

Planificación de Rutas para los UAV's Mediante el Análisis de la Eficiencia de las Comunicaciones en un Entorno 3D

Llerena Ortiz Erika Magdalena¹; Araujo Villarruel Benjamín Damián¹; Jara Olmedo Lenin Anibal¹

¹ Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana, Departamento de Transferencia Tecnológica, Ambato, Ecuador

Resumen: En el Ecuador los sistemas aéreos no tripulados es un tema nuevo de estudio debido a que los lineamientos para este tipo de aeronaves aún no se encuentran definidos. El análisis de una ruta segura de vuelo tiene relación directa con el enlace de comunicaciones entre la aeronave UAV y la Estación de Control en Tierra. Mediante mediciones realizadas durante vuelos experimentales, se hace la comparación de la potencia de recepción estimada mediante tres métodos distintos (presupuesto de enlace, Método de Longley-Rice y simulación mediante software de comunicaciones y modelamiento 3D) a fin de establecer la confiabilidad de los resultados para este escenario particular.

Palabras clave: Entorno 3D, planificación, presupuesto de enlace, cobertura, rutas aéreas, UAV.

Route Planning for UAVs Through Efficiency Analysis Communications in a 3D environment

Abstract: In Ecuador unmanned aerial systems is a new theme of study because guidelines for this type of aircraft are not yet defined. The analysis of a safe flight path is directly related to the communication link between the UAV aircraft and the Ground Control Station. By measurements made during test flights, comparison of the reception power estimated by three different methods (link budget, Longley -Rice method and simulation using communications software and 3D modeling) to establish the reliability of the results it is made for this particular scenario.

Keywords: 3D environment, planning, link budget, coverage, air routes, UAV.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las áreas de la aviación que ha experimentado un importante crecimiento es aquella que involucra a los Vehículos Aéreos No Tripulados (siglas en inglés UAV's). Esta clase de vehículos son operados de forma remota mediante radio-control o bien de forma totalmente autónoma. Murillo et al (2014). A pesar de haber sido desarrollados inicialmente para aplicaciones militares, los UAV tienen un campo de aplicación importante a nivel civil, ya que podrían usarse aparatos de este tipo para darle seguimiento a incendios forestales o catástrofes de diversos tipos sean o no de origen natural, seguridad ciudadana, como la vigilancia de los oleoductos, también suelen ser preferidos para misiones que son demasiado "aburridas, sucias o peligrosas" para los aviones tripulados. Chamorro et al (2013).

Gran parte del trabajo en autonomía de la Aeronave No Tripulada depende críticamente de los enlaces de datos, ya sea antes o durante el vuelo, a diferencia de la aviación tradicional, donde existe una tripulación en la cabina controlando el vuelo. Por ello en la planificación de rutas

para la aeronave es importante determinar las mejores condiciones para cumplir los objetivos del vuelo (Rodríguez, 2014).

En el presente artículo se pretende comparar la potencia de recepción estimada mediante tres métodos distintos (presupuesto de enlace, Método de Longley-Rice y simulación mediante software de comunicaciones y modelamiento 3D) con la obtenida en un experimento real, haciendo posible obtener una ruta eficiente para las comunicaciones del Sistema UAV.

El artículo se estructura en cinco secciones adicionales a esta introducción. En primer lugar, en la sección 2 se muestra una panorámica de los trabajos relacionados. En la sección 3 se introduce al Análisis de las Comunicaciones. La Sección 4 presenta el Desarrollo de las Pruebas. La sección 5 muestra los Resultados de las Pruebas. La sección 6 despliega las conclusiones.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Existen varias publicaciones relacionadas con la planificación de misiones de Vehículos Aéreos No Tripulados, así como trabajos que realizan Comparaciones de modelos de propagación para el análisis de comunicaciones. González et

erikam987@hotmail.com
Recibido: 04/06/2015
Aceptado: 03/05/2016
Publicado: 30/09/2016

al (2014) presentan un método destinado a la optimización de misiones globales llevadas a cabo por un conjunto de UAVs (Vehículos Aéreos No Tripulados) en un entorno 3D. Este método está basado en un algoritmo el cual encuentra trayectorias libres de obstáculos, este trabajo planifica trayectorias para UAVs al igual que se realiza en la presente investigación, la diferencia que dicho artículo utiliza algoritmos para calcular obstáculos y en este trabajo se utiliza métodos para el análisis de comunicaciones y según los resultados obtenidos trazar la trayectoria garantizando enlace de comunicaciones en toda la ruta del UAV.

La investigación de Stenger et al. (2012) analiza uno o más agentes UAV en un entorno de simulación que ha sido desarrollado utilizando el modelado basado en agentes. En esta investigación, mediante la simulación en un entorno dinámico, la capacidad de un agente UAV puede ser probada en condiciones definidas y además su comportamiento puede ser visualizado. Los resultados de un entorno de simulación basado en un agente, ha demostrado ser una herramienta valiosa para evaluar la función de los agentes autónomos durante el proceso de desarrollo, este artículo utiliza un software de simulación para analizar el comportamiento de los UAV's, a diferencia de la presente investigación que se utiliza un simulador para analizar el comportamiento del UAV y el enlace de comunicaciones, dichos datos de comunicaciones obtenidos por la herramienta de simulación se comparan con los datos calculados del presupuesto de enlace, el método de Longley-Rice y datos captados en tiempo real por el analizador de espectros.

En la investigación de Kasampalis et al. (2013) se muestra la existencia de gran cantidad de modelos de propagación para la predicción de la cobertura. El objetivo de este trabajo es comparar mediciones precisas tomadas por un analizador de espectros portable con los resultados de las simulaciones derivadas de los modelos de predicción de cobertura como NTIA-ITS, modelo Longley-Rice, Modelo ITM (Irregular Terrain Model) y modelo ITWOM (Irregular Terrain with Obstructions Model). Tanto en este artículo como en la investigación propuesta, se realiza comparaciones de datos captados por un analizador de espectros con datos obtenidos de métodos de cálculo, la diferencia que en la presente investigación dichos datos se comparan también con los datos obtenidos mediante un software de simulación, en el mismo que se configura los parámetros específicos de un sistema aéreo no tripulado.

En la investigación de Kasampalis et al. (2014) comparan las mediciones de intensidad de campo de precisión tomadas por un analizador de espectro portátil con resultados de los modelos de predicción de cobertura como Longley-Rice, ITU-R P.1546 y Hata-Davidson, en el cuál los autores concluyeron que el modelo Longley-Rice usado en todo el mundo con datos SRTM 3-arc-second -para elevaciones de terrenos-, da resultados satisfactorios en comparación con las otras mediciones, pero es más intenso computacionalmente que los modelos empíricos sencillos. Las curvas de propagación de la Recomendación ITU-R P.1546 dan errores significativos, sobre todo en las distancias mayores a 50 km y necesitan correcciones, el Hata-Davidson a pesar de ser un

modelo simple da resultados razonables. En este artículo al igual que en el anterior se realiza comparaciones de los datos captados de un analizador de espectros con métodos de cálculo, la cual sirve de apoyo para el desarrollo de la presente investigación, puesto que permite analizar y emplear un método que se adapte al entorno de trabajo del sistema aéreo no tripulado.

Para analizar y emplear un método que se acople a los diferentes sistemas utilizados en la presente investigación. La simulación de misiones de UAV con una carga útil de Comunicaciones (Charlesworth, 2013) ha demostrado que se puede proporcionar un banco de pruebas para los algoritmos de navegación potenciales, escritos en MATLAB, en un ambiente que podría simular el movimiento de UAV y los enlaces de comunicaciones. Los datos obtenidos del entorno de simulación han sido útiles en el desarrollo de conceptos y especificaciones de las comunicaciones de los UAVS, por lo que en la investigación propuesta también se utiliza un simulador puesto que los experimentos realizados en este artículo han demostrado que el entorno de simulación es a la vez fiable y flexible.

El objetivo del presente trabajo es comparar las mediciones obtenidas con un analizador de espectros en vuelo real del UAV, con los resultados derivados del cálculo del presupuesto de enlace, del modelo de predicción de cobertura Longley-Rice y de la simulación realizada en un software con entorno 3D, para analizar las comunicaciones, a fin de planificar una ruta segura del UAV, que permita mantener un enlace durante toda la trayectoria.

Este documento recopila el análisis teórico de trabajos relacionados y los compara entre sí, tomando como referencia las mediciones de la potencia de recepción durante los vuelos reales de un UAV. Esto permite establecer qué tan precisas pueden resultar las simulaciones realizadas así como los cálculos basados en los modelos teóricos, proporcionando confiabilidad a los resultados presentados por dichas herramientas.

3. ANÁLISIS DE LAS COMUNICACIONES

3.1 Presupuesto de Enlace

El paso inicial de la determinación de rutas es el establecimiento de un presupuesto de enlace para las comunicaciones. Esto es fundamental pues el monitoreo y control de la aeronave es condicionado por el alcance de sus comunicaciones con la Estación de Control en Tierra. Para este cálculo se consideran todas las especificaciones técnicas de los equipos integrantes del sistema conocido como data link, así como las pérdidas del espacio abierto.

En la Figura 1 se muestra un esquema de los elementos de comunicaciones que conforman el sistema aéreo no tripulado en estudio.



Figura 1. Presupuesto de enlace

El presupuesto de enlace calcula las ganancias y pérdidas desde el transmisor hasta el receptor, lo cual permite tener un parámetro inicial para la determinación de rutas. Para este cálculo es necesario conocer los elementos que lo conforman, los mismos que son listados en la Tabla 1.

Tabla 1. Elementos que conforman el sistema de comunicaciones

TRANSMISOR	
Variables del transmisor	Unidad
Potencia de transmisión (PTx)	DBm
Pérdida en el cable (LsCa)	Db
Pérdida en los conectores (LsCo)	Db
Ganancia de la antena (GTx)	dBi
ATENUACIÓN	
Variables de atenuación	Unidad
Pérdida en el espacio libre (FSL)	DB
RECEPTOR	
Variables del receptor	Unidad
Ganancia de la antena (GRx)	dBi
Pérdida en el cable (LsCa)	dB
Pérdida en los conectores (LsCo)	dB

Para poder interpretar estos datos se debe aplicar la Ecuación (1) de radio enlace, la cual ayudará a interpretar el margen o nivel de recepción (MR) en el Equipo Receptor, dicho cálculo debe realizarse en las dos direcciones de transmisión

$$\begin{aligned} \text{MR}(\text{dB}) = & \text{PTx}(\text{dBm}) - \text{LsCa}(\text{dB}) - \\ & \text{LsCo}(\text{dB}) + \text{GTx}(\text{dBi}) - \text{FSL}(\text{dB}) + \\ & \text{GRx}(\text{dBi}) - \text{LsCa}(\text{dB}) - \text{LsCo}(\text{dB}) \end{aligned} \quad (1)$$

3.2 Pérdida en el Espacio libre

Los cálculos a realizar consideran la pérdida de potencia de la señal en una transmisión inalámbrica. Una onda de radio pierde energía debido a la irradiación producida por la antena en diferentes direcciones.

La radiación de las ondas de radio frecuencia dependen del estado del aire, la niebla, la lluvia o cualquier factor natural o artificial que puede adicionar pérdidas al enlace. La onda de radio también pierde potencia incluso en una transmisión de línea recta, porque se esparce sobre una mayor región en el espacio a medida que se aleja el transmisor del receptor.

La Pérdida en el Espacio libre (FSL), mide la potencia que se pierde en el mismo sin ninguna clase de obstáculo. La señal

de radio se debilita en el aire debido a la expansión dentro de una superficie esférica. (Buettrich et al, 2007).

Para poder conocer el valor de la pérdida que existe en el espacio libre se aplica la Ecuación (2), que viene dada en dB.

$$\begin{aligned} \text{FSL}(\text{dB}) = & 32,4 + 20 \log(\text{dist}[\text{Km}]) \\ & + 20 \log(\text{frec}[\text{MHz}]) \end{aligned} \quad (2)$$

En el trabajo de Durney et al. (2012) y en la investigación de Shumate (2010), se utiliza un método de cálculo de propagación para ambientes abiertos, útil en este tipo de comunicaciones, es el Método de Longley-Rice. Este método se aplica a sistemas punto a punto y a sistemas de comunicación en el rango de frecuencias desde VHF hasta EHF, sobre diferentes tipos de terrenos. La pérdida media de propagación es obtenida utilizando información sobre la geometría del terreno entre el receptor y transmisor, y las características refractivas de la tropósfera indicadas en la Figura 2 Para predecir la potencia de la señal dentro del "horizonte" se utiliza principalmente el modelo de reflexión terrestre de 2 rayos (Padrón et al, n.d.).

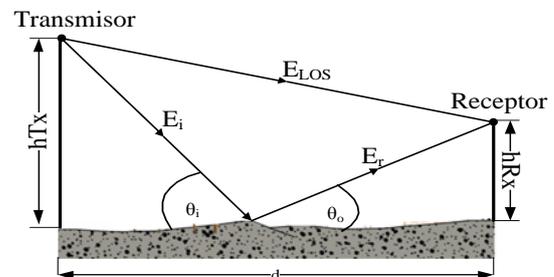


Figura 2. Modelo refractivo de 2 rayos.

La potencia recibida a una distancia proveniente del transmisor puede ser expresada en decibeles expresada en la Ecuación (3).

$$\begin{aligned} L_p(\text{dB}) = & 40 \log d - (10 \log G_t + \\ & 10 \log G_r + 20 \log h_r + 20 \log h_t) \end{aligned} \quad (3)$$

Donde

- L_p : Pérdidas por trayectoria en dB.
- d : Distancia en kilómetros.
- G_r : Ganancia de la antena receptora en dB.
- G_t : Ganancia de la antena transmisora en dB.
- h_r : Altura de la antena receptora en metros.
- h_t : Altura de la antena transmisora en metros (Guía et al, n.d.).

Este método por la gran cantidad de información que recolecta, realiza una mejor predicción conocido también como modo de predicción de un enlace punto a punto. Aunque cabe recalcar que puede verse obligado a incluir modificaciones debido a factores como edificios, árboles, postes entre otros, finalmente dependiendo de la comunicación se puede agregar un porcentaje de

desplazamiento y tiempo que puede afectar al receptor (Méndez, 2008).

3.3 Modelamiento de los equipos y elementos

La planificación de vuelo se realiza a través de un software (Analytical Graphics, n.d.), que utiliza algoritmos de planificación basada en búsqueda de soluciones potencialmente adecuadas, aprovechando todos los estados posibles. De acuerdo a los requerimientos de la prueba a realizar se recopilará información que será necesaria sobre:

- Parámetros por los cuales el modelo de UAV's estará equipado (sensores, peso, dimensiones, etc).
- Datos de los equipos de comunicación (Antenas).
- Cartografía en 2D y 3D donde se realizarán los mismos.
- Una línea de ejecución a través del tiempo de vuelo.

En la Ecuación 4 el posicionamiento dinámico del UAV se determina mediante coordenadas geográficas y se calcula usando la Ecuación (5) y la Ecuación (6).

$$\text{Dist}_{\text{km}} = R * \beta \quad (4)$$

$$\beta = 2 * \arctan(\sqrt{\alpha}, \sqrt{1-\alpha}) \quad (5)$$

$$\alpha = \sin\left(\frac{\text{Lat1}-\text{Lat2}}{2}\right)^2 + \sin\left(\frac{(\text{Lon1}-\text{Lon2})}{2}\right)^2 * \cos(\text{Lat1}) * \cos(\text{Lat2}) \quad (6)$$

Donde el radio terrestre (R) se lo considera igual a 6371 Km. En la simulación se considera la superficie que presenta el UAV y las antenas de comunicación junto con los diferentes parámetros que estas tendrán.

Al ser el algoritmo por búsqueda, las trayectorias dependen del análisis de la configuración del escenario, por lo que las condiciones del medio geográfico se ingresan a la simulación (Fradera, 2014).

Las pruebas se han realizado en la Sierra en la provincia de Tungurahua y en el Oriente en las provincias de Napo y Sucumbíos. Se incluye en la simulación el modelo del diseño de UAV de prueba, estableciendo parámetros de longitud, peso y estructura de manera que se establezca un modelado dinámico.

El enlace de comunicaciones es una de las partes más importantes en el sistema aéreo no tripulado, debido a que permite mantener informado de todos los acontecimientos presentes en la aeronave en tiempo real así como establecer el control del UAV durante todo el vuelo. Para establecer la confiabilidad del enlace durante la trayectoria del UAV se utiliza una herramienta de simulación que permita planificar los vuelos en base a un escenario establecido, de manera que se pueda reducir el riesgo de fallo durante las pruebas. Las simulaciones consideran un entorno 3D, tanto en el modelo

cartográfico como en el modelamiento de la aeronave a fin de establecer un escenario lo más cercano a la realidad.

En la Figura 3 se presenta una imagen del resultado del modelamiento del sistema aéreo no tripulado.

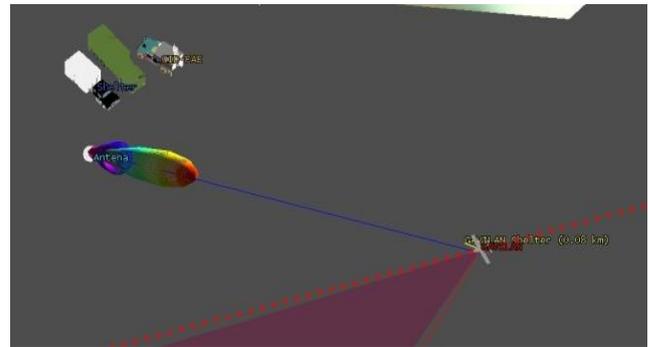


Figura 3. Modelamiento del Sistema Aéreo No Tripulado.

3.4 Presupuesto de enlace en el simulador

Una vez ingresados los parámetros de los elementos y equipos del sistema aéreo no tripulado, se procede al cálculo de los accesos de línea de vista y parámetros de comunicaciones. En este presupuesto se obtiene información calculada de la potencia de transmisión (Tx), la relación señal a ruido Eb/No, la sensibilidad de recepción, y otros parámetros de comunicaciones.

Los datos calculados por la simulación son mostrados en una tabla como se indica en la Tabla 2.

Tabla 2. Presupuesto de enlace realizado en el simulador.

Eb/No (dB)	Sensibilidad_RX (dBm)	Distancia (Km)
96,0458	-68,936	0,832091
97,2849	-67,697	0,721466
98,7359	-66,246	0,610476
100,4919	-64,490	0,498733
102,6545	-62,327	0,388811
105,5698	-59,412	0,277954
109,9162	-55,066	0,168519
118,1586	-46,823	0,065243
117,7305	-47,251	0,068539
109,7167	-55,265	0,172435
105,4414	-59,540	0,282091
102,5620	-62,420	0,392974
100,4096	-64,572	0,503481
98,6869	-66,295	0,613929
97,2368	-67,745	0,725474
95,9998	-68,982	0,836512
94,9109	-70,071	0,948237
94,0590	-70,923	1,045956

Estos valores de simulación se establecen de las relaciones matemáticas que a continuación se detallan.

La Relación Señal/Ruido (E_b/N_o) [dB] permite comparar la cantidad de ruido que existe dentro de una señal deseada, la cual es expresada en la Ecuación (7).

$$\frac{E_b}{N_o} [\text{dB}] = 10 \log \frac{\text{Potencia de la Señal}}{\text{Potencia del Ruido}} \quad (7)$$

Donde la Potencia de la Señal viene dada por la antena y la densidad de potencia del ruido (N_o) se determina por la Ecuación (8):

$$N_o = KT \quad (8)$$

Donde

K : Constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23} [J/K]$

T : Temperatura absoluta, en grados Kelvin.

La Sensibilidad del Receptor establece el valor de sensibilidad del equipo en recepción y viene dado en la Ecuación (9):

$$S(\text{dBm}) = -174 \text{dBm} + 10 \log \frac{E_b + N_o}{N_o} + NF(\text{dB}) + 10 \log B \quad (9)$$

Donde

-174dBm: Considerado como piso de señal existente en el éter.

E_b : Lo recibido por el receptor.

N_o : El ruido, que varía de una banda a otra.

NF : (Noise Figure), ruido electrónico generado por las etapas de entrada del receptor.

B : Ancho de Banda utilizable por el receptor (Bernal I, n.d.).

3.5 Cobertura de enlace

La cobertura de enlace es una forma gráfica del cálculo de los accesos y enlaces que nos brinda la simulación para tener una mejor proyección del comportamiento de las comunicaciones durante toda la trayectoria programada para el vuelo del UAV.

Este resultado permite analizar la cobertura espacial teniendo en cuenta todos los accesos proporcionados por uno o más activos (instalaciones, vehículos, sensores, etc.). Los resultados específicos se generan en base a cálculos de accesos detallados realizados a puntos de cuadrícula, definidos por el usuario, dentro de un área de cobertura (AGI, TRAINING STK Coverage, n.d.).

Con el cálculo de cobertura se pueden realizar las siguientes acciones:

- Definir áreas de interés.
- Definir los elementos de cobertura.
- Definir el período de tiempo de interés.
- Determinar e informar las medidas de calidad de cobertura.

En la Figura 4 se muestra el área de cobertura de una trayectoria seguida por el UAV. La ruta simulada presenta varios colores que representan el estado de las comunicaciones. La sección de ruta donde existe mayor confiabilidad de la comunicación se representa en color azul. La sección roja de la trayectoria representa poco confiabilidad del enlace de comunicaciones. Los parámetros de confiabilidad son establecidos por el equipo investigador en base a los cálculos realizados y especificaciones de los equipos.

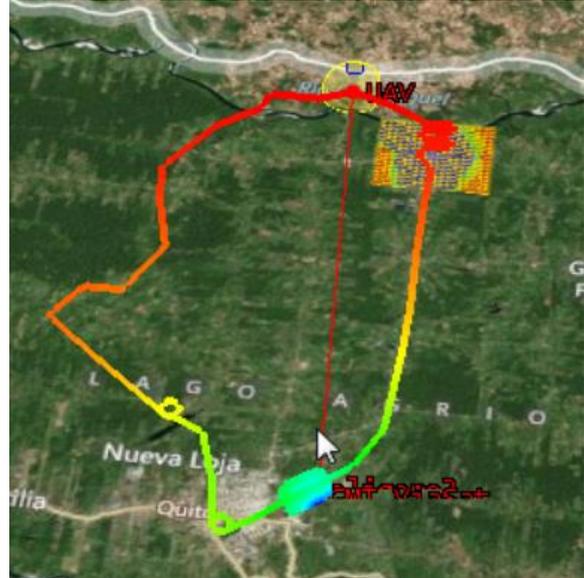


Figura 4. Cobertura de comunicaciones en trayectoria seguida por el UAV.

3.6 Verificación de datos en pruebas

Para verificación que los datos calculados y simulados de potencia de recepción sean correctos, se toman los datos con un analizador de espectros que establece la sensibilidad que existe en la estación terrena. Esta información permite comparar la ruta planificada en simulación para garantizar un adecuado enlace de comunicaciones, y que se puedan obtener datos confiables en tiempo real durante todo el vuelo. La información del analizador de espectros es guardada en una base de datos conjuntamente con las coordenadas del UAV durante el vuelo.

En la Figura 5 se establece el esquema de pruebas para el enlace de comunicaciones con el UAV.

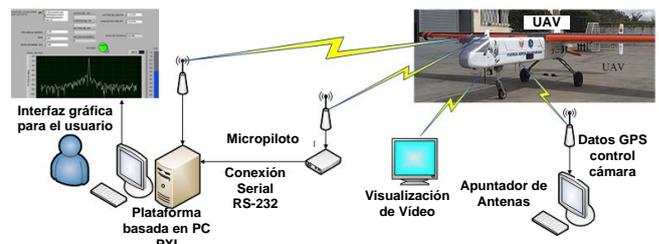


Figura 5. Esquema de pruebas de comunicaciones utilizado en el UAV.

4. DESARROLLO DE LAS PRUEBAS

4.1 Planificación de ruta de vuelo del UAV.

Las pruebas en vuelo se desarrollan con el prototipo UAV-2 desarrollado en el Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea. Dentro de los parámetros establecidos para la verificación se establece una altura de vuelo de 500 m sobre el nivel del suelo (AGL). La Estación en Tierra está ubicada en el área de plataforma de las instalaciones del Aeropuerto Chachoán. Las diferentes pruebas establecen varias trayectorias que permitan variar el aspecto que presenta la aeronave.

La Tabla 3 presenta las coordenadas establecidas para una prueba del enlace de comunicaciones.

Tabla 3. Coordenadas de la Ruta.

Puntos de interés	Latitud	Longitud
R_W	-1,21249 °	-78,5736 °
R_S	-1,21709 °	-78,5723 °
R_E	-1,2133 °	-78,569 °
R_N	-1,209 °	-78,5703 °
1	-1,20089 °	-78,5698 °
2	-1,1937 °	-78,5683 °
3	-1,17191 °	-78,5647 °
4	-1,16827 °	-78,5718 °
5	-1,17251 °	-78,5724 °
6	-1,18023 °	-78,5725 °
7	-1,19347 °	-78,5734 °

En la prueba establecida la aeronave UAV-2 despegga del aeropuerto Chachoán, en la ciudad de Ambato en dirección norte hacia la ciudad de Pillaro, manteniendo una altura de vuelo crucero de 500 m AGL. Durante la trayectoria se recopilan los datos de potencia de recepción en la Estación de Mando y Control en Tierra (EMCT) durante el vuelo, en las frecuencias de operación del UAV. En la simulación se establece el escenario de vuelo, modelando el sistema aéreo no tripulado con todos los elementos descritos sobre los puntos de estudio. Se consideró la cartografía digital del terreno y datos del medio ambiente obtenidos mediante estaciones meteorológicas.

La Figura 6 presenta gráficamente el establecimiento de la ruta para pruebas con el UAV.

Con los datos calculados, recopilados y simulados se realiza una verificación de la ruta confiable para la transmisión de información del UAV durante toda la trayectoria de vuelo.

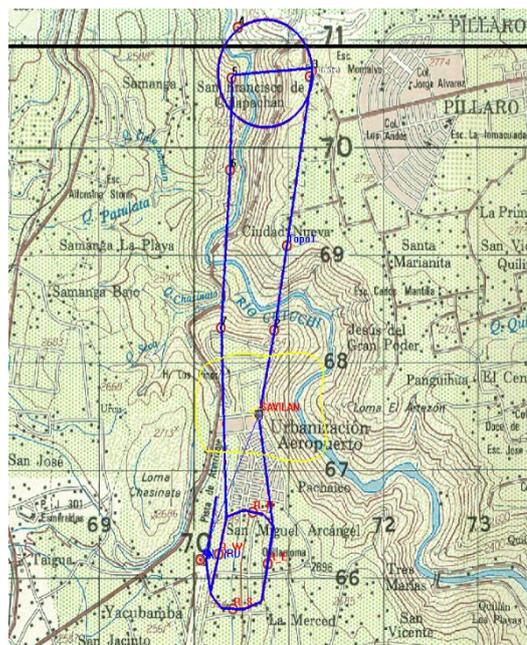


Figura 6. Ubicación de los puntos de estudio

5. RESULTADOS

Los distintos escenarios para las pruebas del UAV fueron modelados para la simulación, considerando todos los elementos que conforman el sistema aéreo no tripulado. Esto permite obtener una mejor proyección del comportamiento de los enlaces de comunicaciones durante la trayectoria previo al cálculo teórico del presupuesto de enlace.

Mediante los vuelos realizados con el prototipo UAV-2, en las rutas planificadas, se logró recopilar los datos de potencia de recepción que existe en la estación de mando y control terrena, trabajando a las frecuencias de operación del UAV. Una muestra de los datos obtenidos se visualiza en la Tabla 4.

Tabla 4. Datos de Potencia de Rx obtenidos

Puntos de estudio	Distancia de la EMCT al UAV	Datos calculados de presupuesto de enlace	Datos calculados con Método de Longley - Rice.	Datos obtenidos con el software de simulación	Datos obtenidos con el analizador de espectros
R_W	0,2 km	-64,40dBm	-39,95dBm	-66,06dBm	-67,25dBm
R_S	0,59 km	-68,22dBm	-58,74dBm	-68,34dBm	-68,25dBm
R_E	0,7 km	-69,71dBm	-61,71dBm	-69,61dBm	-72,25dBm
R_N	0,73 km	-70,07dBm	-62,44dBm	-69,77dBm	-72,3dBm
1	1,49 km	-76,27dBm	-74,83dBm	-74,76dBm	-76,80dBm
2	2,28 km	-79,96dBm	-81,82dBm	-78,17dBm	-82,20dBm
3	4,74 km	-86,32dBm	-94,94dBm	-84,23dBm	-89,15dBm
4	5 km	-86,78dBm	-95,86dBm	-84,79dBm	-90,79dBm
5	4,52 km	-85,91dBm	-94,11dBm	-83,98dBm	-87,60dBm
6	3,67 km	-84,10dBm	-90,49dBm	-82,17dBm	-83,05dBm
7	2,19 km	-79,61dBm	-81,52dBm	-77,86dBm	-79,50dBm

Una comparación de los datos obtenidos mediante el cálculo, la simulación y la medición de la potencia de recepción del enlace de comunicaciones se muestran en la Figura 7.

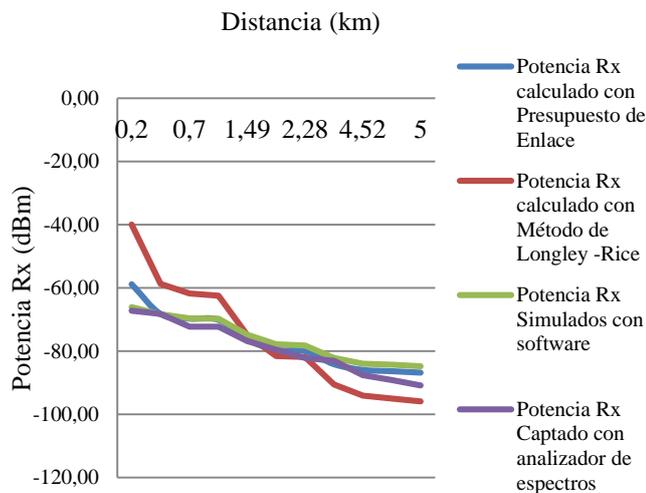


Figura 7. Curvas de comportamiento de la potencia de recepción

La tendencia de las curvas puede evidenciar que la variación de la potencia de recepción es mínima entre los datos calculados, y simulados. Respecto a los datos captados con un analizador de espectros la variación aumenta conforme la distancia se incrementa entre el transmisor y el receptor. Otros factores ambientales que influyen en la aproximación entre las curvas se relacionan con la distancia a la que se encuentran las estaciones, las variaciones del clima y de las alturas que vaya a operar un UAV.

De acuerdo a lo proyectado la eficiencia en comunicaciones utilizando un analizador de espectros nos establece parámetros comparativos con el software de simulación y con los resultados obtenidos mediante cálculos, se comprueba la aproximación en paralelo de los cuatro parámetros.

Mediante los resultados se puede evidenciar que el porcentaje de error promedio de los datos de estimación respecto a los valores reales medidos es de 2.79% del cálculo del presupuesto, 3.25% de los datos derivados del software de simulación y de 4.98% del método de Longley-Rice. Cabe recalcar que el porcentaje de error de los resultados del último método es a corto alcance, a medida que el UAV se aleja de su estación terrena los porcentajes de error disminuye estos parámetros son importantes considerarlos debido a que el UAV realiza misiones de largas distancias.

6. CONCLUSIONES

Para el cálculo de la potencia de recepción se consideró el método de Longley-Rice debido a que este se aplica a sistemas punto a punto y a sistemas de comunicaciones en el rango de frecuencias desde VHF hasta EHF empleadas en el UAV de prueba. Además el método utiliza información sobre la geometría del terreno entre el receptor y transmisor, y las características refractivas de la troposfera.

Para poder conocer que los datos calculados y simulados de la potencia de recepción sean correctos, se estableció con un analizador de espectros la sensibilidad que existe en la estación terrena.

Según las curvas obtenidas de los datos calculados, simulados y medidos se concluye que el método de Longley-Rice es recomendable para largas distancias, pues mientras más se aleja el UAV de su estación terrena los datos se asemejan a la simulación y a la medición realizada con el analizador de espectros.

El método de presupuesto de enlace utiliza los datos técnicos de los equipos utilizados en las pruebas, que son conocidos, por lo que sus resultados son cercanos a los datos obtenidos con la medición experimental durante toda la trayectoria, el cual sirve para realizar una evaluación rápida del comportamiento de los sistemas de comunicaciones.

Una vez concluido la investigación se puede decir que el método más confiable y rápido para la planificación de rutas del UAV es la herramienta de simulación, puesto que se puede configurar todos los parámetros empleados en el sistema aéreo no tripulado y garantizar las comunicaciones durante toda la trayectoria que llevara a cabo el UAV.

REFERENCIAS

- AGI, TRAINING STK Coverage. (n.d.). Can Ground Troops Rely on GPS For Position Accuracy, pp. 9. Obtenido de: <https://www.agi.com/resources/user-resources/downloads/white-papers.aspx#popular=0--subjectAreas=0>. (Mayo, 2016).
- Analytical Graphics, Inc. (AGI). (n.d.). Obtenido de: <https://www.agi.com/>. (Mayo, 2016).
- Bernal, I. (n.d.). Propagación", Quito: Escuela Politécnica Nacional, Obtenido de: <http://clusterfie.epn.edu.ec/ibernal/html/CURSOS/AbrilAgosto06/Inalamblicas/CLASES/AntenasParteII.pdf>. (Mayo, 2016).
- Buettrich, S., Escudero, A., E. Rodríguez, J. (2007). Cálculo de radioenlace, TRICALCAR. Obtenido de: http://www.itrainonline.org/itrainonline/mmtk/wireless_es/files/06_es_calculo-de-radioenlace_presentacion_v02.pdf.
- Chamorro, W., Medina, J. y Sotomayor, N. (2013). Control de un cuadricóptero para seguimiento de un móvil. *Revista Politécnica*, vol. 32, pp. 1-10.
- Charlesworth, P. (2013). Simulating Missions of a UAV with a Communications Payload. *Computer Modelling and Simulation (UKSim)*, 2013 UKSim 15th IEEE, pp. 650 – 655.
- Durney, H., Castro, C., y Ortiz, R. (2012). Diseño e implementación de radio enlaces y estaciones repetidoras wi-fi para conectividad de escuela rurales. *Trilogía*, 24(34), 43-51.
- Fradera, J. (2014). Planificación de misiones para Vehículos No Tripulados (UAS). Tesis de Grado de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Informática, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid.
- González, V., Monje, C. y Balaguer, C. (2014). Planificación de misiones de vehículos aéreos no tripulados con fast marching en un entorno 3D. XXXV Jornadas de Automática.
- Guía, M. V., Medina, F. B. (n.d.). Modelo de predicción para la propagación de la señal de televisión digital abierta en Venezuela. Obtenido de:

<http://biblioteca2.ucab.edu.ve/anexos/biblioteca/marc/texto/AAS7536.pdf>
(Mayo, 2016).

Kasampalis, S., Lazaridis, P., Zaharis, Z., Bizopoulos, A., Zettas, S. y Cosmas, J. (2013). Comparison of Longley-Rice, ITM and ITWOM propagation models for DTV and FM broadcasting. *Wireless Personal Multimedia Communications (WPWC)*, 16th IEEE, pp. 1.

Kasampalis, S., Lazaridis, P., Zaharis, Z., Bizopoulos, A., Zettas, S. y Cosmas, J. (2014). Comparison of Longley-Rice, ITU-R P.1546 and Hata-Davidson propagation models for DVB-T coverage prediction. *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, 2014 IEEE, pp. 1-4.

Mendez, J. M. (2008). Cálculo de cobertura para el sistema de radio comunicación trunking en el sur del estado Anzoátegui para comunicaciones móviles EDC. Tesis de grado de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Murillo, M. H., Limache, A. C. y Giovanini, L. L. (2014). Generación de trayectorias óptimas utilizando control predictivo. *Mecánica Computacional*, vol. XXXIII, pp. 2483-2495.

Padrón, A., Herrera, A., Prieto, R., Rosendo, J., Benoso, L., Venancio, G., Liu, X., Díaz, G., y Sánchez, V. (n.d.). Métodos de predicción de áreas de servicio, SOMI XVIII Congreso de Instrumentación Microondas APG18189, pp. 1-10. (Mayo, 2016).

Rodríguez, L. (2014). Planificación local eficiente de caminos para UAVs en entornos desconocidos, Proyecto de Fin de Grado, Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, España.

Stenger, A., Fernando, B., Heni, M. (2012). Autonomous mission planning for UAVS: A cognitive approach. *Deutscher Luft-und Raumfahrtkongress*.

Shumate, S.E. (2010). Longley-Rice and ITU-P.1546 combined: A new international terrain-specific propagation model. *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall)*, 2010 IEEE (72nd), 1-5.



Erika Magdalena Llerena Ortiz. Nació en Ambato-Ecuador el 11 de mayo de 1987. Realizó sus estudios secundarios en el Instituto Tecnológico "Rumiñahui" donde obtuvo el título de bachiller en Ciencias, especialización Físico-Matemáticas. Se graduó en la Universidad Técnica de Ambato como Ingeniera en Sistemas Computacionales e Informáticos en el año 2011. Obtuvo su título de magister en Gestión de Base de Datos, en la Universidad Técnica de Ambato, en Abril del 2016. Trabajó en el Área de Comunicaciones y Sensores del Centro de Investigación y Desarrollo de la FAE.



Benjamín Damián Araujo Villarruel. Nació en Baños de Agua Santa el 26 de Marzo de 1990. Sus estudios lo realizó en el "Instituto Tecnológico Superior Oscar Efrén Reyes" en la ciudad de Baños donde obtuvo el título de bachiller en Ciencias Generales. Sus estudios superiores los realizó en la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato en 2013, en donde obtuvo el título de Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones. Trabajó en el Área de Comunicaciones y Sensores del Centro de Investigación y Desarrollo de la FAE.



Lenin Anibal Jara Olmedo, Oficial de la Fuerza Aérea Ecuatoriana, nació en Ambato-Ecuador el 13 de diciembre de 1974. Se graduó de Ingeniero Electrónico en la Escuela Politécnica del Ejército en el año 2004. Obtuvo su título de Master of Science in Communications Engineering en la Universidad de York, Inglaterra, en Octubre del 2010. Ha participado en el desarrollo de proyectos tecnológicos relacionados principalmente al área de aviónica, en el Centro de Ingeniería y Mantenimiento de Aviones Militares de la Dirección de la Industria Aeronáutica DIAF y en el Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana.