_2.html](https://www.eorc.jaxa.jp/GOSAT/instrument_2.html).
- [8] Merlin overview. <https://event.dlr.de/en/ila2018/merlin/>.
- [9] Interferometro de michelson. [https://es.wikipedia.org/wiki/Interfer%C3%B3metro\\_de\\_Michelson](https://es.wikipedia.org/wiki/Interfer%C3%B3metro_de_Michelson).
- [10] Fts explanation lectures from keynote chemistry. <https://keynotechemistry.com/spectroscopy/>, .
- [11] François-marie bréon et philippe ciais, spaceborne remote sensing of greenhouse gas concentrations. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631071309002399>.

## 10. Anexo

### 10.1. Transferencia radiativa – Para entender la radiometría

El estudio de cuerpos reales (quasi-negros) en la radiometría parte del principio de la radiancia. Todo cuerpo emite fotones de varias longitudes de onda en función de su **temperatura**. Los fenómenos que influyen en la medición de estos fotones son:

- El **medio** que atraviesa el fotón. En el caso de satélites, dicho medio viene a ser la atmósfera. Este puede afectar en las siguientes formas:

**Absorbancia:** El medio puede absorber los fotones incidentes causando un decremento en la intensidad medida. Este efecto depende de la longitud de onda,  $\lambda$ .

**Dispersión:** Los fotones interactúan con el medio y son dispersados. Este efecto también depende del  $\lambda$  del fotón incidente. Las pérdidas por absorción y dispersión suelen llamarse *extinción*.

**Emisión:** Radiación emitida por el mismo medio. En mediciones desde satélites se tiene que considerar este efecto actuando sobre la Tierra (cuerpo que se desea medir), y sobre el satélite mismo ya que parte de los fotones que se miden son provenientes de la misma atmósfera.

- La **temperatura** del cuerpo que se desea medir.
- La **dispersión del cuerpo** que se desea medir (causado por la emisión del medio en caso de haberlo).
- La **longitud de onda**  $\lambda$  de los fotones que atraviesan el medio, si es que existe.
- Las especificaciones y **temperatura** de la antena: La antena no mide en un cono perfecto. Puede tener **"sidelobes"** que dependen de su eficiencia. La temperatura de la antena puede interferir.

Es importante destacar que un radiómetro no mide más que la potencia incidente para el rango de  $\lambda$  que fue calibrado, el cual *es un valor, escalar*. Esto puede ser remediado agregando más radiómetros para formar un *"phased-array"* o agregando un sistema mecánico de oscilación para recorrer un área con varias mediciones.

La cantidad de mediciones que se pueden efectuar están limitadas por el ruido. Debido a esto es recomendable hacer un promedio temporal de mediciones para obtener el valor de la medición final. Esto se muestra en la ecuación (7) (el sombrero de  $\hat{P}_s$  indica promedio temporal).

$$\hat{P}_s = \frac{1}{\tau} \int_{\tau} |s(t)|^2 dt \quad (7)$$

donde  $s$  es la señal medida. La ecuación (7) también es conocida como *signal averaging*.

Considerando la extinción y la emisión del medio se llega a la ecuación de transferencia radiativa para un medio:

$$\frac{dT_B}{dx} + \kappa_e \cdot T_B = \kappa_a T + \kappa_s T_{vs} \quad (8)$$

$T_B$  : Temperatura equivalente del fotón que atraviesa el medio estudiado

$\kappa_a, \kappa_s$  : Absorción y dispersión

$T_{vs}$  : Temperatura equivalente de la dispersión de volumen (ocasionada por nubes/lluvia)

$T$  : Temperatura física del medio

Lo que se termina midiendo en la antena es el fotón una vez que el mismo atraviesa el medio, a una distancia  $x_{sat}$ .

$$T_B(x_{sat}) = T_B(0) \cdot \exp\left(-\int_0^{x_{sat}} \kappa_e dx\right) + \int_0^{x_{sat}} (\kappa_e T(x) + \kappa_s T_{vs}(x)) \cdot \exp\left(-\int_x^{x_{sat}} \kappa_e dx_2\right) dx \quad (9)$$

donde  $x_2$  es una variable auxiliar.

La temperatura medida,  $T_B(x_{sat})$ , se puede considerar directamente proporcional a la potencia para longitudes de onda cercanas a las microondas.

## 10.2. Potencial técnica para la medición de gases invernaderos

Los satélites que observan la tierra miden la luz emitida y reflejada por la tierra y atmósfera. La luz reflejada presenta variaciones espectrales que reflejan la interacción de la radiación con las partículas. Para muchas frecuencias, la atmósfera es transparente a la radiación. Sin embargo, las longitudes de onda que excitan modos de vibración de las partículas gaseosas, son absorbidas por las mismas (haciéndolas vibrar en dicho modo). Por lo que la medición de la radiancia es proporcional a la cantidad de partículas absorbentes presentes en la atmósfera. En dicho caso, la radiación proveniente de la tierra que llega al satélite sería igual a (aproximación de primer orden, Ref. [11]):

$$I(\lambda) = E_0(\lambda)R(\lambda)T(\lambda) \quad (10)$$

Donde  $E_0(\lambda)$  es la irradiancia de la parte más alta de la atmósfera,  $R(\lambda)$  es la reflectancia de la superficie y  $T(\lambda)$  es la transmitancia atmosférica.  $R(\lambda)$  presenta una variación muy suave con respecto a la longitud de onda y para un rango acotado de frecuencias se puede aproximar como constante o como función lineal de la longitud de onda. De forma similar, la irradiancia  $E_0(\lambda)$  varía poco con respecto a la longitud de onda, excepto por algunas longitudes de onda bien identificadas, llamadas líneas de Fraunhofer. Por otro lado, la transmitancia atmosférica  $T(\lambda)$  muestra rápidos cambios espectrales, resultado de la suma de muchas líneas de absorción individuales de cada componente atmosférico. La amplitud de dichos picos está directamente relacionada con la cantidad del componente absorbente (de dicha longitud de onda).

Entonces, por medio de un instrumento de medición de radiación (los mismos se evalúan en la sección ??) el cual mida longitudes de onda y radiancia de la misma, sería posible identificar las longitudes de absorción de varios gases y deducir su concentración por medio de la radiancia de dicha longitud de onda. Al ser la absorción función de la presión atmosférica, se estaría midiendo un promedio de composición de gases a lo largo de la columna de atmósfera analizada. En caso de seguir desarrollando el concepto y de que la resolución del instrumento elegido lo permita, se podría mejorar el modelo dándole más peso a las capas atmosféricas más bajas (Dufour and Breon, 2003).

## 10.3. Figuras

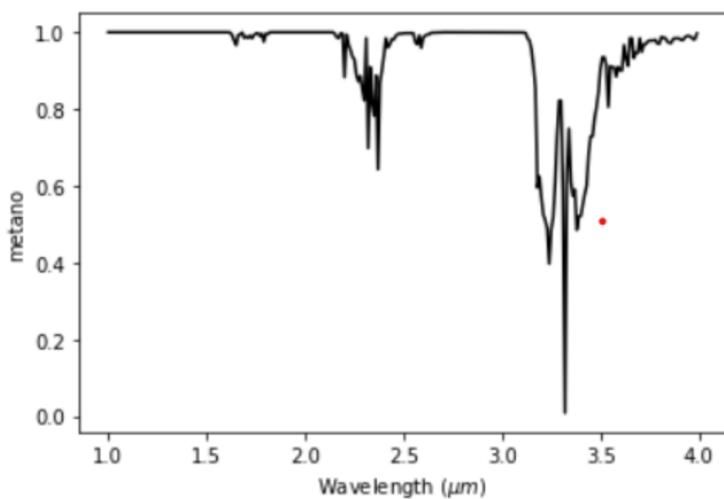


Figura 19: Absorción del metano Vs longitud de onda

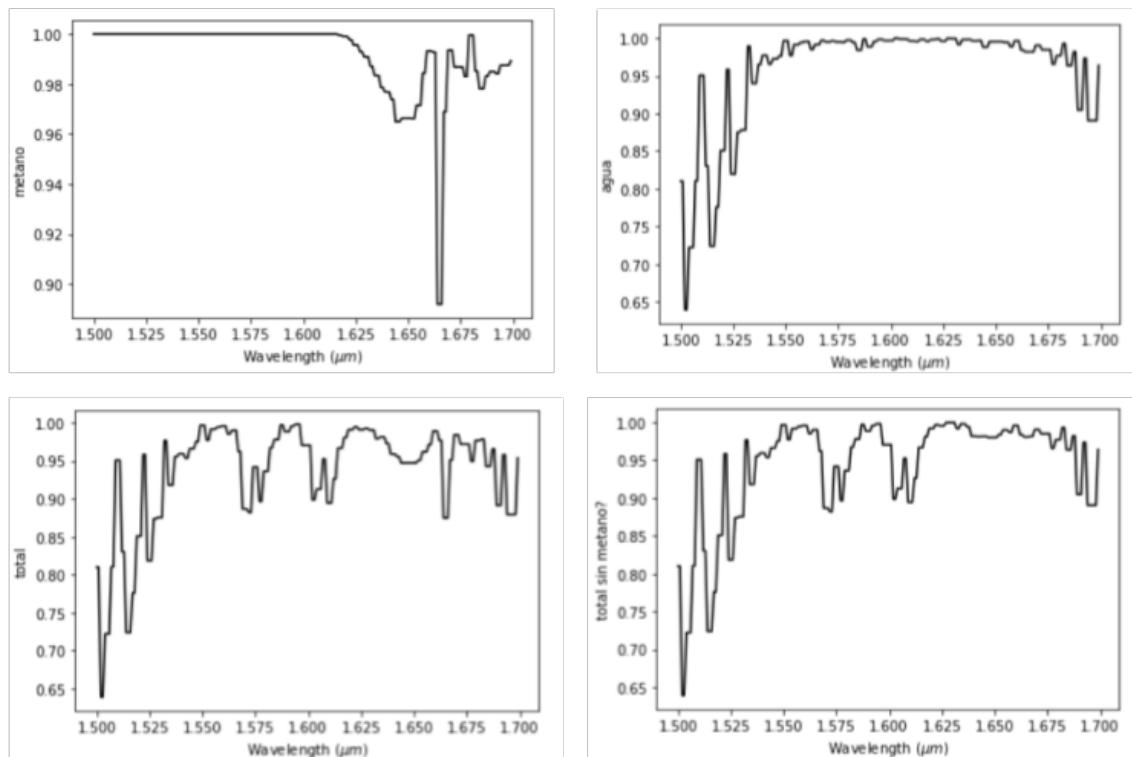


Figura 20: Análisis a 1.6  $\mu\text{m}$

#### 10.4. Código de simulaciones

```

1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import numpy as np
3 import scipy.signal as ss
4 import scipy as scipy
5 import matplotlib as mpl
6 import math
7 import pandas as pd
8 from scipy.interpolate import interp1d
9

```

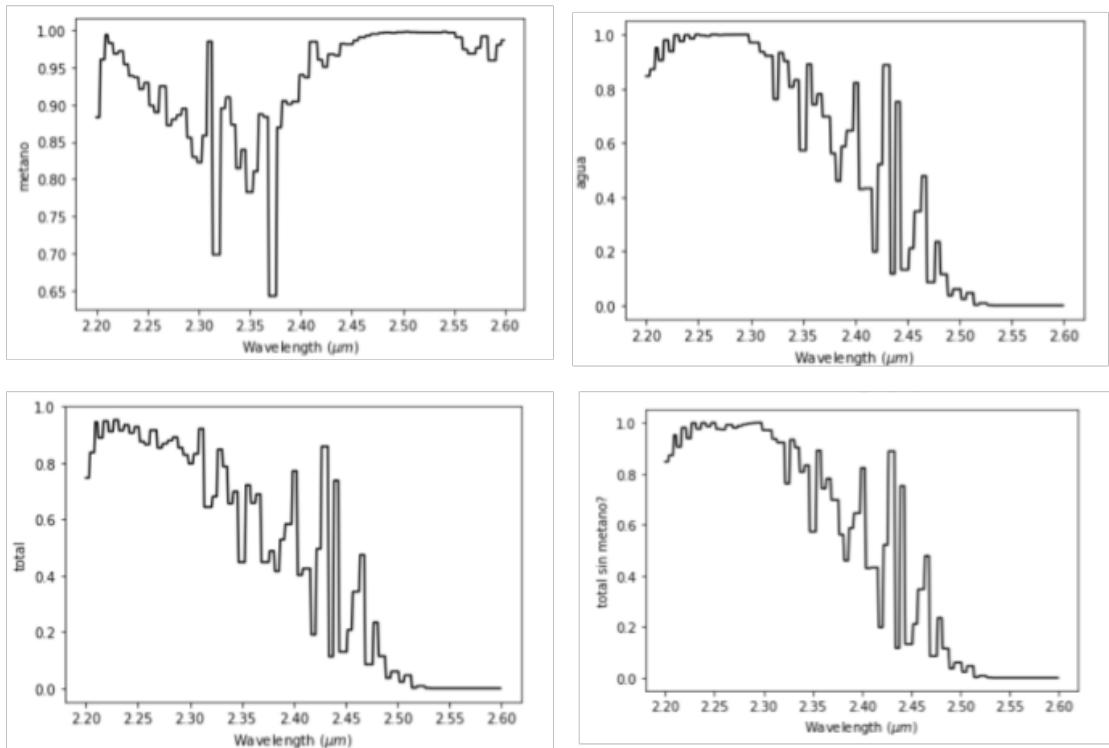


Figura 21: Análisis a 2.4  $\mu\text{m}$

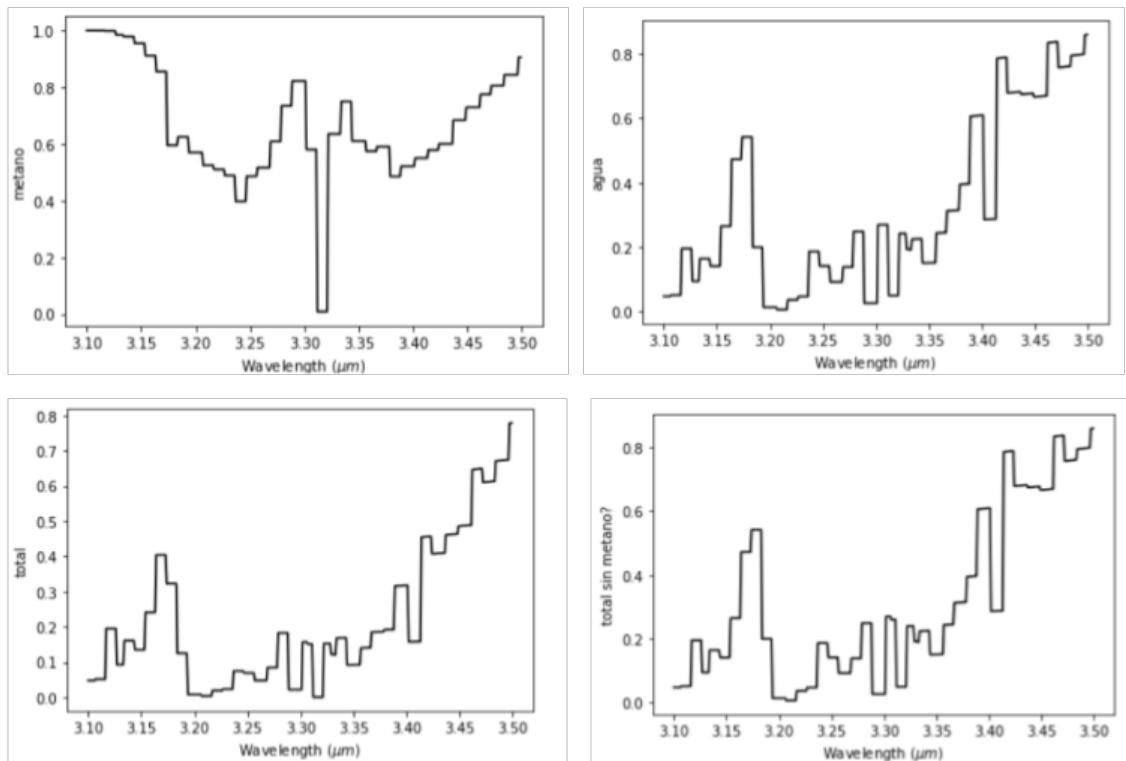


Figura 22: Análisis a 3.3  $\mu\text{m}$

```

10 from google.colab import files
11 uploaded = files.upload()
12
13 pd.set_option("display.max_rows", None, "display.max_columns", None)
14 print(df1)

```

```

15 df1.plot(kind='line', x='wl', y='I_R')
16 df2.plot(kind='line', x='wl', y='I_R')
17
18 #Caracteristicas instrumento
19 x_step = 99e-9 #En m
20 N = 1000 #Cantidad de samples
21 lmin_sensor = 400e-9
22 lmax_sensor = 2500e-9
23
24 #Entonces el instrumento tiene: (#d: optical. x:x)
25 x_range = (N - 1) * x_step
26 d_step = 2 * x_step
27 d_range = 2 * x_range
28
29 print('Características Instrumento:')
30 print('paso x (nm):',x_step*1e9)
31 print('paso d (nm):',d_step*1e9)
32 print('distancia (cm):',x_range*1e2)
33 print('dco (cm):',d_range*1e2)
34 print('Minima longitud de onda posible (um):',(2*d_step)*1e6)
35 print('Maximo número de onda posible (cm$^{-1}$)',1/(2*d_step)*1e-2)
36
37 #Caracteristicas input simulación
38 input_domain_units = 1e-6 #[m], Dominio de entrada en um, data en I/m^2/[um]
39 N_data = len(np.array(df1['wl']))
40 lambda_min = df1.at[0, 'wl'] * input_domain_units
41 lambda_max = df1.at[N_data-1, 'wl'] * input_domain_units
42 delta_lambda = (df1.at[1, 'wl']-df1.at[0, 'wl']) * input_domain_units
43 v_max = 1/lambda_min
44 v_min = 1/lambda_max
45 print('Data de Entrada:')
46 print('lambda_min (um):', lambda_min*1e6)
47 print('lambda_max (um):', lambda_max*1e6)
48 print('v_max (cm$^{-1}$):', v_max*1e-2)
49 print('v_min (cm$^{-1}$):', v_min*1e-2)
50 plt.figure(1)
51 plt.plot(np.array(df1['wl']),np.array(df1['I_R']))
52 plt.title('Data de entrada')
53 plt.xlabel('Longitud de Onda (um)')
54 plt.ylabel('W/m$^2$/um')
55
56 #Características output simulación
57 output_domain_units = 100 #[m^-1], Dominio de salida en cm^-1, data en W/m^2/[cm^-1]
58

```

```

59 #Zero Padding en numero de onda para que quede interpolado en d para sampling k*d_step
60     para algun valor de k
61 k_os_min = 1+int(np.floor(2*d_step*v_max)) #oversampling #ROUND INTEGER TO NEXT
62     INTEGER
63 print('Oversampling a utilizar:', k_os_min)
64 v_os = (1/d_step)*k_os_min
65 v_spec_max = v_os/2 #Frecuencia maxima en el espectro
66 N2 = int(np.ceil(1+v_spec_max*lambda_max**2/delta_lambda)) #N Calculado con criterio
67     de conservar resolucion minima
68
69 #Paso en frecuencia
70 delta_v = v_spec_max / N2
71 #Redondear data a bines
72 v_min = np.ceil(v_min / delta_v) * delta_v #Redondear v_min a un bin
73 v_max = np.floor(v_max / delta_v) * delta_v #Redondear v_max a un bin
74 #Generar vector de v equiespaciado v_int (numeros enteros, indica multiplos de delta_v
75     )
76 v_int = np.linspace(int(v_min/delta_v),int(v_max/delta_v),(int((v_max-v_min)/delta_v
77         +1)))
78 #(precision numerica)
79 v_int = [int(i) for i in np.round(v_int)]
80
81 #Entonces
82 print('N2 (Espectro generado): ', N2)
83 print('v_min (redondeado a bin, cm$^{-1}$): ', v_min*1e-2)
84 print('v_max (redondeado a bin, cm$^{-1}$): ', v_max*1e-2)
85 print('delta_v (paso en numero de onda, cm$^{-1}$): ', delta_v*1e-2)
86
87 #Calcular longitudes de onda asociadas a numeros de onda para interpolar, en unidades
88     de entrada
89 v_dom_interp = [ delta_v * i/input_domain_units for i in v_int] # En unidades de
90     salida
91 l_dom_interp = [ 1e4/i for i in v_dom_interp]
92 l_dom_interp = [1/(input_domain_units*output_domain_units)/i for i in v_dom_interp] #
93     En unidades de entrada
94 l_original_domain = np.array(df1['wl'])
95 I_original_data = np.array(df1['I_R'])
96 #Recortar espectro
97 I_sensor_data = [0 if (l_original_domain[i]*input_domain_units < lmin_sensor or
98     l_original_domain[i]*input_domain_units > lmax_sensor) else I_original_data[i] for
99     i in range(len(I_original_data))]
100 I_interp_data_f = interp1d(l_original_domain, I_sensor_data, kind='slinear', fill_value
101     =[0])
102 I_interp_data = I_interp_data_f(l_dom_interp) #Esta seria la funcion I_data_lambda(1/v

```

```

    )
92 #Aplicar jacobiano (1/v^2)
93 #I_v = 1e4 * np.divide(I_interp_data,v_dom_interp)
94 I_v = 1/(input_domain_units*output_domain_units) * np.divide(I_interp_data,
95   v_dom_interp)
96 I_v = np.divide(I_v,v_dom_interp)
97
98 #Espectro de partida
99 I = np.zeros(N2)
100 I[v_int] = I_v
101 plt.figure(2)
102 plt.plot(I)
103 plt.title('Espectro generado a partir de data')
104 plt.xlabel('bin')
105 plt.ylabel('W/m$^2$/cm$^{-1}$')
106
107 #Antitransformar para obtener interferograma de partida
108 dv = delta_v/output_domain_units #Diferenciales en output_domain_units, al integrar W
109   /m^2/cm^-1*cm^-1 = W/m^2
110 I_d = np.fft.irfft(I)*len(I)*dv
111 print('I_d : ', I_d)
112 print('i_d length', len(I_d))
113
114 #En base al interferograma obtenido, se calculará interferograma simulado
115 nuevo_id = np.zeros(2 * N)
116 #VENTANA A UTILIZAR
117 window = ss.windows.get_window('blackmanharris',2*N)
118 window2 = np.zeros(2*N)
119 for i in range(N):
120   window2[i] = window[N-1+i]
121   window2[N-1+i] = window[i]
122 for i in range(int(len(nuevo_id)/2)):
123   if i < N/2:
124     nuevo_id[i] = I_d[k_os_min*i]
125     nuevo_id[2*N - i - 1] = I_d[k_os_min*(1+i)]
126   else:
127     #Se utilizaron todos los datos
128     #zero padding interpolará valores en frecuencia
129     nuevo_id[i] = 0
130     nuevo_id[2*N - i - 1] = 0
131 # APPLICAR VENTANA
132 interferogram_record = np.array(nuevo_id)
133 interferogram_record = interferogram_record + interferogram_record[0]
134 for i in range(2*N):

```

```

133     nuevo_id[i] = nuevo_id[i] * window2[i]
134
135 #Interferograma Original
136 plt.figure(3)
137 plt.plot([i*d_step/k_os_min*1e2 for i in range(int(len(I_d)/2))],[I_d[i]*1e3 for i in
138 range(int(len(I_d)/2))])
139 plt.title('Interferograma generado a partir de data')
140 plt.xlabel('dco [cm]')
141 plt.ylabel('mW/m$^2$')
142
143 #Nuevo Interferograma
144 plt.figure(5)
145 plt.plot([i*d_step*1e2 for i in range(N)],[nuevo_id[i]*1e3 for i in range(N)])
146 plt.title('Interferograma ventaneado y resampleado')
147 plt.xlabel('dco [cm]')
148 plt.ylabel('mW/m$^2$')
149
150
151 #Obtener espectro
152 dd = d_step
153 spec = 2*np.absolute(np.fft.rfft(nuevo_id))*dd #TODO: XQ TENGO QUE MULTIPLICAR POR DOS
154 ??
155 #Al integrar, W/m^2*m = W/m^2/m, se busca W/m^2/(output_domain_units)
156 spec = spec*output_domain_units #Al transformar queda en W/m^2/(m^-1), convertir en W/
157 m^2/(output_domain_units)
158
159
160 #graficar los dos juntos
161 plt.figure(6)
162 plt.plot(v_int_espectro_original*(k_os_min/(d_step*2))*1e-2,I)
163 plt.title('Espectro Original')
164 plt.xlabel('número de onda (cm$^{-1}$)')
165 plt.ylabel('W/m$^2$/cm$^{-1}$')
166 plt.figure(7)
167 plt.plot(v_int_espectro_nuevo*(1/(d_step*2))*1e-2,spec)
168 plt.title('Espectro Obtenido')
169 plt.xlabel('número de onda (cm$^{-1}$)')
170 plt.ylabel('W/m$^2$/cm$^{-1}$')
171 plt.figure(8)
172 plt.plot(v_int_espectro_original*(k_os_min/(d_step*2))*1e-2,I)
173 plt.plot(v_int_espectro_nuevo*(1/(d_step*2))*1e-2,spec)

```

```

174 plt.title('Espectros Superpuestos')
175 plt.xlabel('número de onda (cm$^{-1}$)')
176 plt.ylabel('W/m$^2$/cm$^{-1}$')
177 plt.figure(9)
178 plt.plot(v_int_espectro_original*(k_os_min/(d_step*2))*1e-2,I) #cm^-1
179 plt.plot(v_int_espectro_nuevo*(1/(d_step*2))*1e-2,spec) #cm^-1
180 plt.xlim([1e-2/lmax_sensor,1e-2/lmin_sensor])
181 plt.title('Espectros Superpuestos, recortado')
182 plt.xlabel('número de onda (cm$^{-1}$)')
183 plt.ylabel('W/m$^2$/cm$^{-1}$')
184
185 plt.figure(10)
186 plt.plot(v_int_espectro_nuevo*(1/(d_step*2))*1e-2,spec) #cm^-1
187 plt.xlim([1e-2/lmax_sensor,1e-2/lmin_sensor])
188 plt.title('Espectros Obtenido, recortado')
189 plt.xlabel('número de onda (cm$^{-1}$)')
190 plt.ylabel('W/m$^2$/cm$^{-1}$')
191
192 #Graficar ventana utilizada
193 plt.figure(11)
194 plt.plot(window)
195 plt.plot(window2)
196 plt.title('Ventana utilizada')
197 plt.xlabel('Dominio (cm)')
198 plt.ylabel('K')
199
200 #Interferogram Record
201 plt.figure(12)
202 plt.plot([i*d_step*1e2 for i in range(N)],[interferogram_record[i]*1e3 for i in range(N)])
203 plt.title('Interferogram Record')
204 plt.xlabel('dco [cm]')
205 plt.ylabel('mW/m$^2$')

```

Listing 1: Python example