

# Simulador de un LIDAR elástico atmosférico para medir los niveles de concentración de aerosoles en la tropósfera

## *Elastic atmospheric LIDAR simulator for measuring aerosol concentration levels in the troposphere*

Oscar Sergio González Camacho

Departamento de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Católica Boliviana Av. General Galindo s/n, Cochabamba, Bolivia

oscar\_sgc@icloud.com

### **Resumen**

A lo largo de los años el estudio de la atmósfera terrestre, así como los factores que influyen en la contaminación de ésta han ido cobrando fuerza a nivel mundial. En este aspecto, las técnicas de medición con láseres han ganado un alto nivel de aceptación por sus propiedades no invasivas. El LIDAR atmosférico es una técnica de teledetección óptica que permite medir la concentración de aerosoles y otros contaminantes presentes en el aire.

El costo de adquisición de un equipo LIDAR para este propósito, así como la configuración, pruebas y calibración, es extremadamente elevado, es por eso que se plantea el uso de un simulador para obtener los mismos resultados a partir de datos capturados o simulados de una atmósfera.

El presente artículo tiene por objeto mostrar la implementación del simulador de un LIDAR elástico atmosférico utilizando Java como lenguaje de programación.

Palabras clave: LIDAR, Atmósfera, Contaminación, Simulador.

### **Abstract**

Over the years, the study of earth atmosphere, as well as the factors that influence on its pollution have been gaining strength all around the world. In this aspect, the laser measurement techniques gained a high level of acceptance for their non-invasive properties. The atmospheric LIDAR is an optical remote sensing technique that allows to measure aerosols concentration and other contaminants present in the air.

The cost of acquiring a LIDAR equipment for this purpose, as well as the configuration, testing and calibration, is extremely high, that is why it is proposed to use a simulator to obtain the same results from captured or simulated data from the atmosphere.

The present article aims to show the implementation of an atmospheric elastic LIDAR simulator using Java as a programming language.

Palabras clave: LIDAR, Atmosphere, Pollution, Simulator.

## 1. Introducción

El estudio de la contaminación del aire en los últimos años se ha convertido en un tema de gran interés a nivel mundial, este abarca desde la investigación teórica y aplicada, hasta el desarrollo de nuevas tecnologías que permiten facilitar el estudio del tema. Se ha demostrado que la actividad del ser humano está cambiando la composición atmosférica diariamente, ocasionando el incremento de gases generadores del efecto invernadero y el deterioro de la calidad del aire constantemente.

Las técnicas de medición mediante el uso de láseres han ido ganando un alto nivel de aceptación por sus altos rangos de alcance y por las técnicas no invasivas que utilizan a la hora de realizar su trabajo. El LIDAR atmosférico, permite medir la concentración de partículas de aerosol, así como la de algunos contaminantes presentes en el aire, gracias a la interacción entre la radiación óptica emitida y las partículas presentes en la atmósfera.

El objetivo de este proyecto fue el desarrollo del simulador de un LIDAR elástico atmosférico capaz de medir los niveles de concentración de aerosoles en la tropósfera. La realización de un sistema de esta magnitud y características, representó un reto debido a la variedad de temas de investigación, tanto en el área informática, como en el área de física óptica, matemática y el área medio ambiental.

El sistema desarrollado en este proyecto está pensado en simular, con la mayor precisión posible, el funcionamiento de un equipo LIDAR, que pueda ejecutarse en diversas plataformas de escritorio y que sea capaz de trabajar con datos de atmósferas simuladas empleando los componentes de un equipo LIDAR.

Contar con un simulador del LIDAR facilita y ahorra tiempo y dinero a la hora de realizar la configuración del equipo real y permite realizar estudios de la atmósfera utilizando datos simulados o reales del objeto de investigación.

## 2. Atmósfera terrestre

Es una capa que envuelve la superficie, tiene aproximadamente 10 000 km de espesor y está compuesta en gran parte por gases y partículas líquidas y sólidas en suspensión. Estos componentes se mantienen si la gravedad es suficiente y la temperatura de la atmósfera es baja (American Meteorology Society, 2012). La atmósfera protege la vida sobre la tierra absorbiendo gran parte de la radiación solar ultravioleta en la capa de ozono además actúa como escudo anti-meteoritos, desintegrándolos por la fricción que sufren al chocar con el aire (Encarta, n.d.).

## **2.1. Tropósfera**

Es la capa inferior de la atmósfera y abarca desde la superficie terrestre hasta los 11 000 m s.n.m. En esta capa se encuentra entre el 75% y 80% de toda la masa atmosférica terrestre, los cambios de temperatura y fenómenos climatológicos suceden en esta capa (Russell, *The Troposphere*, 2010). En términos de estructura, se consideran la composición, la presión y la temperatura de la tropósfera:

**Composición:** La composición química de la tropósfera es uniforme, con la excepción del vapor de agua que la compone, puesto que la fuente de este se encuentra en la superficie terrestre y se adhiere a la tropósfera a través de la evaporación y la transpiración.

**Presión:** La presión de los gases va disminuyendo en la medida que la altura aumenta, es decir que la presión siempre aumenta hacia abajo y el aumento de esta es proporcional a la densidad del fluido y el espesor de la capa. Por esta razón, la presión en esta capa es menor que en sus antecesoras.

**Temperatura:** La temperatura en la tropósfera está sujeta al gradiente adiabático. Esta disminuye a medida que la altitud aumenta. En condiciones regulares disminuye a razón de 6,5 °C por cada 1000 m.

## **2.2. Atmósfera Estándar Internacional**

Más conocida por sus siglas en inglés ISA , es un modelo atmosférico que permite obtener valores de presión, temperatura, densidad y viscosidad del aire en función de la altitud. Su tarea es proporcionar un marco referencial para la navegación aérea y la realización de cálculos aerodinámicos (International Organization for Standardization, 1978).

Como la atmósfera real es variable y en ningún momento, lugar o situación permanece constante, es necesario usar un modelo hipotético de esta para realizar diversas tareas. En este modelo se asume que el aire está libre de partículas de polvo, vapor de agua y humedad y que éste se encuentra en reposo con respecto a la tierra (Cavcar). Los valores de la Tabla 1 son considerados como las condiciones a nivel del mar.

Tabla 1. Condiciones promedio a nivel del mar

Condición	Símbolo	Valor
Presión	$\rho_0$	1 013,25 hPa <sup>1</sup>
Densidad	$\rho_0$	1,225 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura	$T_0$	288,15 K <sup>2</sup>
Velocidad del Sonido	$a_0$	340,294 m/s.
Aceleración de la gravedad	$g_0$	9,80665 m/s <sup>2</sup>

### 3. Estudio de la atmósfera en Bolivia

La OMS atribuye el aumento de enfermedades respiratorias al aumento de la contaminación atmosférica producida en los últimos años. Un informe brindado por la OMS en 2016 señala que alrededor de 7 millones de personas murieron en 2012 producto de las infecciones respiratorias agudas (WHO, 2014).

Pese a que en Bolivia no existen grandes urbes poblacionales, el país no se queda fuera de estos indicadores y el deterioro de la calidad del aire, en especial en las ciudades capitales del eje troncal, va aumentando a medida que crece la población. En este contexto, la ciudad de Cochabamba es particularmente sensible a los incrementos de la contaminación, pues además del incremento anual del parque automotor, las características topográficas y climatológicas del valle en el que está asentada la ciudad, aumentan los niveles de aerosoles contaminantes en la atmósfera (Alvarado Arnez, Lujan Perez, & Bomblat, 2004).

En respuesta a la necesidad de conocer los niveles de contaminación del aire en Cochabamba, el G.A.M. de Cochabamba, la agencia SwissContact y la Universidad Católica Boliviana “San Pablo”, se unen para crear la Red de Monitoreo de la calidad del aire (MoniCA), cuyos objetivos principales son determinar los niveles de contaminación atmosférica a los que se encuentran expuestos los pobladores de la ciudad, informar sobre estos niveles y respaldar las acciones para la gestión de la calidad del aire (Gobierno Autónomo Municipal de Cochabamba, 2015).

---

<sup>1</sup> hPa: Hectopascal. 1 Hectopascal =  $10^{-3}$  Pascales

<sup>2</sup> K: Grados Kelvin. 1 K = -272.15 °C

### **3.1. Red MoniCA**

Es un conjunto de redes de monitoreo utilizada para identificar los niveles de contaminación, inicialmente en cuatro ciudades del país. El proyecto “AIRE LIMPIO”, financiado por la COSUDE y ejecutado por SwissContact, apoyó el establecimiento de las redes de monitoreo en La Paz, Cochabamba, Santa Cruz y El Alto (Swiss Contact Bolivia, 2006).

Se sabe que los métodos utilizados para determinar la concentración de los contaminantes en el aire se selecciona de acuerdo a las regulaciones propias de cada país (Alvarado Arnez, Lujan Perez, & Bomblat, 2004). En caso de ausencia de estas normas, se aplican las establecidas por organismos internacionales como referencia. En la red MoniCA se aplican tres métodos de medición (Mancilla, 2012): Pasivos, Activos y continuos.

## **4. LIDAR elástico atmosférico**

LIDAR es una técnica de teledetección óptica basada principalmente en un láser que emite pulsos de luz, un telescopio que recoge la retro dispersión generada al colisionar el láser con las partículas y un policromador que se encarga de filtrar las distintas frecuencias de luz retro dispersadas y distribuir estas hacia diversos sensores y equipos que se encargarán de procesar dichas señales (Eizmendi, 2011).

El primer invento basado en este principio se remonta a 1930, cuando se utilizaban reflectores para medir perfiles de densidad del aire. El primer sistema LIDAR apareció en la década de 1960 y fue utilizado para medir la distancia existente entre la tierra y la luna (Rocadenbosch Burillo, 1996).

Cuando el haz de luz del láser colisiona con los componentes atmosféricos(aerosoles y moléculas), la luz se dispersa en todas direcciones. Una pequeña porción de esa luz es retro dispersada y recogida por el telescopio.

La técnica del LIDAR elástico es la más simple y proporciona información sobre los componentes del medioambiente, como ser aerosoles, nubes, polvo, etc. Se le atribuye la palabra elástico ya que el resultado de la interacción entre las partículas y las moléculas, con la luz retro dispersada tiene la misma longitud de onda (Eizmendi, 2011).

## **5. Componentes del lidar elástico atmosférico**

### **5.1. Láser Nd-YAG**

Es el más utilizado en diversas aplicaciones, bombea la luz con una lámpara de flash o matriz de diodos láser. Estos emiten una luz roja que corresponde a una longitud de onda de 1064 nm (primer armónico), si se dobla la frecuencia la potencia

se divide entre 1064 nm y 532 nm (segundo armónico, luz verde) y si se triplica la frecuencia, se divide también con 355 nm (tercer armónico, luz ultravioleta). (Paschotta, 2015). En el proyecto se tomó en cuenta únicamente una de las longitudes de onda del láser, 532 nm que vendría a ser el segundo armónico y sus características están representadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Características del láser

Característica	Valor
Longitud de onda	532 nm
Energía por pulso	4 uJ
Frecuencia de Repetición	5 kHz
Duración del Pulso	0,99 ns
Apertura Efectiva	314 cm <sup>2</sup>
Campo de Visión Efectivo	55 urad
Filtro de ancho de banda	0,5 nm
Tiempo de adquisición	0,8 s
Resolución Vertical	15 m

## 5.2. Telescopio Cassegrain

Es un telescopio reflector que utiliza tres espejos. El primero se encuentra en la parte posterior del cuerpo del telescopio, este espejo debe concentrar toda la luz que recoge en un punto denominado foco. El segundo espejo es convexo y se encuentra en la parte delantera del telescopio, se encarga de reflejar nuevamente la imagen hacia el espejo principal, que se refleja en el tercer espejo y este se encarga de enviar la luz hacia la parte superior del tubo, donde está montado el objetivo (AstroMía, 2015).

El radio de curvatura del primer espejo (R1) y del segundo espejo (R2) está dado por:

$$R_1 = -\frac{2DF}{F-B} \quad \text{ec. 1}$$

$$R_2 = -\frac{2DB}{F-B-D} \quad \text{ec. 2}$$

Donde:

$F$  es la longitud focal efectiva del sistema

$B$  es la longitud focal posterior

$D$  es la distancia entre los dos espejos

La constante cónica del primer espejo ( $K_1$ ) es la de una parábola:

$$K_1 = -1 \quad \text{ec. 3}$$

La constante cónica del segundo espejo ( $K_2$ ) está dada por el cambio de enfoque a la ubicación deseada:

$$K_2 = -1 - \alpha - \sqrt{\alpha(\alpha + 2)} \quad \text{ec. 4}$$

Donde:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[ \frac{4DBM}{(F+BM-DM)(F-B-D)} \right]^2 \quad \text{ec. 5}$$

Con:

$$M = (F - B)/D \quad \text{ec. 6}$$

### 5.3. Balance de Enlace (Link-Budget)

El balance de enlace es un nombre formal que se le da al cálculo de la señal recibida junto a la proporción de ruido que acompaña a ésta (ganancias y/o pérdidas) (Willis, 2007). La información que se obtiene al realizar este cálculo es vital a la hora de diseñar componentes de Tx y Rx, así como la correcta calibración de estos y la mejora de señal para obtener resultados más precisos. La ecuación genérica del balance de enlace está dada por:

$$\text{Poder Recibido} = \text{Poder Transmitido} + \text{Ganancias} - \text{Pérdidas} \quad \text{ec. 7}$$

En el caso del Lidar, el cálculo de la potencia recibida (ORP<sup>3</sup>) y la relación de proporción entre la señal y el ruido que la acompaña (SNR<sup>4</sup>), resultan útiles para seleccionar los mejores dispositivos y proporciona información útil para calibrar estos de manera correcta (Eizmendi, 2011).

### 5.4. Parámetros Opto-Atmosféricos

#### Temperatura

El modelado de la temperatura en una altura dada se realiza mediante la ecuación de temperatura de la atmósfera estándar internacional (ISA).

---

<sup>3</sup> ORP: Potencia de retorno de señal del sistema, resultado del proceso del LIDAR sin intervención del link budget.

<sup>4</sup> SNR: Proporción existente entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido que la corrompe. A mayor altitud, mayor señal. A menor altitud, más ruido.

$$T = T_0 - 6.5 \frac{h(m)}{1000} \quad \text{ec. 8}$$

Donde:

$T_0$  es la temperatura a nivel del mar (15° C)

$h$  es la altura en metros para la cual deseamos conocer la temperatura

### Presión

El modelado de la presión en una altura dada se realiza mediante la ecuación de presión de la atmósfera estándar internacional (ISA).

$$p = p_0 \left(1 - 0.0065 \frac{h}{T_0}\right)^{5.2561} \quad \text{ec. 9}$$

Donde:

$T_0$  es la temperatura a nivel del mar expresada en K

$h$  es la altura en metros para la cual deseamos conocer la presión

### Aerosoles (Retro dispersión Mie $\alpha$ )

Se realiza el cálculo de la retro dispersión Mie  $\alpha$  mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{18 + \sin(0.25 * \pi * x^2) + (0.1 * \cos(0.5 * \pi * x^3)) - (0.2 * x)^3 - (0.01 * x + 1)}{1500} \quad \text{ec. 10}$$

Donde:

$x$  es una altura expresada en metros

### Moléculas (Retro dispersión Rayleigh $\beta$ )

Se realiza el cálculo de la retro dispersión Rayleigh  $\beta$  mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{24\pi^3 (n_s^2 - 1)^2}{\lambda^4 N_s^2 (n_s^2 + 2)^2} KF \quad \text{ec. 11}$$

Donde:

$N_s$  es la densidad molecular

$n_s$  es el índice refractivo

$\lambda$  es la longitud de onda

$KF$  es el término de despolarización y está dado por:

$$KF = \left(\frac{6+3\rho}{6-7\rho}\right) \quad \text{ec. 12}$$



Donde:

$\rho$  es la extinción de Rayleigh

### **Poder elástico recibido**

En la retro dispersión elástica Mie/Rayleigh, la potencia recibida está dada por la ecuación:

$$P_{\lambda_0}(R) = \frac{K}{R^2} [\beta_{\lambda_0}^{mol}(R) + \beta_{\lambda_0}^{aer}(R)] e^{-2 \int_0^R \alpha_{\lambda_0}^{mol}(r) + \alpha_{\lambda_0}^{aer}(r) dr} OVF_{\lambda_0}(R) \quad \text{ec. 13}$$

Donde:

$$\beta_{\lambda}(R) = \beta_{\lambda}^{aer}(R) + \beta_{\lambda}^{mol}(R) \quad \text{ec. 14}$$

Con  $R$  como una altura expresada en metros.

$$\alpha_{\lambda}(R) = \alpha_{\lambda}^{aer}(R) + \alpha_{\lambda}^{mol}(R) \quad \text{ec. 15}$$

OVF es el factor de superposición

$K$  que es la constante independiente del sistema y puede ser escrita como:

$$K = \frac{E c}{2} A_r \quad \text{ec. 16}$$

Donde:

$E$  es el pulso de energía emitido por el láser.

$c$  es la velocidad de la luz.

$A_r$  es el área del telescopio.

La potencia medida en el rango  $R$  depende de la suma del coeficiente de retro dispersión molecular (Eizmendi, 2011).

## **6. Simuladores**

Un simulador es la representación de un entorno en el cual se desarrolla un proceso en específico, mediante la visualización de una representación de dicho proceso. Su principal objetivo es ayudar a que el usuario se familiarice con el proceso a estudiar y de ser posible, con el entorno en el que este se desarrolla.

El simulador desarrollado en el proyecto es no inmersivo, ya que simula un entorno cercano a la realidad, pero no utiliza componentes reales, sino que utiliza software computacional para representar los componentes físicos reales.

## 7. Desarrollo

### 7.1. Módulo de componentes atmosféricos

El objetivo principal de este módulo fue representar gráficamente la atmósfera, previo trazado de los componentes atmosféricos (temperatura, presión, retro dispersión Mie, retro dispersión Rayleigh) de acuerdo a las ecuaciones descritas en el punto 5.4. Si buscamos en las ecuaciones antes mencionadas, notaremos que no hay una ecuación para la atmósfera. Esto se debe a que no existe una ecuación que permita representarla. En cambio podemos utilizar la sumatoria de todos los puntos resultantes de Mie (ec. 10) y Rayleigh (ec. 11) para obtener así una representación aproximada de la misma.

Como podemos notar, todos los parámetros atmosféricos están basados en una función matemática, siguiendo la definición de función<sup>5</sup> definida mediante la expresión:

$$y = f(x)$$

Al ser todas las funciones, de la forma antes descrita, generalizamos la representación de estas a través de la clase abstracta Function representada en la Figura 1.

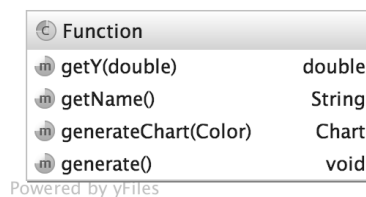


Figura 1: Diagrama clase Function.

Otro factor en común de todos los parámetros es que requieren una lista de alturas dadas sobre las cuales trabajar. Teniendo esto en cuenta, podemos describir los parámetros a través de los siguientes pseudo-códigos:

---

<sup>5</sup> Función Matemática: Una función es un objeto matemático que se utiliza para expresar la dependencia entre dos magnitudes, y puede presentarse a través de varios aspectos complementarios.

```
1: getName()
2:   return functionName
```

Donde la variable `functionName` está definida como una cadena con el nombre de cada función.

```
1: getY(value)
2:   return f(value)
```

Donde `f(value)` corresponde a la ecuación propia de cada parámetro descrita en el punto 5.4.

```
1: generate()
2:   for i ← 0 to altitudes.size -1 do
3:     results.add(getY(altitude[i] * 1000));
4:   end for
```

Donde `results`, es una lista que almacena los resultados obtenidos al calcular el valor de  $f(x)$  para cada altura en un punto determinado, cabe resaltar que se multiplican las alturas por mil ya que estas se encuentran en kilómetros y las necesitamos en metros para realizar los cálculos.

```
1: generateChart(Color)
2:   new Chart(width, height);
3:   setChartParameters(Color);
4:   new Series();
5:   Series = Chart.addSeries(getName(), altitudes, results);
6:   setSeriesProperties();
7:   return Chart
```

La función recibe el color que tendrá la gráfica trazada, se crea un objeto de la clase **Chart** con una altura y un ancho predefinidos. Se realizan las diversas configuraciones del objeto (color de fondo, color del trazo, ejes, separaciones, etc.). Se crea un objeto de la clase **Series** al cual se le asigna el objeto **Chart** con las series agregadas. Se realizan las configuraciones del objeto y se retorna el objeto **Chart** que será una representación gráfica de la función deseada.

## 7.2. Módulo de componentes del LIDAR

Para este módulo, el objetivo principal fue representar los componentes físicos del LIDAR utilizando clases. Se implementaron los siguientes componentes:

### Lasers

Se implementó la clase Laser que contiene los componentes básicos del láser, un constructor por defecto con los valores descritos en la Tabla 2 y un constructor que permite recibir valores desde la interfaz de usuario para crear distintos objetos láser. En la Figura 2 se encuentra representada la clase Laser a través de un diagrama.

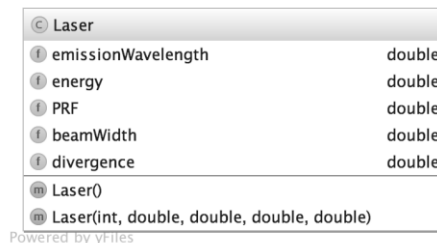


Figura 2: Diagrama de la clase Laser

### Telescopio

Se implementó la clase Telescope que contiene los componentes básicos del telescopio, un constructor por defecto con los valores estándar de un telescopio Cassegrain y un constructor que permite recibir valores desde la interfaz de usuario para crear distintos objetos telescopio. En la Figura 3 se encuentra representada la clase Telescope a través de un diagrama.

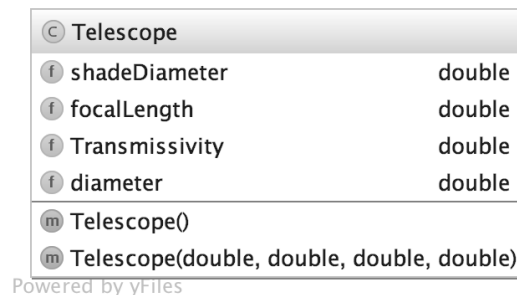


Figura 3: Diagrama de la clase Telescopio

## Monocromador

Se implementó la clase Monochromator que contiene los componentes básicos del monocromador, un constructor por defecto con los valores predefinidos de un monocromador y varios constructores con diversos parámetros que son recibidos desde la interfaz de usuario para crear distintos tipos de monocromador. La Figura 4 representa la clase Monochromator a través de un diagrama.

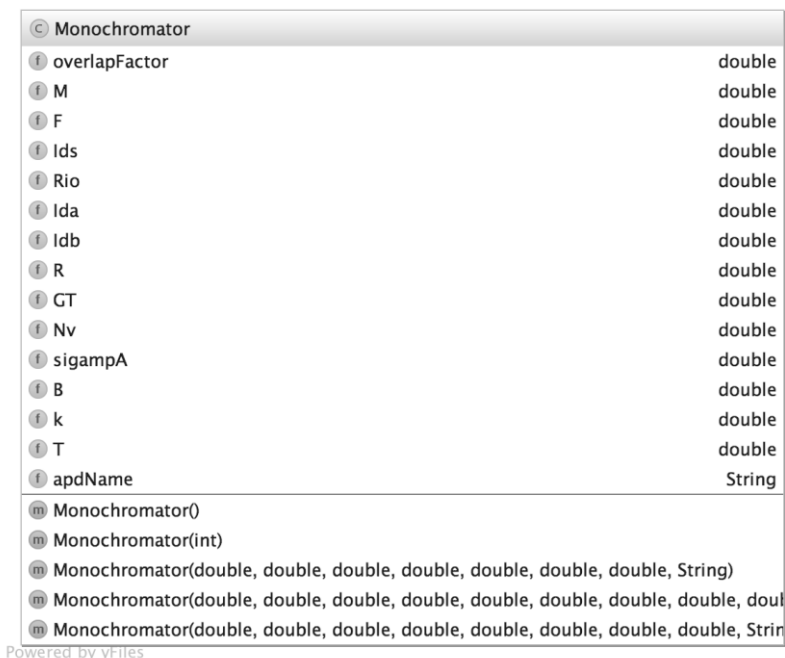


Figura 4: Diagrama de la clase Monochromator

### 7.3. Módulo del Link-Budget

Dado que en el funcionamiento del módulo del Link-Budget se trabaja con la resolución de integrales, se implementó una clase IntegralSolver que se encarga de resolver la integral requerida, a través del método compuesto del trapecio. En la Figura 5 se encuentra representada la clase IntegralSolver.

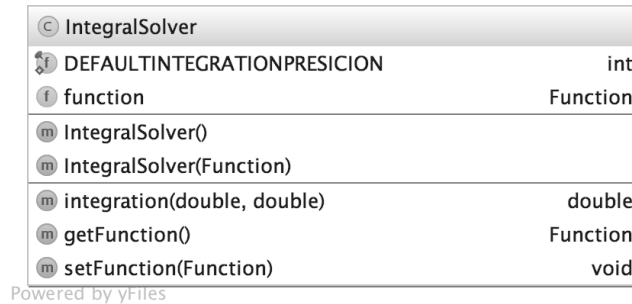


Figura 5: Diagrama de la clase `IntegralSolver`

Es en este módulo en donde todos los componentes se unen e interactúan para generar los resultados esperados. Para llegar a estos resultados, debe procesarse bastante información que va desde el rango de altura inicial, las presiones y temperaturas calculadas, `Mie` y `Rayleigh`, los componentes simulados del LIDAR y variables propias del cálculo del Link-Budget. Al final todo se mezcla y se resume en la ecuación ec. 13 que es considerada como la ecuación del LIDAR.

Para poder resolver la ec. 13, se debe contar con:

- Lista de alturas
- Lista de presiones (en base a la altura)
- Lista de temperaturas (en base a la altura)
- Lista de valores `Mie`
- Lista de valores `Raleigh`
- Telescopio
- Monocromador
- Láser

Una vez que se tienen todos estos componentes, se procede con el cálculo de los resultados, resumido a continuación:

- Inicialización de variables independientes y cálculo de variables dependientes.
- Cálculo del vector del poder elástico recibido.
- Cálculo del vector de la relación señal ruido.

Los valores resultantes, se encuentran almacenados en los vectores relación señal ruido y poder elástico recibido (SNR y ORP respectivamente). Estos vectores serán representados gráficamente y serán presentados en el punto 8.

## 8. Resultados

Después de obtener los vectores resultantes con los valores calculados para ORP y SNR, se deben poder representar de manera gráfica ambos vectores. En este caso no se utilizó una función con una curva o una recta o una mezcla de estas. Se empleó una variante del algoritmo Ray-Tracing<sup>6</sup>, para poder calcular pixel por pixel el color correspondiente a cada uno de los valores de cada posición de los vectores SNR y ORP. Dicho esto, en la Figura 6 podemos apreciar el resultado de la simulación para el ORP y en la Figura 7 se puede apreciar el resultado de la simulación para el SNR.

En la Figura 6 se observa la potencia de retorno de la señal del sistema antes de procesarla utilizando el *link-budget*. El eje vertical representa la altura expresada en kilómetros, mientras que el eje horizontal representa el tiempo de las mediciones en horas, iniciando a la 1:30 y culminando a las 6:30.

Para cada hora, existen seis simulaciones y cada simulación representa la luz retro dispersada, capturada por el telescopio. La representación gráfica de la simulación muestra en la parte clara (inferior y superior) la atmósfera libre, mientras que la parte central, más oscura podemos apreciar la tropósfera que contiene aerosoles y otras partículas contaminantes, representadas por un tono más claro dentro de la zona oscura.

---

<sup>6</sup> Ray-Tracing: Algoritmo para síntesis de imágenes tridimensionales. Extiende la idea de trazar los rayos para determinar las superficies visibles con un proceso de sombreado (cálculo de la intensidad del píxel).

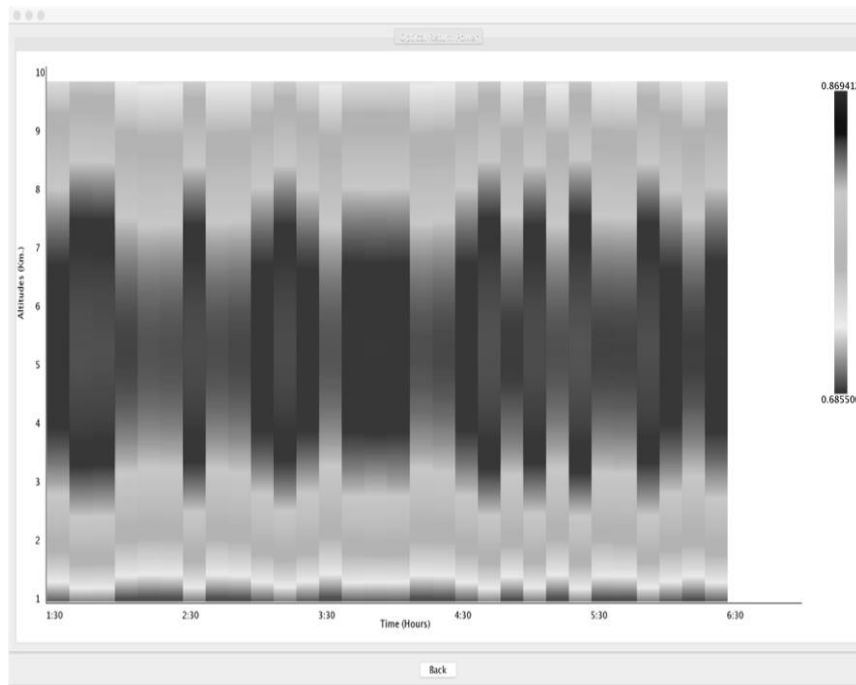


Figura 6: Poder de retorno óptico

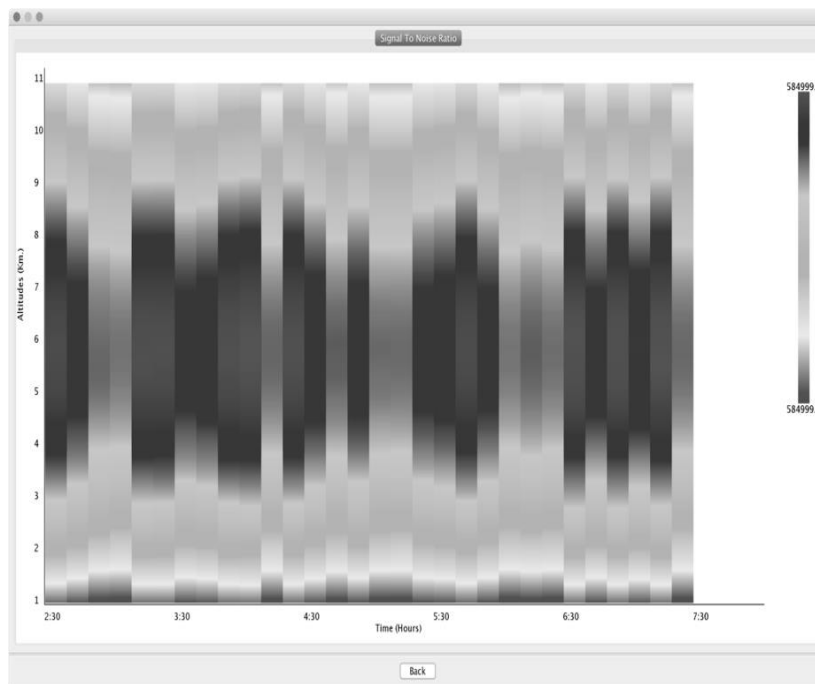


Figura 7: Relación señal a ruido



En la Figura 7 se aprecia la proporción entre la potencia de la señal transmitida y la potencia del ruido que corrompe dicha señal. El eje vertical representa la altura expresada en kilómetros, mientras que el eje horizontal representa el tiempo de las mediciones en horas, iniciando a las 2:30 y culminando a las 7:30.

Esta gráfica muestra una representación de la atmósfera (hasta 11 km) más precisa que la Figura 6. En esta ya están incluidos diversos factores que intervienen en la correcta representación de la atmósfera, ya sean ruidos en la señal, o factores propios de la atmósfera como ser humedad, viscosidad, presión, etc. Y al igual que en la Figura 6, para cada hora, existen seis simulaciones y cada simulación representa la luz retro dispersada, capturada por el telescopio y procesada por el *link-budget*.

Se pudo corroborar la validez de los resultados al obtener valores similares entre los vectores resultantes del simulador y resultados calculados con programas implementados utilizando MATLAB.

## 9. Conclusiones

El simulador desarrollado es escalable y configurable con los parámetros más importantes para realizar su tarea.

A partir de la atmósfera estándar implementada, se logra generar los resultados esperados de Rayleigh, así mismo calcular la potencia del lidar que se encargará de procesar la información.

Se realizó la simulación del link-budget, logrando introducir parámetros que permiten ejecutar comparaciones entre el simulador del lidar del proyecto y un equipo lidar real de las mismas características.

El simulador es capaz de mostrar los resultados esperados. Estos son útiles para ser comparados con el equipo real, de manera que se pueda realizar una configuración correcta de este.

## Bibliografía

- [1] American Meteorology Society. (2012). *Atmosphere: AMS Glossary*. Obtenido Abril 2015, de Meteorology Glossary: <http://glossary.ametsoc.org/wiki/Atmosphere>
- [2] Alvarado Arnez, S., Lujan Perez, M., & Bomblat, C. (2004, Diciembre). Modelación de las emisiones del parque automotor en la ciudad de Cochabamba - Bolivia. *Acta Nova*, 2(4), 475-493.
- [3] AstroMía. (2015). *Cassegrain*. (Cassegrain, Producer) obtenido de Diccionario de Astronomía: <http://www.astromia.com/glosario/cassegrain.htm>

- 
- [4] Cavcar, M. (n.d.). *The International Standard Atmosphere*. Anadolu University, Departamento de Aviación Civil.
- [5] Eizmendi, M. (2011, Septiembre). *IFAE-UAB Raman LIDAR Link Budget and Components*. Tesis de Maestría, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Teoria del Senyal i Comunicacions, Barcelona.
- [6] Encarta. *Meteorology: Encarta MSN*. Obtenido Abril 2015, de Encarta MSN: [http://encarta.msn.com/encyclopedia\\_761571037\\_3/Meteorology.html](http://encarta.msn.com/encyclopedia_761571037_3/Meteorology.html)
- [7] Gobierno Autónomo Municipal de Cochabamba . (2015). *Gobierno Autónomo Municipal de Cochabamba* . Obtenido Abril 2015, de Gobierno Autónomo Municipal de Cochabamba : <http://cochabamba.gob.bo/Madretierra/redmonica>
- [8] International Organization for Standardization. (1978, Diciembre 15). *Standard Atmosphere. 2*.
- [9] Mancilla, J. (2012, Abril 8). *La Red MoniCA: INSPIRA*. Obtenido Abril 2015, de Inspira Sociedad que Inspira: [http://www.sociedadqueinspira.com/noticia/1/500-la\\_red\\_monica/1-la\\_red\\_monica](http://www.sociedadqueinspira.com/noticia/1/500-la_red_monica/1-la_red_monica)
- [10] Paschotta, R. (2015). *YAG Lasers*. Obtenido de RP Photonics Encyclopedia: [http://www.rp-photonics.com/yag\\_lasers.html](http://www.rp-photonics.com/yag_lasers.html)
- [11] Rocadenbosch Burillo, F. (1996). *LIDAR Sensing of the Atmosphere: Receiver design*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Teoria del Senyal i Comunicacions, Barcelona.
- [12] Russell, R. (2010, Enero 11). *The Troposphere*. (National Earth Science Teachers Association (NESTA)) Obtenido de Windows to the universe: <http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/troposphere.html>
- [13] Swiss Contact Bolivia. (2006). *Aire Limpio: SWISSCONTACT*. Obtenido Abril 2015, de SWISSCONTACT: <http://www.swisscontact.bo/swisscontact.php>
- [14] WHO. (2014, Marzo 25). *Media Centre World Health Organization*. Obtenido de World Health Organization Web Site: <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/>
- [15] Willis, M. (2007, Mayo 5). *Propagation tutorial*. Obtenido Noviembre 8, 2015, de Link Budgets: <http://www.mike-willis.com/Tutorial/PF13.htm>