

# Diseño de un sistema de carga útil (payload) para la detección de niveles de CO<sub>2</sub> de la Republica Dominicana para el pico-satélite UNAPEC.

Isaías Josué Gómez Guzmán, Estudiante Universitario, Miguel Eduardo Damirón Pérez, Estudiante Universitario  
Universidad Apec (UNAPEC), República Dominicana, isajo9994@gmail.com  
Universidad Apec (UNAPEC), República Dominicana, miguel.damiron@gmail.com

*Abstract— This is a payload design for a pico-satellite that will be constructed by Apec University “UNAPEC” to measure the CO<sub>2</sub> concentration in the Dominican Republic. It's conformed by three cameras that will be modified as spectrometers to detect CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> and other particles involved in the XCO<sub>2</sub> measurements and using Gauss distribution to get a complete range of the CO<sub>2</sub> concentration with the purpose of presenting data in images.*

*Keywords—CO<sub>2</sub>, pico-satellite, Exosphere, Nadir, camera.*

## I. INTRODUCCIÓN

Existe una necesidad creciente, tanto científica como impulsada por las políticas ambientales, de monitorizar el ciclo global del carbono. Mientras que los acuerdos internacionales actuales pretenden controlar aspectos del ciclo del carbono producido por el hombre, el objetivo principal es estabilizar las concentraciones de gas (particularmente de CO<sub>2</sub>). Por esta razón, se ha acelerado durante la última década la intención de determinar la fuente de producción de CO<sub>2</sub> [1].

Las predicciones fiables de los niveles futuros de CO<sub>2</sub> atmosférico requieren una comprensión de los procesos de emisión de CO<sub>2</sub> y de sus depósitos. Las mediciones de CO<sub>2</sub> mediante una red de superficie se utilizan actualmente para controlar el nivel atmosférico de dicho gas. Si bien estas mediciones son altamente precisas, las dimensiones de la red son demasiado pequeñas para caracterizar adecuadamente la distribución geográfica de los sumideros de CO<sub>2</sub> y los procesos que controlan su variabilidad. Como resultado, se buscan técnicas a bordo de vehículos espaciales que permitan medir el CO<sub>2</sub> promediado en columnas con una cobertura global más completa [2].

Entre los vehículos espaciales destinados a mediciones de CO<sub>2</sub> se encuentran los satélites. Existen varias técnicas para procesar la información sobre las distribuciones de CO<sub>2</sub> medidas por los satélites. Por ejemplo, podemos medir irradiancias en bandas infrarrojas térmicas de CO<sub>2</sub>. La técnica requiere que se conozcan las propiedades de la superficie, el perfil de temperatura y las emisiones de otros gases (especialmente H<sub>2</sub>O). La cobertura estaría limitada por las nubes, pero el instrumento funcionaría tanto de día como de noche [1].

Alternativamente, podríamos medir las bandas del infrarrojo cercano de la luz solar reflejada por la superficie para obtener parámetros de absorción por CO<sub>2</sub>. La técnica es relativamente insensible al perfil de temperatura, pero funciona solo en condiciones de luz solar y sin nubes. El perfil de vapor de agua

debe conocerse aproximadamente. Las principales fuentes de dispersión son nubes y aerosoles no detectados [1].

En este artículo se pretenden establecer las pautas para el diseño de la carga útil (payload) del pico-satélite UNAPEC, cuya misión será obtener las mediciones de las distribuciones de CO<sub>2</sub> en la República Dominicana. La delimitación a esta área se debe a que forma parte del trópico, que es donde la cobertura de datos de los satélites destinados a mediciones de CO<sub>2</sub> sufren principalmente de la excesiva presencia de nubes, a veces durante más de un mes, y se aproximan a la discreción de los modeladores al elegir no aplicar una correlación de tiempo para pasar por el área las veces necesarias hasta obtener datos confiables.

Además, lograr manejar los datos de emisiones de CO<sub>2</sub> podrá dar respuestas a fenómenos como lluvia ácida, altas temperaturas provocadas por el estancamiento de los rayos de sol en la tierra y enfermedades respiratorias por contaminación del aire. Estas anomalías no dejan de ser una amenaza para la República Dominicana cuando las emisiones del CO<sub>2</sub> estaban en 2.31 toneladas por personas en el año 2015 y aumentaron a 3.28 toneladas por personas para el año 2017, representando un incremento del 41.99%.

## II. MÉTODOS

La estrategia que se utilizará será medir la fracción promedio de la columna de aire seco XCO<sub>2</sub>, que se define como la relación entre la "abundancia de columna" de CO<sub>2</sub> (es decir, la densidad de cantidad de CO<sub>2</sub> dependiente de la altitud integrada sobre la columna atmosférica) y la abundancia de columna de "aire seco". Se emplearán espectros de alta resolución de la luz solar reflejada tomados simultáneamente en bandas de infrarrojo cercano (NIR) CO<sub>2</sub> (1,58  $\mu\text{m}$  y 2,06  $\mu\text{m}$ ) y O<sub>2</sub> (0,76  $\mu\text{m}$ ).

La banda de 1,58  $\mu\text{m}$  de CO<sub>2</sub> es muy adecuada para recuperar la columna de CO<sub>2</sub> porque está virtualmente libre de absorciones atmosféricas interferentes, y también es lo suficientemente débil como para poder determinar el nivel continuo entre las líneas de CO<sub>2</sub> incluso en ángulos cenitales solares altos (SZAs), con una potencia ( $R = \lambda/\Delta\lambda$ ) de aproximadamente 21,000 (es decir, la resolución espectral es aproximadamente 0,075 nm). Esto facilita la detección de variaciones dependientes de la longitud de onda de la superficie del albedo o nubes en el aire y partículas de aerosol [2].

Sin embargo, los espectros de la banda de 1,58  $\mu\text{m}$  de  $\text{CO}_2$  por sí solos no pueden producir  $\text{XCO}_2$  con suficiente precisión, ya que las mediciones de la absorción basadas en el espacio están influenciadas por una serie de factores además del  $\text{CO}_2$  vmr. Las incertidumbres en la presión superficial y la trayectoria atmosférica atravesada por la radiación reflejada pueden contribuir a errores en  $\text{XCO}_2$ . Variaciones topográficas sobre la tierra y el clima local contribuyen con incertidumbres en la presión superficial y la masa atmosférica total en un sondeo de  $\text{CO}_2$ . La dispersión por nubes / aerosoles contribuye aún más a las incertidumbres en la trayectoria atmosférica. Las variaciones de vapor de agua no detectadas introducen incertidumbres en  $\text{XCO}_2$  alterando la fracción de aire seco de la presión atmosférica total y ampliando las líneas de  $\text{CO}_2$  de manera más eficiente que  $\text{O}_2$  y  $\text{N}_2$ . Todos estos factores deben estar explícitamente restringidos para recuperar  $\text{XCO}_2$  con la alta precisión requerida [2].

Los espectros de la banda A de  $\text{O}_2$  (0,76  $\mu\text{m}$ ) proporcionan restricciones tanto a la presión de superficie como a las variaciones de longitud de trayectoria óptica asociadas con la dispersión por nubes / aerosoles. Se utiliza la banda de  $\text{CO}_2$  a 2,06  $\mu\text{m}$  junto con la banda A de  $\text{O}_2$  para restringir la dependencia de la longitud de onda de la dispersión atmosférica. Esta banda de  $\text{CO}_2$  es lo suficientemente fuerte como para ser sensible a la dispersión por nubes / aerosoles. Por otro lado, dado que las líneas en la banda de 2,06  $\mu\text{m}$  están fuertemente saturadas, esta banda es más susceptible a errores sistemáticos y no debe usarse sola con la banda de  $\text{O}_2$  para mediciones de  $\text{CO}_2$  [2].

El  $\text{O}_2$  proporciona un agente ideal para el aire seco porque la fracción molar de oxígeno en el aire seco es bien conocida (0.20935) y esencialmente constante. Dada esta información,  $\text{XCO}_2$  puede definirse matemáticamente como [3]:

$$\text{XCO}_2 = 0.20935 \frac{\int \text{NCO}_2 ds}{\int \text{NO}_2 ds}. \quad (1)$$

Aquí,  $\text{NCO}_2$  es la densidad numérica de las moléculas de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  es la densidad numérica del oxígeno molecular,  $s$  es la longitud del camino óptico, y las integrales se realizan sobre la "columna" atmosférica que se extiende desde el sol hasta la superficie y la nave espacial [3].

Para mejorar la calidad de los datos la carga útil (payload) del pico-satélite UNAPEC recolectará las observaciones en la dirección Nadir que se refiere a la visión perpendicular del satélite a la superficie terrestre.

En Nadir los datos pueden ser recogidos a lo largo de la superficie justo debajo del pico-satélite. Las observaciones se recogerán en todas las latitudes donde el ángulo del zenit solar es inferior a 85°. El modo Nadir proporciona la resolución espacial más alta en la superficie y se espera que devuelva

sondeos más utilizables para regiones que están parcialmente nubladas como tiende a estar la República Dominicana [4].

El procesamiento de los datos de  $\text{CO}_2$  atmosférico que aquí se presentará se basa en la teoría de estimación óptima según lo descrito por Rodgers [1976]. Una observación puede describirse como [5]:

$$y = F(x, b) + \epsilon_y \quad (2)$$

donde  $y$  es el vector de observación de las irradiancias espectrales;  $x$  es el vector de variables que uno quiere procesar,  $\text{CO}_2$  atmosférico;  $F(x, b)$  es la función de transferencia directa del "mundo real" que vincula las variables atmosféricas a las observaciones;  $b$  son todos los parámetros que afectan a  $y$  pero no están contenidos en  $x$  (como los gases absorbentes específicos que se especifican pero no se recuperan, los datos espectroscópicos, entre otros factores);  $\epsilon_y$  es el error observacional [5].

La función de transferencia del mundo real  $F$  en (2) es aproximada por algún modelo directo (en este caso un modelo de transferencia de radiación) [5]:

$$y = f(x, \hat{b}) + \epsilon_f + \epsilon_y \quad (3)$$

donde los parámetros  $b$  se estiman mediante  $\hat{b}$  y  $\epsilon_f$  es el error del modelo directo. Invertiendo este modelo directo, se obtiene el vector de solución  $\hat{x}$  [5]:

$$\hat{x} = f^{-1}(y) \quad (4)$$

Sin embargo, esta inversión es altamente inestable y amplifica el ruido ( $\epsilon_f$  y  $\epsilon_y$ ) considerablemente. Por lo tanto, se usa un perfil de conjetura a priori  $x_a$  para restringir la solución. Esto nos lleva a la siguiente representación del esquema de procesamiento de los datos [5]:

$$\hat{x} = R(y, \hat{b}, x_a) \quad (5)$$

Asumiendo estadísticas gaussianas, la solución a este modelo inverso se puede encontrar minimizando la siguiente función de costo con respecto a  $\hat{x}$  [5]:

$$\Phi = (\hat{x} - x_a)^T S_a^{-1} (\hat{x} - x_a) + [y - f(\hat{x}, \hat{b})]^T S_y^{-1} [y - f(\hat{x}, \hat{b})] \quad (6)$$

Aquí  $S_a$  es la matriz de covarianza que define la incertidumbre en  $x_a$  y  $S_y$  es la matriz de covarianza que define la incertidumbre en  $y$  y el modelo directo.

La solución se puede escribir como [5]

$$\hat{x} = x_a + S_a K^T S_y^{-1} [y - f(\hat{x}, \hat{b})] \quad (7)$$

Aquí  $K = \partial f / \partial x$  evaluado en  $\hat{x}$ , que se llama matriz de función de ponderación. Linealizar sobre la estimación actual  $x_i$ , usando  $f(\hat{x}) = f(x_i + K_i(\hat{x} - x_i) + O(\hat{x} - x_i)^2$  proporciona la siguiente ecuación iterativa para encontrar la solución [5]:

$$x_{i+1} = x_a + (S_a^{-1} + K_i^T S_\epsilon^{-1} K_i)^{-1} K_i^T S_\epsilon^{-1} K_i [y - f(x_i) + K_i(x_i - x_a)] \quad (8)$$

La matriz de covarianza de la solución es entonces [5]

$$S_{\hat{x}} = (K^T S_\epsilon^{-1} K + S_a^{-1})^{-1} \quad (9)$$

La raíz cuadrada de los elementos diagonales de esta matriz de covarianza representa la desviación estándar de las variables recuperadas y se utilizará como un diagnóstico de los errores en procesamiento de los datos. Los elementos fuera de diagonal representan las correlaciones entre los errores [5].

Otro diagnóstico útil para el algoritmo de procesamiento de los datos es el núcleo promediado, podemos escribir los perfiles recuperados como una combinación lineal de los perfiles a priori y los perfiles reales más un término de error [5]:

$$\begin{aligned} \hat{x} &= x_a + A(x - x_a) + D_y \epsilon_y \\ &= (I - A)x_a + Ax + D_y \epsilon_y, \end{aligned} \quad (10)$$

donde

$$D_y = \frac{\partial R}{\partial y} = S_{\hat{x}} K^T S_\epsilon^{-1} \quad (11)$$

y

$$A = \frac{\partial \hat{x}}{\partial x} = D_y K \quad (12)$$

Las filas de la matriz A se llaman núcleos promediados del procesamiento de los datos y describen la sensibilidad del perfil procesado al perfil real. Son una medida del contenido de información de las observaciones para cada nivel procesado y de la resolución vertical del procesamiento de los datos por medio de su ancho y superposición [5].

### Diseño

En el espacio todo está expuesto a radiación que puede provocar que los dispositivos electrónicos funcionen con error (por

ejemplo, el cambio no deseado del estado de un bit), pérdida de funcionalidad hasta reiniciar el suministro de energía y por último el daño permanente [6]. La cantidad de radiación depende de en qué capa de la atmósfera a la que se encuentre el pico-satélite. La mayoría de los satélites orbitan por encima de los 640Km de altura, al inicio de la exósfera.

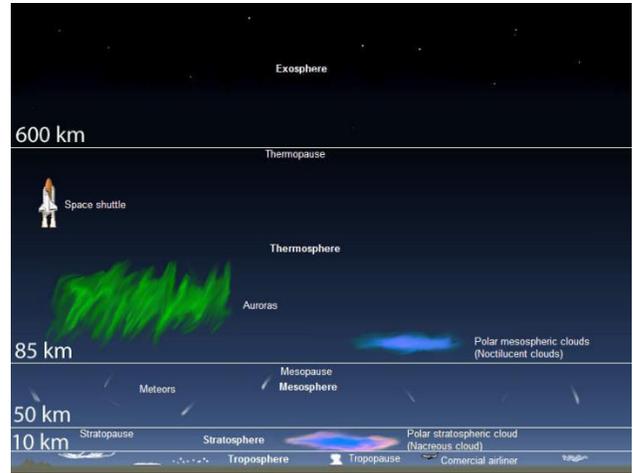


Fig.1 – Capas de la órbita baja de la tierra LEO. Crédito: Wikimedia Commons.

La cantidad de radiación presente en el LEO se comprende entre los 19Krad y los 190Krad por lo que componentes a utilizar en el diseño del payload debe estar adecuadamente protegidos. El grado de protección no solo dependerá de la radiación a la que se expondrá, sino que también de la construcción intrínseca de cada componente; en el caso de los componentes que no están contruidos con los fines de funcionamiento en el espacio es de 3 – 10Krad aun que pueden funcionar dentro de 10 – 30Krad con mucho daño [6].

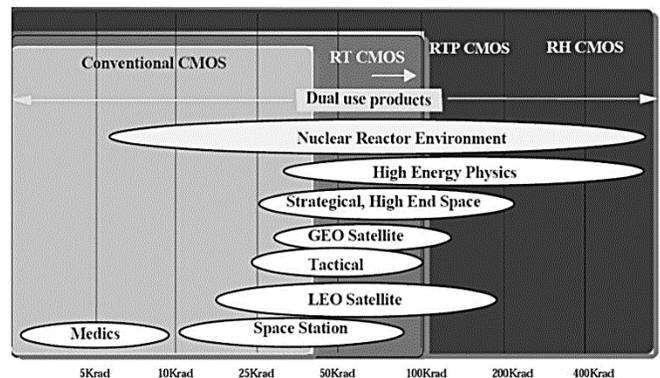


Fig.2 – Cantidad de radiación conocida. Crédito: Atmel.

Para protegerlos de la radiación se utiliza un escudo de aluminio cuyo grosor es determinado por una tabla de acuerdo con la cantidad de radiación a la que estará expuesta. En este caso sería de un mínimo de 0.5mm [6].

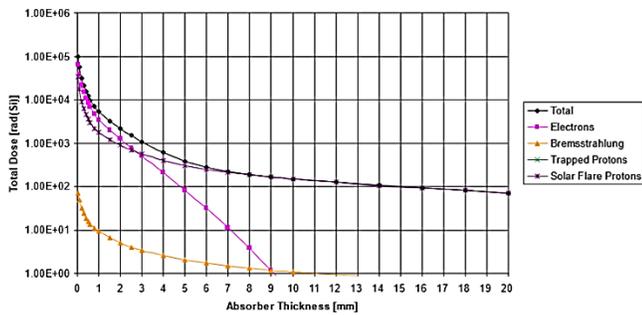


Fig.3- Relación de grosor y radiación para determinar la protección de los componentes. Crédito: [6]

La radiación solar está compuesta por luz ultra violeta, luz blanca (luz visible) e infrarroja. Se utilizará el sol como fuente de luz para que, mediante la reflexión producida por la superficie de la tierra, los espectrómetros capen la absorción infrarroja por el dióxido de carbono.

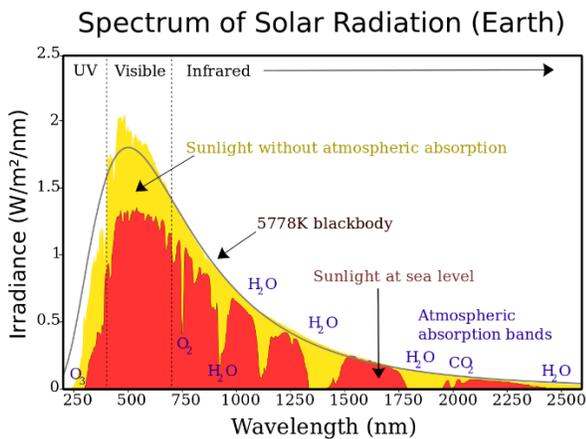


Fig.4 – Espectro de la radiación solar. Crédito: Wikipedia.

El payload podrá medir los niveles de concentración del dióxido de carbono en el territorio de la República Dominicana a través de la adquisición de la concentración de dos (2) gases: dióxido de carbono “CO<sub>2</sub>” y el Oxígeno diatómico “O<sub>2</sub>”, dos cámaras para el CO<sub>2</sub> y una para el O<sub>2</sub>. Las cámaras serán utilizadas como un espectrómetro ya que las mismas estarán adaptadas y calibradas para detectar las longitudes de ondas características de los gases en consideración, dada esta analogía a lo largo de esta investigación se harán mención de estas como espectrómetros.

Los espectrómetros operarán en el “Near Infrared” (NIR) o banda cercana del infrarrojo, uno en la banda de los 1.58 μm que es donde el CO<sub>2</sub> tiene una absorción más pronunciada, otro en la banda A, 0.76 μm del O<sub>2</sub> y el restante en la banda de los 2.06 μm para corregir errores en la detección del CO<sub>2</sub> dada por la presencia del vapor de agua “H<sub>2</sub>O”, cambios de temperatura y presión en la atmósfera [2].

Para hacer esto posible se utilizarán filtros pasa banda ópticos delante del sensor de imagen. El ancho de banda de cada uno será de acuerdo con lo requerido para las mediciones del CO<sub>2</sub> y el O<sub>2</sub>: 1.57 – 158 μm (banda 1.58 μm para el CO<sub>2</sub>), 0.762 – 0.772 (banda A del O<sub>2</sub>, 0.76 μm) y 2.04 – 2.09 μm (banda 2.06 μm para el CO<sub>2</sub>) [2].

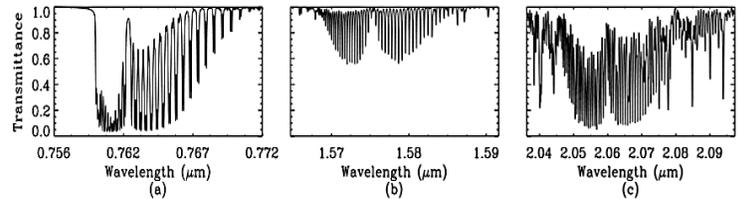


Fig.5 – Ancho de banda de los espectros a utilizar. (a) CO<sub>2</sub>, (b) O<sub>2</sub>, (c) CO<sub>2</sub> y otras partículas. Crédito: [2]

Para aprovechar la radiación del sol y asegurar que no impacten directamente el sensor de imagen del payload, la órbita del picosatélite estará en Nadir con un Sun Zenith Angle entre 0 a 85° con relación al sol y el objeto observado. Mientras más cerca del 0 estará el ángulo, más luz será captada por el sensor de imagen y para proteger el mismo de las radiaciones debe de utilizarse un lente que de igual modo proporcionará un ángulo de apertura que está dada por la siguiente fórmula:

$$f/\# = \frac{f}{D}$$

Donde:

$f/\#$  es el número “f” del lente

$f$  es la distancia focal

$D$  es el diámetro donde entra la luz mejor conocido como la apertura efectiva.

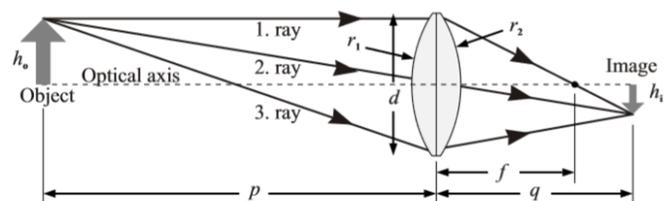


Fig.6 – Distancia focal y de imagen del lente. Crédito: Serway and Jewett.

La posición del lente depende del radio de este y de una distancia focal que debe de tomarse en consideración en los cálculos del lente [6].

$$f = \frac{R}{2}$$

Donde:

$f$  es la distancia focal.

$R$  es el radio de la curvatura del lente.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{q} + \frac{1}{p}$$

$q$  es la distancia del sensor de imagen al foco.  
 $p$  es la distancia del objeto con relación al lente.

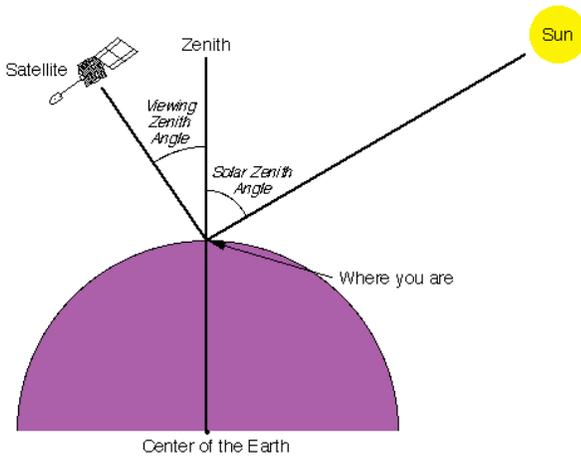


Fig.7 – Ángulo de reflexión del sol captado por el satélite. Crédito: Atmospheric sciences 749 radiation transfer.

Al momento de seleccionar el sensor de imagen hay dos posibles opciones, dispositivo de carga acoplada “CCD” o semiconductor complementario de óxido metálico “CMOS”. Para el diseño de este payload se requiere CMOS debido a que tiene menos eficiencia cuántica lo que significa que absorbe menos luz, generará menos electrones a través de los fotones proveniente de la radiación solar, prolongando su tiempo de vida útil en el espacio. [2.3.3 camera pico].

Pros for CCD and CMOS image sensors	
CCD image sensor	CMOS image sensor
Lowest noise	One bias voltage
Highest quantum efficiency	Smallest sensitivity to radiation
Flexible integration	Easy integration of circuitry
Smallest pixel size	Low power consumption

Fig.8 – Comparación entre los sensores CCD y CMOS. Crédito: [6]

La transmitancia óptica debe ser calculada para obtener la absorbencia (absorción manifestada) que es el fenómeno por el que se discriminará la cantidad de CO<sub>2</sub>. Se obtienen de la siguiente manera [7]:

$$T = \frac{I}{I_0}$$

Donde:

T es la transmitancia.

I es la intensidad recibida.

$I_0$  es la intensidad de la fuente luminosa.

$$A = -\log_{10} T$$

A es la absorbencia.

### III. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los datos obtenidos por el payload serán almacenados en una memoria Flash en el pico-satélite para ser transmitidos cuando sean requeridos y posteriormente ser procesados por una estación en la tierra. Esto se debe a que la energía es un recurso finito que será administrado por la computadora de vuelo.

Los datos serán procesados a partir de un modelo de laboratorio de la radiación para observar el comportamiento de los espectrómetros a cada una de las longitudes de onda del infrarrojo. Introduciendo concentraciones conocidas de dióxido de carbono, oxígeno y vapor de agua, se medirá la absorbencia a través de la transmitancia captada por los espectrómetros.

Utilizando la distribución de Gauss se obtendrán los valores intermedios de las concentraciones de los gases medidos en el modelo de laboratorio, y de esta manera tener el rango completo de absorción por concentración de CO<sub>2</sub>. Con los datos que se obtendrán se hará una interpolación a imágenes que presentarán las concentraciones de CO<sub>2</sub> con la finalidad de cumplir la misión de medir las emisiones de CO<sub>2</sub> en la República Dominicana.

### IV. REFERENCES

- [1] P. J. Rayner, "The utility of remotely sensed CO<sub>2</sub> concentration data in surface source inversions," in *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, Victoria, Australia, 2001, pp. 175-178.
- [2] Z. Kuang, Spaceborne measurements of atmospheric CO<sub>2</sub> by high-resolution NIR spectrometry of reflected sunlight: An introductory study, California, 2002.
- [3] D. Crisp, Measuring Atmospheric Carbon Dioxide from Space with the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2), California: California Institute of Technology.
- [4] J. P. Laboratory, "Measurement Approach," NASA, [Online]. Available: <https://oco.jpl.nasa.gov/science/MeasurementApproach/>. [Accessed 14 marzo 2018].
- [5] R. J. Engelen, A. S. Denning, K. R. G. Stephens and G. L., "Global observations of the carbon budget 1. Expected satellite capabilities for emission spectroscopy in the EOS and NPOESS eras," in *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, Colorado, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, 2001, pp. 20,055-20,068.
- [6] T. E. M. N. C. S. S. V. Henrik Dalsager, Camera System for Pico Satellites, Aalborg Denmark: Aalborg University, 2006.
- [7] Wikipedia, "Wikipedia," Wikipedia, 28 julio 2017. [Online]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Transmitancia>. [Accessed 13 marzo 2018].
- [8] D. Crisp, "Absorption of Sunlight by Water Vapor in Cloudy Conditions: A Partial Explanation for the Cloud Absorption Anomaly," in *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, California, 1997, pp. 571-574.
- [9] OPEN, "The Orbiting Carbon Observatory tracks 2–3 peta-gram increase in carbon release to the atmosphere during the 2014–2016 El Niño," *Scientific Reports*, pp. 1-12, 2017.