

Sistema aéreo de medición de gases contaminantes basado en un UAV, resultados preliminares

Air pollutant measurement system based on a UAV, preliminary results

Sergio Vargas V. y Diego Lange V.

Departamento de Ciencias Exactas e Ingeniería Universidad Católica Boliviana
"San Pablo", c. Márquez s/n, Zona Tupuraya, Cochabamba - Bolivia

lange@ucbcha.edu.bo

Resumen: El monitoreo de gases contaminantes es una actividad que se lleva a cabo en la mayor parte de los países desarrollados en estaciones ubicadas en ciudades y zonas afectadas por algún tipo de emisión de contaminantes. Estas estaciones proveen una nube de puntos que permite estudiar la evolución de los contaminantes a nivel de suelo. A nivel de la tropósfera, en especial por debajo de la capa límite atmosférica, se utilizan sistemas de instrumentos de teledetección tales como radares, fotómetros solares o lidars atmosféricos (además de radiosondas), que son capaces de generar perfiles verticales de las variables estudiadas.

Sin embargo, el costo de estos sistemas puede ser muy elevado, lo que limita la capacidad de investigación y estudio de la atmósfera en países o comunidades que no cuentan con una tradición en investigación o con los recursos necesarios para ello.

En éste documento se plantea un sistema de medición de contaminantes criterio basado en un UAV (Unmanned Aerial Vehicle) que, dadas sus características, puede generar perfiles verticales de los contaminantes hasta un nivel inicial de 300 m, con la posibilidad de alcanzar el límite de la capa estable que se genera durante la noche. Se monitorea Ozono (O_3), Monóxido de Carbono (CO), Material Particulado (PM_{10}), temperatura y presión atmosférica. También se plantean las mediciones preliminares de dichos gases en la ciudad de Cochabamba, Bolivia.

Palabras clave: Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV), Contaminantes atmosféricos, Perfiles verticales de Temperatura-Presión, contaminación atmosférica, cambio climático, Ozono (O_3), Monóxido de Carbono (CO), Material Particulado (PM_{10}).

Abstract: Pollutant gases monitoring takes place in most of developed countries in stations located in cities and areas affected by pollutant emissions. These stations provide a point-cloud that allows to study the evolution of pollutants at

ground level. In the troposphere, especially inside the atmospheric boundary layer (ABL), remote sensing systems such as radars, sunphotometers or atmospheric LIDAR systems (also radiosondes) are used because their vertical-profiles generating capability.

However, the cost of these systems can be very high, which limits research and study of the behavior of the atmosphere in countries or communities that do not have a tradition in research or resources to do so.

In this document, a key-pollutant gases measurement system based on a UAV (Unmanned Aerial Vehicle), is proposed. This system can generate vertical profiles of pollutants to an initial level of 300 m, with the possibility of reaching the limit of the stable layer generated overnight. Ozone (O_3), carbon monoxide (CO), Atmospheric Particulate Matter (PM_{10}), temperature and atmospheric pressure are monitored. Preliminary measurements of these gases are also shown in Cochabamba city (Bolivia).

Keywords: Unmanned aerial vehicle (UAV), greenhouse effect, vertical profiles of temperature and pressure, air pollution, climate change, Ozone (O_3), carbon monoxide (CO), Atmospheric Particulate Matter (PM_{10}).

1 Introducción

El cambio climático y la calidad del aire dependen de la emisión, transformación y transporte de componentes atmosféricos clave (tales como aerosoles o material particulado, nubes y gases de efecto invernadero) y su interacción con la radiación solar (1).

Estos componentes atmosféricos se concentran principalmente en la tropósfera, que es la capa más baja de la atmósfera, y se extiende 11 km desde la superficie terrestre. A su vez, la capa más baja de la tropósfera, conocida como la capa límite atmosférica (ABL, *Atmospheric Boundary Layer*), contiene la mayor parte de los aerosoles (o material particulado) y se puede definir como “aquella capa de la atmósfera que es directamente influenciada por la superficie terrestre, y responde a las variaciones superficiales en una escala temporal de una hora o menos. Éstas variaciones incluyen resistencia al rozamiento, evaporación y transpiración, transferencia de calor, emisión de contaminantes y variaciones en el flujo por el terreno” (2).

El espesor de la capa límite es muy variable en el tiempo y espacio, variando desde cientos de metros a unos pocos kilómetros, dependiendo de la hora del día, la estación del año y las condiciones geográficas de la zona. Durante la noche, la capa límite es estable con turbulencias esporádicas, y debido a la caída de temperatura, su altura se reduce considerablemente a pocos cientos de metros.

Se puede definir a los gases de efecto invernadero, como aquellos gases que forman parte de la atmósfera, cuyo origen puede ser natural o antropogénico, que

emiten y absorben radiación en el espectro de la radiación térmica infrarroja emitida por la superficie terrestre, la atmósfera (principalmente la ABL) y las nubes. El vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) y ozono (O₃) son considerados por el IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) como gases de efecto invernadero primarios (3).

En el caso de la ciudad de Cochabamba, varios estudios señalan que el deterioro de la calidad del aire se debe las emisiones del parque automotor (4). Es necesario también considerar la especial topografía del valle cochabambino, como una influencia importante en el comportamiento de la ABL. La altura media del valle central es de 2.566 m.s.n.m.; y todo el valle está rodeado por montañas en los cuatro puntos cardinales (Figura 1:).

Por otro lado, los Vehículos Aéreos no Tripulados UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), son aeronaves que vuelan sin tripulación y que son controlados de manera remota, y que en algunos casos tienen un control autónomo o semi-autónomo (5).

Los UAVs pueden ser aplicados en diversos usos civiles, como la inspección de ambientes de alta toxicidad, cartografía, agricultura, cine, servicios forestales, medio ambiente, diversión, etc. En los últimos años (gracias al avance de la tecnología y la disminución de precios), se ha observado un crecimiento acelerado del mercado de UAVs en el mundo en general y en Bolivia en particular, por lo que las aplicaciones se han multiplicado. Actualmente, en Bolivia no existe una reglamentación para los UAVs, a diferencia de otros países (6, 7), sin embargo se deben tomar en cuenta las recomendaciones de la ICAO (*International Civil Aviation Organization*) para su uso (5).



Figura 1: Mapa del valle de Cochabamba. El valle central incluye Cochabamba y Sacaba. El valle bajo es la parte este del valle central hasta Suticollo, y el valle alto incluye Cliza, Punata y poblaciones adyacentes. Se muestra también la ubicación del Hipódromo, que fue el lugar elegido para llevar a cabo las medidas. Fuente: Google Maps.

En éste documento se presentan el prototipo y los resultados preliminares de un sistema de medición de gases basado en un UAV, utilizando sensores y dispositivos electrónicos disponibles en el mercado nacional, o que pueden ser adquiridos en el exterior a bajo costo. Debido a la altura que un UAV puede alcanzar, se ha limitado el estudio a la capa estable de la ABL, es decir, la capa que se forma durante la noche.

2 Planteamiento del problema

Actualmente, el estudio del comportamiento de la ABL se lleva a cabo utilizando sistemas de teledetección tales como lidars, sodares y radares atmosférico, o radiosondas (8–11). Estos sistemas son capaces de proporcionar perfiles de los componentes atmosféricos clave en altura, lo que los hace ideales para estudiar precisamente, el comportamiento de la ABL y de sus componentes clave.

A nivel de suelo, suelen utilizarse equipos de medición in-situ, tales como estaciones de calidad del aire situadas en puntos estratégicos de la zona que se

quiere estudiar. Éstas estaciones cuentan con instrumentos capaces de tomar muestras de componentes atmosféricos cada cierto tiempo, de manera pasiva o activa (4, 12).

De acuerdo a la Norma Boliviana NB 62018:2008 (13) referente a la calidad del aire, los contaminantes criterio son: Monóxido de Carbono (CO), O₃, dióxido de nitrógeno (NO₂), material particulado con diámetro equivalente menor a 10 micrómetros (PM₁₀), dióxido de azufre (SO₂), material particulado con diámetro equivalente menor a 2,5 micrómetros (PM_{2,5}), plomo (Pb) y partículas totales en dispersión (PTS).

Un estudio reciente ha determinado que entre las gestiones 2012 y 2014, el riesgo para la salud de la población cochabambina (bajo la Norma Boliviana NB 62018:2008 según la concentración de contaminantes monitoreados), es *muuy alto*, y puede ser causante de efectos adversos en la población en general, complicaciones graves en niños y adultos mayores con enfermedades cardiovasculares o respiratorias y se recomienda no exponerse al aire libre, manteniéndose en lugares cerrados como casas y oficinas (12).

En el caso cochabambino, la red MoniCA tiene tres estaciones de monitoreo activo (SEMAPA, Coña Coña y Parque Kanata) y otras estaciones de monitoreo pasivo, que ofrecen un mapa de puntos a nivel de suelo que ofrecen información de la calidad del aire a nivel de suelo (12).

Sin embargo, no se cuenta con sistemas de teledetección que permitan determinar la influencia del comportamiento de la ABL en la distribución de los componentes atmosféricos clave. Es decir, no es posible conocer la evolución y distribución en altura de gases de efecto invernadero o material particulado.

El precio de estos sistemas (lidares y radares atmosféricos o radiosondas), suelen ser prohibitivos, por lo que el desarrollo de un sistema más barato puede marcar la diferencia entre estudiar o no el comportamiento de la ABL y sus componentes atmosféricos clave. Es claro que éste sistema puede no tener la misma resolución o alcance de los sistemas de teledetección, pero ofrece la oportunidad de llevar a cabo estudios básicos.

2.1 Sistema aéreo de medición de componentes atmosféricos clave

El sistema propuesto consta de dos partes principales: El sistema de medición y el UAV, que se encarga de elevar al primero para crear perfiles verticales de los componentes estudiados.

2.2 Características del UAV

La elevación que puede alcanzar un UAV depende enteramente de los componentes que se elijan en el diseño, siendo el componente clave la batería que determinará el tiempo de vuelo en cada misión.

Se ha elegido un UAV tipo VTOL (*Vertical Take-Off and Landing*, despegue y aterrizaje vertical), de 6 motores en configuración X6 (Figura 2:), debido a que es posible controlar su posición con precisión, es estable, fácil de maniobrar, resistente a ráfagas de viento y la carga útil que puede elevar es suficiente para los componentes del sistema de medición. Sin embargo, la autonomía de vuelo es de sólo 15 minutos. Se ha definido que la altura máxima de vuelo en las pruebas preliminares es de 300 m.

El *frame* escogido es Tarot Ironman 680, con un peso de 600 g y un diámetro de 695 mm. Las hélices son de 12", cada una con motor MT3506. El controlador de vuelo es Pixhawk de 3D Robotics. En cuanto a la batería, considerando el peso total del sistema y el consumo eléctrico del UAV y de la carga útil, se eligió una batería LiPo de 4 celdas de alta capacidad y 8.000 mAh (Figura 2:).



Figura 2: UAV diseñado para el proyecto. Izq. El *frame* y todos los componentes de vuelo. Der. El UAV en pruebas de vuelo y fotografía en la festividad de San Juan, 24 de junio de 2015 (Hipódromo). Al fondo se observa la cordillera del Tunari y una densa capa de contaminación.

2.3 Diseño del sistema de medición

En principio, se buscó integrar instrumentos de medición de todos los contaminantes criterio de la Norma Boliviana NB 62018:2008, pero no se encontraron sensores disponibles para algunos de ellos. El sistema cuenta con sensores de CO, O₃ y PM₁₀. Además se añadieron sensores de CH₄ (3) y gas licuado de petróleo (GLP), debido a que el sensor de CO es además capaz de medir H₂, LPG y CH₄. El sensor de PM₁₀, es Sharp (GP2Y1010AU0F), con una sensibilidad típica de 0,5 V/(0.1 mg/m³). El sensor de O₃, es Futurlec (MQ131), con una

sensitividad de 10 ppb ($14,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). El sensor de CO es Hanwei Electronics (MQ2), cuya sensitividad depende de la concentración del gas.

Es importante además contar con dos sensores de temperatura (se instalaron tres sensores) y un sensor de presión atmosférica (y temperatura) y un sensor GPS. El gradiente de temperatura permite establecer el límite de la capa estable (8, 14, 15). Los primeros dos sensores digitales son de marca Maxim Integrated (DS18B20), con una precisión de $0,0625 \text{ }^\circ\text{C}$, a una resolución de 12 bits. El sensor de temperatura (y presión atmosférica) restante es de marca Measurement Specialties (MS5611), con una resolución típica de $0,012 \text{ }^\circ\text{C}$ ($0,012 \text{ mbar}$) y una precisión de $\pm 0,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\pm 1.5 \text{ mbar}$).

Los datos que todos los sensores adquieren, deben ser almacenados y procesados por un elemento de adquisición de datos. En éste caso, se eligió una tarjeta de desarrollo Freescale KL25Z, cuyas interfaces de entrada/salida de propósito general, procesador, interfaz de comunicación y facilidad de programación (en Python) cumplen con los requisitos del proyecto.

La posición de los sensores en el UAV es crítica, porque se debe minimizar la influencia del plan de vuelo en las medidas obtenidas. Basados en los estudios realizados por Haas *et al.* (16), se definió que la mejor ubicación de los sensores de gases es en la parte superior del UAV, debajo de su carcasa de protección del UAV (Figura 3). La tarjeta de desarrollo también se ubicó junto a los sensores de gases. Los sensores de gases deben calentarse antes de poder ser utilizados, por lo que deben estar lo más protegidos posible de las corrientes de aire en vuelo (Figura 3).

Los sensores de temperatura y presión debían además estar lejos de cualquier fuente de calor, por lo que se ubicaron en la cubierta de carbono, lejos de todos los componentes electrónicos. El sensor de material particulado se instaló en uno de los brazos del UAV.

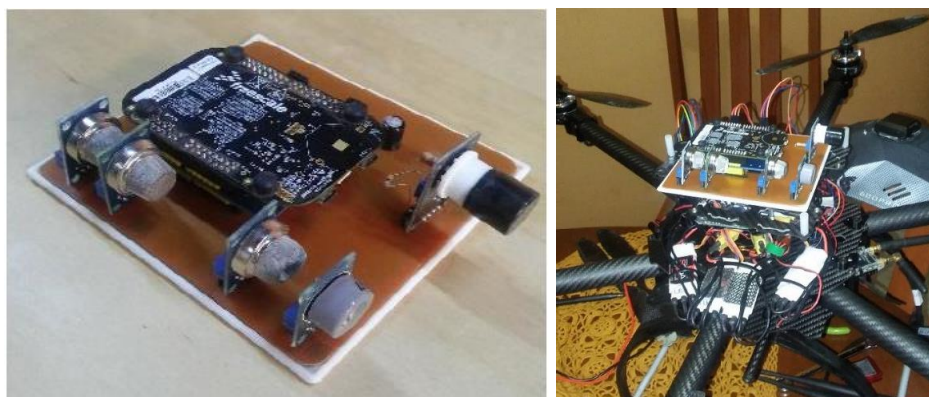


Figura 3: Sistema de medición: Izq. La placa con la tarjeta de desarrollo y los sensores de gases. Der. El UAV interconectado con el sistema de medición en su parte superior.

3 Resultados y Discusión

Todos los sensores fueron configurados dentro de los rangos de trabajo recomendados por el fabricante en sus hojas de datos (17–20) . Se intentó calibrar los sensores en alguna de las estaciones de la red MoniCA, pero no hubo respuesta por parte de los responsables del Gobierno Autónomo Municipal de Cochabamba. Tampoco fue posible obtener información de la red MoniCA en las fechas en las que se llevaron a cabo los vuelos. En una siguiente etapa, se pretende calibrar los sensores de gases principalmente, con equipos especializados para ello.

Los resultados que se muestran a continuación son preliminares, pero demuestran que en la mayoría de los casos es posible obtener perfiles verticales de los contaminantes estudiados utilizando un UAV. Es necesario subsanar algunos errores en el posicionamiento y protección de los sensores ante las condiciones generadas en vuelo por el UAV, e integrar barras de error en las medidas.

Se eligió el Hipódromo de Cochabamba como lugar de pruebas (Figura 1:), debido al alto tráfico vehicular en la zona, la cercanía a la estación Coña Coña de la red MoniCA y debido a que es un espacio abierto en el que se puede volar el UAV de manera segura. En todas las Figuras siguientes, la altura de referencia es precisamente, la del Hipódromo.

Los resultados se muestran separando las mediciones en “subida” y “bajada”, debido a que el comportamiento del UAV es distinto en ambos casos, y su influencia en cada sensor, también.

En las pruebas efectuadas en noviembre de 2105, el plan de vuelo del UAV especificaba una subida completamente vertical hasta los 300 m, pero la bajada no podía ser vertical por la pérdida de sustentación, debido a que se generan vórtices

en los extremos de las hélices, en los que los rotores son atrapados (*Vortex ring*). La manera de evitar ésta situación es sacar al UAV del vórtice desplazándolo hacia los costados. Por tanto, la bajada fue escalonada. Sin embargo, el tiempo que el UAV tarda en aterrizar disminuye drásticamente el tiempo útil de medida. En las pruebas realizadas en enero de 2016, se modificó la trayectoria de bajada a una espiral (Figura 4).

La modificación de la trayectoria de bajada no modificó las lecturas de los gases, pero influyó notablemente en la temperatura, que demostró ser especialmente sensible al movimiento del UAV.

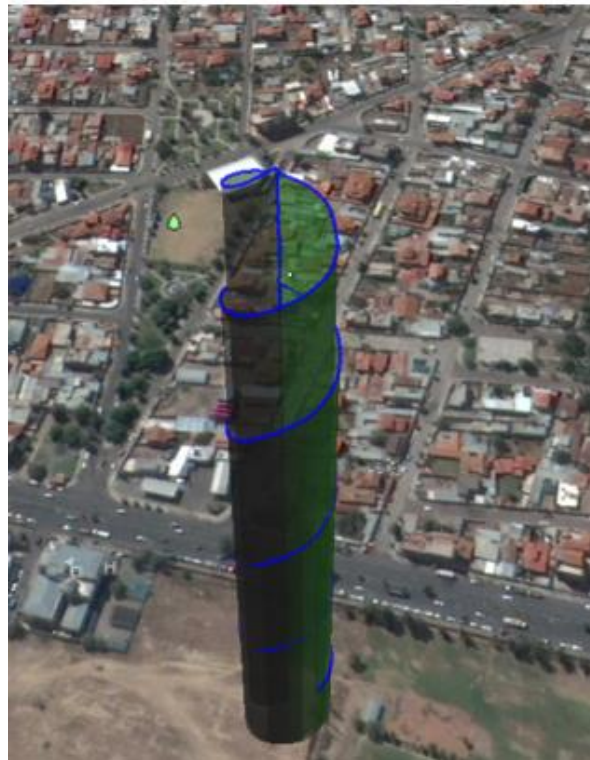


Figura 4: Subida completamente vertical y bajada en espiral. Trayectoria generada en función a las coordenadas del GPS.

3.1 Monóxido de Carbono

Se llevaron a cabo medidas de concentración de CO entre el 18 y 20 de noviembre de 2015. La Figura 5: muestra la medida correspondiente al día 20 de noviembre. Si bien la discrepancia en la nube de puntos es alta, puede verse que la concentración ronda 7 mg/m^3 . Los resultados son similares en los tres días de medición.

El informe nacional de la Calidad del Aire de las gestiones 2008 y 2009, muestra valores por debajo de 5 mg/m^3 (21). No se tienen resultados actuales, debido a que las estaciones de la red MoniCA ya no monitorean CO (12).

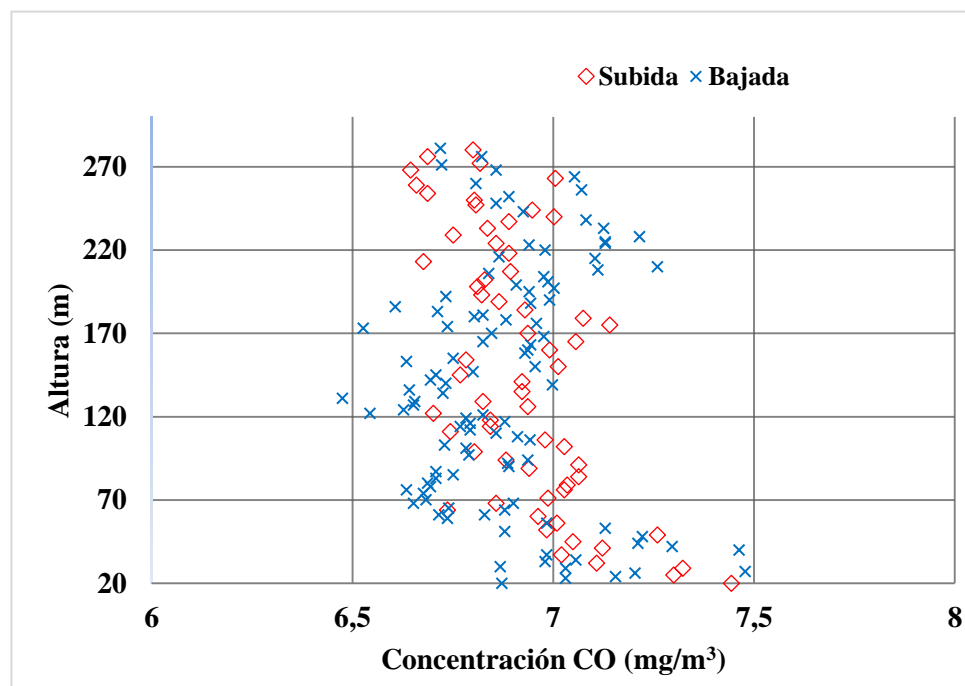


Figura 5: Perfil vertical de concentración de CO el día 20 de noviembre de 2015, a las 07:30 am.

3.2 Ozono

En el caso del O_3 , la discrepancia entre la subida y la bajada es mayor, sin embargo la concentración se mantiene estable en altura, alrededor de $24 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, como puede observarse en la Figura 6. El límite permitido por la Norma Boliviana NB 62018:2008, es de $60 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, lo que indica que por la mañana los niveles de O_3 están dentro de los niveles permitidos. Entre las gestiones 2012 a 2014, los valores promedio registrados en Cochabamba van desde 30 a $50 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, con mayores niveles registrados en la estación de Coña Coña. En SEMAPA, por ejemplo, el promedio entre 2012 y 2014 bajó desde $18 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ a $8 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ aproximadamente (12). Según el informe anual de la red MoniCA, en 2009 el promedio mensual de concentración de O_3 en el Viaducto (aledaño al Hipódromo) fue de $33 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ (22).

3.3 Material Particulado

Es importante notar que el sensor utilizado fue diseñado para detectar humo de cigarrillo, y “polvo casero”. Es posible que detecte también $PM_{2.5}$. No existe mayor información en su hoja de datos.

Dadas las condiciones de vuelo del UAV, las mediciones de PM_{10} fueron gravemente afectadas respecto a los valores obtenidos en tierra, antes de iniciar la misión de vuelo. En la Figura 7:, se puede observar una alta concentración de puntos (tanto a la subida como a la bajada) a la altura del suelo, marcando entre 500 y 600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La zona de despegue es de tierra, por tanto el vuelo del UAV levantará polvo y modificará el valor real del contaminante.

Se puede observar que antes de activar el UAV, el valor medido es de 480 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pero en el tiempo entre que el UAV enciende motores y despegar, el valor medido sube a 520 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La influencia del polvo levantado por los motores explica la diferencia.

En vuelo, la variación de las medidas es muy grande como para considerarlas significativas, respecto al valor obtenido en tierra. El principio de medición del sensor puede ser el problema. Utiliza un emisor LED infrarrojo y un fototransistor, que detecta la luz reflejada por el material particulado en el aire.

Sin embargo, es necesario llevar a cabo más pruebas incluso en tierra, debido a que los valores obtenidos superan los valores de la red MoniCA de las mismas fechas (alrededor de 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). El límite permisible según la Norma Boliviana 62011 es de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y de la Ley 1333 es de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (12).

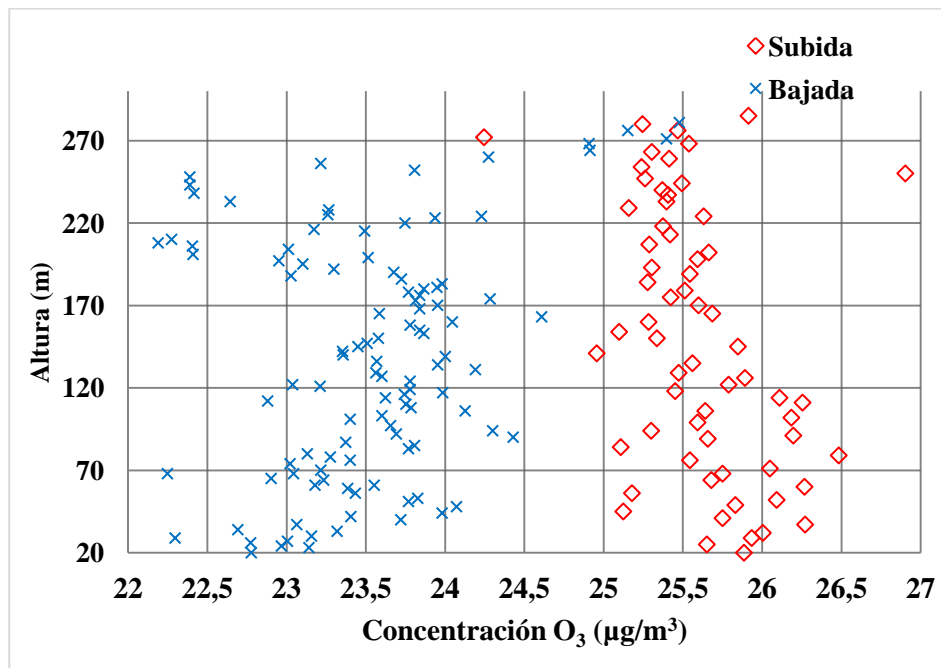


Figura 6: Perfil vertical de concentración de O₃ el día 20 de noviembre de 2015, a las 07:30 am.

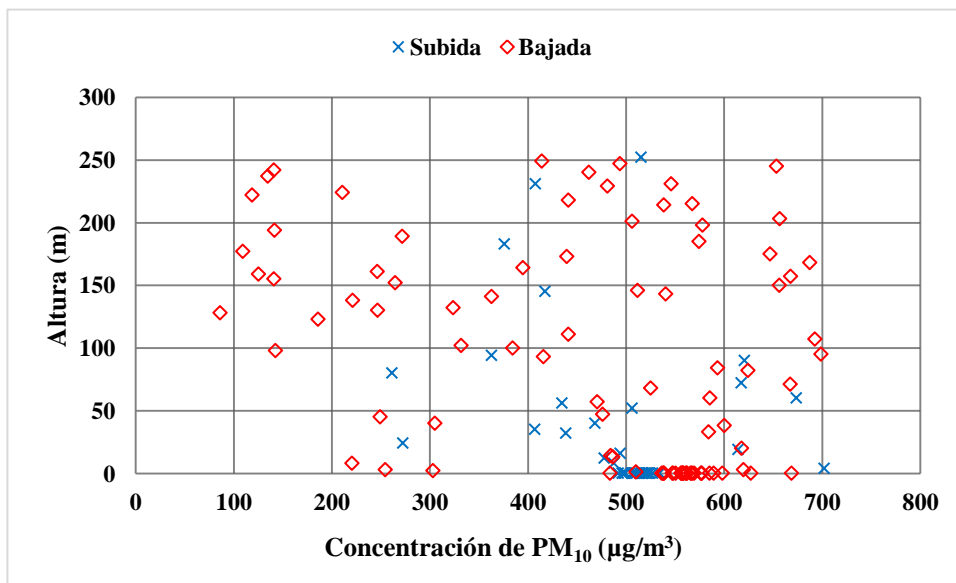


Figura 7: Perfil vertical de densidad de PM₁₀, el día 20 de noviembre de 2015, a las 07:30 am.

3.4 Temperatura

La temperatura es un parámetro especialmente sensible a las variaciones de posición del UAV, debido a que los sensores miden la temperatura del aire que, según se suba o baje, puede ser modificada por el movimiento del UAV. Esto se verificó cuando se llevaron a cabo las pruebas en noviembre de 2105. Inicialmente, los sensores no estaban protegidos de las ráfagas de viento generadas por los rotores, por lo que su influencia se hizo notoria, en especial en la bajada escalonada.

En las pruebas siguientes los sensores fueron aislados, lo que disminuyó considerablemente la influencia de los rotores. Esas mejoras, combinadas con el cambio de trayectoria de bajada (escalonada a espiral) mejoraron los resultados. Sin embargo, aún existen efectos que no se han podido explicar satisfactoriamente, y que están siendo investigados actualmente.

Uno de los objetivos iniciales del proyecto era determinar el límite de la capa estable de la ABL, que se estimaba en menos de 300 m sobre el nivel de la ciudad (en función a observaciones desde puntos altos de la ciudad). A pesar de haber alcanzado esa cota, los perfiles de temperatura en su estado actual no son concluyentes y no permiten determinar las variaciones de temperatura potencial (23, 24).

Se utilizaron tres sensores de temperatura ubicados en distintas partes del *frame*. Dos similares de la marca Maxim Integrated (DS-1 y 2 en la Figura 8:) y el tercero que además mide presión atmosférica (TM1 en la Figura 8:). Los resultados de la presión atmosférica a continuación corresponden a éste sensor.

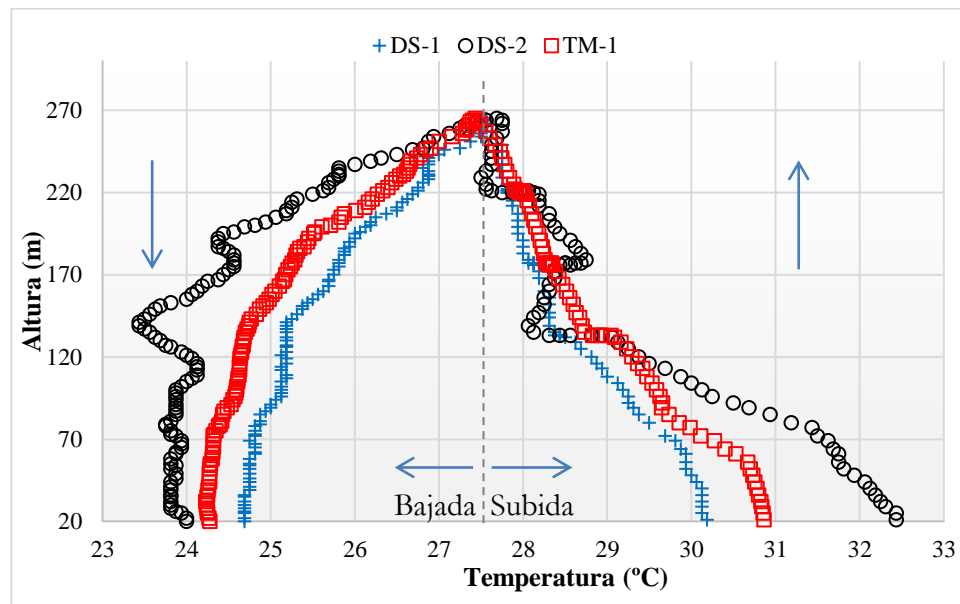


Figura 8: Perfil vertical de temperatura el día 07 de enero de 2016, a las 12:00 am.

El sensor DS-2 en la Figura 8, no estaba protegido, por lo que los cambios de temperatura en la bajada en espiral son notorios respecto a los otros dos sensores. Dada la hora de la medida (12:00 am), es difícil que la pendiente de bajada corresponda a una inversión térmica (pendiente de temperatura durante el descenso), por tanto, el perfil que se acerca más a la realidad es el de subida (tiene una pendiente de entre 6,7 y 8,5 °C/km, que indica una atmósfera estable). La temperatura ambiente en tierra era de 30 °C, pero los sensores estaban expuestos a luz solar directa, por lo que su medida en tierra es ligeramente superior (DS-1 30,2 °C, DS-2 32,4 °C y TM-1 30,9 °C).

Conforme el UAV se eleva, la temperatura disminuye, como era de esperar. Sin embargo, cuando empieza el descenso, las lecturas no son las mismas que a la subida, sino que disminuyen. Esta situación podría explicarse dado que toda la estructura se ha enfriado con el movimiento de aire generado por los rotores. Los sensores aún no se ha podido aislar, de manera tal que no se vean afectados por éste enfriamiento.

3.5 Presión atmosférica

Las medidas de presión atmosférica son las que mayor precisión presentan. Las variaciones entre un día y otro son muy similares, y los resultados razonables para las condiciones de la ciudad de Cochabamba (Figura 9):

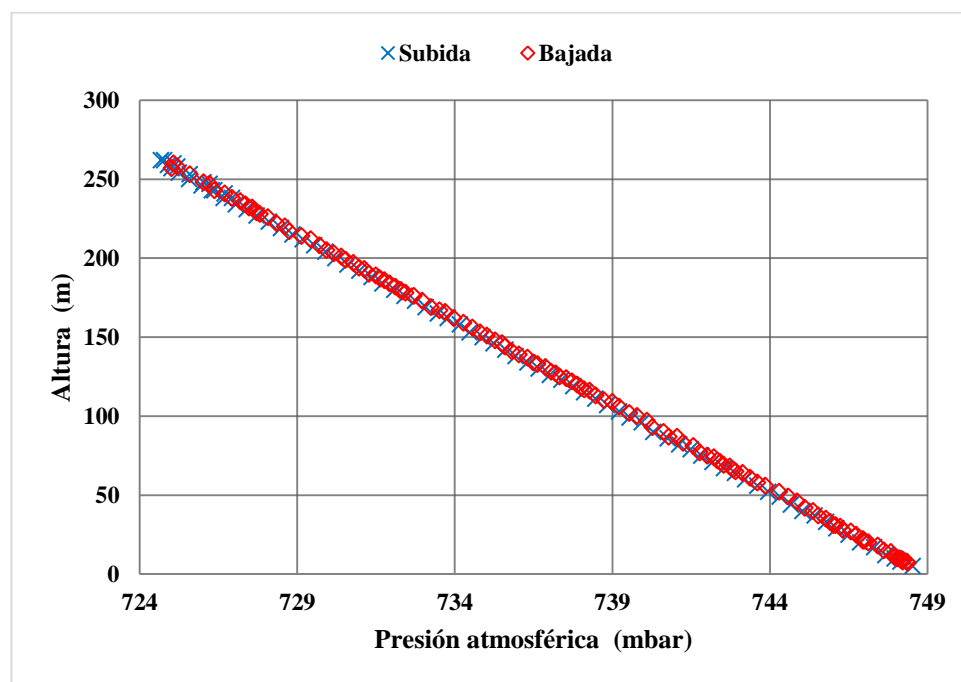


Figura 9: Perfil vertical de presión atmosférica, el día 24 de noviembre de 2015, a las 08.15 am.

4 Conclusiones y Recomendaciones

Los resultados preliminares muestran que es posible monitorear ciertos componentes atmosféricos clave utilizando un UAV y un sistema de medición especialmente adaptado al mismo. Sin embargo, es necesario llevar a cabo más pruebas, para determinar la posición óptima de cada uno de los sensores.

El UAV ha demostrado ser lo suficientemente estable como plataforma de medición. En principio se definió una altura máxima de vuelo de 300 m por razones de seguridad, pero será posible elevar este límite una vez todos los sensores hayan sido validados adecuadamente. Sin embargo, es necesario estudiar y eliminar la influencia del vuelo del UAV en parámetros tales como la temperatura.

Entre los componentes estudiados, CO y O₃ muestran valores razonables comparados con estudios realizados por la red MoniCA (alrededor de 7 mg/m³ y 24 µg/m³, respectivamente) (12, 21).

En el caso de PM₁₀, a falta de datos específicos por parte de los fabricantes y pruebas de calibración, el sensor elegido no es adecuado para detectar PM₁₀. Es probable que cualquier sensor que utilice el mismo principio de medida que el utilizado, no sea adecuado para un sistema aéreo.

Los resultados obtenidos con el sensor de presión atmosférica son razonables (alrededor de 750 mbar en superficie), aunque aún se debe comparar su precisión y exactitud con los instrumentos adecuados en tierra (por ejemplo, la red MoniCA).

La temperatura es la variable más complicada de medir, a tenor de las pruebas realizadas. Queda claro que la posición en la que se encuentre el sensor respecto a los rotores y a los componentes electrónicos es clave para la exactitud de la medida. Sin embargo, el perfil de temperatura obtenido en subida tiene el comportamiento esperado. No se han realizado pruebas para definir la influencia que tiene el propio sensor en la lectura de la temperatura ambiente, pero en base a otros trabajos en desarrollo actualmente, parece rondar los 0,8° C.

Los sensores de temperatura son influenciados por el enfriamiento de toda la estructura. Es necesario modificar la posición de cada uno de manera tal que no se vean afectados.

Una parte importante y necesaria para validar los datos es añadir barras de error en cada uno de las variables estudiadas. Es parte del trabajo en ejecución actualmente, que se presentará en un artículo posterior.

La calibración de los sensores es también una necesidad vital para la correcta interpretación de los resultados. Se espera lograr una respuesta positiva por parte del Gobierno Autónomo Municipal de Cochabamba, para acceder a las estaciones de la red MoniCA.

Agradecimientos

Éste trabajo no habría sido posible sin el apoyo decidido de la Fundación Jala, dado que Sergio Vargas Villar trabajó en el UAS Research mientras preparó el proyecto, y de que la plataforma de vuelo (el UAV) es propiedad de la Fundación Jala.

Referencias bibliográficas

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2013.
- [2] STULL, R B. Mean Boundary layer characteristics. In : An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Kluwer Academic Publishers, 1988. p. 1–28.
- [3] IPCC. CLIMATE CHANGE 2013 - They Physical Science Basis - Frequently Asked Questions. CLIMATE CHANGE 2013 - The Physical Science Basis. 2013. P. 78. DOI doi:10.1017/CBO9781107415324.

- [4] ALVARADO, Sonia, LUJÁN, Marcos and BOMBLAT, Christian. Modelación de las emisiones del parque automotor en la ciudad de Cochabamba - Bolivia. *Acta Nova*. 2004. Vol. 2, no. 4, p. 493.
- [5] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. Cir. 328 AN/190, Unmanned Aircraft Systems (UAS). Montréal, Quebec, Canada, 2011.
- [6] ANAC, Administración Nacional de Aviación civil de Argentina. No Title. Proyecto Normativa para Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV) [online]. 2015. [Accessed 7 March 2016]. Available from: <http://www.anac.gov.ar/anac/web/index.php/1/1088/raacdna-bajo-proceso-de-elaboracion-participativa-de-normas-decreto-117203/-ltpre-gtproyecto-normativa-para-vehiculos-ltbr-gtaereos-no-tripulados-uav-ltpre-gt>
- [7] AGENCIA ESTATAL DE SEGURIDAD AÉREA DE ESPAÑA. Real Decreto-ley 8/2014, de 4 de julio, de aprobación de medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia. *Boletín Oficial del Estado*, 163-2015 [online]. 2015. Available from: <http://aedron.com/legislacion/>
- [8] LANGE, D., ROCADENBOSCH, F., TIANA-ALSINA, J. and FRASIER, S. Atmospheric Boundary Layer Height Estimation Using a Kalman Filter and a Frequency-Modulated Continuous-Wave Radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2015. Vol. 53, no. 6, p. 3338–3349. DOI 10.1109/TGRS.2014.2374233.
- [9] COHN, Stephen A. and ANGEVINE, Wayne M. Boundary Layer Height and Entrainment Zone Thickness Measured by Lidars and Wind-Profiling Radars. *Journal of Applied Meteorology*. 3 August 2000. Vol. 39, no. 8, p. 1233–1247. DOI 10.1175/1520-0450(2000)039<1233:BLHAEZ>2.0.CO;2.
- [10] TACONET, Odile and WEILL, Alain. Convective plumes in the atmospheric boundary layer as observed with an acoustic Doppler sodar. *Boundary-Layer Meteorology*. February 1983. Vol. 25, no. 2, p. 143–158. DOI 10.1007/BF00123971. Referenciado En Stull...
- [11] EMEIS, Stefan, SCHÄFER, Klaus, MÜNKEL, Christoph, SCHÄFER, Klaus and MÜNKEL, Christoph. Observation of the structure of the urban boundary layer with different ceilometers and validation by RASS data. *Meteorologische Zeitschrift*. 1 April 2009. Vol. 18, no. 2, p. 149–154. DOI 10.1127/0941-2948/2009/0365.
- [12] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y AGUA. Informe nacional de Calidad del Aire de Bolivia, Gestiones 2012-2014. 2015.

- [13] IBNORCA. Norma Boliviana NB 62011:2008, calidad del aire - Contaminantes criterio exterior - Límites máximos permisibles. 2008.
- [14] SICARD, M., PÉREZ, C., ROCADENBOSCH, F., BALDASANO, J. M. and GARCÍA-VIZCAINO, D. Mixed-Layer Depth Determination in the Barcelona Coastal Area From Regular Lidar Measurements: Methods, Results and Limitations. *Boundary-Layer Meteorology*. 17 December 2005. Vol. 119, no. 1, p. 135–157. DOI 10.1007/s10546-005-9005-9.
- [15] MOLERO, F, SICARD, M, GUZMÁN, F Navas, PREISSLE, J and AMODEO, A. Study on aerosol properties over Madrid (Spain) by multiple instrumentation during SPALI10 lidar campaign Estudio de las propiedades de los aerosoles sobre Madrid (España) mediante multiples instrumentos durante la campaña lidar SPALI10. . 2012. Vol. 45, no. 4, p. 405–413.
- [16] HAAS, Patrick Y, BALISTRERI, Christophe, PONTELANDOLFO, Piero, TRISCONI, Gilles, PEKOZ, Hasret and PIGNATIELLO, Antonio. Development of an unmanned aerial vehicle UAV for air quality measurement in urban areas. In : 32nd AIAA Applied Aerodynamics Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2014. AIAA Aviation. doi:10.2514/6.2014-2272
- [17] SHARP CORPORATION. Compact Optical Dust Sensor datasheet. [online]. [Accessed 17 March 2016]. Available from: https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/gp2y1010au_e.pdf
- [18] FUTURLEC. Technical Data MQ-131 Gas sensor. [online]. [Accessed 17 March 2016]. Available from: http://www.futurlec.com/Ozone_Gas_Sensor.shtml
- [19] HANWEI ELECTRONICS. Technical Data MQ2 Gas sensor. [online]. [Accessed 17 March 2016]. Available from: <https://www.seeedstudio.com/depot/datasheet/MQ-2.pdf>
- [20] MEASUREMENTS SPECIALTIES. Pressure Sensor - MS5611-01BA03. [online]. [Accessed 17 March 2016]. Available from: <http://www.meas-spec.com/product/pressure/MS5611-01BA03.aspx>
- [21] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y AGUA. Informe Nacional de la Calidad del Aire de Bolivia, Gestiones 2008 - 2009. 2010.
- [22] LUJÁN, Marcos. Red de Monitoreo de la Calidad del Aire Red MoniCA. Cochabamba, 2010.
- [23] STULL, R B. Measurements and simulation techniques. In : *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, 1988. p. 405–440.

- [24] SAEED, U, ROCADENBOSCH, F. and CREWELL, S. Synergetic use of LiDAR and microwave radiometer observations for boundary-layer height detection. In : Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015 IEEE International. 2015. p. 3945–3948.