

GEI y Métodos de detección

Alejandro Albarran

Diego Espinosa

16 de enero de 2026

Efecto Invernadero

El efecto invernadero es un proceso natural, consecuencia de la propiedad radiativa de la atmósfera de la Tierra, al retener parte de la radiación emitida por el sol. Esta es absorbida por la superficie y posteriormente emitida de regreso manteniendo un equilibrio térmico.

Cierta parte de esta radiación infrarroja es absorbida por los gases que conforman la atmósfera y emitida nuevamente en todas direcciones. Esto permite que la temperatura del planeta sea mayor a la temperatura efectiva, permitiendo la vida en el.

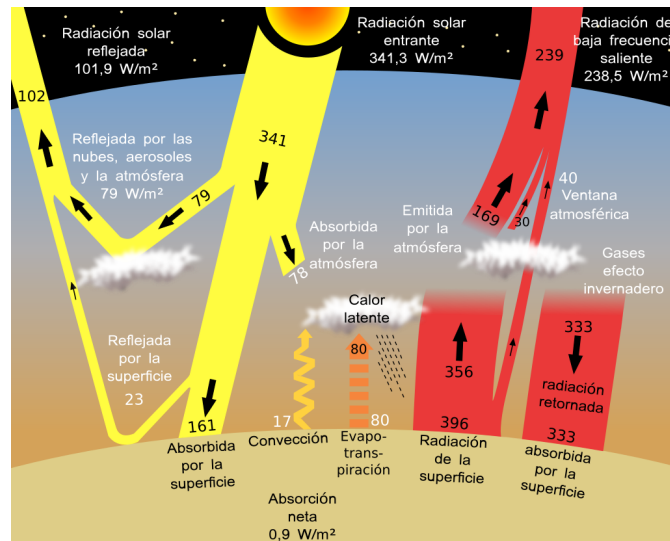


Figura 1: Diagrama del efecto invernadero.

1. Gases de Efecto invernadero

La quema de gases fósiles, aumento no controlado en la urbanización, transporte, agricultura y otras actividades culturales y económicas, durante el último par de siglos, han provocado una emisión a la atmósfera no regulada de lo que se conocen como gases de efecto invernadero (GEI). Estos gases absorben en mayor medida la radiación infrarroja que posteriormente es reemitida, aumentando la temperatura en la superficie de la tierra.

Gas	Fórmula	Longitud de Onda (μm)	Importancia Espectroscópica
Dióxido de Carbono	CO_2	2.7, 4.3, 15.0	La banda de 15 μm domina el efecto invernadero. La de 4.3 μm se usa en sensores.
Metano	CH_4	3.3, 7.7	Fuerte absorción en 3.3 μm (estiramiento C-H). Solapamiento con H_2O en 7.7 μm .
Óxido Nitroso	N_2O	4.5, 7.8, 17.0	Absorción muy intensa en 4.5 μm (región "silenciosa" de otros gases).
Vapor de Agua	H_2O	2.7, 6.3, >12	El gas más absorbente. Sus bandas anchas interfieren con la medición de otros gases.
Ozono	O_3	9.0, 9.6, 14.3	Absorbe en la "ventana atmosférica" (8-14 μm), haciéndolo muy potente.

Tabla 1: Principales Gases de Efecto Invernadero (GEI) y sus bandas de absorción en el Infrarrojo (IR).

Sensores

2. Introducción a los sensores

Los sensores son una parte fundamental en la tecnología moderna, particularmente en los sistemas de medición y control utilizados para el estudio del medio ambiente. Su función principal es detectar cambios en alguna magnitud física, mediante la interacción entre el entorno y un dispositivo sensible, provocando un cambio en alguna propiedad física o química en el dispositivo, que puede ser interpretado y analizado.

Esta respuesta se puede transformar en una señal medible, por lo general en una señal eléctrica. Lo que permite que sea amplificada, filtrada, digitalizada y procesada por computadoras u otros sistemas electrónicos.

En el contexto del monitoreo ambiental, los sensores permiten registrar de manera continua parámetros como la temperatura del aire, la humedad, la velocidad del viento, la calidad del aire y la presencia de sustancias contaminantes. Siendo los dos últimos parámetros, los que nos son de interés para ser analizados y utilizados para mejorar la salud pública y la calidad del aire en la Ciudad de México.

3. Tipos de sensores

Debido a la diversidad de sensores, es necesario agruparlos según criterios que permitan analizar sus características, ventajas y limitaciones. Entre los criterios más utilizados se encuentran el principio de operación, el tipo de señal que generan y la plataforma en la que son empleados.

Una de las clasificaciones más relevantes se basa en el principio de operación del sensor, es decir, en el fenómeno físico o químico que utiliza para realizar la medición. Para nosotros, los sensores ópticos, térmicos y químicos son de particular interés para aplicaciones ambientales.

Los sensores ópticos funcionan a partir de la interacción de la radiación electromagnética con la sustancia a medir. En la detección de GEI, estos sensores aprovechan la absorción o emisión de radiación en longitudes de onda específicas características de cada gas, lo que permite identificar y cuantificar su concentración de manera precisa.

Los sensores térmicos se basan en la medición de cambios de temperatura o en las propiedades térmicas de los gases. Estos sensores pueden detectar variaciones en la conductividad térmica o en la transferencia de calor, lo que resulta útil para identificar la presencia de GEI en el ambiente.

Los sensores químicos operan mediante reacciones químicas o interacciones moleculares entre el gas y un material sensible. Dichas interacciones generan cambios medibles en propiedades como la resistencia eléctrica, la corriente o el potencial, permitiendo la detección de gases específicos.

El tipo de señal que producen los sensores es otro tipo de clasificación. Los sensores activos requieren una fuente de energía externa para emitir una señal, como ocurre en varios sensores ópticos que emplean fuentes de luz. Por otra parte, los sensores pasivos no generan su propia señal, sino que detectan la energía presente en el entorno, como la radiación emitida o reflejada por los gases. Esta diferencia influye directamente en el consumo energético, la complejidad del sistema y el tipo de aplicaciones para las que cada sensor es más adecuado.

Los sensores pueden clasificarse según la plataforma de uso, es decir según el lugar o sistema en el que se instalan y operan. Existen sensores montados en estaciones terrestres, plataformas móviles, drones, aeronaves y satélites. Esta clasificación es particularmente relevante en el monitoreo de GEI, ya que determina la escala espacial y temporal de las mediciones. Mientras que las plataformas terrestres permiten mediciones locales y de alta precisión, las plataformas aéreas y satelitales facilitan la observación de grandes áreas y el análisis global de las emisiones de gases de efecto invernadero.

4. Sensores espaciales y en tierra

Los sensores instalados en satélites permiten observar la Tierra desde el espacio, lo que les permite tener una cobertura espacial global. Gracias a esto, es posible observar áreas extensas, e incluso remotas o de difícil acceso, como océanos, selvas o zonas polares. Estos sensores recopilan información de manera periódica conforme el satélite recorre su órbita, generando datos continuos sobre la evolución de variables atmosféricas a gran escala. Sin embargo, esta amplia cobertura suele venir acompañada de una menor resolución espacial y temporal, ya que cada punto de la superficie es observado solo cuando el satélite pasa sobre él.

Los sensores ubicados en estaciones terrenas están diseñados para realizar mediciones continuas en un punto o área específica. Esto permite obtener datos con alta resolución temporal, lo que resulta especialmente útil para detectar variaciones rápidas o eventos locales, como cambios en la concentración de contaminantes o fluctuaciones meteorológicas. Estos sensores suelen tener una mayor precisión, debido a que están más cerca del fenómeno que se desea medir y pueden ser calibrados y mantenidos de forma regular. Sin embargo, su principal limitación es la cobertura espacial reducida.

5. La teoría detrás de cada tipo de sensor

Uno de los principios más utilizados es la absorción espectral. Cada gas posee una estructura molecular específica que determina las longitudes de onda de radiación que pueden absorber. Los GEI presentan bandas de absorción características principalmente en el rango del infrarrojo. Cuando la radiación atraviesa una masa de aire que contiene estos gases, parte de la energía es absorbida por las moléculas, lo que produce una disminución de la intensidad de la radiación en esas longitudes de onda. Los sensores ópticos miden esta atenuación y es posible relacionarla con la concentración del gas presente.

La emisión térmica es otro principio fundamental. Los cuerpos, incluidos los gases, emiten radiación electromagnética en función de su temperatura. En la atmósfera, los GEI absorben energía térmica y posteriormente la reemiten en forma de radiación infrarroja. Los sensores térmicos y radiométricos pueden detectar esta radiación emitida, lo que permite inferir la presencia y distribución de los gases en diferentes capas de la atmósfera. Este principio es especialmente relevante para sensores satelitales que observan la Tierra desde el espacio y analizan el balance energético del sistema climático.

La espectroscopia integra y amplía estos conceptos al estudiar de manera detallada cómo la radiación interactúa con la materia en función de la longitud de onda. A través del análisis espectral, es posible identificar la huella característica de cada gas, ya que cada uno presenta un patrón único de absorción y emisión. Los sensores espectroscópicos descomponen la radiación recibida en sus componentes espectrales y comparan los resultados con modelos teóricos o bases de datos, lo que permite distinguir entre distintos GEI y calcular sus concentraciones con alta precisión.

Métodos de Detección

6. Sensores Infrarrojos No Dispersivos (NDIR)

Los sensores NDIR se basan en la absorción selectiva de radiación infrarroja por parte de las moléculas de los GEI. El principio físico que gobierna la medición NDIR es la ley de Beer-Lambert, que establece que la atenuación de una radiación al atravesar un medio absorbente es proporcional a la concentración del absorbente y a la longitud de camino óptico:

$$I = I_0 e^{-\kappa c L} \quad (1)$$

donde I_0 es la intensidad inicial de la radiación, I es la intensidad transmitida, κ es el coeficiente de absorción del gas, c es la concentración y L es la longitud de camino óptico.

De esta forma, midiendo la reducción de la intensidad de la radiación en una banda espectral específica, es posible obtener la concentración de gas presente.

Un sistema NDIR está compuesto por una fuente de radiación que atraviesa una celda con el gas a analizar, un filtro óptico selecciona la banda espectral característica del gas de interés y un detector mide la radiación transmitida, permitiendo convertir esta señal en una concentración cuantitativa.

Para el uso en satélites, la fuente de radiación es el Sol, que emite radiación que es reflejada en la tierra y atraviesa los gases en la atmósfera, de esta forma se puede analizar el espectro de absorción de estos GEI.

Una de las desventajas de este método es que es muy selectivo, al usar filtros solo se puede analizar un gas a la vez. Y es por esto que se opta por métodos que permiten analizar varios gases a la vez.

7. Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).

La espectroscopia FTIR es una de las técnicas más avanzadas y versátiles para la identificación y cuantificación de gases atmosféricos. A diferencia de los sensores NDIR, esta técnica permite analizar simultáneamente varios gases, mediante la adquisición de espectros infrarrojos.

Un sistema FTIR utiliza un interferómetro de Michelson para modular simultáneamente todas las longitudes de onda de la fuente. La señal se registra como un interferograma, el cual contiene toda la información del espectro infrarrojo. Posteriormente mediante la transformada de Fourier, el interferograma se transforma en un espectro de absorbancia en función del número de onda, lo que permite identificar los gases presentes, mediante modelos basados en la ley de Beer-Lambert.

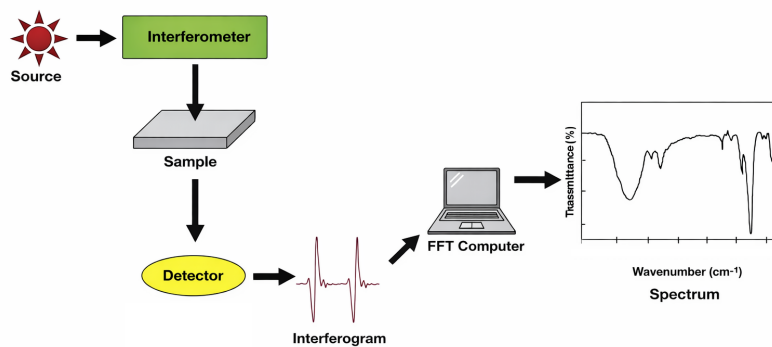


Figura 2: Diagrama del sistema FTIR.

La principal ventaja de FTIR es la medición simultánea de múltiples gases, con una alta resolución espectral, además de una mayor precisión en la posición de los picos.