

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN GESTIÓN DE
RIESGOS Y CAMBIO CLIMÁTICO**

LICENCIATURA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

TESIS

**DETERMINACIÓN PRELIMINAR DE LA ALTURA DE
CAPA DE MEZCLA MEDIANTE UN PROTOTIPO DE
VANT METEOROLÓGICO EN UNA ZONA DE LA
CIUDAD DE TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS.**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

PRESENTA

LILIANA RENDÓN VÁZQUEZ

DIRECTOR

DR. WILLIAMS VÁZQUEZ MORALES

ASESOR

ING. GUSTAVO VÁZQUEZ CRUZ

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS. ENERO 2020.



AGRADECIMIENTOS

Al **Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) No. UNICACH-EXB-109**, por la beca otorgada que permitió la realización de este proyecto de titulación

Al **Dr. Williams Vázquez Morales** quien fue responsable de dirigir este proyecto y me permitió integrarme a esta investigación, así como el permitirme acceder a la beca otorgada por **PRODEP**. Compartiendo sus conocimientos hizo posible culminar este trabajo. Asimismo, por brindar el espacio para trabajar, apoyo, confianza, *amistad* y todos los recursos otorgados como la impresión de esta tesis.

Al **Ing. Gustavo Vázquez Cruz** por la asesoría, seguimiento y aportaciones que realizó al proyecto.

Al **Dr. Emmanuel Díaz Nigenda**, por formar parte del equipo de trabajo en el proyecto, gracias a sus aportaciones, comentarios y revisiones.

Al **Lic. Oscar Isaac Rascón López**, por la disposición de formar parte del equipo en este trabajo y apoyo otorgado. Compartiendo sus conocimientos de meteorología, fue una guía imprescindible en esta investigación.

A la **Mtra. Andrea Venegas Sandoval** por el apoyo durante el proceso y darme tiempo para continuar trabajando mi tesis, visitar a mis asesores aun estando en horarios laborales. Pero sobre todo por sus ánimos y la amistad.

Al **Ing. Emmanuel Eduardo Sánchez López**, por nuestra amistad de antaño y las asesorías en programación.

Al **Ing. Jesús Ernesto Velázquez** por el acompañamiento y asesoría con el manejo del VANT durante la campaña de monitoreo.

Al **Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático** de la **UNICACH** por haber sido mi casa de estudios durante todo el proceso de mi formación académica, además del apoyo brindado con los espacios necesarios para la realización de este proyecto.

DEDICATORIA

A mis padres **Elvira y Yoni**

Gracias por su amor y apoyo incondicional. Sin la guía de ustedes jamás habría podido culminar esta etapa.

Este trabajo es un fruto de ustedes.

Me esforzare cada día para que se sientan orgullosos de mí y retribuirles por todo lo que han hecho. Los amo ♥

A **Nephtali**, quien ha sido un ejemplo a seguir en mi camino académico, ayudado en todos mis sueños y con la motivación a seguir soñando, a creer que todo es posible. Gracias por tu compañía.

Je t' aime...

xD

A mi hermana **Betty**, quien siempre me ha apoyado y motivado a cumplir este sueño, en los momentos de mayor dificultad para mí, sé que cuento contigo.

A **mis amigos**, por la amistad, el respaldo y los consejos que siempre me han brindado me ha permitido mantenerme de pie y a no perder la alegría. Su compañía ha sido de gran bendición a mi vida, sin duda un regalo de Dios. En especial **Andrea y Kisai....**

Les estaré siempre agradecida.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. La atmósfera y su composición.....	3
2.2. Estratificación Atmosférica.....	4
2.3. Temperatura del aire.....	7
2.4. Inversiones Atmosféricas.....	8
2.5. Altura de Capa de Mezcla.....	12
2.6. Equipos utilizados para determinar la altura de capa de mezcla.....	15
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
4. JUSTIFICACIÓN.....	17
5. ANTECEDENTES.....	19
6. OBJETIVOS.....	22
6.1. Objetivos Generales.....	22
6.2. Objetivos Específicos.....	22
7. ÁREA DE ESTUDIO.....	23
7.1. Localización Geográfica.....	23
7.2. Clima.....	24
7.3. Zona de medición.....	26
8. METODOLOGÍA.....	27
8.1. Micro Estación Meteorológica.....	27
8.2. Calibración.....	32
8.3. Montaje sobre el VANT.....	33
8.4. Campaña de Monitoreo y determinación de la altura de capa de mezcla.....	37
9. RESULTADOS.....	41
9.1. Ensamble de la Micro Estación Meteorológica (MEM).....	41
9.2. Calibración.....	42
9.3. Diseño de la carcasa.....	43
9.4. Pruebas piloto.....	46
9.5. Campaña de monitoreo.....	50
9.5.1. Determinación Preliminar de la Altura de Capa de Mezcla.....	52
10. CONCLUSIONES.....	67

11. RECOMENDACIONES.....	70
12. BIBLIOGRAFÍA.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Capas de la atmósfera.....	5
Figura 2. Intercambio energético del aire.....	8
Figura 3. Situación de Inversión Térmica.....	9
Figura 4. Esquema: Ilustrando la inversión de temperatura durante la noche por irradiación.....	11
Figura 5. Inversión térmica. (a) Esquema de la capa de inversión. (b) La inversión de temperatura provoca la acumulación de contaminantes.....	11
Figura 6. Altura de Capa de Mezcla.	13
Figura 7. Determinación de la altura de capa de mezcla.....	14
Figura 8. Mapa de ubicación geográfica de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.	23
Figura 9. Punto de las mediciones meteorológicas.	26
Figura 10. Placa Arduino Nano.....	28
Figura 11. Sensor de temperatura, humedad y Presión atmosférica (BME280).	30
Figura 12. RTC DS3231.....	30
Figura 13. Módulo socket tarjeta SD.....	31
Figura 14. Power Bank.....	32
Figura 15. Prueba de funcionamiento de la MEM vs HOBO.	33
Figura 16. Diferentes tipos de VANTs en el mercado.....	34
Figura 17. VANT DJI Phantom 4	34
Figura 18. VANT DJI Matrice 600 Pro.	36
Figura 19. Matrice 600 Pro en Vuelo.....	37
Figura 20. Determinación gráfica de la altura de capa de mezcla.....	38
Figura 21. Diagrama de conexiones de la Micro Estación Meteorológica.	41
Figura 22. Montaje de los sensores sobre placa fenólica.....	41
Figura 23. Grafica comparativa de temperaturas registradas por la MEM y el HOBO.	42
Figura 24. Diseño de la carcasa a través del software SketchUp.	43
Figura 25. Impresión de carcasa.	44
Figura 26. MEM sobre la carcasa diseñada.....	44
Figura 27. Sensores BME280 con carcasa.....	45
Figura 28. Micro Estación Meteorológica terminada.....	45
Figura 29. VANT DJI Phantom 4 en vuelo.	46
Figura 30. Carcasa adaptada al DJI Phantom 4.....	47
Figura 31. Sensor acondicionado sobre el VANT DJI Phantom 4.....	48
Figura 32. Montaje de la MEM sobre el VANT.	49
Figura 33. Gráfica de alturas máximas del VANT durante la campaña de monitoreo.	50
Figura 34. Gráfica de las alturas de capa de mezcla calculadas a partir del método gráfico.....	52
Figura 35. Gráfica de alturas de capa de mezcla calculadas a partir del método matemático	53

Figura 36. Perfil de temperatura ambiental y el perfil adiabático seco del 28 de enero.....	54
Figura 37. Perfil de temperatura ambiental y el perfil adiabático seco de 03 de febrero del 2019.....	57
Figura 38. Perfil de temperatura ambiental y el perfil adiabático seco del 04 de febrero del 2019.....	58
Figura 39. Perfil de temperatura ambiental y el perfil adiabático seco a) 09 de febrero del 2019 y b) 10 de febrero del 2019.....	59
Figura 40. Correlación entre resultados de método gráfico y matemático.....	59
Figura 41. Perfil de temperatura ambiental y el perfil adiabático seco del 23 de enero.....	61
Figura 42. Perfil de temperatura ambiental y el perfil adiabático seco del 24 de febrero.....	61
Figura 43. Perfil de temperatura ambiental y el perfil adiabático seco del 25 de enero.....	62
Figura 44. Condiciones Sinópticas del 22 al 25 de enero.....	62
Figura 45. Gráfica del 28 de enero del 2019.....	63
Figura 46. Condiciones sinópticas del 28 de enero.....	64
Figura 47. Fotografía del día de monitoreo 05 de febrero.....	64
Figura 48. Gráfica del 05 de febrero del 2019.....	65
Figura 49. Condiciones sinópticas del 05 de febrero.....	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición promedio de la atmósfera seca por debajo de los 25 km.....	3
Tabla 2 .Temperatura y Precipitación promedio de Tuxtla Gutiérrez.....	25
Tabla 3. Características del sensor BME280.....	29
Tabla 4. Características del Módulo Reloj en Tiempo Real DS3231.....	31
Tabla 5. Características del VANT DJI Phantom 4.....	35
Tabla 6. Características del Matrice 600 Pro-DJI.....	36
Tabla 7. Resultados de Altura de Capa de Mezcla con Método Gráfico y Matemático.....	56
Tabla 8 Clasificación de las alturas de capa de mezcla en relación con las condiciones atmosféricas.....	66

1. INTRODUCCIÓN.

La contaminación del aire es un problema causado principalmente por el desarrollo urbano, industrial y demográfico que demanda el uso de bienes y servicios con la consecuente generación de emisiones contaminantes a la atmósfera, esto representa una amenaza para la salud en todo el mundo (INECC, 2014).

Según el censo del INEGI (2010), 49% de la población en Chiapas se concentra en zonas urbanas mientras que el 51% lo hace en zonas rurales, con estos datos podemos observar que casi la mitad de la población del Estado se encuentra en desarrollo urbano, ante esta situación las investigaciones y el planteamiento de programas sociales sobre la calidad del aire toman relevancia debido a que actualmente existe poca información al respecto en Chiapas.

La Secretaria de Medio Ambiente e Historia Natural (SEMAHN, 2018) señala a Tuxtla Gutiérrez como el principal emisor de contaminantes atmosféricos en el Estado de Chiapas, mayormente por combustión de tipo doméstica y agrícola. Esto nos señala la importancia del estudio de la calidad del aire, considerando la medición de contaminantes, así como de las variables meteorológicas que permiten la dispersión o concentración de los contaminantes, esto permite entender de mejor manera el comportamiento de la contaminación atmosférica local.

Para realizar el monitoreo meteorológico se emplean diversos equipos e instrumentos especializados como estaciones meteorológicas fijas, radiosondas, sistemas SODAR, así como globos cautivos, que suelen ser costosos o de difícil manejo. Por otro lado, actualmente el avance tecnológico genera alternativas de nuevos instrumentos de medición que brindan soluciones prácticas, rápidas y eficaces como los sensores programables de bajo costo.

Sin embargo, otro de los mayores problemas en el estudio de la atmosfera es la medición de variables en la altura, por ello el VANT (Vehículo Aéreo no Tripulado)

es una excelente alternativa ya que la versatilidad de usos que se les puede dar a los VANTs hace que sean empleados en diversas áreas de investigación científica, como por ejemplo en este estudio se utilizó para el área de meteorología.

Partiendo de este contexto en general, se desarrolló el presente trabajo con la finalidad de generar una alternativa de monitoreo atmosférico que consiste en aprovechar las bondades de los sensores programables de variables meteorológicas de presión, humedad y temperatura en conjunto de otros módulos que permitieron la invención de una micro estación meteorológica, capaz de ser montada sobre un VANT, para lograr realizar mediciones en la atmosfera vertical obteniendo una base de datos a la que posteriormente se sometió a un tratamiento cuantitativo y un análisis meteorológico, de esta manera poder calcular la altura de capa de mezcla en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

La importancia de medir la altura de capa de mezcla es porque constituye una de las principales variables a medir en un monitoreo de la calidad de aire, pues determina el volumen de aire disponible para la dispersión de contaminantes.

2. MARCO TEÓRICO.

2.1. La atmósfera y su composición.

La atmósfera es la envoltura gaseosa que rodea a la Tierra (Ayllón, 2013). Está compuesta de gases y de partículas sólidas y líquidas en suspensión atraídas por la gravedad terrestre. En ella se producen todos los fenómenos climáticos y meteorológicos que afectan al planeta, regulan la entrada y salida de energía de la tierra y es el principal medio de transferencia del calor. Por compresión, el mayor porcentaje de la masa atmosférica se encuentra concentrado en los primeros kilómetros (UC, 2001).

Cada cuerpo celeste tiene una atmósfera propia, de características particulares. En el caso de la Tierra, la atmósfera seca, es decir, sin considerar el vapor de agua presente en ella (Canziani, 2000), está compuesta por los gases que se muestran en la tabla 1:

Tabla 1. Composición promedio de la atmósfera seca por debajo de los 25 km.

Componente	Símbolo	% en volumen (aire seco)	Peso molecular
Nitrógeno	N ₂	78.08	28.02
Oxígeno	O ₂	20.95	32.00
Argón	Ar	0.93	39.88
Dióxido de carbono	CO ₂	0.035	44.00
Neón	Ne	0.0018	20.18
Helio	He	0.0005	4.00
Ozono	O ₃	0.00006	48.00
Hidrógeno	H	0.00005	2.02
Criptón	Kr	0.0011	
Xenón	Xe	0.00009	
Metano	CH ₄	0.00017	

Fuente: Barry y Chorley (1999).

Muñoz (citado en Navarro, 2010) en su manual de vuelo explica que la distribución de los gases que componen a la atmosfera se debe a que cada uno tiene un peso distinto, por ende, existe una tendencia natural donde los elementos más pesados tienden a permanecer en las capas más bajas (por ejemplo: oxígeno) mientras que los más ligeros se encuentran en las capas más altas. Esto explica el por qué la mayor parte del oxígeno se encuentra por debajo de los 10,600 metros de altitud, y por que a medida que se asciende disminuye la cantidad de oxígeno presente en la atmósfera.

A estos constituyentes hay que añadir el vapor de agua concentrado en las capas más bajas, cuya cantidad depende de las condiciones climatológicas y la localización geográfica, pudiendo variar entre el 0% y el 5%. A medida que aumenta el vapor de agua, los demás gases disminuyen proporcionalmente (Navarro, 2010).

Dentro de la atmósfera también están presentes numerosas partículas suspendidas de sales marinas, polvo, materia orgánica o de origen industrial llamadas “aerosoles”, procedentes de la superficie terrestre. La concentración en el tiempo y el espacio de los aerosoles está influenciada fundamentalmente por la actividad volcánica y humana.

2.2. Estratificación Atmosférica.

Basado en los cambios de temperatura se pueden distinguir las diferentes capas de la atmosfera: troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera o ionosfera (figura 1).

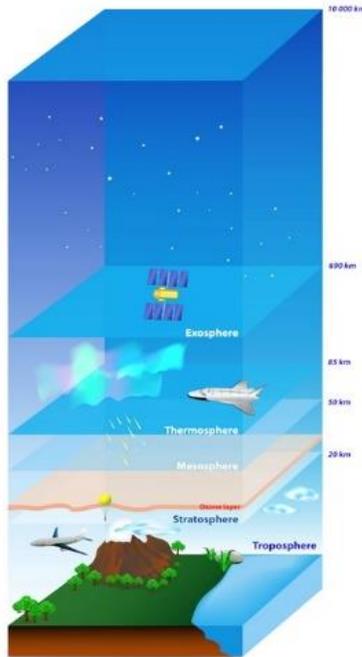


Figura 1. Capas de la atmósfera. (GeoEnciclopedia, 2019).

A continuación, se describirán las capas de la atmósfera desde la más externa, hasta la más cercana a la superficie terrestre, profundizando en esta última debido a que nuestra unidad de estudio se encuentra en esta capa.

Exosfera: Es la última capa, la más externa hasta conectarse con el viento solar. Comprende el área desde la parte superior de la termosfera hasta unos 10,000 kilómetros de altura hasta perderse en el vacío del espacio interplanetario.

Termosfera o Ionosfera: Desde el límite superior de la mesopausa se extiende la termosfera, conocida como atmósfera superior. Se extiende hasta los 500-1,000 kilómetros, El aumento de temperatura en esta región se debe al bombardeo de nitrógeno y oxígeno moleculares y de especies atómicas por partículas energéticas, como los electrones y protones, provenientes del Sol.

En sentido inverso, estos procesos liberan a su vez una cantidad equivalente de energía principal en forma de calor. Las partículas ionizadas son las responsables de que las ondas de radio se reflejen y regresen a la tierra.

La mesosfera: Se localiza sobre la estratosfera, la concentración de ozono y otros gases es baja y la temperatura disminuye a medida que aumenta la altitud. Es importante por la ionización y las reacciones químicas que ocurren en ella y los meteoritos desintegrados (estrellas fugaces).

La estratosfera: Se localiza por encima de la troposfera y tiene un espesor aproximado de 30 Km. En esta región, la temperatura del aire aumenta con la altitud. Su temperatura es más caliente que la de la troposfera debido a que la capa de ozono absorbe un 97-99 por ciento de la luz ultravioleta del Sol. La capa de ozono es una región de la estratósfera que bloquea los rayos solares e impide que lleguen a los seres vivos en su forma dañina.

Troposfera: Es la capa más baja de la atmósfera y la más próxima a la superficie terrestre, contiene aproximadamente el 75% de la masa total de los gases que constituyen la atmósfera. Es la capa más activa pues el aire ubicado ahí está en constante movimiento y casi todo el vapor de agua de la atmósfera está concentrado en ese punto (Domínguez, 2014). Sus características principales son:

- La temperatura disminuye con la altura, aproximadamente 0.6 °C por cada 100 m en el aire húmedo, y 1°C/100 m en aire seco. A dicha disminución se le llama gradiente térmico vertical.
- En esta capa se producen movimientos convectivos; es decir, corrientes ascendentes de aire, provocadas principalmente por el calentamiento de las capas bajas del aire. Siendo por ello una capa muy inestable.
- Todos los fenómenos meteorológicos se producen en esta capa atmosférica.
- Tiene como límite superior la tropopausa, que se localiza a 17 km de altura en la zona ecuatorial, y a 8 km en las zonas polares.

- En su límite superior la temperatura es de 50°C bajo cero aproximadamente.

La región limítrofe de la troposfera que la separa de la estratosfera, se llama tropopausa. Ahí la temperatura no experimenta variaciones con la altura.

2.3. Temperatura del aire.

La temperatura es un índice indicativo del calentamiento o enfriamiento del aire que resulta del intercambio de calor entre la atmósfera y la tierra (INIA, 2008). El calor se transmite por: conducción, convección, turbulencia y radiación.

La *conducción* consiste en la transferencia de calor de partícula a partícula, es decir, cuando dos cuerpos se encuentran en contacto directo. En el caso de la *convección* las partículas en movimiento se dilatan, pierden densidad y ascienden, las frías que están encima descienden, produciendo corrientes de ascenso y descenso de origen térmico, mediante las cuales se transmite el calor.

En la *turbulencia* existe un movimiento desordenado de las partículas de aire de origen mecánico (por fricción), que da lugar a que las partículas frías ocupen el lugar de las partículas caldeadas y viceversa (Ayllón, 2013).

La *radiación* consiste en la transferencia de calor de un cuerpo a otro, sin que exista contacto entre ellos. Tal es el caso del Sol, que envía grandes cantidades de energía en varias direcciones.

La temperatura del aire se debe principalmente a la radiación calorífica del suelo. Durante el día las capas inferiores del aire se calientan; al dilatarse disminuye su densidad y se produce el ascenso del aire caliente, el cual se enfría a medida que se eleva.

La compresión o expansión que sufre el aire también influye en la variación de la temperatura. Si se comprime un gas, el trabajo mecánico de la compresión se convierte en calor y produce un aumento de temperatura.

Si el gas se expande, gasta una parte de su propio calor en forma de trabajo, por lo cual disminuye su temperatura.

Cuando un volumen de aire asciende va disminuyendo su presión y, por tanto, se expande y enfría. Si desciende, se comprime y aumenta su temperatura (proceso adiabático). El valor del gradiente térmico de estas variaciones con la altura depende de varias circunstancias; entre ellas la temperatura del suelo, la liberación de calor latente por condensación del vapor de agua y la velocidad con que se mueve el aire (Andrades y Muñoz, 2012). En promedio se calcula un gradiente de $6^{\circ}.5 \text{ C/km}$ de altura (figura 2).

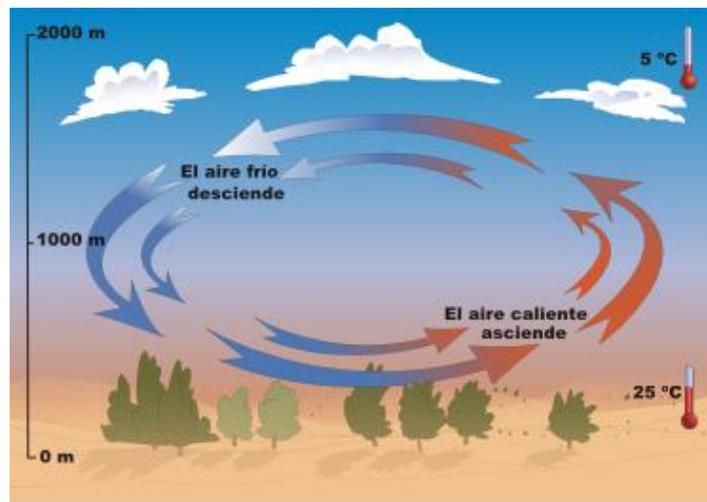


Figura 2. Intercambio energético del aire (Ojeda, 2018).

2.4. Inversiones Atmosféricas.

Los movimientos del aire sobre la superficie terrestre son factores importantes en la creación y dispersión de fenómenos de contaminación del aire. Si cesan los movimientos de aire, la concentración de contaminantes puede aumentar localmente.

Normalmente como ya se ha mencionado, la temperatura en la troposfera disminuye con la altura. Sin embargo, hay circunstancias en donde sucede lo contrario a determinada altura y, entonces se tiene una inversión de temperatura, condición asociada a problemas de contaminación (figura 3). De acuerdo al IDEAM (2012), existen diferentes formas en la generación de las inversiones de temperatura:

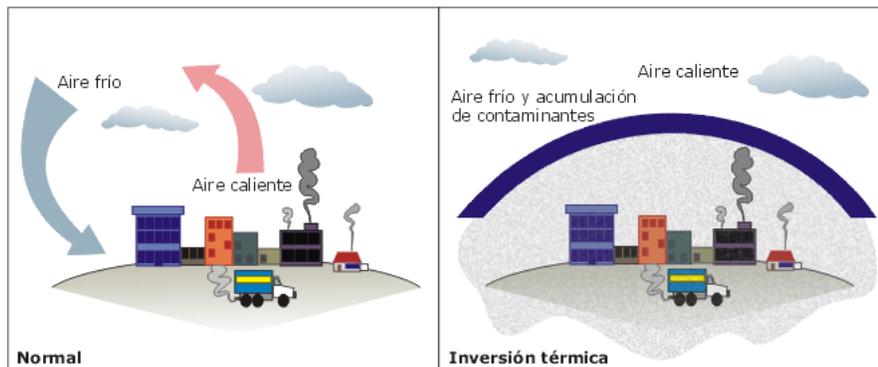


Figura 3. Situación de Inversión Térmica (Silverio, 2016).

a) Inversión de subsidencia.

Se forma en la vecindad de un área de altas presiones. El aire frío de las capas altas comienza a descender para ocupar el sitio del aire superficial que tiende a desplazarse a la zona de baja presión. El aire que va descendiendo se comprime debido al aumento de presión, calentándose y atrapando debajo aire más frío, al mismo tiempo se esparce horizontalmente. Su espesor, al principio de varios metros se va reduciendo al seguirse comprimiendo hasta grosores de 100-200 m, aumentando más la diferencia de temperatura y disminuyendo la humedad relativa. Suelen cubrir grandes superficies, a veces durante casi todo el anticiclón (zona estable de altas presiones).

b) Inversiones por Advección.

Las inversiones por advección están relacionadas con el flujo horizontal del aire cálido. Cuando este se mueve sobre una superficie fría, los procesos de conducción y convección enfrían el aire más cercano a la superficie y conducen a una inversión basada en la superficie. Este tipo de inversión es más común durante el invierno cuando el aire cálido pasa sobre una superficie cubierta de nieve o extremadamente fría.

c) Inversión Frontal.

La inversión frontal se forma cuando una capa de aire relativamente frío cerca del suelo pasa por debajo de una capa de aire relativamente cálido y menos denso y lo desplaza hacia arriba, levantándolo. Este proceso de formación de una inversión ocurre con el paso de un frente frío. También puede formarse una inversión frontal cuando una capa de aire relativamente cálido asciende por encima de una capa de aire más frío y más denso cerca del suelo. Este proceso de formación de una inversión ocurre con el paso de un frente cálido.

En ambos casos, durante el día a menudo una capa de estratos define el límite superior de la inversión frontal. Por la noche, puede formarse niebla en el aire más frío, que es húmedo y estable, dentro de la capa de inversión.

d) Inversión por irradiación.

En las noches claras la superficie terrestre se enfría rápidamente, irradiando su calor a la atmósfera y enfriando más el aire cercano a la superficie que el situado a alturas superiores. Esto produce la inversión ilustrada en la parte (a) de la figura 4. A la mañana siguiente la radiación solar calienta la superficie y el aire cercano a ella, parte (b), produciéndose una capa limitada de mezclado.

Durante el día el aire se sigue calentando y es probable que la inversión desaparezca (c) (Figueruelo y Marino, 2004).

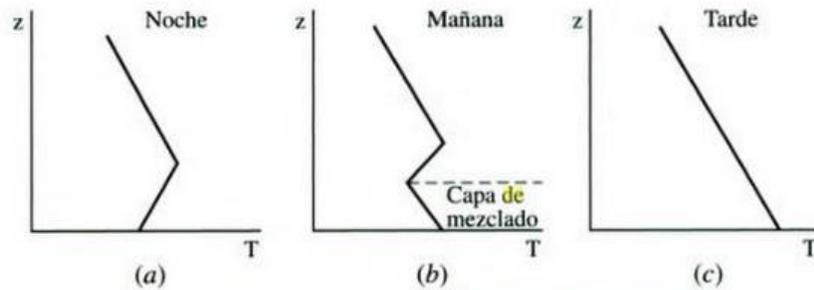


Figura 4. Esquema: Ilustrando la inversión de temperatura durante la noche por irradiación. (Figueruelo y Marino, 2004).

El concepto de inversión de temperatura describe en general una capa de aire muy (PI) estable. Desde el punto de vista meteorológico se conoce como puntos de inversión a aquellos puntos en los cuales el perfil de temperatura cambia de signo y como capa de inversión a la zona entre dos puntos de inversión, la base y la cima de la capa de inversión. Figueruelo y Marino (2004) lo explican a través de la figura 5 que se puede observar a continuación.

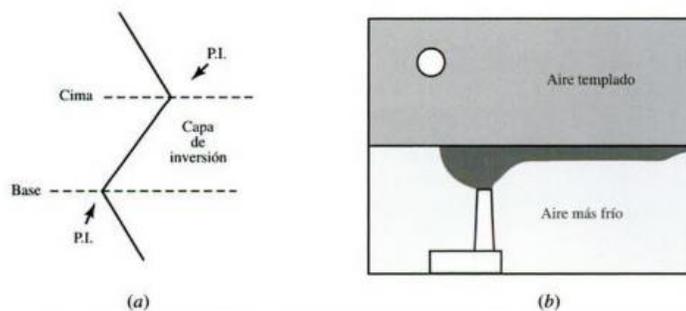


Figura 5. Inversión térmica. (a) Esquema de la capa de inversión. (b) La inversión de temperatura provoca la acumulación de contaminantes.

2.5. Altura de Capa de Mezcla.

Uno de los temas más relevantes en la meteorología urbana es el de la capa de mezcla, el cual, junto con las condiciones de estabilidad atmosférica, tiene estrecha relación con el comportamiento de los ciclos de concentración de contaminantes en el aire (Jiménez, 2016).

Puigcerver y Carrascal (2008) definen capa de mezcla a la porción de la capa fronteriza más próxima al suelo, en la que la estratificación es con frecuencia indiferente o inestable y la mezcla vertical tiene lugar fácilmente. Su espesor se podría comparar con la altura hasta la cual se dispersan los contaminantes.

A medida que la insolación calienta al suelo y la convección se va desarrollando, aumenta el espesor de la capa de mezcla.

De otro modo Moragues, (2002) lo explica de la siguiente forma: la mayor parte de los contaminantes atmosféricos no llegan a ascender más de unos cuantos centenares de metros debido a que el aire en esta zona de la atmósfera está en contacto con la superficie terrestre y su movimiento está afectado por la rugosidad del terreno. Este fenómeno da lugar a que se produzcan turbulencias y en consecuencia que tenga lugar una mezcla constante de los componentes atmosféricos. Es por esta razón que a esta zona más baja de la atmósfera terrestre se denomina capa de mezcla. La capa de mezcla puede interpretarse como el espesor de atmósfera en que se difunden (se mezclan) los contaminantes. El espesor de la capa de mezcla dependerá de las condiciones de la atmósfera, en particular de la clase de estabilidad, de la radiación solar, de la velocidad del viento y del tipo de terreno.

El punto en el que la porción de aire que se enfría en el gradiente vertical adiabático seco intersecta la "línea" del perfil de la temperatura ambiental se conoce como altura de mezcla (figura 6). Este es el nivel máximo al que la porción de aire puede ascender (Moragues, 2002).

Cuando no se produce ninguna intersección (cuando el gradiente vertical ambiental es mucho mayor que el gradiente vertical adiabático), la altura de mezcla se puede extender a mayores alturas en la atmósfera. El aire que se encuentra debajo de la altura de mezcla conforma la capa de mezclado. Mientras más profunda sea esta capa, mayor será el volumen de aire disponible para la dispersión de los contaminantes.

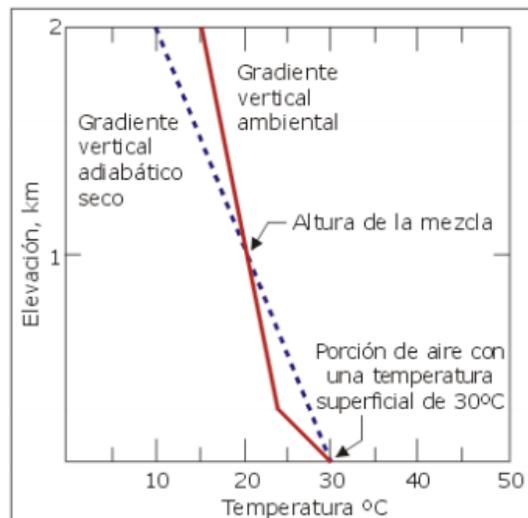


Figura 6. Altura de Capa de Mezcla.

Fuente: Moragues (2002) Clasificación de la estabilidad.

Para la determinación de la altura de capa de mezcla se pueden emplear dos procedimientos:

1. Basado en los datos correspondientes a los perfiles de temperatura en función de la altura:

Para ello se debe contar con datos de radiosondeo para calcular la altura de capa de mezcla, se utiliza un método que consiste en buscar la intersección de los datos tomados del radiosondeo y la adiabática seca (figura 7).

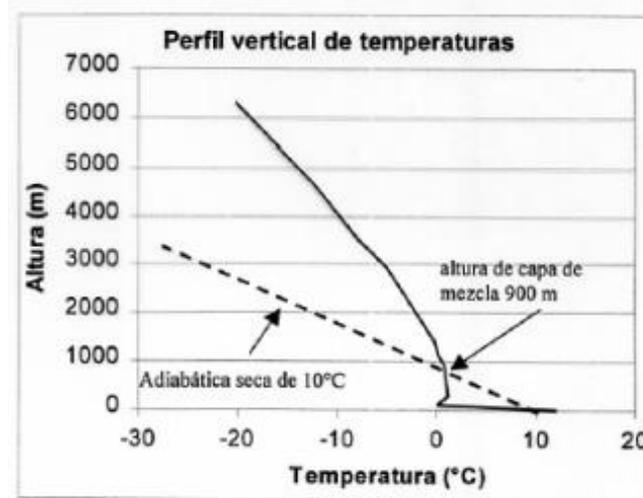


Figura 7. Determinación de la altura de capa de mezcla. La línea punteada denota el gradiente vertical adiabático seco, la línea sólida los datos del radiosondeo.
Fuente: Moragues (2002) Clasificación de la estabilidad

Para el caso urbano, se determina una altura mínima, en función de la temperatura mínima matutina observada más 5° C, y una altura máxima, en función de la máxima temperatura vespertina observada. Para el caso rural, debido a la ausencia de edificación no se produce el fenómeno de retención de calor, por lo que el valor de altura mínima se toma nulo.

Distinto al método anteriormente mencionado para la determinación de la altura de capa de mezcla, se puede emplear un procedimiento basado en los datos correspondientes a los perfiles de temperatura, cálculo de la velocidad de fricción, parámetro de Coriolis y longitud de Monin Obukhov mediante estas ecuaciones se caracteriza un perfil logarítmico y desviación estándar de las fluctuaciones turbulentas de la velocidad del viento con respecto a la altura, tomando en cuenta la estabilidad atmosférica.

2.6. Equipos utilizados para determinar la altura de capa de mezcla.

Para la determinación de la altura de capa de mezcla, es necesario contar con datos del perfil vertical de temperatura, que para ello se suelen utilizar torres meteorológicas provistas de varios sensores colocados estratégicamente a diferentes alturas con idea de analizar las variables meteorológicas y/o los flujos turbulentos de las capas bajas de la atmósfera. También se utilizan sistemas basados en ondas sonoras como el SODAR o haces luminosos como el Lidar¹. La documentación sobre los niveles superiores suele obtenerse mediante la utilización de aviones instrumentados o mediante el lanzamiento de globos aerostáticos provistos de sondas meteorológicas especialmente diseñadas para la medida y transmisión de la información a una estación receptora situada en superficie. Estos equipos instrumentales han permitido analizar la validez de las formulaciones utilizadas para el cálculo de la altura de la capa límite, así como desarrollar nuevas expresiones que se ajustan mejor a lo observado en la naturaleza.

¹ <https://aws-dewi.ul.com/knowledge-center/webinars/lidar-y-sodar-funcionamiento-operacion-usos-y-limitaciones/>

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La Ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, cuenta con una población de 598, 710 habitantes con una tasa de crecimiento anual del 1.9% (INEGI, 2015). Este crecimiento acelerado genera a la par problemas de tipo ambiental, como es el caso de la mala calidad del aire que se llega a presentar en la ciudad, aunado a ello está relacionado con la forma en la que los contaminantes emitidos se diluyen en la atmosfera, y esto depende de una condición meteorológica denominada altura de capa de mezcla, que para el caso de la ciudad no se cuenta con registros de monitoreo de esta capa de mezclado.

Como se ha mencionado, para generar datos del perfil vertical de la temperatura y con ellos determinar la altura de capa de mezcla, se emplean diversos instrumentos especializados, los cuales tienen costos elevados tanto para su adquisición como para su operación, y para algunas instituciones es incosteable realizar dichas mediciones, por lo que hace necesario incursionar en la innovación tecnológica y así generar la base de datos necesaria.

En este sentido, al tener esta carencia en instrumentación y, por consiguiente, información, no se pueden generar análisis con fundamentos sobre del grado de contaminación atmosférica y las afectaciones que puede ocasionar en la población y el ambiente.

4. JUSTIFICACIÓN.

De acuerdo al Programa Municipal ante el Cambio Climático (PROMACC), Tuxtla Gutiérrez emitió 1, 708,447 t CO₂e² en el año 2010, estas emisiones crecieron un 51.5% en el periodo 2005-2012. La principal fuente de emisión es el transporte con un 41%, seguido por el cambio de uso de suelo (pérdida de cobertura forestal) con el 32%, los residuos sólidos con el 20%, el consumo de Gas LP residencial 6%, mientras que la agricultura y los procesos industriales representan menos del 1%. Teniendo en cuenta que la atmósfera es el medio en el que se liberan los contaminantes, el transporte y la dispersión de estas descargas depende en gran medida del estado en el que se encuentre la atmosfera, por ende, para realizar actividades relativas a la planificación y estudio de la calidad del aire es imprescindible comprender la meteorología de la contaminación del aire y su influencia en la dispersión de las sustancias contaminantes. (Ramos, Carrera y Magaña, 2006). Por ello la relevancia de este estudio radica en que la altura capa de mezcla constituye uno de los parámetros básicos a medir en un monitoreo de la calidad del aire, debido a que es uno de los insumos necesarios en los métodos y/o modelos predictivos de diagnóstico, que contribuyen a la evaluación de las concentraciones de los contaminantes ya que, con base a ella, se puede determinar el volumen donde los contaminantes estarán diluidos.

Sin embargo, para determinar la altura capa de mezcla son necesarias mediciones de variables meteorológicas en la vertical atmosférica, estas mediciones suelen ser muy costosas debido al uso de estaciones meteorológicas móviles o en su mayoría radiosondas que son globos de Helio en los que se les acondiciona sensores de temperatura, humedad y presión, la desventaja mayor de esta última técnica es que se pierden los sensores y esto suele ser altamente incosteable.

² Toneladas de CO₂ equivalente.

Considerando lo anterior, surge la necesidad de crear o implementar prototipos de bajo costo que permitan medir los parámetros necesarios para la determinación de la altura de capa de mezcla, dado que para medir esta variable es necesario realizar mediciones en la atmosfera vertical, lo cual es la idea central de este trabajo de investigación.

5. ANTECEDENTES.

En el año de 1904, Ludwig Prandtl un ingeniero alemán que trabajaba dentro del campo de la aerodinámica en el estudio de las corrientes fluidas afectadas por la presencia de obstáculos, publicó un artículo revolucionario en el campo de la Mecánica de Fluidos. Según Prandtl, en los flujos de los fluidos poco viscosos como en el aire o en el agua, el campo fluido puede dividirse en dos regiones: por un lado, una capa viscosa delgada o capa límite en las proximidades de superficies sólidas, donde los efectos viscosos son importantes, y por otro lado, una región exterior que se podía analizar con las ecuaciones de Euler y de Bernoulli. Este trabajo marcó el comienzo del desarrollo de la teoría sobre la capa límite consolidándose como la herramienta más importante en el análisis de los flujos que caracterizan a los fluidos.

Estos descubrimientos sobre la capa límite en fluidos tuvieron una importante repercusión en los campos de la ingeniería aplicada a las áreas de la Hidráulica, la Aerodinámica, la Mecánica de Fluidos y la Termodinámica, y en las ciencias de la Oceanografía y de la Meteorología. De esta forma, la adopción del término de capa límite en las Ciencias Atmosféricas surgió como consecuencia de la aplicación de las teorías desarrolladas para fluidos al escenario de la atmósfera real. Al principio, se consideró que la capa límite atmosférica tendría una estructura similar que la que se manifestaba en experiencias de laboratorio con fluidos.

Sin embargo, la importancia que tiene el conocimiento de la altura de la capa de mezcla, en cuanto a su vinculación con los estudios de contaminación atmosférica, comenzó a ser evidente desde la década de los años 60 del siglo pasado (Holzworth, 1967; Miller, 1967). Debido a la necesidad de determinar el espesor de capa límite, se impulsó el desarrollo de diferentes equipos mediante los cuales se derivaban entre otras variables, la profundidad de dicha capa.

Holzworth (1967) desarrolló una metodología para estimar el espesor de la capa de mezcla, quien la diseñó para aplicarse en los aeropuertos como parte de los estudios meteorológicos que permiten una navegación aérea más segura. En esta

se requiere conocer el perfil térmico atmosférico (el cual se asume constante a lo largo del día), y también se requiere construir, a las dos condiciones extremas de temperatura del día, los perfiles adiabáticos secos del aire. Los tres perfiles son esencialmente líneas rectas, a pesar de que en las primeras centenas de metros las temperaturas del perfil ambiental pueden ser oscilantes, debido a fenómenos de convección.

Para conocer el perfil atmosférico, Holzworth (1967) contempla liberar un globo sonda provisto de instrumentos meteorológicos (sensores de presión y de temperatura), capaces de enviar datos a control remoto. Los altos costos del estudio se deben a que en cada ensayo se pierden el globo y los instrumentos.

Utilizando la misma metodología Trejo y Villagómez (2011), la adaptan para desarrollar un modelo matemático propio, el cual es aplicado al método de Holzworth, para estimar altura de capa de mezcla en la atmósfera utilizando datos proporcionados por aviones comerciales. Dentro de este proyecto se propone en lugar de utilizar un costoso globo sonda para determinar el perfil térmico ambiental, obtener directamente datos de temperatura vertical desde un avión cuando despega.

Existen varios estudios para la determinación de la altura de capa de mezcla. Cada uno tiene diferentes métodos para hacerlo, sin embargo, una forma muy recurrente es, con ayuda de la aviación, obtener los datos verticales; con base en ello, la Universidad del Valle de México en el 2011, hacen una propuesta para aprovechar los aviones comerciales como medio para obtener información que conduzca a la estimación de la capa de mezcla en todas las ciudades que tengan aeropuerto.

Otra modalidad usada a menudo consiste en tomar la temperatura más baja que se registre entre las 00:00 y las 06:00 horas (tiempo local) y sumar a este dato los 5°C según la metodología de Holzworth. La altura mínima de capa de mezcla se ubica en el cruce del perfil térmico ambiental con el primer perfil del adiabático seco. El espesor máximo de la capa de mezcla se obtiene cruzando el perfil ambiental con el segundo perfil adiabático seco; el cual toma en este caso como temperatura del

piso, la temperatura máxima del día, la cual típicamente se presenta entre las 14:00 y las 18:00 horas, tiempo local (Trejo, Villagómez, 2011).

La importancia de las mediciones en la atmosfera ha tomado auge a través de los años, por ello se aprovecha el avance tecnológico para utilizar estas nuevas tecnologías y obtener datos de mayor precisión en cuando a las mediciones atmosféricas, tanto de variables meteorológicas como de contaminantes.

En este sentido, Vargas y Lange (2016) realizaron un trabajo, en el cual implementaron un sistema de medición de contaminantes criterio, tales como; (O_3), Monóxido de Carbono (CO), Material particulado (PM_{10}), temperatura y presión atmosférica. mediante el uso de un VANT en la ciudad de Bolivia, cabe destacar que el prototipo registrador de estos contaminantes fue generado por los investigadores mediante el uso de un registrador de placa reducida y sensores programables.

Yepes et al. (2017) mediante el uso de un VANT, generaron un instrumento de medición a través de sensores programables de bajo costo, el cual es capaz de medir las concentraciones de contaminantes alrededor de algunos rellenos sanitarios de la ciudad de Bolivia, lo anterior con la finalidad de determinar en dónde estaban las concentraciones más altas y sobre qué tipo de contaminantes eran los más dominantes.

Las investigaciones y estudios mencionados, muestran el desarrollo que se ha generado en torno a los métodos utilizados para la estimación de la altura de capa de mezcla, así como los medios que se emplean para lograr hacer las mediciones en la atmosfera vertical y la manera en la que actualmente los VANTs resultan una buena alternativa para realizar este tipo de mediciones en conjunto con otros módulos.

Con base a lo anterior, en el siguiente apartado se presentan los objetivos planteados para este trabajo de investigación.

6. OBJETIVOS.

6.1. Objetivos Generales.

- Implementar en un VANT sensores meteorológicos (temperatura, humedad y presión), mediante el uso de un computador (Arduino Nano).
- Determinar mediante un VANT meteorológico la altura de capa de mezcla en una zona de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

6.2. Objetivos Específicos.

- Instrumentar y programar en la placa computador reducida los sensores meteorológicos acorde a sus necesidades de funcionamiento.
- Establecer una campaña para la medición del perfil vertical de Temperatura
- Analizar los resultados obtenidos para determinar la de la altura de capa de mezcla.

7. ÁREA DE ESTUDIO.

7.1. Localización Geográfica.

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez es la capital del Estado de Chiapas, está ubicada en la Región Socioeconómica I METROPOLITANA; limita al norte con los municipios de San Fernando y Osumacinta, al este con el municipio de Chiapa de Corzo, al sur con el de Suchiapa y al oeste con los municipios de Ocozocoautla de Espinosa y Berriozábal (figura 8). Las coordenadas de la cabecera municipal son: 16° 45' 11" de latitud norte y 93° 06' 56" de longitud oeste y se ubica a una altitud de 522 metros sobre el nivel del mar. Con una superficie territorial de 334.61 km² ocupa el 0.45% del territorio estatal (CEIEG, 2013).

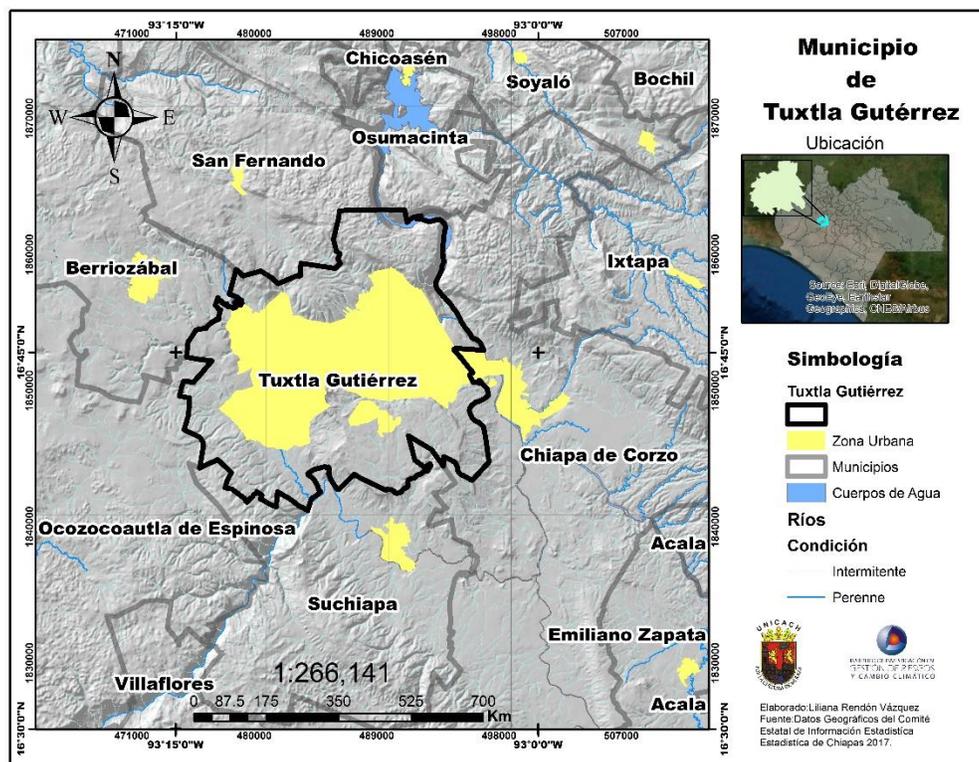


Figura 8. Mapa de ubicación geográfica de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

7.2. Clima.

El tipo de clima que se presenta en este municipio según la clasificación de Köppen-Geiger es de tipo A (w0), cálido subhúmedo con lluvias en el verano.

La temperatura media anual de Tuxtla Gutiérrez según CONAGUA es de 25.8 °C. La temporada cálida inicia a mediados de febrero y termina hasta el mes de septiembre. El período más caluroso del año es desde abril hasta la segunda semana de mayo donde se alcanzan temperaturas de 40 °C. El período más frío del año es el mes de diciembre cuando la temperatura puede llegar a descender hasta 10°C.

El año más frío registrado fue 1960, con una temperatura media anual de 24.0 °C, mientras que el año más caluroso fue registrado en 1998 con una temperatura media anual de 26.6 °C, las altas temperaturas propiciaron condiciones ambientales secas, intensificando y descontrolando incendios, provocados en su mayoría por quemas agrícolas ese año en todo Chiapas.

En cuanto a la precipitación pluvial en promedio es de 900 mm anuales. La temporada de lluvias se extiende desde mayo hasta la segunda semana de octubre. El año más seco registrado fue 1994 con una precipitación pluvial anual de 610.1 mm. Opuesto a ello, el año más lluvioso registrado fue 1965 con una precipitación pluvial anual de 1339.5 mm.

La información anteriormente mencionada se puede simplificar en la tabla 3 que se presenta a continuación, donde se presentan las temperaturas máximas y mínimas registradas en cada mes, así como las temperaturas mínimas y máximas promedio de cada mes.

Tabla 2 .Temperatura y Precipitación promedio de Tuxtla Gutiérrez.

Parámetros climáticos promedio de Tuxtla Gutiérrez													
Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Temp. Máx. °C	33.62	35.87	38.129	38.25	38.5	36.24	34.82	33.95	33.85	33.91	33.13	33.98	35.288
Temp. Máx. Media °C	29.88	31.60	34.31	35.93	35.74	32.79	32.09	32.21	31.30	30.68	30.35	29.82	32.23
Temp. Mín Media °C	15.17	16.05	17.94	20.29	21.6	21.30	20.62	20.62	20.68	19.79	17.72	15.93	18.97
Temp. Mín °C	12.03	8.87	14.62	16.96	19.53	19.81	19.14	19.08	19.16	16.53	13.7	11.74	15.93
Precipitación Total (mm)	0.86	2.02	2.68	12.61	75.78	212.19	178.9	198.64	203.62	65.076	13.22	3.34	968.971
Fuente: Estación Meteorológica número: 00007202, Tuxtla Gutiérrez (DGE) 1951-2018													

*Datos obtenidos del Observatorio Meteorológico de Tuxtla Gutiérrez de CONAGUA.

Sin embargo, la urbanización dentro del municipio ha traído consigo un aumento de la temperatura (especialmente en el valle de Tuxtla) como consecuencia del aumento en las áreas de concreto y la emisión de gases los vehículos terrestres (Vázquez, 2019).

7.3. Zona de medición.

Las mediciones se realizaron en la ciudad universitaria de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), ubicada en la zona norte de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, en las instalaciones ocupadas por el Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático (figura 9).

Las mediciones se realizaron en este punto, debido a que el equipo VANT se encuentra en este instituto y por medidas de seguridad del equipo únicamente se utiliza ahí, además para el análisis de datos en un punto será más sencillo identificar las variaciones de los parámetros meteorológicos medidos.

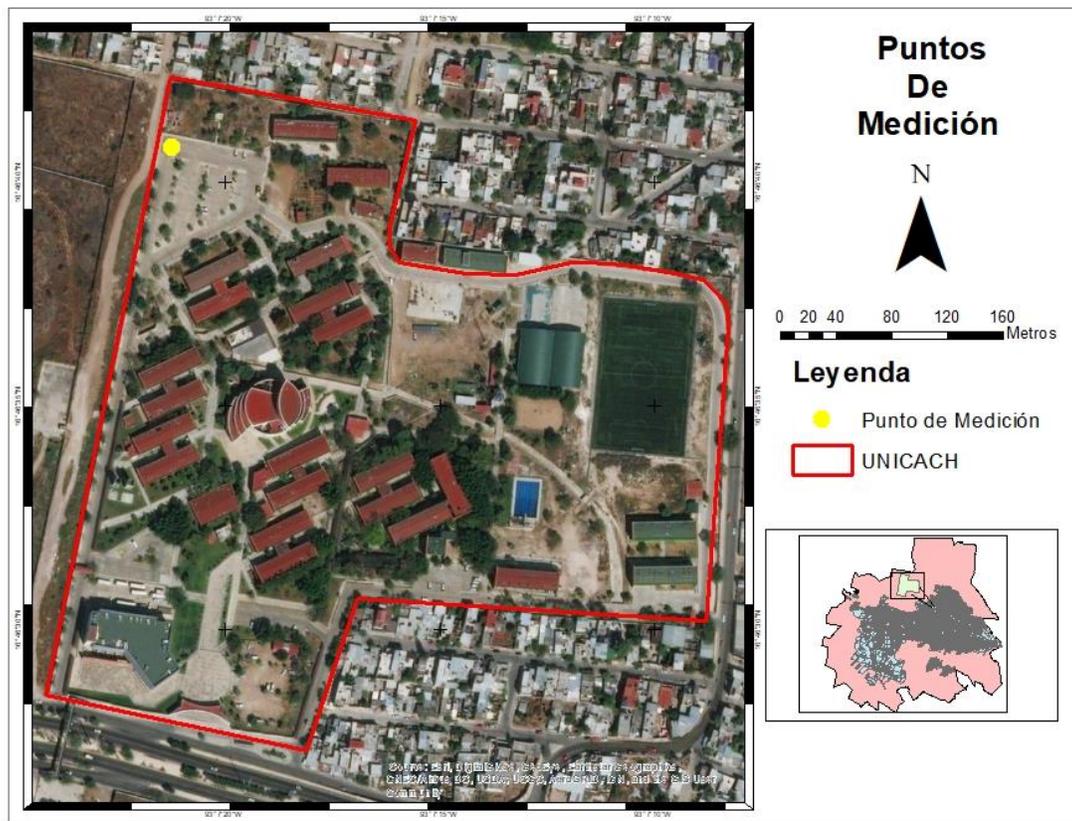


Figura 9. Punto de las mediciones meteorológicas.

8. METODOLOGÍA.

El desarrollo metodológico del proyecto se llevó a cabo en dos vías de investigación:

a) La primera dedicada a la creación de un instrumento electrónico de bajo costo al que llamaremos: Estación Micro Meteorológica (MEM), capaz de ser acondicionado al VANT; b) la segunda vía de investigación se desarrolla en base al estudio experimental de la determinación de altura de capa de mezcla, basado en los resultados obtenidos de las mediciones realizadas en la campaña de monitoreo por medio del VANT instrumentado, mediante el cual es posible medir el perfil vertical de temperatura y determinar la altura de capa de mezcla a través del tratamiento de los datos.

8.1. Micro Estación Meteorológica.

Como se mencionó anteriormente, para la determinación de la altura de capa de mezcla se necesitan datos del perfil vertical de temperatura, los cuales son obtenidos a través de instrumentos cuyo costo y operación son elevados. Sin embargo, las bondades que ofrece el avance tecnológico actualmente genera nuevas alternativas para la innovación y desarrollo de instrumentación a bajo costo. En este sentido para desarrollar el instrumento micro -meteorológico se emplearon diferentes módulos electrónicos configurados entre sí para generar un prototipo registrador de temperatura, humedad y presión, capaz de ser práctico en tamaño y peso para la adaptación al VANT.

Para generar dicho instrumento fue necesario como insumo el uso de una placa computadora o también conocido como ordenador de placa reducida (en inglés: Single Board Computer o SBC), al cual se define como una computadora completa en un solo circuito que comprende memoria, entrada/salida, un microprocesador y todas las demás características elementales que componen a una computadora. Sin embargo, a diferencia de una computadora personal, no depende de extensiones para otras funciones, reduciendo el costo total del sistema ya que utiliza

en menor cantidad las placas de circuito de controlador y conectores (Gonazhapa 2016) para hacer la integración, conexión, y programación de los diferentes módulos.

Existen diferentes tipos de tipos de SBC, para este proyecto se utilizó una placa “Arduino” el cual es una plataforma electrónica de hardware libre que incorpora un microcontrolador re-programable y una serie de pines hembra, que permiten establecer conexiones con diferentes sensores y módulos electrónicos de una forma práctica. Hay diversos modelos de “Arduino” con el propósito de adecuarse a varios tipos de proyectos. Por lo que considerando las diferentes características de cada modelo en relación con la meta a cumplir del proyecto se utilizó la versión: Arduino Nano por su práctico tamaño reducido y de contar con los pines necesarios para las conexiones a realizar.

Arduino Nano es una placa de desarrollo de tamaño compacto. Tiene 14 pines de entrada/salida digital, 6 entradas analógicas, un cristal de 16Mhz, conexión Mini-USB, terminales para conexión ICSP y un botón de reinicio (figura 10).

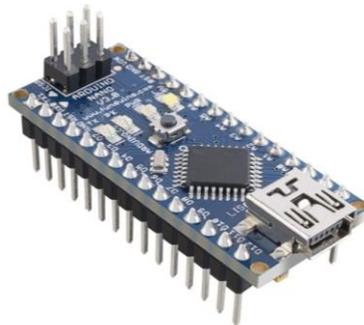


Figura 10. Placa Arduino Nano. (Herrero, 2019).

Para la programación de la placa es necesario un software llamado IDE (Integrated Development Enviroment), el cual es un conjunto de herramientas que permiten a los usuarios escribir, depurar, editar y grabar el código (llamado “sketch”) necesario para la funcionalidad del Arduino acorde al proyecto a realizar. Es un software libre que está disponible directamente de la página oficial de Arduino para diferentes plataformas de sistemas operativos.

Para la medición de la temperatura y la humedad se utilizó el módulo BME280 (ver tabla 3), el cual integra en un solo dispositivo sensores de presión atmosférica, temperatura y humedad relativa con gran precisión, bajo consumo de energía y un formato ultra compacto (ver figura 11).

Este tipo de sensor puede ser utilizado para calcular la altitud con gran precisión, por lo que es un sensor muy utilizado en sistemas de Autopiloto para VANTs dando como resultado medidas de altitud con una precisión de hasta 1m (BOSH, 2018).

Tabla 3. Características del sensor BME280.

Especificaciones Técnicas
1. Voltaje de Operación: 1.8V - 3.3V
2. Rango de Presión: 300 a 1100 hPa
3. Resolución: 0.16 Pa
4. Precisión absoluta: 1 hPa
5. Rango de Temperatura: -40°C a 85°C
6. Resolución de temperatura: 0.01°C
7. Precisión Temperatura: 1°C
8. Rango de Humedad Relativa: 0-100% RH
9. Precisión de HR: +-3%
10. Frecuencia de Muestreo: 157 Hz (máx.)

Para su funcionamiento existen diferentes librerías³ que deben incluirse en el sketch general, para este proyecto se empleó la librería “cactus_io_BME280_I2C.h”.

³ En informática, una librería es un conjunto de implementaciones funcionales, codificadas en un lenguaje de programación, que ofrece una interfaz bien definida para la funcionalidad que se invoca.

Debido a que proporciona facilidad para operar múltiples sensores al mismo tiempo, y entrega datos de salida en grados Celsius, porcentaje de Humedad, presión en milibares y cálculo de la altura.

A diferencia de un programa ejecutable, el comportamiento que implementa una librería no espera ser utilizado de forma autónoma, sino que su fin es ser utilizada por otros programas, independientes y de forma simultánea.

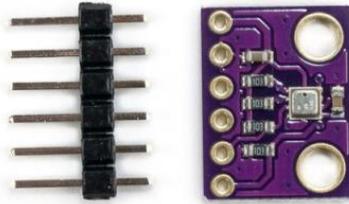


Figura 11. Sensor de temperatura, humedad y Presión atmosférica (BME280) (Herrero, 2019).

A fin de que el prototipo lograra registrar hora y fecha exacta de cada dato captado por el sensor BME280 se requirió el módulo DS3231 (ver tabla 4), el cuál es un reloj en tiempo real de alta exactitud que cuenta con un oscilador a cristal con compensación de temperatura. El dispositivo incorpora una entrada para batería auxiliar y mantiene la cuenta precisa del tiempo incluso cuando la energía es interrumpida (figura 12).



Figura 12. RTC DS3231 (Herrero, 2019).

El módulo DS3231 mantiene registro de segundos, minutos, horas, día de la semana, fecha, mes y año. Para el funcionamiento se emplea la librería “RTClib.h” desarrollado por Adafruit.

Tabla 4. Características del Módulo Reloj en Tiempo Real DS3231.

RTC Alta exactitud, maneja todas las funciones para el mantenimiento de fecha/hora
Exactitud de ± 2 ppm operando a una temperatura de 0°C a +40°C
Módulo cuenta con reloj DS3231 y memoria EEPROM I2C
Cuenta con batería de respaldo
Registro de segundos, minutos, horas, día de la semana, fecha, mes y año con compensación de años bisiestos hasta 2100

El siguiente módulo que se utiliza en el prototipo es un lector de tarjeta SD⁴ (Secure Digital), en el cual se almacenarán los datos medidos por el sensor. Este módulo (figura 13) permite manejar una tarjeta de memoria, de forma que se pueden almacenar grandes cantidades de datos usando un microcontrolador como dispositivo de control.



Figura 13. Módulo socket tarjeta SD (Herrero, 2019).

El módulo necesita de la librería “SD.h”, para realizar la función de escritura y lectura.

Por último, para la alimentación de voltaje para el funcionamiento de todos los módulos acoplados, es necesario un banco de batería comúnmente llamado “Power Bank” (figura 14), que es un dispositivo que cuenta con una batería de ion Litio

⁴ Secure Digital (**SD**) es un dispositivo en formato de tarjeta de memoria para dispositivos portátiles.

conectado a un regulador de carga, que proporciona 5v de salida mediante un puerto USB y que este alimentará a la Placa Arduino Nano quien reparte la corriente necesaria a cada módulo acoplado.



Figura 14. Power Bank (Herrero, 2019).

Todo el sistema acoplado debe protegerse de la intemperie, por lo que es necesario realizar una carcasa con las dimensiones Ad hoc para el montaje sobre el VANT. Para ello se emplea software de diseño y una impresora en 3D de filamentos plásticos.

8.2. Calibración.

Una vez terminada la Micro Estación Meteorológica (MEM), se realizó la calibración durante tres días para comparar el funcionamiento de ésta con el dispositivo registrador de temperatura HOBO, el cual es un dispositivo comercial que registra temperatura y humedad (figura 15).



Figura 15. Prueba de funcionamiento de la MEM vs HOBO.

Este procedimiento consistió en colocar en un mismo lugar ambos equipos para determinar el tiempo de la durabilidad de la batería de la MEM y la precisión de los parámetros de temperatura y humedad contra los datos arrojados con el HOBO.

8.3. Montaje sobre el VANT.

Un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT), coloquialmente llamado DRONE, es una aeronave que vuela sin tripulación, capaz de mantener de manera autónoma un nivel de vuelo controlado, sostenido, y propulsado por un motor de explosión, eléctrico o de reacción.

Los VANTs tienen usos tanto civiles como comerciales, sin embargo, sus primeros usos fueron en aplicaciones militares, en este caso llamados Vehículos Aéreos de Combate No Tripulados (UCAV por sus siglas en inglés).

Con la progresiva popularización del uso civil de los VANTs, sus aplicaciones han aumentado consecuentemente, también el número de consumidores más allá del terreno militar. Este crecimiento ha llevado a que surjan más empresas dedicadas a este mercado, una de las más usadas es DJI (figura 16). En este proyecto se utilizaron dos VANTs, los cuales fueron: el Phantom 4 (cuadricóptero) y el segundo un MATRICE 600 Pro (hexacóptero), ambos de la compañía DJI.



Figura 16. Diferentes tipos de VANTs en el mercado (Macho, 2019).

Phantom 4.

El Phantom 4 es un cuadricóptero bastante resistente pues está hecho con una aleación de titanio y magnesio que aumenta la dureza de la estructura y reducen su peso, haciendo fácil su manejo y desplazamiento (figura 17).



Figura 17. VANT DJI Phantom 4 (DJI, 2019).

Es uno de los VANTs más comercializados para uso civil y recreativo, por su versatilidad de manejo y recomendado para aquellos que se inician en el manejo de estos equipos, sus principales características se enlistan en la tabla 5.

Tabla 5. Características del VANT DJI Phatom 4.

Aeronave DJI Phantom 4	
Carcasa de color blanco brillante y los respiraderos vienen en la parte inferior de cada uno de los brazos del equipo.	
Peso (batería y hélices incluidas)	1,380 g
Tamaño diagonal (sin hélices)	350 mm
Velocidad de ascenso máx.	Modo-S: 6 m/s (19.7 ft/s)
Velocidad de descenso máx.	Modo-S: 4 m/s (13.1 ft/s)
Velocidad máx.	72 km/h (45 mph) (modo-S)
Ángulo de inclinación máx.	42° (Modo-S)
	35° (Modo-A)
	25° (Modo-P)
Velocidad angular máx.	250°/s (Modo-S)
	150°/s (Modo-A)
Altura máx. de servicio sobre el nivel del mar	6 000 m (19 685 pies)
Resistencia al viento máx.	10 m/s
Tiempo de vuelo máx.	28 minutos aprox.
Rango de temperatura de funcionamiento	De 0°C a 40°C
Sistemas de posicionamiento por satélite	GPS / GLONASS

Matrice 600 Pro.

La aeronave Matrice 600 Pro está diseñada para cinematografía profesional y aplicaciones industriales, pertenece a la gama de VANTs profesionales porque puede adaptarse a cualquier proyecto, y puede cargar hasta un máximo de 6 kilogramos de peso extra (figura 18).



Figura 18. VANT DJI Matrice 600 Pro.

El Matrice 600 Pro tiene un diseño modular, es decir, que sus partes son desmontables y móviles, lo que le da una ligereza para su montaje y transportación. Sus características principales se resumen en la tabla 6.

Tabla 6. Características del Matrice 600 Pro-DJI.

Capacidad de carga máxima de 6 kilogramos.
Propulsión a prueba de polvo
Compatibilidad con la línea de cámaras y gimbals Zenmuse de DJI.
Compatibilidad con Ronin-MX, un sistema aéreo de gimbal que permite cargar cámaras profesionales de alto nivel. Es compatible con Black Magic, Canon, Panasonic, RED, Sony o Nikon.
Cuenta con seis baterías inteligentes.
Dependiendo de la carga, la autonomía de vuelo varía, puede volar 36 minutos, mientras que con una cámara profesional puede volar hasta los 16 minutos.
Radio de acción de hasta 4.8 kilómetros.
Incorpora controlador de vuelo, denominado A3, con capacidad para tres unidades GPS, seis IMUs y seis GNSS, para conseguir más precisión y seguridad en el vuelo.

El Matrice 600 Pro tiene un rendimiento de vuelo mejorado y una mayor capacidad de carga en comparación de los anteriores modelos DJI, su sistema de propulsión a prueba de polvo simplifica el mantenimiento del vuelo, mientras que los motores con enfriamiento activo están hechos para ser fiables cuando funcionan durante un extenso periodo de tiempo (figura 19).



Figura 19. Matrice 600 Pro en Vuelo.

De manera individual con cada VANT, se realizaron pruebas piloto en conjunto con la MEM, haciendo el uso de accesorios adecuados y diseñados para cada tipo de estructura, durante dichas pruebas de vuelo se evaluó el desempeño del VANT en conjunto al instrumento para determinar la mejor opción de VANT a emplear.

8.4. Campaña de Monitoreo y determinación de la altura de capa de mezcla.

La campaña de monitoreo se realizó durante un mes, en la cual se planteó realizar ascensos matutinos del VANT a las 7:00 horas para tomar los datos de presión, temperatura y humedad ambiental de la atmosfera vertical, manteniendo una misma velocidad de ascenso y descenso de 1 m/s. Todas las mediciones se realizaron en la zona seleccionada previamente (ver figura 9).

Posteriormente se realizó el tratamiento y análisis de los datos por cada día de monitoreo, para hacerlo se utilizaron dos métodos con base a la metodología propuesta por Trejo y Villagómez (2011).

El primer método empleado es el Gráfico, que consiste en la intersección entre la línea del perfil de temperatura ambiental y la línea del perfil adiabático seco, en el punto de la gráfica donde se encuentre la intersección se considera está el límite de la altura capa de mezcla, como se puede observar en el ejemplo de la figura 20.

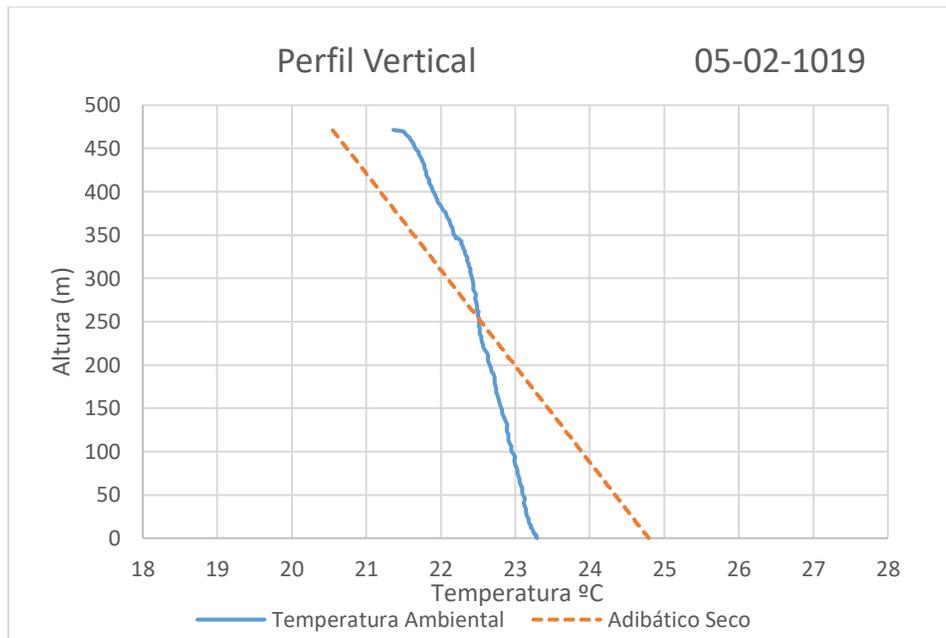


Figura 20. Determinación gráfica de la altura de capa de mezcla.

El perfil adiabático seco de temperatura es una recta con pendiente, tal que la temperatura desciende 9.8 °C por cada kilómetro de altura. Por lo tanto, el perfil adiabático seco matutino, se obtiene con la ecuación siguiente:

$$T = T_0 - 9.8 (10^{-3}) Z \quad (1)$$

Donde

Z= altura en metros (m)

T₀ = Temperatura mínima del día más 5 °K

Para la T_0 , sugieren sumar 5° si las mediciones son realizadas fuera del centro de la ciudad, esto debido al efecto de isla de calor⁵.

El segundo método que se utilizó fue el Matemático, el cual necesita los datos de temperaturas y presiones de la atmósfera vertical para someterlas al análisis de diversas ecuaciones que nos ayudarán a obtener la tasa de enfriamiento por día y con ello determinar la altura de la capa de mezcla.

Para ello fue necesario calcular a través de la ecuación 2 el perfil lineal de temperatura con respecto a la altura.

$$T = T_b - hZ \quad (2)$$

Donde

T_b = Temperatura a nivel del suelo

h = Tasa de enfriamiento del aire

Para poder relacionar la presión adimensional con la temperatura adimensional se realiza a través del exponente α , el cual incluye la tasa de enfriamiento h , misma que al sustituirse en (2) permite obtener Z , que es la altura correspondiente a cada pareja de datos T , P .

$$\alpha = \frac{PMg}{R h} \quad (3)$$

Donde

$PM = 28.96 \text{ Kg/Kgmol}$

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$

$R = 8309 \text{ N-m/Kgmol}^\circ\text{K}$

⁵ Situación urbana de acumulación de calor por la enorme cantidad de concreto y demás materiales absorbentes de calor de una ciudad (Trejo y Villagómez, 2011).

El cálculo de alfa se obtiene de los logaritmos naturales de la temperatura y presión registradas durante el sondeo atmosférico, ajustando dichos valores con la ecuación (4).

$$LN\left(\frac{P}{P_0}\right) = \alpha Ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + \beta \quad (4)$$

donde β es una ordenada al origen sin sentido físico que permita un mejor ajuste de la pendiente α .

El resultado de este ajuste lineal por mínimos cuadrados se obtiene con la ecuación (5):

$$m = \frac{n \cdot \sum(x \cdot y) - \sum x \cdot \sum y}{n \cdot \sum x^2 - |\sum x|^2} \quad (5)$$

Utilizando el valor de α de (3) se despeja h, que es la tasa de enfriamiento de la atmósfera de la siguiente manera:

$$h = \frac{(28.96)(9.81)}{(8309)(5.569)} = 0.0061 \text{ } ^\circ K/m$$

Para encontrar la altura de capa de mezcla, se realiza la igualdad entre la ecuación del perfil adiabático seco y el perfil ambiental con h obtenida.

Perfil ambiental $T = T_b - hZ$

Perfil adiabático seco $T = 273.15 - 9.8(10^{-3})$

A partir del uso de la información obtenida de las mediciones realizadas, es posible determinar la altura de la capa de mezcla por cualquiera de los dos métodos. En el siguiente apartado se presentan los resultados obtenidos.

9. RESULTADOS.

9.1. Ensamble de la Micro Estación Meteorológica (MEM).

En el siguiente esquema se muestran las conexiones que se emplearon para que en conjunto de la placa Arduino, el sensor BME280, así como los módulos de reloj y memoria funcionaran en un circuito alimentado por un banco de batería (figura 21).

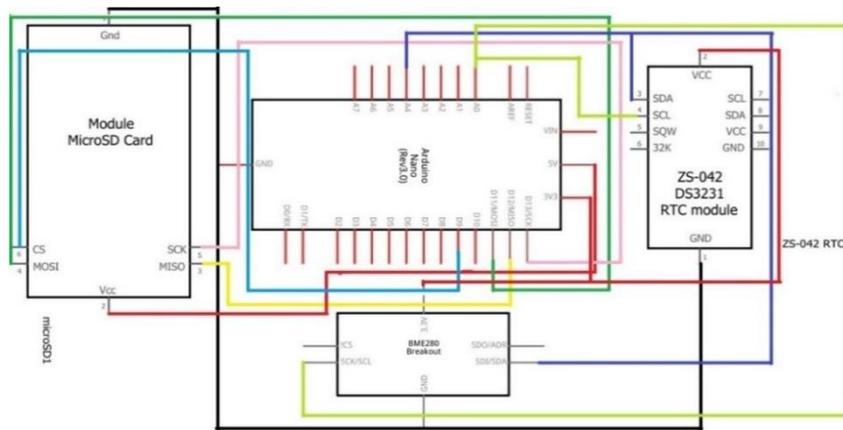


Figura 21. Diagrama de conexiones de la Micro Estación Meteorológica.

El montaje físico de las partes electrónicas se realizó sobre una placa fenólica perforada de 5x5 cm; Esta tablilla tipo protoboard es útil para armar prototipos con soldadura de circuitos integrados y conexiones (figura 22).

Estas placas por lo general son de cobre y se componen de dos caras, ya que una funciona como aislante para que al fundirla en ácido ferroso separe las pistas de cobre y hace que no existan cortos circuitos.

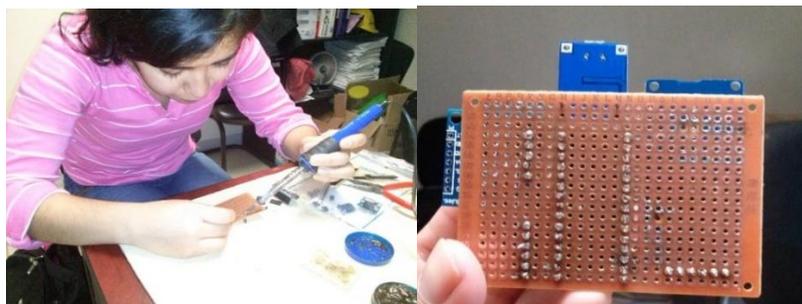


Figura 22. Montaje de los sensores sobre placa fenólica.

Cabe destacar que el montaje se acondicionó de manera que las piezas pudieran ser desmontables fácilmente en caso de que sea necesario cambiar alguna de ellas. Además de buscar hacer un diseño lo más pequeño posible para que fuera práctico acomodarlo sobre el VANT.

9.2. Calibración.

En esta prueba de funcionamiento de la MEM la batería duró 60 horas continuas, mientras que, para la estimación de la temperatura, la MEM registró datos de 0.5°C por arriba de aquellos obtenidos por el HOBO, esta diferencia concuerda con la estimación de las características del sensor BME280 que puede tener un margen de error de 0.1 a 1 °C. Por lo tanto, los datos obtenidos están dentro de los parámetros establecidos por el fabricante del sensor (figura 23).

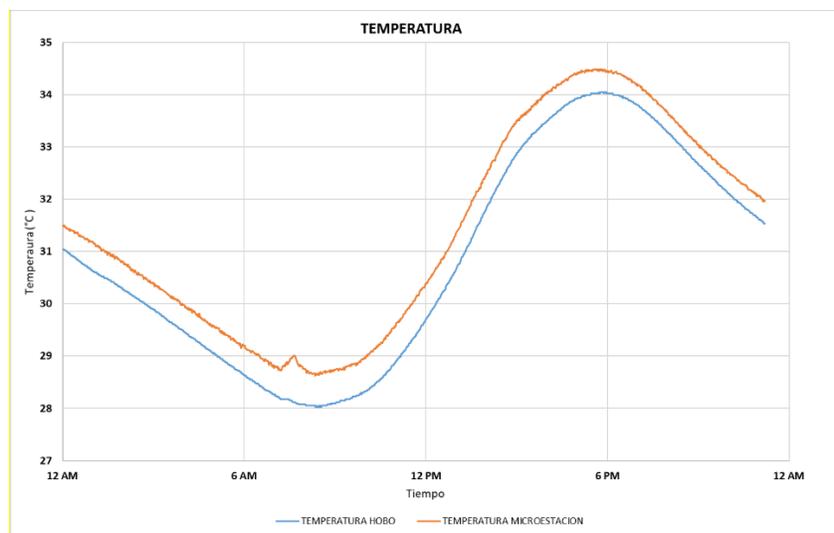


Figura 23. Grafica comparativa de temperaturas registradas por la MEM y el HOBO.

9.3. Diseño de la carcasa.

La MEM requirió de protección para lo cual se necesitó diseñar una carcasa resistente. Para el diseño se utilizó el programa SketchUp, el cual es un software que permite crear y modelar imágenes en 3D de edificios, coches, personas y cualquier otro, este software incluye una galería de objetos, texturas e imágenes para descargar o exportarlas a plataformas de impresión en 3D.

Por lo que en este programa se diseñó una caja en la que se pudiera colocar la MEM, considerando que la carcasa tuviera accesos para conectarla con el banco de batería y salida de la memoria SD (figura 24).

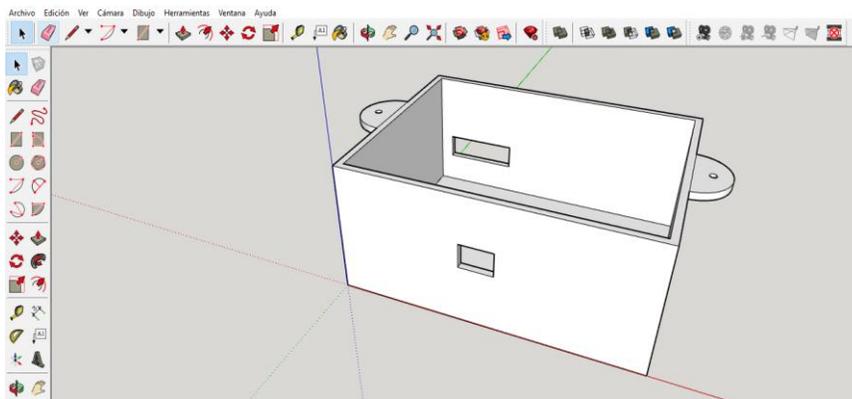


Figura 24. Diseño de la carcasa a través del software SketchUp.

Al tener el diseño completo se procedió a la impresión en 3D, para ello se usa tecnología de impresión en 3D por medio de filamentos plásticos (figura 25). El material de impresión de la carcasa fue de tipo PLA (polímero de ácido láctico). Este material es altamente versátil, pues se pueden crear diferentes objetos para múltiples fines.

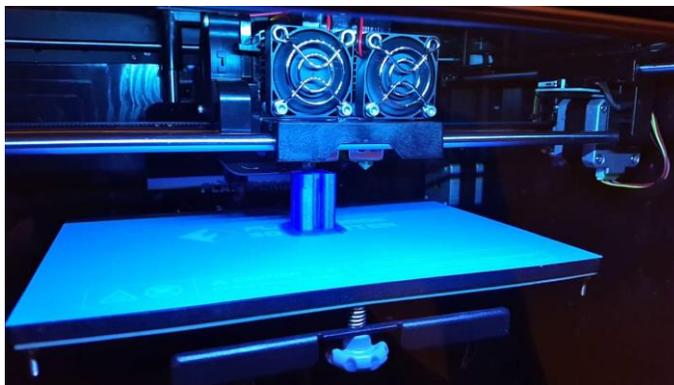


Figura 25. Impresión de carcasa.

Como se puede observar en la figura 26 se tiene el diseño impreso de la carcasa con el sistema de la Micro Estación Meteorológica.

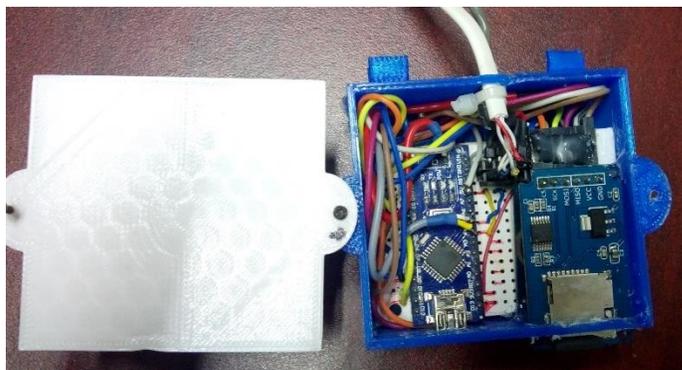


Figura 26. MEM sobre la carcasa diseñada.

El diseño contempló utilizar dos sensores BME280 para ser acondicionados en diferentes lugares del VANT, de manera que los sensores estuvieran expuestos por lo que fue necesario elaborar una carcasa aparte de la central que permitiera el contacto directo con el ambiente (figura 27).



Figura 27. Sensores BME280 con carcasa.

Uniendo todas las piezas, se obtiene la MEM, con una unidad central y 2 sensores de temperatura, presión y humedad, como se muestra en la figura 28.

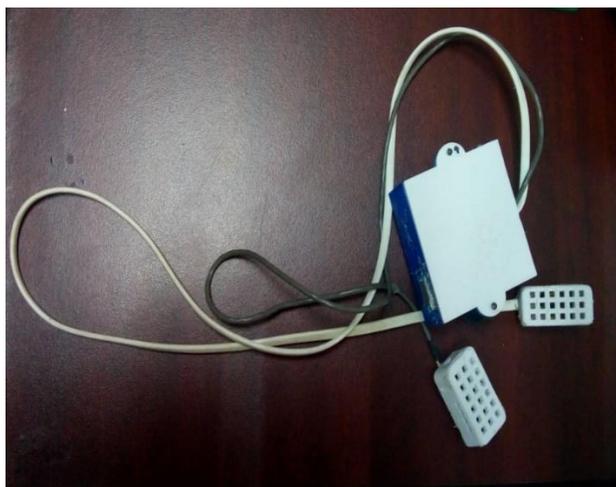


Figura 28. Micro Estación Meteorológica terminada.

Una vez obtenido el diseño y la estación micro meteorológica finalizada, se realizan las pruebas pilotos con cada uno de los VANTs disponibles.

9.4. Pruebas piloto.

Las pruebas se realizaron dentro de un área de la Ciudad Universitaria (CU) de la UNICACH, que diera la seguridad de no exponer a la población, puesto que es importante evitar realizar vuelos en sectores muy poblados o donde hay grupos de personas. Aunque los VANTs suelen ser seguros, siempre están expuestos a un vuelo errático o a una caída, por ello tampoco deben hacerse vuelos cerca de cables de tendido eléctrico, telefónico u objetos que obstruyan su vuelo.

Como se mencionó anteriormente en este proyecto se usaron dos VANTs; el Phantom 4 y Matrice 600 Pro, en los cuales se adaptó la MEM para realizar pruebas piloto de vuelo, con la finalidad de encontrar la mejor opción de VANT para la obtención de los datos del perfil vertical de temperatura. Durante las pruebas piloto se obtuvieron tres diferentes tipos de carcasa, esto debido a que estas debían adaptarse a cada respectivo VANT.

El modelo DJI Phantom 4, al ser muy pequeño limitaba los espacios disponibles para la implementación de la MEM, descartando algunos lugares del VANT como lo era el techo del mismo pues no se podía colocar el sensor ahí debido a que las hélices estaban a la altura del techo, lo cual implicaba que el sensor recibiría directamente la turbulencia generada por las hélices del mismo modo si se colocaba debajo de ellas por lo tanto, se decidió crear una carcasa que colgara del VANT para captar de manera precisa los datos sin interferencia como se puede observar en la figura 29.



Figura 29. VANT DJI Phantom 4 en vuelo.

En esta carcasa se consideró que el sensor BME280 estuviera totalmente expuesto con un acceso para conectar el banco de batería, el cual se montaba sobre la misma carcasa, asimismo se crearon otros accesorios para que pudiera estar sujeto al VANT, como plataformas que le daban centímetros extra de altura al VANT para que al inicio del ascenso no tuviera obstrucción al impulsarse con el suelo, es importante destacar que para esta prueba únicamente se utilizó un sensor BME280 (figura 30).

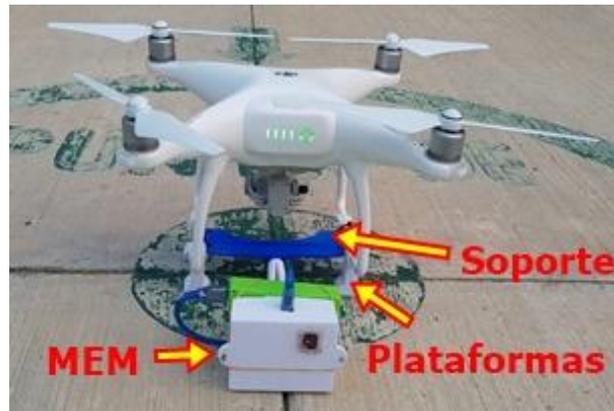


Figura 30. Carcasa adaptada al DJI Phantom 4.

A pesar de estas adaptaciones se observaron irregularidades al momento del vuelo, presentando inestabilidad no generada por los vientos, por esta razón se tuvo que descartar esta primera prueba, pues el sistema de detección de objetos que posee la aeronave detectaba a la carcasa como un objeto a esquivar.

Por tanto, a más altura el VANT hacía movimientos más bruscos y de este modo era complicado pilotear de manera segura, además que se observó que los datos de ascenso no eran captados con precisión y esto se reflejaba en las gráficas de los datos, la irregularidad en los datos observados eran causados por el mismo movimiento del VANT pues al ascender impulsa el aire circundante hacia abajo por el contrario al descender lo empuja hacia arriba, esta situación ocasionaba que homogenice la temperatura en algunos puntos.

No obstante, se procedió a generar otro tipo de carcasa para el mismo VANT (Phantom 4), tomando en cuenta la experiencia pasada, se optó por colocar dos sensores, uno en la parte superior del techo del VANT, mientras que el otro estuviera colgando del mismo. Para que el sensor colocado en el techo no estuviera en contacto con la turbulencia de las hélices, se diseñó una pequeña plataforma que lo elevara quince centímetros sobre la altura de las hélices y de este modo pudiera captar los datos de ascenso sin problema (figura 31). La idea del segundo sensor colgado era para que captara los datos del descenso.

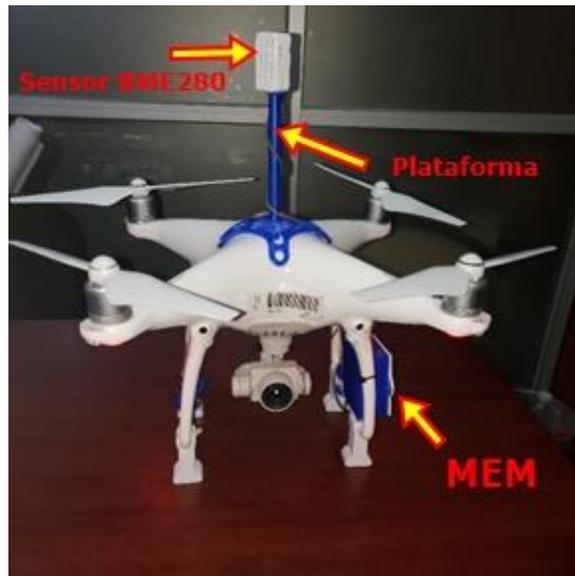


Figura 31. Sensor acondicionado sobre el VANT DJI Phantom 4.

En la prueba con este diseño de carcasa, había pérdida de señal de los satélites durante el vuelo, esto ocasionaba que el GPS de la aeronave no mantuviera la señal de posicionamiento. Por tanto, se activaba un modo de vuelo llamado "Vision" y en este modo de vuelo el VANT no responde a la dirección del control remoto sino a las corrientes de viento que hubiese en el momento, con ello se alteraba la trayectoria vertical para las mediciones, sin embargo, esto sucedía porque la plataforma que sostenía al sensor, estaba arriba del sensor GPS, por lo que la señal se obstruía, de modo que este diseño también fue descartado.

Aunque el diseño de soporte de los sensores generó problemas al VANT, los datos captados del perfil de temperatura vertical tenían mejor precisión que en la anterior prueba, por lo que tomando el diseño del prototipo con dos sensores se optó por implementarlo en el segundo VANT el Matrice 600 pro.

Una de las ventajas del VANT Matrice 600 Pro es su amplio tamaño, el cual permitió con facilidad colocar el prototipo diseñado en un lugar seguro, así como en la distribución de los sensores BME280 libres de cualquier interferencia u obstrucción en el momento de realizar las mediciones (figura 32).



Figura 32. Montaje de la MEM sobre el VANT.

Una vez concluidas las pruebas, se determinó que el VANT Matrice 600 Pro, es el más óptimo a emplear en la campaña de monitoreo, esto debido a su espacio adecuado para montar sin problema el prototipo, su estabilidad ante ráfagas de vientos, mayor tiempo de vuelo, menor afectación de turbulencias generadas por las aspas a los sensores, al tener un sistema de GPS superficial este no se vio obstruida la señal, con una sola desventaja que es la restricción de ascenso que hasta el momento permite llegar a 500 metros de altura en la vertical.

9.5. Campaña de monitoreo.

La campaña de monitoreo se realizó por 31 días, correspondiendo al periodo; 21 de enero - 23 de febrero del presente año. Esta campaña consistió en elevar al VANT equipado con la MEM a 500 metros debido a que es la altura máxima permitida por el mismo software del VANT a la que se puede ascender.

Cada vuelo tenía una duración aproximada de 30 a 35 minutos iniciando a las 07:00 horas, durante la campaña se obtenían los datos de temperatura, presión y humedad de la atmosfera vertical. Durante la campaña de monitoreo se presentaron 8 días en los que no se alcanzó a llegar a los 500 metros. Cabe destacar que como se puede observar en la siguiente gráfica en ningún día con exactitud se registra una altura de quinientos metros, esto se debe a que la altura de los datos registrados por la MEM está en función del sensor BME280, que a través de la presión calcula la altura, por ello siempre existió un desfase entre los 20 y 30 metros (figura 33).

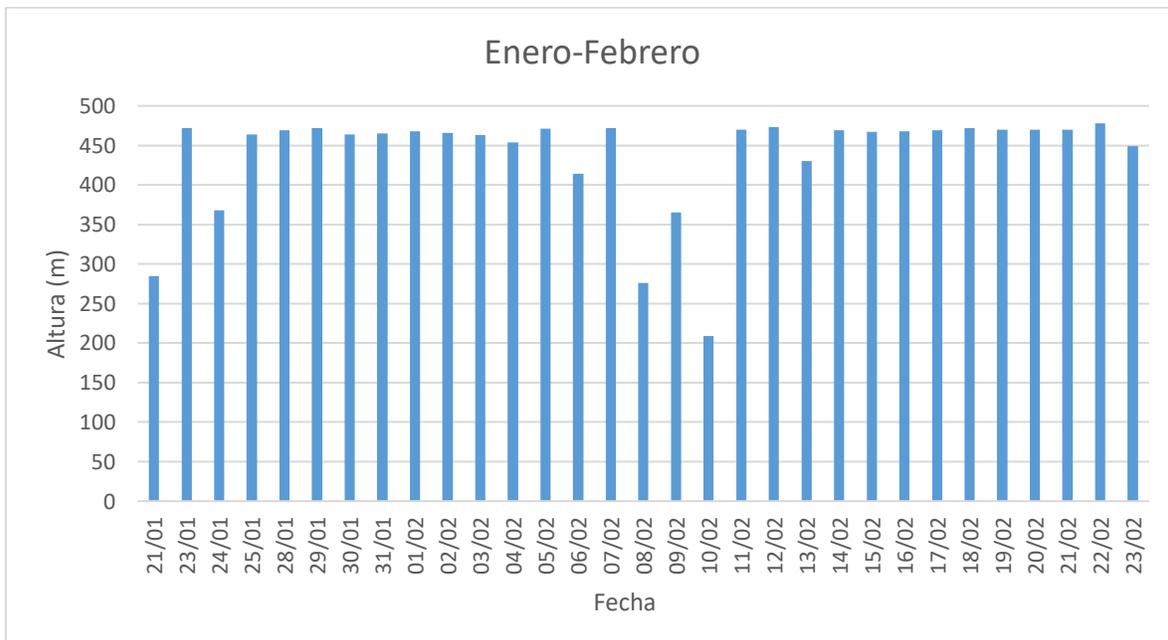


Figura 33. Gráfica de alturas máximas del VANT durante la campaña de monitoreo.

Como podemos apreciar en la figura 33, los días 21, 24 de enero y los días 08, 09 y 10 de febrero, las alturas de los vuelos fueron inferiores a los 400 metros, lo anterior por la presencia de fuertes vientos que no permitían al VANT sostener un vuelo de ascenso estable, también ocasionaron algunos problemas técnicos como es el caso para los días el 09 y 10 de febrero que por estas fuertes ráfagas de vientos se desconectó el cable de energía de la MEM deteniendo el registro de los datos.

Por otro lado, el 08 de febrero el monitoreo se tuvo que postergar tres horas más tarde de la hora establecida, ya que el área en donde se realizaron los vuelos estaba ocupada por otra actividad de la universidad. Acontecido a esto los datos obtenidos en ese día no se consideraron para la campaña de monitoreo pues debe haber homogeneidad en la hora de medición, esto debido a que la temperatura a las 10:00 horas por efecto de la radiación es de 2 a 3° más cálida que a las 07:00 horas, presentando condiciones meteorológicas muy diferentes entre ambos horarios.

Tomando en cuenta esto, la meta de llegar a una altura cercana a los 500 metros fue posible en 23 días representando un total de 76.66% de las muestras. Es decir, de la muestra total de la campaña de monitoreo (31 días) solamente 23 días son efectivos, los cuales son los que se consideraron como muestra total en los análisis posteriores.

9.5.1. Determinación Preliminar de la Altura de Capa de Mezcla.

Siguiendo los métodos planteados, se calcularon las alturas de capa de mezcla para los 23 días seleccionados, es importante señalar que las mediciones se realizaron dentro del perímetro urbano de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, tomando en cuenta este factor para el cálculo del perfil adiabático seco (ecuación 1) es necesario considerar el aumento de temperatura por el efecto de la isla de calor por lo que Trejo y Villagómez (2011) sugieren sumar 5°C a la temperatura inicial, sin embargo para nuestra zona de estudio se tomó en cuenta un estudio de islas de calor, realizado para ciudad de Tuxtla Gutiérrez, en donde se determina que la diferencia térmica entre la zona de medición con la zona centro de la ciudad, es de 1.5°C (Villatoro, 2015).

Considerando este ajuste, se hizo el cálculo de las alturas de capa de mezcla siguiendo la metodología del método gráfico. A continuación, se presenta la gráfica general de los días efectivos de la campaña de monitoreo con las alturas de capa de mezcla calculadas con el método gráfico (figura 34).

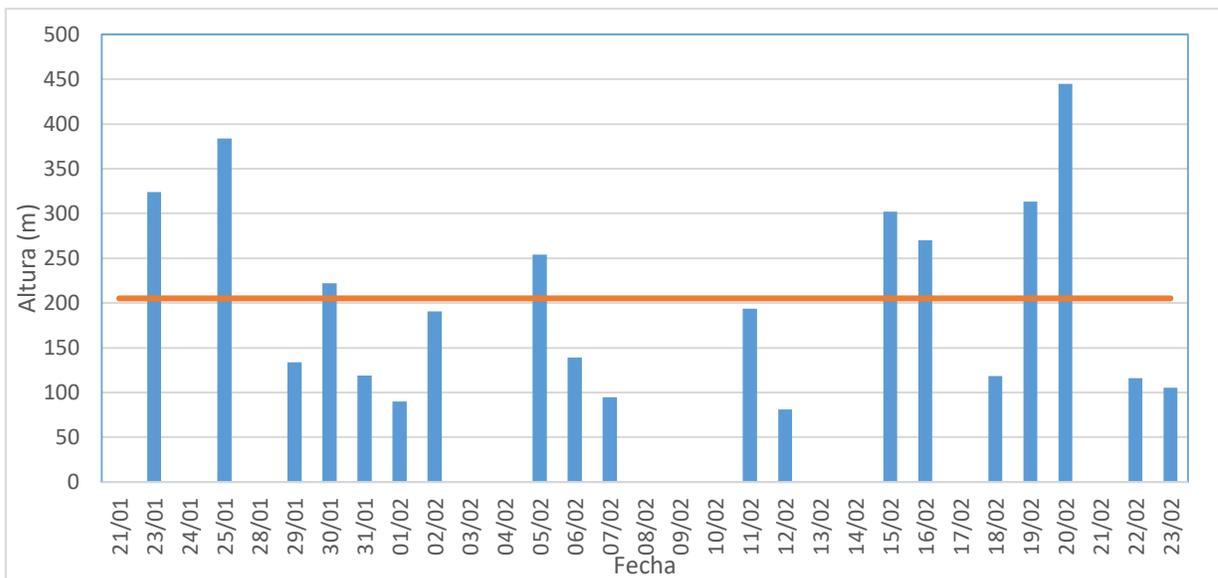


Figura 34. Gráfica de las alturas de capa de mezcla calculadas a partir del método gráfico. La línea naranja representa el promedio de la altura de capa de mezcla.

La altura de capa de mezcla se mantuvo en promedio a 205.10 metros, esto considerando únicamente los 23 días efectivos, en donde se pudo determinar la altura de capa de mezcla. En la figura 34 se indica el promedio a través de una línea color naranja para observarse de mejor manera. También se aprecia que en once días de la campaña no se alcanzó a captar la de capa de mezcla por lo cual en la gráfica se representa con un valor de cero, esto no significa que la capa de mezcla sea inexistente, más bien que puede estar superior al nivel de muestreo y no se alcanzó a medir dentro de los primeros 500 metros.

De igual manera con los resultados obtenidos del método matemático se elaboró una gráfica con las alturas de capa de mezcla calculadas.

Cabe destacar que, para la generación del promedio con este método, únicamente se tomaron en cuenta los días que tuvieron una altura de capa de mezcla dentro del rango de 500 metros para poder hacer una comparativa con los resultados del método gráfico, teniendo como promedio 244.74 metros, como se puede observar en la línea de promedio color naranja de la figura 35. Es preciso señalar que los números que aparecen al interior de la gráfica se refieren a la altura de capa de mezcla calculada por el método, sin embargo, al ser rangos superiores a los 500 metros se representa de esta forma en la gráfica.

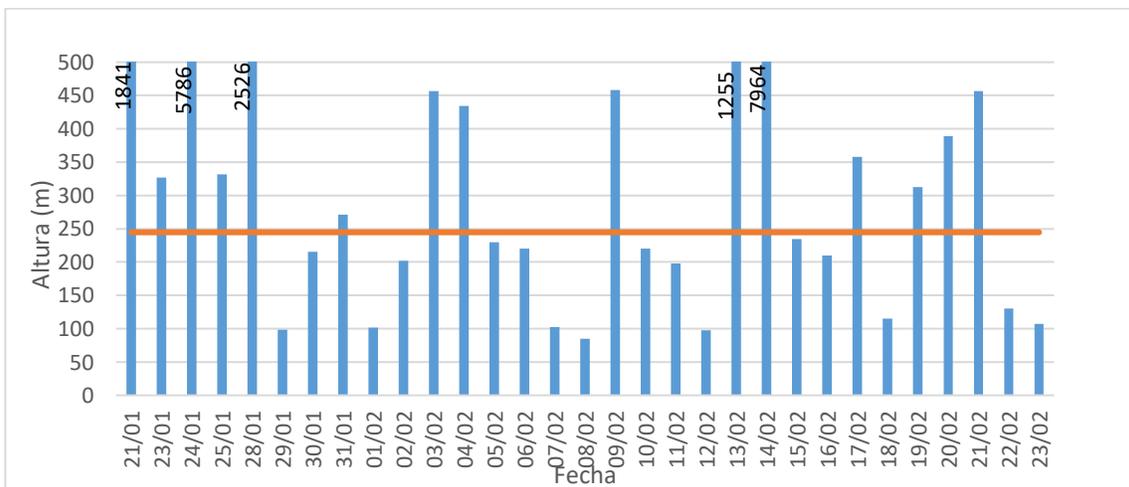


Figura 35. Gráfica de alturas de capa de mezcla calculadas a partir del método matemático. La línea naranja representa el promedio de la altura de capa de mezcla.

Como resultado de la comparativa entre ambos métodos, se encontró que en algunos días en donde el método gráfico no encontraba altura de capa mezcla, el método matemático obtenía valores superiores a los 500 metros. Claro ejemplo de ello es el día 28 de enero, en el cual, mediante la aplicación del método matemático se obtuvo una altura de 2526 metros, mientras que en el método gráfico no se encontró un valor.

Al observar este día, se puede notar que, aunque el perfil térmico vertical y el perfil adiabático seco no se intersectan en la gráfica, si continúan la misma tendencia en que se comportan en algún punto no muy lejano van a confluir (figura 36).

Sin embargo, por la limitante de la altura a la que puede ascender el VANT esto no se puede medir bajo este método.

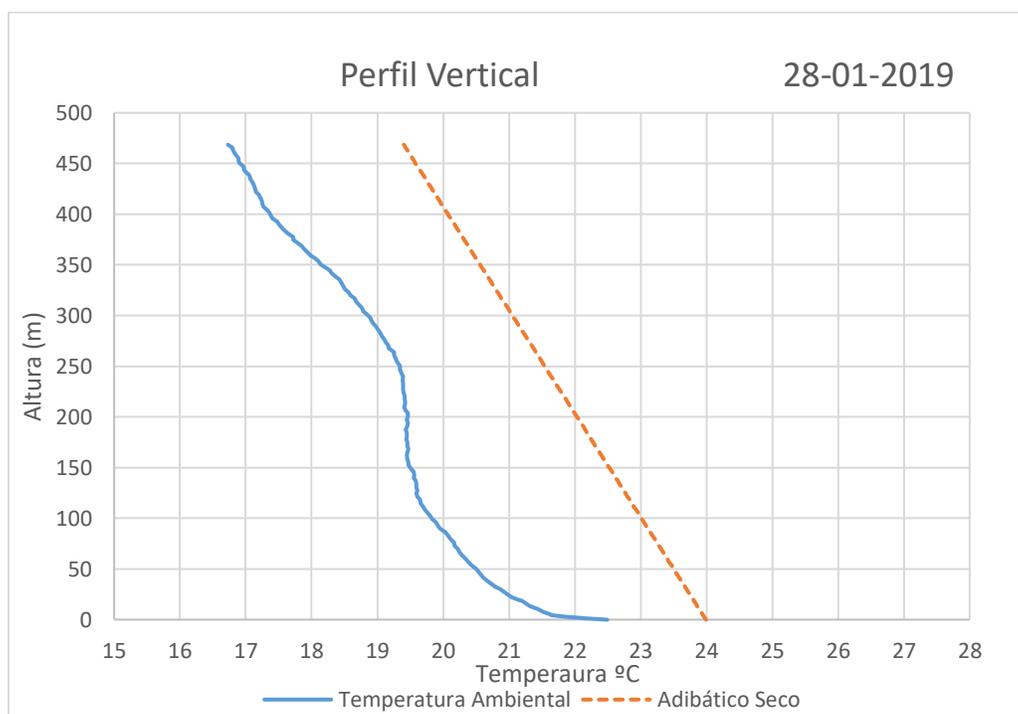


Figura 36. Perfil de temperatura ambiental y el perfil adiabático seco del 28 de enero.

Debido a estas situaciones podemos asumir que la diferencia entre la altura promedio de ambos métodos sucedió porque en el método gráfico se presentaron varios días donde la intersección entre el perfil de temperatura ambiental y adiabático seco era nulo por lo que se asignaba como valor cero en la altura de capa de mezcla, mientras que en el método matemático al realizar la proyección con los valores de presión y temperatura que se contaba, siempre alcanzaba a captar una altura de capa de mezcla aunque fuera mayor a los 500 metros, por lo que siempre se contaron con mayores a cero en el método matemático, como se puede observar en la tabla 7.

Tabla 7. Resultados de Altura de Capa de Mezcla con Método Gráfico y Matemático.

Día	Altura de Capa de Mezcla (m) (Método Gráfico)	Altura de Capa de Mezcla (m) (Método Matemático)
21 enero	0	1841.8
23 enero	323.8	326.5
24 enero	0	5786.3
25 enero	384	331.9
28 enero	0	2526.0
29 enero	134	98.4
30 enero	222.3	215.6
31 enero	118.98	271.1
01 febrero	90.14	101.6
02 febrero	190.5	201.7
03 febrero	0	456.8
04 febrero	0	434.2
05 febrero	254	229.4
06 febrero	139	220.1
07 febrero	94.92	102.8
09 febrero	0	458.1
10 febrero	0	219.9
11 febrero	193.72	198.2
12 febrero	81.26	97.8
13 febrero	0	1255.8
14 febrero	0	7964.9
15 febrero	302.19	234.6
16 febrero	270	210.1
17 febrero	0	358.2
18 febrero	118.6	115
19 febrero	313.37	312.6
20 febrero	444.96	388.6
21 febrero	0	456.9
22 febrero	115.8	130.6
23 febrero	105.44	107.5

En la tabla 7 se puede observar que la mayoría de los días no presentan mucha diferencia en el cálculo de la altura de capa de mezcla entre los métodos, a pesar de ello hubo casos donde el método matemático calculó una altura menor a los 500 metros mientras que el método gráfico no lograba captarla, ejemplo de esta situación son los días 03, 04, 09, 10 17 y 21 de febrero.

Sin embargo, al observar el método gráfico para los días 03, 04, 17 y 21 de febrero se puede ver que el perfil de temperatura ambiental y el perfil adiabático seco están muy próximos a la intersección donde el método matemático encuentra la altura de capa de mezcla. A continuación, se presenta ejemplo de esta situación con el día 03 y 04 de febrero (figura 37 y 38).

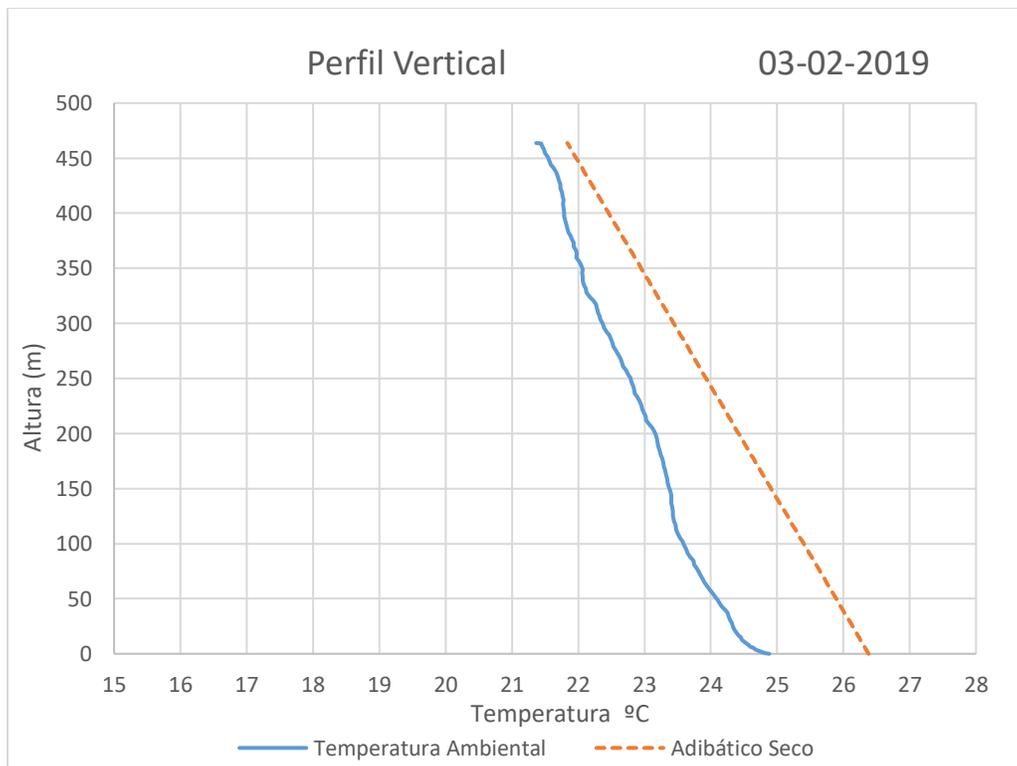


Figura 37. Perfil de temperatura ambiental y el perfil adiabático seco de 03 de febrero del 2019.

En comparación con los resultados del 03 de febrero en el método matemático encuentra la altura de capa de mezcla a 456.8 metros, al ver la figura 38 se puede observar que la intersección del perfil adiabático se acerca mucho al perfil de temperatura ambiental a partir de los 400 metros conforme va ascendiendo.

Del mismo modo sucede el 04 de febrero (figura 38) al acercarse ambas líneas, aproximadamente desde los 400 metros, mientras que el método matemático encuentra a la altura de capa de mezcla con un valor de 434,2 metros.

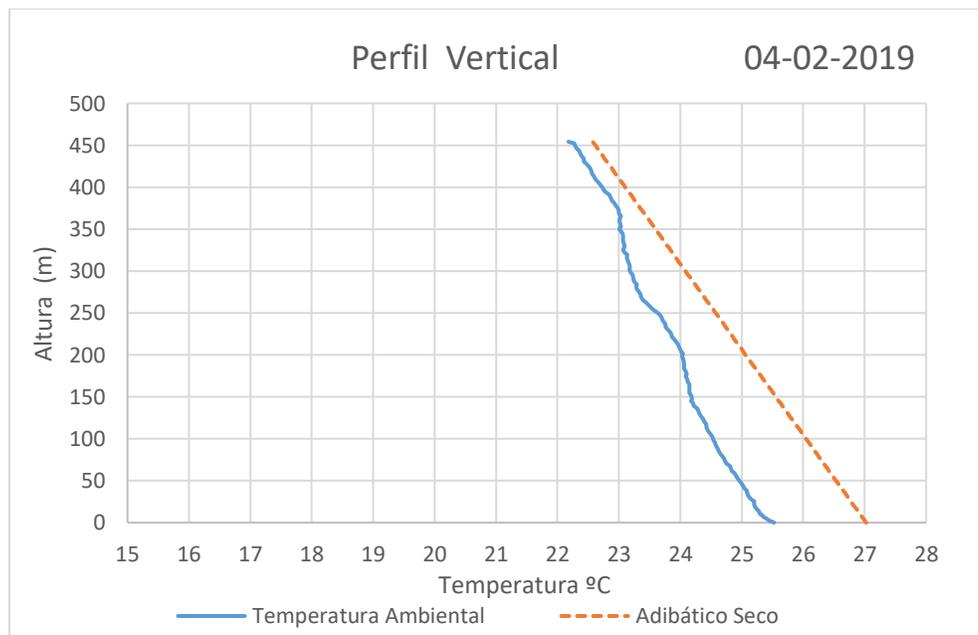


Figura 38. Perfil de temperatura ambiental y el perfil adiabático seco del 04 de febrero del 2019.

Contrariamente a los casos ya mencionados, con el método gráfico los días de monitoreo 09 y 10 de febrero muestran que la intersección entre los perfiles es muy lejana (figura 39) mientras que el método matemático encuentra valores inferiores a los quinientos metros, de 458.1 metros para el 09 de febrero y de 219.9 metros el 10 de febrero.

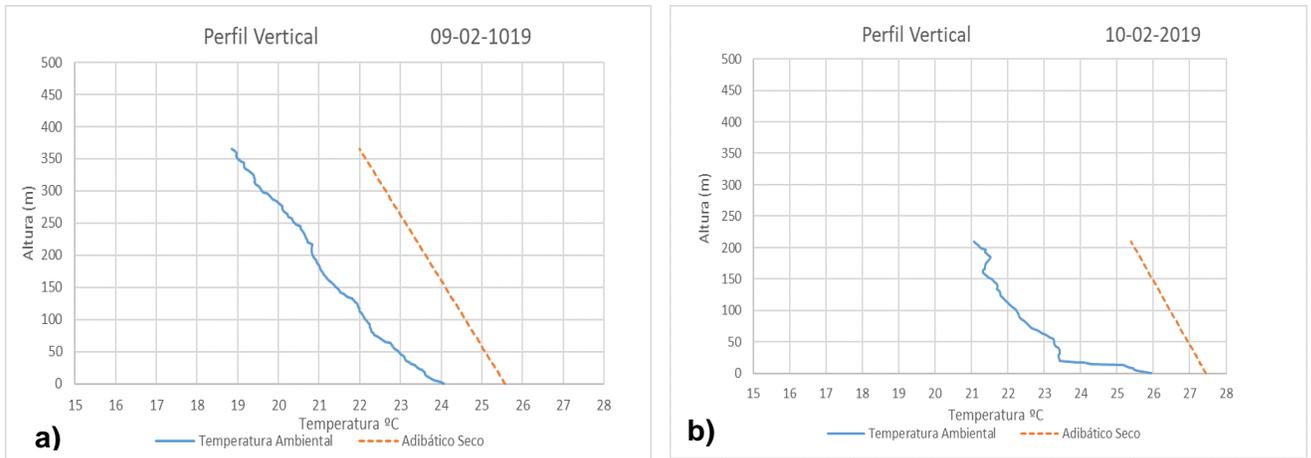


Figura 39. Perfil de temperatura ambiental y el perfil adiabático seco a) 09 de febrero del 2019 y b) 10 de febrero del 2019.

Con base a esto se analizó de manera comparativa los resultados de ambos métodos para encontrar la correlación que existía entre ellos sin tomar en cuenta los días con valor cero del método gráfico y los días con alturas mayores a los 500 metros en el método matemático (figura 40).

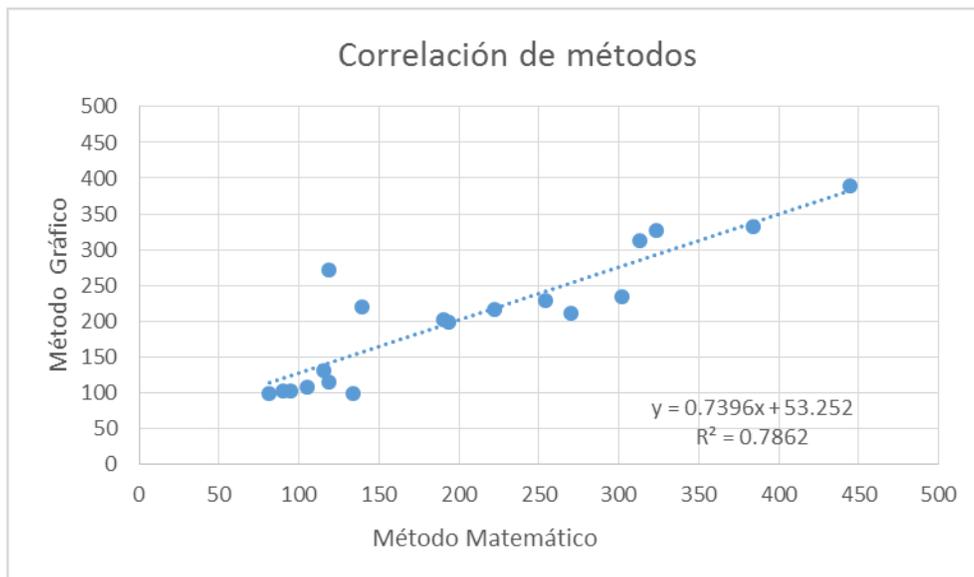


Figura 40. Correlación entre resultados de método gráfico y matemático.

Como se puede observar en la figura 40 la correlación que existe entre ambos resultados es del 78%, tomando en cuenta los días en donde los dos métodos alcanzaron a medir una altura de capa de mezcla dentro del rango de ascenso del VANT.

Este tipo de análisis estadístico no solo permite identificar la similitud de los resultados como se mencionó anteriormente, sino que también permite reconocer el margen de error, es decir la diferencia entre los datos, en este caso se muestra con un 22% de error entre ambos métodos.

Posteriormente se realizó un análisis cualitativo, el cual consistió en estudiar las condiciones meteorológicas que se presentaron en cada día de monitoreo para determinar su relación con la altura de capa de mezcla medida, pues de esta manera, se podría identificar los fenómenos atmosféricos que pueden acentuar bajas alturas.

Las condiciones sinópticas que predominaron durante estos días fueron los sistemas de baja presión, corrientes de chorro y frentes fríos (CONAGUA, 2019). Es importante mencionar que la campaña de monitoreo fue realizada en temporada invernal, por lo que se presentaron once frentes fríos en el país de los cuales nueve llegaron hasta el Estado de Chiapas, generando sistemas anticiclónicos durante la campaña de monitoreo.

De manera general se pudo detectar que los días en que Tuxtla Gutiérrez era afectado por frentes fríos se presentaban inversiones térmicas ejemplo de este tipo de situaciones registradas es del 23 de enero en donde la llegada del frente frío número 30 generó este fenómeno.

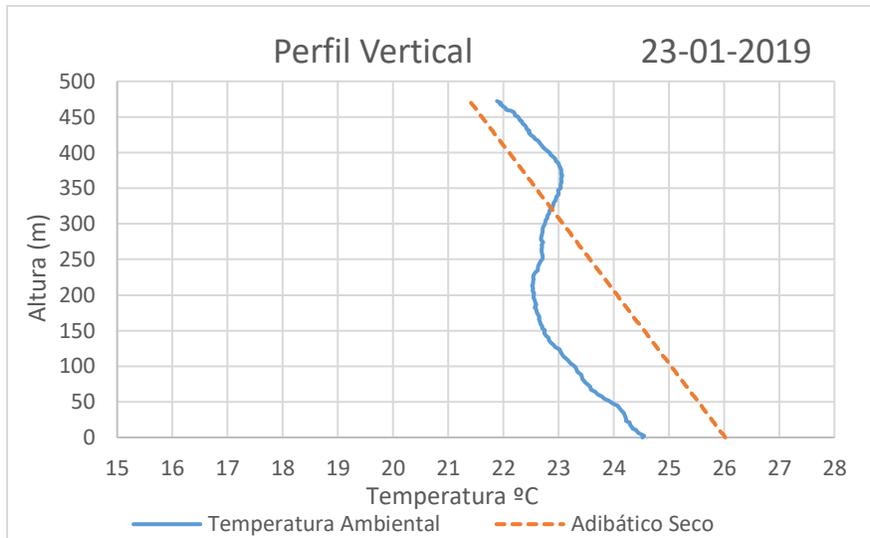


Figura 41. Perfil de temperatura ambiental y el perfil adiabático seco del 23 de enero.

En la figura 41 se puede ver que la temperatura inicial es de 24.5°, conforme se sigue ascendiendo la temperatura disminuye hasta los 320 metros, en donde la temperatura comienza a aumentar medio grado, presentándose la inversión térmica. Consiguiente a ello, el día 24 de enero el frente frío continuó desplazándose hacia el sur del país, dejando una masa de aire frío en la mayor parte del Estado por lo que en ese día la temperatura logró seguir el gradiente térmico vertical de temperatura (figura 42).

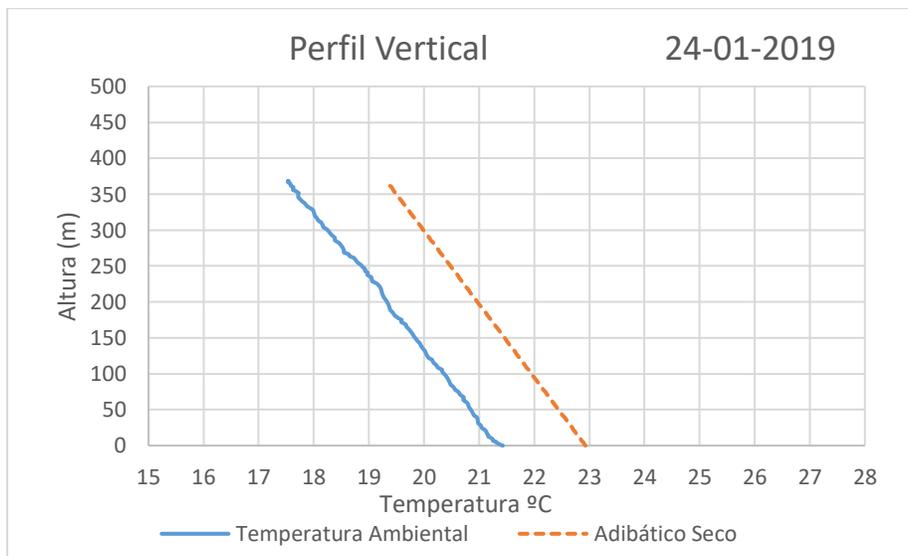


Figura 42. Perfil de temperatura ambiental y el perfil adiabático seco del 24 de febrero.

Para el 25 de enero el frente frío estaba saliendo del Estado de Chiapas por lo que la masa de frío que había pasado dejó a la superficie más fría que el aire ascendente generando nuevamente una inversión térmica por subsidencia (figura 43).

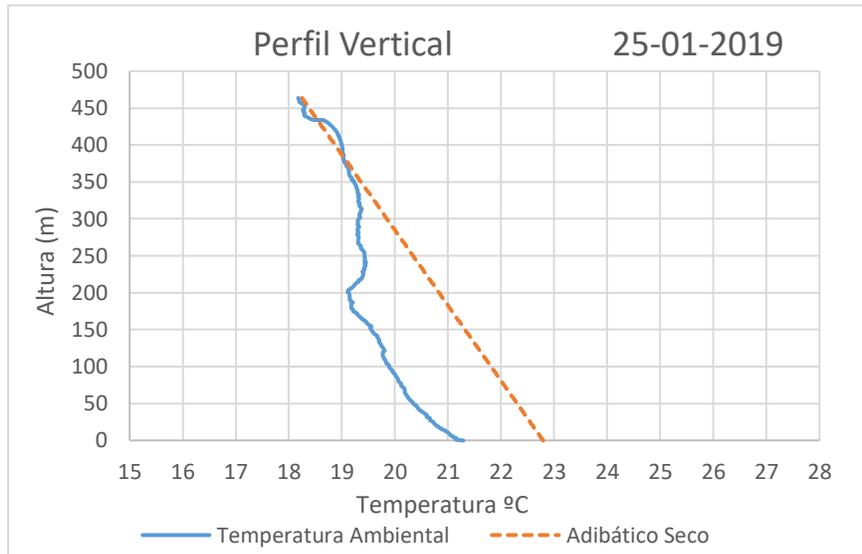


Figura 43. Perfil de temperatura ambiental y el perfil adiabático seco del 25 de enero.

En la figura 44 se pueden observar las condiciones sinópticas que acontecieron los primeros cuatro días de monitoreo, en donde se puede observar el desplazamiento del frente frío generando condiciones ciclónicas en el Estado de Chiapas.

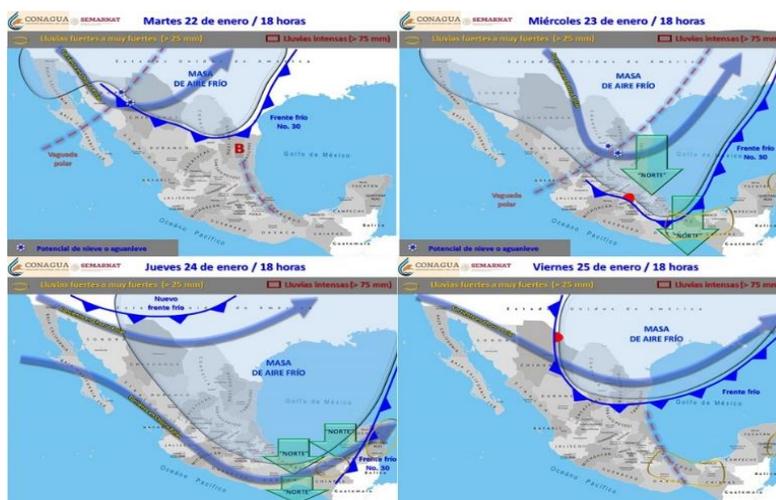


Figura 44. Condiciones Sinópticas del 22 al 25 de enero.

Durante los días bajo la influencia de sistemas de alta presión las alturas de capa de mezcla se presentaban elevadas, en su mayoría superiores a los mil metros ejemplo de este caso es el 28 de enero cuya altura de capa de mezcla no se determinó por medio del método gráfico al ser mayor a quinientos metros (figura 45), sin embargo, el método matemático calculó una altura de 3635.1 metros.

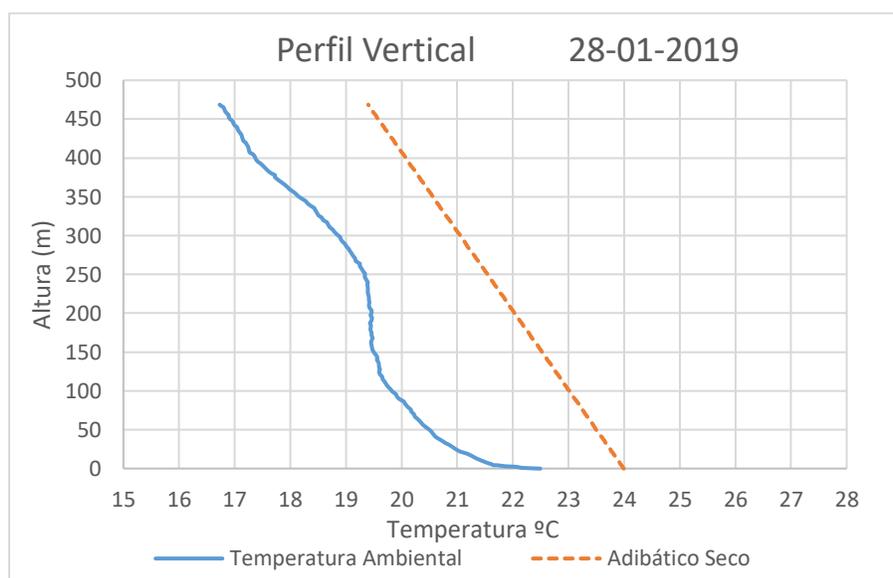


Figura 45. Gráfica del 28 de enero del 2019.

Como se puede ver en la figura 46 el estado de Chiapas tenía la influencia de un sistema anticiclónico con vientos moderados del norte y con una fuerte corriente en chorro de altura, la cual generaba condiciones de turbulencia en la atmosfera, en la figura 47 el perfil de temperatura ambiental presenta un comportamiento de inestabilidad.

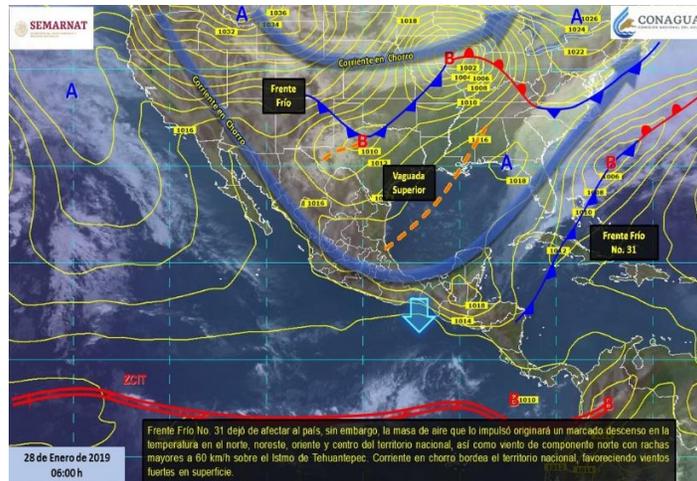


Figura 46. Condiciones sinópticas del 28 de enero.

Otro día representativo dentro de la campaña de monitoreo fue el 05 de febrero presentando bruma en el ambiente (Ver figura 48). Tanto el método gráfico como el matemático calcularon una altura de capa de mezcla entre los 230 y 250 metros.



Figura 47. Fotografía del día de monitoreo 05 de febrero.

El 05 de febrero estuvo bajo la influencia de un sistema anticiclónico, este tipo de sistemas son asociados a días de estabilidad, la cual pudo ser captada por medio del método gráfico como se puede ver en la siguiente figura.

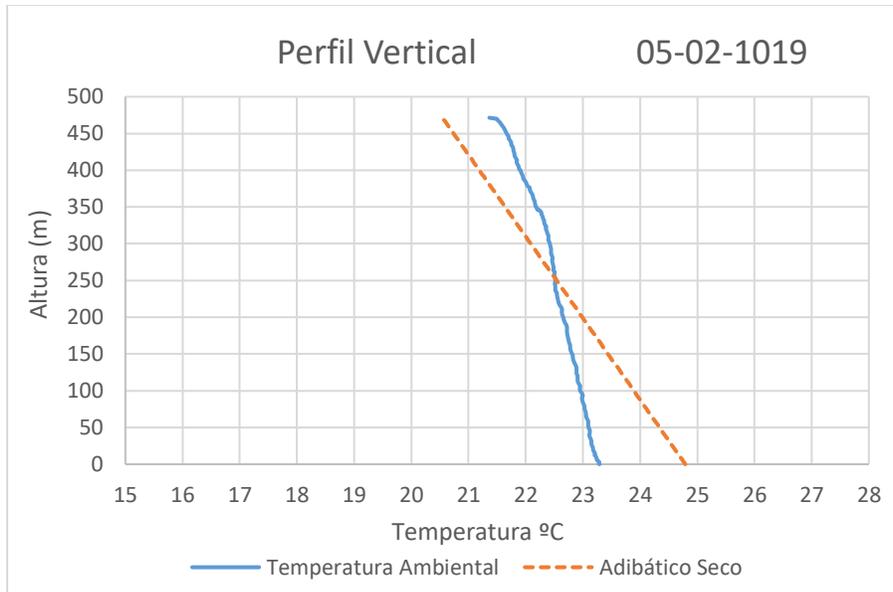


Figura 48. Gráfica del 05 de febrero del 2019.

Al observar las condiciones sinópticas de este día de muestreo se puede comprobar que había un sistema de alta presión en el ambiente.

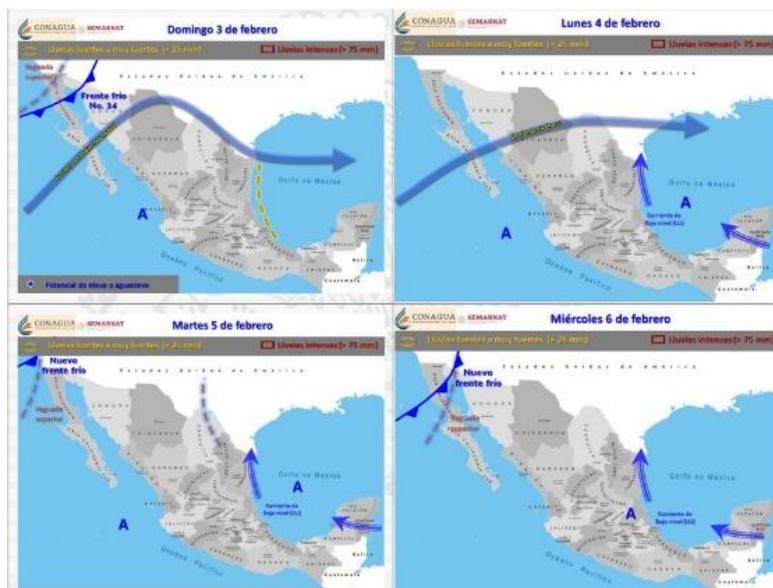


Figura 49. Condiciones sinópticas del 05 de febrero.

A continuación, se presenta en la tabla 8 una clasificación general de las alturas de capa de mezcla, las cuales se dividieron en cuatro categorías.

Tabla 8 Clasificación de las alturas de capa de mezcla en relación con las condiciones atmosféricas.

Condiciones atmosféricas	Alturas de capa de mezcla	Altura (m)
Ingreso de frentes fríos	Muy Altas	<500
Corriente de bajo nivel	Altas	300-500
Estabilidad	Medias	100-300
Inversiones térmicas y suradas	Bajas	0-100

De manera general en la campaña de monitoreo realizada, se pudo observar que durante ingreso de sistemas frontales las alturas de capa de mezcla eran *muy altas*, conforme el sistema se iba desplazando, las alturas comenzaban a descender pasando a la categoría de *altas*, debido a inversiones por subsidencia.

Para el caso de las alturas de capa de mezcla *medias*, estas generalmente se presentaban en días con estabilidad dentro de la ciudad, por la presencia de sistemas anticiclónicos (altas presiones), al prolongarse este tipo de sistemas en la ciudad, las inversiones térmicas eran presentes y más agudas conforme al paso de los días, siendo interrumpido por el ingreso de sistemas frontales.

10. CONCLUSIONES.

Por medio de la metodología aplicada en esta investigación, fue posible completar la campaña de monitoreo a través de un VANT instrumentado con la MEM, el uso en conjunto de ambos permitió obtener a bajo costo datos de presión, temperatura y humedad en la vertical atmosférica a una altura de 500 metros, lo cual permitió hacer la estimación de la altura de capa de mezcla por medio de los dos métodos empleados anteriormente descritos; gráfico y matemático. Estos métodos pudieron funcionar debido a que los datos requeridos de las variables meteorológicas que ambos métodos necesitan, se obtuvieron durante la campaña de monitoreo realizada.

El uso del VANT fue un eje importante para la obtención de los datos necesarios en la vertical atmosférica de forma rápida y eficaz debido a su facilidad de manejo. En este sentido, se pudieron observar varios beneficios del empleo del VANT durante las mediciones; una de ellas es que cuenta con una cámara en donde se puede observar durante el ascenso el estado del tiempo en la atmosfera, además que permite guardar esta información mediante fotografías o videos, que ayudan al análisis de los datos.

Sin embargo, para este estudio el VANT tuvo como limitante la resistencia al viento, ya que, en ocasiones durante la campaña de monitoreo se presentaron rachas superiores a los 20m/s, provocando inestabilidad en el vuelo en alturas superiores a los 40 metros, por tanto, había un riesgo de desplome de la aeronave. Otro inconveniente eran las actualizaciones del software del VANT, pues retrasaban el ascenso para las mediciones en algunas ocasiones.

No obstante, para cuestiones del estudio de la altura de capa de mezcla, la mayor limitante que podríamos mencionar sobre el VANT es la restricción de altura en cuanto a que el ascenso no puede ser mayor a 500 metros. Por ello es fundamental gestionar los permisos necesarios para que se puedan realizar vuelos entre los mil y dos mil metros de altura, ya que esto permitirá construir bases de datos más

completas, y en torno a los métodos utilizados se podrán comprobar los resultados del método matemático que el gráfico no puede medir por la limitante de la altura.

El utilizar ambas metodologías ayudó a verificar la correspondencia de los resultados obtenidos, sin embargo se pudo observar que el método gráfico muestra resultados con mayor detalle, puesto que para graficar utiliza la temperatura ambiental registrada durante la medición, a diferencia del matemático el cual hace una modelación a partir de los datos obtenidos, por medio del cálculo de la tasa de enfriamiento para obtener mayor alcance respecto a la altura, considerando lo anterior es recomendable utilizar el método gráfico para muestreos locales, utilizando como apoyo el método analítico para verificar la correspondencia de los datos.

El método gráfico determinó la altura de capa de mezcla en un 63.3% de los días durante el período de muestreo, de los cuales en 33.33% las alturas son menores de 205 metros, mientras que en un 30% fueron entre los 205 y 500 metros, por último, en 36.7% son superiores a los 500 metros.

De manera general los días con alturas de capa de mezcla bajas (menores a los 205 metros) se muestran consecutivas es decir de 2 a 4 días, estos periodos se interrumpían por el ingreso de los sistemas de baja presión. Es importante destacar que la temporada en la que se realizó la campaña de monitoreo fue en la invernal, en esta época del año México y en particular el Estado de Chiapas es afectado por los frentes fríos, es decir sistemas ciclónicos que generan inestabilidad en la atmosfera lo que en su mayoría favorece la turbulencia.

En este sentido es preciso señalar que en áreas con varias fuentes fijas y móviles de contaminación⁶ puede aumentar mucho la concentración de contaminantes si persisten situaciones meteorológicas que impiden su dispersión, las cuales pueden empeorar dependiendo de la geomorfología del lugar, o si existen barreras artificiales (edificios) que pueden favorecer la acumulación de contaminantes. Este

⁶ Entre las diferentes fuentes de emisiones a la atmósfera podemos distinguir dos grandes tipos: las fuentes fijas y las móviles (INECC, 2007).

tipo de situaciones deben ser consideradas, debido a las repercusiones que la contaminación atmosférica puede tener sobre la salud del ser humano.

La Organización Mundial de la Salud menciona que la población más afectada por problemas relacionados con contaminación atmosférica son las personas con enfermedades previas, los niños menores de cinco años y los adultos entre 50 y 75 años de edad son los más afectados. Por otro lado, las personas de bajos recursos y aquellas que viven en situación de vulnerabilidad, así como las madres de familia que utilizan estufas tradicionales de biomasa para cocinar y calentarse, también corren mayor riesgo. Durante la campaña de monitoreo se pudieron observar varias chimeneas en la ciudad provenientes de casas, por lo que se pudo detectar que aun siendo la capital del Estado muchas personas aún cocinan con este tipo de estufas tradicionales.

La mancha urbana de Tuxtla Gutiérrez sigue creciendo, por ende el aumento de coches particulares, transportes públicos, emisiones por quemas de basura y lotes, negocios que generan emisiones a la atmosfera y las quemas agrícolas de las poblaciones aledañas de la capital, entre los meses de febrero-mayo afectan todos los años a la ciudad por el humo, contaminantes y partículas emitidas, ocasionando episodios de una atmosfera llena de calima en donde la visibilidad es poca, lo cual provoca condiciones favorables para la acumulación de contaminantes por varios días, considerando que la ciudad está ubicada en un valle intermontano, la dispersión de contaminantes puede ser obstruida por las elevaciones que están en la periferia de Tuxtla Gutiérrez.

Por ello es importante continuar con el monitoreo de la altura de capa de mezcla, para generar información que sustente las bases suficientes, para hacer propuestas en próximos ordenamientos territoriales y la gestión de un sistema de monitoreo atmosférico.

11. RECOMENDACIONES.

- Extender por lo menos un año completo de monitoreo del perfil vertical de temperatura.
- Homogeneizar la hora exacta de inicio de las mediciones, lugar y altura en donde se tomará la fotografía para poder analizar la base de datos y detectar fácilmente cualquier anomalía.
- Realizar el registro del VANT y gestionar la licencia de piloto ya que al pesar más de dos kilogramos la aeronave es un requisito obligatorio por parte de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes a través de la Dirección General de Aeronáutica Civil.
- También es fundamental gestionar los permisos necesarios para que se puedan realizar vuelos entre los mil y dos mil metros de altura, procurando mantener la seguridad del equipo, y poder construir bases de datos más completas.
- Agregar en la MEM un módulo GPS dependiente de satélites y no de la presión para calcular la altura.
- Optimizar y complementar la MEM, con otros sensores ambientales como radiación, intensidad y dirección de vientos, o sensores de calidad del aire para aprovechar la viabilidad del VANT.
- Realizar mediciones en otras áreas de la ciudad para observar y comparar el comportamiento meteorológico en diferentes puntos.

12. BIBLIOGRAFÍA.

- Andrades, M., Muñoz C. (2012). La Temperatura. En Fundamentos de Climatología (pp. 19-24). España: Universidad de la Roja.
- Ayllón, T. (2003). Temperatura del aire. En Elementos de Meteorología y Climatología (pp.50-60). México: Trillas.
- BOSCH. (2018). BME280 - DATA SHEET. ALEMANIA: BOSCH SENSORTEC.
- Domínguez H., (2004). Las Capas de la atmósfera. En Nuestra Atmósfera: Cómo comprender los Cambios Climáticos (pág. 17-27). México: Lectorum S.A de C.V.
- CEIEG. (2013), REGIÓN I METROPOLITANA. Agosto 28, 2017, de Gobierno del Estado de Chiapas Sitio web: http://www.ceieg.chiapas.gob.mx/productos/files/MAPASTEMREG/REGION_I_METROPOLITANA_post.pdf
- CONAGUA. (2019). Centro Hidrometeorológico Regional "Tuxtla Gutiérrez Chiapas". 14 junio, 2019, de Gobierno del México Sitio web: <https://smn.conagua.gob.mx/es/centro-hidrometeorologico-tuxtla-gutierrez-chiapas>
- DJI. (2019). DJI ESPECIFICACIONES. septiembre, 2019., de DJI Sitio web: <https://www.dji.com/mx>
- DJI. (2019). Phantom 4. Especificaciones. septiembre, 2019., de DJI Sitio web: <https://www.dji.com/mx/phantom-4>
- Figueruelo J., Marino M., (2004). Química Física del Ambiente y de los Procesos Medioambientales. Barcelona: REVERTÉ S.A.
- Gonazhapa, B. (2016). Entorno Arduino. En Arduino: Guía Práctica (pp. 2-5). Madrid: RC Libros.
- Herrero, I. (2019). Arduino Nano V3.0. octubre, 2019., de IBEROBOTICS Sitio web: <https://www.iberobotics.com/producto/arduino-nano-v3-0-atmega328-5v-16mhz-compatible/>

- Holtzworth, G. (1967) "Mixing Depth, Windspeeds and Air Pollution Potential in U.S.". Journ. Appl. Meteor. Vol. 6; 1039-1044.
- IDEAM, Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2007-2010 Bogotá, D.C., 2012.
- INECC. (2007). Tipos y fuentes de contaminantes atmosféricos. noviembre 15, 2019, de SEMARNAT Sitio web: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/396/tipos.html>
- INECC. (2014). INFORME NACIONAL DE CALIDAD DEL AIRE 2014, MÉXICO. Consultado: 08/03/2019, de SEMARNAT Sitio web: <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/Informe2014.pdf>
- INEGI 2010. Cuaderno estadístico municipal, Tuxtla Gutiérrez, estado de Chiapas. Edición 2003. INEGI. Aguascalientes, México.
- INEGI, CONAPO, SEDESOL (2005). Instituto Nacional de Estadística y Geografía, ed. «Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2005 - Tuxtla Gutiérrez» (PDF). Consultado el 01 de diciembre de 2017.
- INIA. (2008). Temperatura del aire atmosférico. marzo 11, 2019. de Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria de Uruguay Sitio web: http://www.inia.org.uy/disciplinas/agroclima/le/cc_tempe.htm
- Jiménez J. (2016). Altura de la capa de mezcla en un área urbana, montañosa y tropical. Caso de estudio: Valle de Aburrá (Colombia) (Tesis Doctoral). Universidad de Antioquia, Medellín.
- Moragues J., (2007). Clasificación de estabilidad: Capa de Mezcla
- Navarro, M. (2010). Principios básicos de la atmósfera. marzo 20, 2019, de Manual de Vuelo Sitio web: https://www.manualvuelo.es/1pbav/11_atmos.html
- Ojeda M. (2018). CN y TICS. octubre, 2018., de Blogger. Sitio web: http://carlosojeda14.blogspot.com/2018/09/fenomenosatmosfericoseolometoros_19.html

- OMS. (2006). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Consultado: 08/03/2019, de Organización Mundial de la Salud Sitio web: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf;jsessionid=FB1811E5F9571DC7E602DF35AAB50995?sequence=1
- Organización Panamericana de la Salud (2005). Conceptos básicos sobre la meteorología de la contaminación del aire. Organización Mundial de la Salud. Enero 2005.
- PNUMA. GEO América Latina y El Caribe (2003). Perspectivas del Medio Ambiente 2003. Costa Rica. 2003.
- PROMACC. (2015). Programa Municipal Ante el Cambio Climático de Tuxtla Gutiérrez. Consultado: 12/03/19, de SEMARNAT Sitio web: <http://www.cecropia.org/humana/tuxtla/data/proyectos/promacc/PROMACC.pdf>
- Puigcerver M., Carrascal D. (2008). Características generales de la atmósfera. En El medio atmosférico: meteorología y contaminación (p. 23). España: Universitat de Barcelona.
- Ramos S., Carrera J., Magaña E., (2016). TALLER DE CALIDAD DEL AIRE. Consultado el: 09/01/2019, de Universidad Juárez Autónoma de Tabasco Sitio web: <http://www.riaat.ujat.mx/hablandoal aire/tutoriales/TallerDeCalidadDelAire.pdf>
- Ruiz Gutierrez, J. M. (2007). Arduino: Manual de programación. San Francisco, CA: Creative Commons.
- Silverio A. (2015). Responsabilidad de las naciones y la industria ante los problemas ambientales. octubre, 2019., de DGC Sitio web: <https://sites.google.com/a/dgb.email/202---amaro-jaquez-silverio-abel/t-relacion-hombre---naturaleza-en-distintos-contextos-culturales/x-responsabilidad-de-las-naciones-y-la-industria-ante-los-problemas-ambientales>.

- SEMAHN. (2018). Programa de Gestión Para Mejorar la Calidad del Aire Del Estado de Chiapas. Consultado: 10/03/2019, de SEMARNAT Sitio web: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/310363/26_ProAire_Chiapas.pdf
- Trejo R., Villagómez P. (2011). Método Propuesto para Estimar la Altura de Capa de Mezcla en la Atmosfera, con ayuda de la Aviación. Conciencia Tecnológica, Vol. 44, pp. 36-40.
- UC. (2001). Atmósfera. 20 septiembre, 2017, de Pontificia Universidad Católica de Chile Sitio web: http://www7.uc.cl/sw_educ/contam/fratmosf.htm
- Vargas, S., Lange, D. (2016). Sistema aéreo de medición de gases contaminantes basado en un UAV, resultados preliminares. Acta Nova, 7, pp. 194-212.
- Villatoro, C. (2015). Modelación preliminar de la isla de calor urbano en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez y sus efectos al índice de confort térmico. (Tesis de pregrado inédita). Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Chiapas, México.
- WHO (World Health Organization). 2006. Air quality guidelines global update 2005. Disponible en:http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf
- Yepes, L., Acero, J., Castañeda, L. (2017). PROTOTIPO DE MEDICIÓN DE EMISIONES DE GAS CARBÓNICO EN UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO (UAV) PARA LOS ALREDEDORES DE RELLENOS SANITARIOS. octubre 15, 2019, de Universidad Distrital Francisco José de Caldas Sitio web: <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/6624/11/YepesSu%C3%A1rezJennyLorena2017.pdf>