



UNIVERSIDAD DE PANAMÁ  
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS FÍSICAS  
ESTUDIO COMPARATIVO DEL MODELO DE LA ATMÓSFERA ESTÁNDAR  
APLICADO AL CASO PARTICULAR DE LA TROPÓSFERA EN LA REGIÓN DE EL  
CERRO, LAS TABLAS, PANAMÁ

NORIEL MANRIQUE CORREA GONZÁLEZ

TESIS PRESENTADA COMO UNO DE LOS REQUISITOS PARA OPTAR AL GRADO  
DE MAESTRO EN CIENCIAS FÍSICAS

PANAMÁ, REPUBLICA DE PANAMÁ  
2013



Título de la Tesis: **"Estudio comparativo del modelo de la atmósfera estándar aplicado al caso particular de la troposfera en la región de El Cerro, Las Tablas, Panamá"**

TESIS

Sometida para optar al título de Maestría en CIENCIAS FÍSICAS

Vicerrectoría de Investigación y Postgrado

Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología

APROBADO POR:

**Mgtr. Alvaro Maturell**  
**Presidente**

**Doctor Eduardo Camacho**  
**Miembro**

**Mgtr. Moisés Ortega**  
**Miembro**

REFRENDADO POR:

**REPRESENTANTE DE LA VICERRECTORÍA**  
**DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADO**

FECHA:

\_\_\_\_\_

57

## DEDICATORIA

29 SEP 2014.

A mi esposa que siempre me apoyo durante la ejecución de esta investigación, a mi familia que supo darme lo mejor de ellos esperando que me sirviera de mucho en mi vida sin esperar nada a cambio.

*Ob.*

## AGRADECIMIENTO

A toda mi familia por su apoyo incondicional. A mi esposa por estar siempre pendiente que no me faltara nada y pudiera culminar con éxito mi trabajo de investigación. A mi hermano que siempre está presente en los buenos y malos momentos.

Al Magter Eldis Barnes que desde que inicie mi carrera docente ha estado a mi lado, como jefe y como amigo.

A mis colegas de física, en especial a el profesor Sergio Guerra, el Dr. José Moreno y al Mgter. Marciano Santamaría que en todo momento me brindó su apoyo y me dio ánimos para culminar este trabajo.

A los colegas del Física de la Atmósfera que creyeron en mí y pusieron su tiempo y conocimiento a mi disposición para llevar a cabo este trabajo de investigación.

A mi asesor, Alvaro Maturell, por haber depositado su confianza en mí para poder sacar esta investigación adelante a pesar de que en el país no se cuenta con muchos especialistas en esta área.

## ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
<b>2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA</b>	<b>6</b>
<b>2 1 Descripción del sitio de muestreo</b>	<b>7</b>
(Lutgens & Tarbuck The atmosphere an introduction to meteorology 2007)2	2
<b>Composición de la Atmósfera</b>	<b>9</b>
<b>2 3 División térmica de la atmósfera</b>	<b>10</b>
<b>2 3 1 La tropósfera</b>	<b>10</b>
<b>2 3 2 La estratósfera</b>	<b>15</b>
<b>2 3 3 La mesósfera</b>	<b>16</b>
<b>2 3 4 La termósfera</b>	<b>16</b>
<b>2 4 La atmósfera estándar</b>	<b>17</b>
<b>2 4 1 Modelando la temperatura</b>	<b>18</b>
<b>2 4 2 Modelando la presión</b>	<b>19</b>
<b>3 ASPECTOS METODOLÓGICOS</b>	<b>21</b>
<b>4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>26</b>
<b>4 1 Base de datos</b>	<b>26</b>
<b>4 2 Estudio de los perfiles de temperatura y altitud en la tropósfera</b>	<b>29</b>
<b>4 3 Estudio de los perfiles de presión y la altitud en la tropósfera</b>	<b>54</b>
<b>4 4 Estudio de los perfiles de humedad relativa y la altitud en la tropósfera</b>	<b>70</b>
<b>4 5 Estudio de los perfiles de ozono y la altitud en la tropósfera</b>	<b>79</b>
<b>5 CONCLUSIONES</b>	<b>87</b>
<b>6 RECOMENDACIONES</b>	<b>91</b>
<b>7 BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>92</b>

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	<b>Parámetros tomados para caracterizar la atmósfera estándar (Cavcar 2010)</b>	<b>18</b>
<b>Tabla 2</b>	<b>Valores de pendiente error absoluto y coeficiente de correlación obtenidos de los ajustes de los perfiles correspondientes a la Fig 19 22</b>	<b>37</b>
<b>Tabla 3</b>	<b>Valores de pendiente error absoluto y coeficiente de correlación obtenidos de los ajustes de los perfiles correspondientes a la Fig 25 27</b>	<b>45</b>
<b>Tabla 4</b>	<b>Valores del intercepto presión inicial y coeficiente de correlación de los perfiles de presión en función de la altitud para el área de estudio en las fechas asignadas correspondiente al mes de julio agosto de 2007</b>	<b>68</b>
<b>Tabla 5</b>	<b>Tendencia de la humedad relativa durante el período de estudio alrededor de los 8 km</b>	<b>78</b>

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> <i>El ER 2 de NASA equipado con instrumentos de percepción remota similares a los satélites se utilizó para volar sobre las nubes Fuente (Mike Craig 2008)</i>	5
<b>Figura 2</b> <i>El WB 57 de NASA equipado con instrumentos in situ se utilizó para penetrar las nubes en los niveles medios y superiores Fuente (Mike Craig 2008)</i>	5
<b>Figura 3</b> <i>El DC 8 de la NASA equipado con instrumentos de percepción remota e in situ se utilizó para proveer la química y medidas de las nubes incluyendo el TTL y estratosfera para validación Aura Fuente (Mike Craig 2008)</i>	5
<b>Figura 4</b> <i>El radar Polarización de NASA (NPOL por sus siglas en inglés) recogió datos y brindó datos climática para las misiones de investigación en la Bahía Panamá Fuente (Mike Craig 2008)</i>	5
<b>Figura 5</b> <i>El radar Investigación Atmosférica Móvil Compartido y de Capacitación de la Universidad de Oklahoma (SMART por sus siglas en inglés) brindó información climatológica local en San José para apoyo de las aeronaves Fuente (Mike Craig 2008)</i>	6
<b>Figura 6</b> <i>El remolque Atmosférico Nittany y Experimento de Validación Integrada de la Universidad Estatal de Pensilvania (NATIVE por sus siglas en inglés) también recabó información de Las Tablas Panamá Fuente (Mike Craig 2008)</i>	6
<b>Figura 7</b> <i>Mapa donde muestra la ubicación del sitio de estudio del proyecto TC4</i>	7
<b>Figura 8</b> <i>Mapa de la ubicación del sitio de investigación respecto a la ciudad de Las Tablas</i>	7
<b>Figura 10</b> <i>Imágenes de la localidad de El Cerro lugar en donde se apostaron los equipos de trabajo Fuente (Mike Craig 2008)</i>	8
<b>Figura 11</b> <i>Representación esquemática de la estructura térmica de la atmósfera con sus diferentes capas Fuente (Brasseur &amp; Solomon 2005)</i>	9
<b>Figura 12</b> <i>Diagrama de una parcela de aire y las fuerzas que actúan sobre ella Fuente (Wallace &amp; Hobbs 2006)</i>	11
<b>Figura 13</b> <i>Variaciones con la temperatura de la saturación de la presión de vapor sobre una superficie plana de agua pura (línea roja y escala a la izquierda) y la diferencia entre e y la saturación de la presión de vapor sobre una superficie plana de hielo e (línea azul y escala a la derecha) Fuente (Wallace &amp; Hobbs 2006)</i>	12
<b>Figura 14</b> <i>Analogías para las condiciones de (a) estabilidad (b) no estable (c) neutral y (d) inestabilidad El círculo rojo es la posición original de la bola y los círculos blancos son sus posiciones desplazadas Las flechas indican las direcciones de las bolas que se mueven desde a una posición desplazada si la fuerza que produce el desplazamiento es removida Fuente (Wallace &amp; Hobbs 2006)</i>	14
<b>Figura 15</b> <i>Variaciones de temperatura en la atmósfera estándar Fuente (AIRBUS 2002)</i>	19
<b>Figura 16</b> <i>Presión altitud como función de la presión Fuente (AIRBUS 2002)</i>	20
<b>Figura 17</b> <i>DTS utilizado para la adquisición de datos</i>	22
<b>Figura 18</b> <i>Página web utilizada para el manejo de la información necesaria para realizar las comparaciones con el modelo estándar</i>	23
<b>Figura 19</b> <i>Seleccionador de parámetros atmosféricos para ser utilizados en la obtención de los perfiles</i>	24
<b>Figura 20</b> <i>Base de datos y las tablas utilizadas en el estudio</i>	26
<b>Figura 21</b> <i>Diseño de la tabla utilizada para almacenar temporalmente los datos provenientes del archivo plano (txt)</i>	27
<b>Figura 22</b> <i>Diseño de la tabla utilizada para almacenar los parámetros atmosféricos provenientes de la tabla temporal</i>	28

<b>Figura 23</b>	<b>Diseño de la tabla utilizada para realizar los cálculos de los errores del parámetro atmosférico temperatura que será utilizado para la obtención del perfil de temperatura y altitud</b>	<b>28</b>
<b>Figura 24</b>	<b>Diseño de la tabla utilizada para la realización del cálculo de la presión utilizando la ecuación (6)</b>	<b>29</b>
<b>Figura 25</b>	<b>Perfil de temperatura para los días en que se llevó a cabo el estudio en la región de Los Santos por parte de la NASA Física de la Atmósfera (UP) y la Universidad de Costa Rica</b>	<b>30</b>
<b>Figura 26</b>	<b>Ajuste de los espectros de temperatura altitud de S1F1 a S1F4</b>	<b>31</b>
<b>Figura 27</b>	<b>Ajuste de los espectros de temperatura altitud de S1F5 a S1F8</b>	<b>32</b>
<b>Figura 28</b>	<b>Ajuste de los espectros de temperatura altitud de S1F9 a S1F12</b>	<b>33</b>
<b>Figura 29</b>	<b>Ajuste de los espectros de temperatura altitud de S1F14 a S1F16</b>	<b>34</b>
<b>Figura 30</b>	<b>Ajuste de los espectros de temperatura altitud de S1F17 a S1F20</b>	<b>35</b>
<b>Figura 31</b>	<b>Ajuste de los espectros de temperatura altitud de S1F21 a S1F23</b>	<b>36</b>
<b>Figura 32</b>	<b>Gráfico de las pendientes de los perfiles S1F1 F24 en función de los días</b>	<b>38</b>
<b>Figura 33</b>	<b>Gráfico de los coeficientes de correlación obtenidos de los ajustes de las pendientes de los perfiles S1F1 F24 en función del día</b>	<b>38</b>
<b>Figura 34</b>	<b>Ajuste de los espectros de temperatura altitud de S2F1 a S2F4</b>	<b>39</b>
<b>Figura 35</b>	<b>Ajuste de los espectros de temperatura altitud de S2F5 a S2F8</b>	<b>40</b>
<b>Figura 36</b>	<b>Ajuste de los espectros de temperatura altitud de S2F9 a S2F12</b>	<b>41</b>
<b>Figura 37</b>	<b>Ajuste de los espectros de temperatura altitud de S2F13 a S2F16</b>	<b>42</b>
<b>Figura 38</b>	<b>Ajuste de los espectros de temperatura altitud de S2F17 a S2F20</b>	<b>43</b>
<b>Figura 39</b>	<b>Ajuste de los espectros de temperatura altitud de S2F21 a S2F23</b>	<b>44</b>
<b>Figura 40</b>	<b>Gráfico de las pendientes de los perfiles S2F1 F23 en función de los días</b>	<b>46</b>
<b>Figura 41</b>	<b>Gráfico de los coeficientes de correlación obtenidos de los ajustes de las pendientes de los perfiles S2F1 F24 en función del día</b>	<b>46</b>
<b>Figura 42</b>	<b>Gráfico de los valores medios de las pendientes para los días en estudio</b>	<b>48</b>
<b>Figura 43</b>	<b>Explicación probable a la presencia de la doble pendiente en los perfiles de temperatura en función de la altitud</b>	<b>49</b>
<b>Figura 44</b>	<b>Perfiles de presión en función de la altitud para las fechas 1 a la 4</b>	<b>54</b>
<b>Figura 45</b>	<b>Perfiles de presión en función de la altitud para las fechas 5 a la 8</b>	<b>55</b>
<b>Figura 46</b>	<b>Perfiles de presión en función de la altitud para las fechas 9 a la 12</b>	<b>56</b>
<b>Figura 47</b>	<b>Perfiles de presión en función de la altitud para las fechas 13 a la 16</b>	<b>57</b>
<b>Figura 48</b>	<b>Perfiles de presión en función de la altitud para las fechas 17 a la 20</b>	<b>58</b>
<b>Figura 49</b>	<b>Perfiles de presión en función de la altitud para las fechas 13 a la 16</b>	<b>59</b>
<b>Figura 50</b>	<b>Ambos presión y densidad del aire decrecen con el incremento de la altitud (Ahrens 2011)</b>	<b>60</b>
<b>Figura 51</b>	<b>Ajuste de los perfiles de presión en función de la altitud para F1 a F4</b>	<b>61</b>
<b>Figura 52</b>	<b>Ajuste de los perfiles de presión en función de la altitud para F1 a F4</b>	<b>62</b>
<b>Figura 53</b>	<b>Ajuste de los perfiles de presión en función de la altitud para F5 a F8</b>	<b>63</b>
<b>Figura 54</b>	<b>Ajuste de los perfiles de presión en función de la altitud para F9 a F12</b>	<b>64</b>
<b>Figura 55</b>	<b>Ajuste de los perfiles de presión en función de la altitud para F13 a F16</b>	<b>65</b>
<b>Figura 56</b>	<b>Ajuste de los perfiles de presión en función de la altitud para F17 a F20</b>	<b>66</b>
<b>Figura 57</b>	<b>Ajuste de los perfiles de presión en función de la altitud para F21 a F23</b>	<b>67</b>
<b>Figura 58</b>	<b>Comportamiento de la humedad relativa cuando varía la altitud en el área de estudio para F1 a F4</b>	<b>70</b>
<b>Figura 59</b>	<b>Comportamiento de la humedad relativa cuando varía la altitud en el área de estudio</b>	

para F5 a F8	71
<b>Figura 60</b> Comportamiento de la humedad relativa cuando varía la altitud en el área de estudio para F9 a F12	72
<b>Figura 61</b> Comportamiento de la humedad relativa cuando varía la altitud en el área de estudio para F13 a F16	73
<b>Figura 62</b> Comportamiento de la humedad relativa cuando varía la altitud en el área de estudio para F17 a F20	74
<b>Figura 63</b> Comportamiento de la humedad relativa en los alrededores de los 8 km para los primeros días del estudio	75
<b>Figura 64</b> Comportamiento de la humedad relativa en los alrededores de los 8 km para los siguientes días del estudio	76
<b>Figura 65</b> Comportamiento de la humedad relativa en los alrededores de los 8 km para los últimos días del estudio	77
<b>Figura 66</b> Perfiles de Ozono para las fechas F1 a F4	79
<b>Figura 67</b> Perfiles de Ozono para las fechas F5 a F8	80
<b>Figura 68</b> Perfiles de Ozono para las fechas F9 a F12	81
<b>Figura 69</b> Perfiles de Ozono para las fechas F13 a F16	82
<b>Figura 70</b> Perfiles de Ozono para las fechas F17 a F20	83
<b>Figura 71</b> Perfiles de Ozono para las fechas F21 a F22	84
<b>Figura 72</b> Perfiles de Ozono Temperatura y Humedad Relativa para el área de estudio	85

## **RESUMEN**

**Este trabajo se desarrolló en las instalaciones de Física de la Atmósfera en la Universidad de Panamá Panamá El objetivo principal en este trabajo era realizar una comparación entre el modelo estándar de la atmósfera desarrollado en sus inicios por los Estados Unidos de Norte América y el modelo de la atmósfera en la región de El Cerro en la provincia de los Santos localizado en la latitud 7 75 y una longitud 80 25**

**Otro objetivo de esta investigación fue determinar las propiedades atmosféricas del área de estudio y así poder utilizarlas en modelos de simulación de cambios climáticos**

**Se seleccionó esta región por su alta convección El estudio se llevó a cabo entre la NASA La Universidad de Costa Rica y la Universidad de Panamá Se llevó a cabo en un período comprendido entre los meses de julio y agosto del año 2007**

**Los datos fueron tomados con equipos de medición de última generación y utilizando Globo Sondas para obtener algunos parámetros atmosféricos que se utilizan para predecir el cambio climático y su comportamiento en el tiempo**

**Para el manejo de toda la información disponible para realizar este trabajo de investigación se confeccionó una base de datos en Microsoft SQL Server con acceso mediante una página web en lenguaje de programación (asp)**

**Se crearon cuatro perfiles para realizar una comparación con los perfiles de la atmósfera estándar estos fueron temperatura presión humedad relativa y concentración de ozono mixto estos fueron estudiados para ver su comportamiento con respecto al cambio de altitud**

**Se obtuvo que el perfil de temperatura altitud presenta una doble pendiente no así como lo indica el modelo de la atmósfera estándar El comportamiento experimental de los datos obtenidos puede ser explicado mediante un modelo matemático con una variación exponencial**

**Alrededor del punto en donde se da el cambio de pendiente 8 km se tiene una humedad relativa alrededor del 77%**

**Se puede decir que en esta región del país podemos utilizar el modelo estándar para predecir algunos parámetros atmosféricos sin ninguna dificultad**

**ABSTRACT**

This work was conducted at the premises of Atmospheric Physics at the Universidad de Panamá Panamá. The main objective in this study was a comparison between the standard model of the atmosphere developed in the beginning by the United States of America and the model of the atmosphere in the region of El Cerro of Los Santos province located in the latitude 7 75 and longitude 80 25.

Another objective of this research was to determine the atmospheric properties of the study area so you can use in simulation models climate change.

This region was chosen for its high convection. The study was carried out between the NASA, the Universidad de Costa Rica and the Universidad de Panamá. It was carried out in a period between July and August 2007.

The data were taken with measuring equipment of last generation and using Balloon Probes for some atmospheric parameters that are used to predict climate change and its behavior over time.

To manage all the information available to make this research a database in Microsoft SQL Server was compiled with access via a web page in asp programming language.

Four profiles were created for comparison with the standard atmosphere profiles: these were temperature, pressure, relative humidity, and ozone concentration. These were studied to see its behavior with respect to the change in altitude.

It was found that the temperature altitude profile has a double slope, not as indicated by the model of the standard atmosphere. The experimental data obtained behavior can be explained by a mathematical model with an exponential variation.

Around the point where the slope change occurs, 8 km, it has a relative humidity around 77%.

It can be said that in this region we can use the standard model for predicting some atmospheric parameters without any difficulty.

# **1 INTRODUCCIÓN**

El Cerro es un pueblo ubicado a 3 4 km de la comunidad de Las Tablas y a 35 km de la comunidad de Chitré en la provincia de Los Santos localizado en la latitud 7 75 y una longitud 80 25 La provincia de Los Santos se encuentra ubicada a unos 275 km de la capital de la Republica de Panamá Una investigación experimental fue llevada a cabo en el invierno de 2007 para estudiar las facetas químicas dinámicas y procesos físicos que suceden en la atmósfera superior tropical de la Tierra específicamente en la Capa de Transición Tropopausa (TTL por sus siglas en inglés)

La identificación y cuantificación de procesos clave en esta región es esencial para progresar en temas que involucran el cambio climático la reducción del ozono y la química troposférica (Mike Craig 2008)

La NASA llevó a cabo medidas terrestres y aéreas en una misión denominada TC4 (Tropical Composition Cloud and Climate Coupling) para obtener información que se pudiera utilizar en los modelos climáticos globales en especial en la formación de nubes

En dicho estudio se utilizaron tres aviones de la NASA (DC 8 WB 57 y ER 2) que volaron desde el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría en Costa Rica Para el experimento ellos llevaron consigo más de 66 instrumentos altamente especializados que recolectaron información en el sitio y con sensores remotos También se utilizaron muchos componentes terrestres un radar banda C que se colocó en el aeropuerto en Costa Rica para brindar información del clima local Un gran radar Polarimétrico de banda S y un remolque de investigación atmosférica

**En ambos sitios Panamá y Costa Rica se operaron extensos programas de lanzamiento de globos sonda**

**En total más de 400 científicos ingenieros personal de la misión y de apoyo estuvieron destacados en Costa Rica y Panamá desde mediados de julio hasta mediados de agosto de 2007**

**Este gran experimento internacional reunió a investigadores de ocho centros de la NASA más de 14 universidades y más de 20 agencias estadounidenses e internacionales siendo un estudio muy bien estructurado de nuestro ambiente**

**La misión fue patrocinada por el Área Enfocada en la Composición Atmosférica de la División de Ciencia Terrestre de la NASA conformada por el Programa de Investigación Atmosférica Superior el Programa Científico de Radiación y el Programa de Química Troposférica**

**Equipos utilizados en la investigación**



**Figura 1:** El ER-2 de NASA, equipado con instrumentos de percepción remota, similares a los satélites, se utilizó para volar sobre las nubes. Fuente: (Mike Craig, 2008)



**Figura 2:** El WB-57 de NASA, equipado con instrumentos in situ, se utilizó para penetrar las nubes en los niveles medios y superiores. Fuente: (Mike Craig, 2008)



**Figura 3:** El DC-8 de la NASA, equipado con instrumentos de percepción remota e in situ, se utilizó para proveer la química y medidas de las nubes, incluyendo el TTL y estratósfera para validación Aura. Fuente: (Mike Craig, 2008)



**Figura 4:** El radar Polarización de NASA (NPOL, por sus siglas en inglés) recogió datos y brindó datos climática para las misiones de investigación en la Bahía Panamá. Fuente: (Mike Craig, 2008)



**Figura 5:** El radar Investigación Atmosférica Móvil Compartido y de Capacitación, de la Universidad de Oklahoma (SMART, por sus siglas en inglés), brindó información climatológica local en San José, para apoyo de las aeronaves. *Fuente:* (Mike Craig, 2008)



**Figura 6:** El remolque Atmosférico Nittany y Experimento de Validación Integrada de la Universidad Estatal de Pensilvania (NATIVE, por sus siglas en inglés), también recabó información de Las Tablas, Panamá. *Fuente:* (Mike Craig, 2008)

## 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

La misión TC4 de la NASA investigaba la estructura, las propiedades y procesos en el pacífico oriental del trópico. La química, la dinámica y los procesos físicos que ocurren en la baja tropósfera tropical no están muy estudiados. El estudio se llevó a cabo durante los meses de julio y agosto del año 2007 en el Golfo de Panamá y lugares circundantes, ya que, es en esta región, en donde la convección es muy persistente.

## 2.1 Descripción del sitio de muestreo.



Figura 7: Mapa donde muestra la ubicación del sitio de estudio del proyecto TC4.

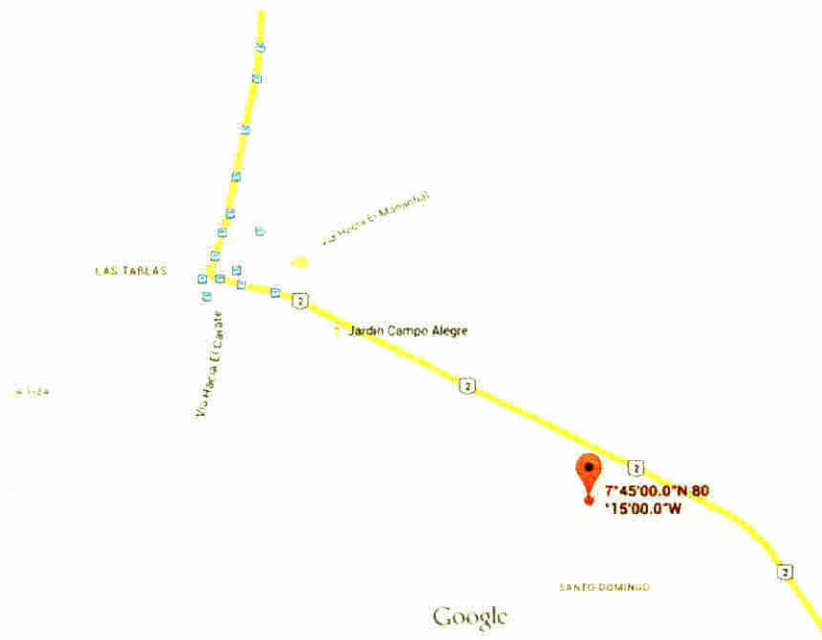


Figura 8: Mapa de la ubicación del sitio de investigación respecto a la ciudad de Las Tablas.

## El Cerro Site Photos



Approach View from Main Highway



Entrance from Main Highway



View from Hilltop (looking North)

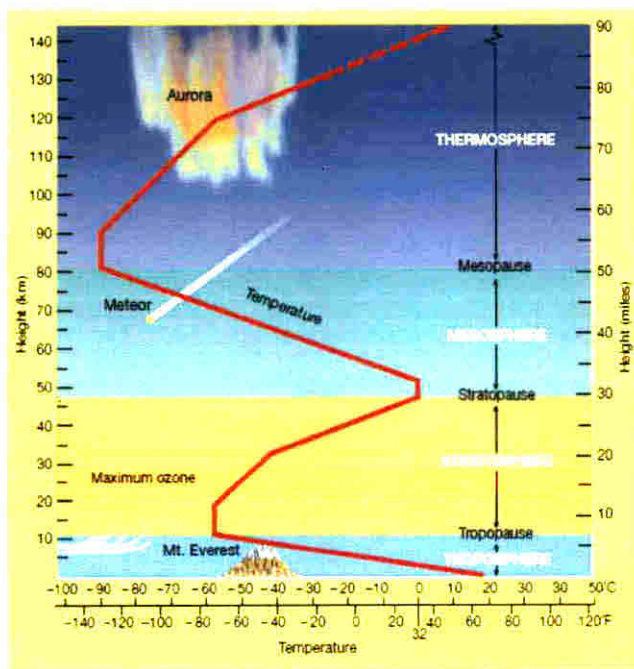


View from Top of Road (looking East)

**Figura 9:** Imágenes de la localidad de El Cerro; lugar en donde se apostaron los equipos de trabajo. Fuente: (Mike Craig, 2008)

## 2.2 Composición de la Atmósfera.

La atmósfera está compuesta básicamente por un 78% de nitrógeno ( $N_2$ ), gas químicamente con poca actividad, y un 21% de oxígeno ( $O_2$ ), que es esencial para la vida. Sus porcentajes se mantienen muy constantes hasta alcanzar una altitud aproximada de unos 100 km; a esta región ( $\leq 100$  km) se le llama **homósfera**. A medida que la altitud va aumentando la composición es variable, dando cabida a átomos y moléculas livianas; a esta región ( $> 100$  km) se le llama **heterósfera**. El



1% restante se distribuye entre una gran variedad de compuestos gaseosos que son importantes para el equilibrio de la atmósfera y la conservación de las condiciones necesarias para que se dé la vida en nuestro planeta (Sacchetti & Gisbert, 2003).

**Figura 10:** Representación esquemática de la estructura térmica de la atmósfera con sus diferentes capas. Fuente: (Brasseur & Solomon, 2005).

### 2.3. **División térmica de la atmósfera.**

La atmósfera se puede caracterizar en términos de la variación de la temperatura y presión con la altitud en: la *tropósfera*, la *estratósfera*, la *mesósfera* y la *termósfera*.

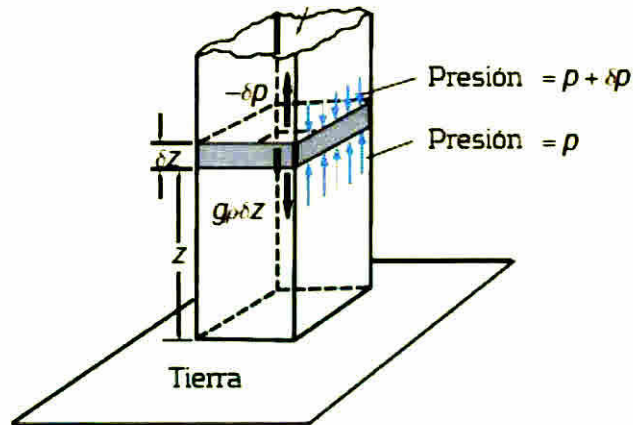
#### 2.3.1 **La tropósfera**

Es la capa más baja de la atmósfera, lugar en donde vivimos, en donde la temperatura decrece con la altitud. Tiene un espesor promedio de 8 km en los polos y 18 km sobre el ecuador. El término se dio a conocer por primera vez en 1908 por Teisserenc de Bort y su significado literal es “donde el aire da la vuelta” (Lutgens & Tarbuck, 2013). Cuando la temperatura decrece en la tropósfera se le llama *gradiente vertical de temperatura ambiental*  $\left(-\frac{\partial T}{\partial z}\right)$

(Lutgens & Tarbuck, The Atmosphere an Introduction to Meteorology, 2013). En promedio está alrededor de unos 6,5 °C/km y se le conoce como ***gradiente vertical***

***de temperatura normal*** (Gamma)  $\left(\frac{\partial T}{\partial z} \approx -6,5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{km}} \equiv -\Gamma\right)$ .

La presión a cualquier altura en la atmósfera se debe a la fuerza por unidad de área ejercida por todo el peso del aire que se encuentra sobre esta altura.



**Figura 11:** Diagrama de una parcela de aire y las fuerzas que actúan sobre ella. Fuente: (Wallace & Hobbs, 2006).

Imaginemos que tenemos una parcela de aire que se encuentra a una altura  $z$  sobre el nivel del mar cuyo espesor es  $\delta z$  y su masa  $\delta m = \rho A \delta z$ .

Tomaremos  $A = 1 \text{ m}^2$  y así su peso será  $(\delta m)g = (\rho A \delta z)g$  y aplicando el principio de equilibrio de fuerzas se obtiene:

$$\frac{\delta p}{\delta z} = -\rho g \quad (1)$$

A este resultado se le conoce como la **ecuación hidrostática**.

De la ley de los gases ideales obtenemos que:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -p(z) \frac{g}{RT(z)} \quad (2)$$

A continuación derivaremos una ecuación que muestra la tasa de cambio de la temperatura con la altitud para una parcela de aire que se mueve sobre la

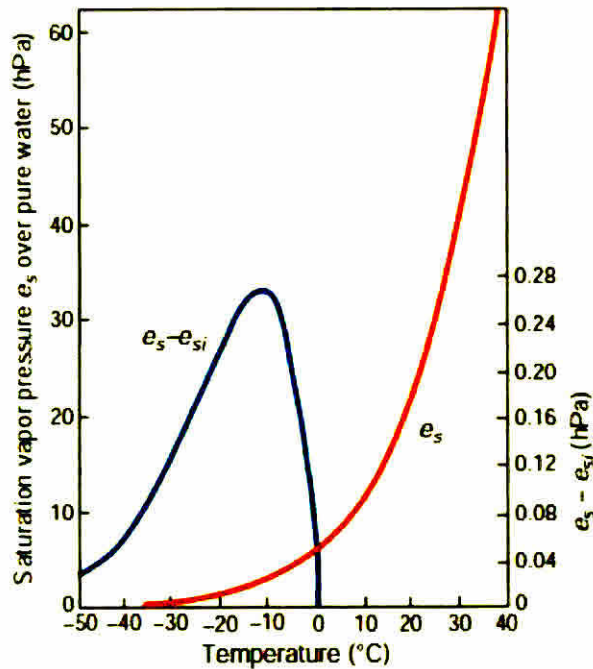
atmósfera de la Tierra. Para dicha deducción estaremos asumiendo que la parcela está aislada térmicamente de su ambiente,  $\partial q=0$ ; también, la atmósfera se encuentra en equilibrio hidrostático.

Así, para una unidad de masa de la parcela de aire se tiene:

$$-\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{g}{c_p} \equiv \Gamma_d \quad (3)$$

A esta ecuación se le conoce con el nombre de **gradiente adiabático seco**, en

donde  $c_p$  tiene un valor aproximado de  $1\,005 \frac{J}{kgK}$ .



**Figura 12:** Variaciones con la temperatura de la saturación de la presión de vapor es sobre una superficie plana de agua pura (línea roja y escala a la izquierda) y la diferencia entre  $e_s$  y la saturación de la presión de vapor sobre una superficie plana de hielo  $e_{si}$  (línea azul y escala a la derecha) Fuente (Wallace & Hobbs, 2006).

La tropósfera es frecuentemente caracterizada por movimientos verticales localizados, aunque son menores que los movimientos horizontales. La presencia de vapor de agua, nubes, tormentas y lluvias contribuyen a dar significado a la tropósfera. El vapor de agua juega un papel importante en la regulación de la temperatura del aire, ya que, absorbe de la energía solar la radiación térmica proveniente de la superficie del planeta. La tropósfera contiene el 99% del vapor de agua de la atmósfera y un 85% de la masa de la atmósfera.

En esta región de la atmósfera gran parte de la distribución del vapor de agua es una consecuencia de la relación Clausius-Clapeyron y rápidamente decae con la altitud (Wallace & Hobbs, 2006).

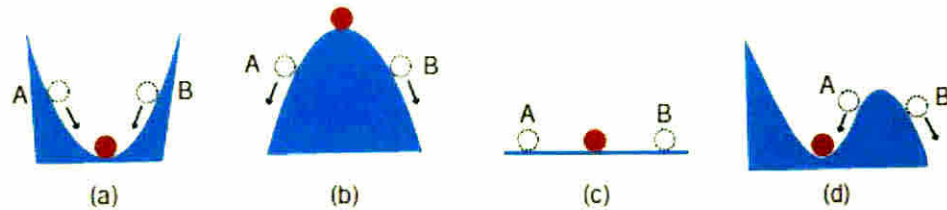
La mayoría de los fenómenos meteorológicos ocurren dentro de la tropósfera, aunque una porción pequeña de la turbulencia, se puede extender a la baja estratósfera. En esta capa de la atmósfera se lleva a cabo vigorosas corrientes convectivas de aire (Mohanakumar, 2008).

Si la parcela de aire es más caliente que sus alrededores, a la misma presión, esta flotará y se desplaza hacia arriba; por el contrario, si es más fría que sus

alrededores, es más densa y se desplaza hacia abajo.

La atmósfera se considera **estable** si la parcela de aire, desplazada hacia arriba o hacia abajo, retorna a su posición original y como consecuencia las fuerzas se equilibran.

Se considera **inestable** si la parcela de aire se desplaza hacia arriba o hacia abajo esta continuará moviéndose hacia arriba o hacia abajo respectivamente. Si sobre la parcela se mueve en una atmósfera **neutral** esta permanecerá en la nueva localización.



**Figura 13:** Analogías para las condiciones de (a) estabilidad, (b) no estable, (c) neutral y (d) inestabilidad. El círculo rojo es la posición original de la bola y los círculos blancos son sus posiciones desplazadas. Las flechas indican las direcciones de las bolas que se mueven desde a una posición desplazada si la fuerza que produce el desplazamiento es removida. Fuente (Wallace & Hobbs, 2006).

El gradiente adiabático seco caracteriza la estabilidad neutral porque, si el volumen de aire sin nubes es desplazado hacia arriba o hacia abajo, esta continúa sin ninguna aceleración. El gradiente adiabático seco es común a pocos kilómetros de altura de la atmósfera en las tardes soleadas de verano (Schlatter,

2009).

Raramente el gradiente vertical de temperatura es mayor que el gradiente adiabático seco. Cuando la temperatura incrementa con la altitud se le llama *inversión*. Las inversiones representan una muy estable estratificación del aire porque ellas inhiben el movimiento vertical (Schlatter, 2009).

### **2.3.2 La estratósfera**

Es la segunda mayor capa de la atmósfera y se extiende, luego de la tropopausa, hasta aproximadamente los 50 km. La temperatura en el aire incrementa gradualmente alrededor de 273 K hasta la estratopausa, que es marcada por una inversión en la tendencia de la temperatura (Mohanakumar, 2008).

Debido a que la temperatura aumenta con la altitud en esta región, no existe convección y la atmósfera se considera estable. La estratósfera contiene un 90% del ozono atmosférico (Schlatter, 2009). Debido a que en esta región casi no existe concentración de vapor de agua, el ozono juega un rol importante en la regulación de la temperatura de la capa. La temperatura incrementa con la concentración de ozono.

Desde los 20 a 30 km hay usualmente una capa casi isotérmica. La estabilidad de esta capa causa que una pequeña capa de aerosol pueda permanecer por largo tiempo. La pequeña concentración de vapor de agua significa que la liberación de calor latente o condensación sean despreciables, como consecuencia la formación de nubes es rara (Mohanakumar, 2008). La razón de ozono mixto a los 20 km de altitud es aproximadamente 3 ppmv y se eleva a un máximo de entre 8-10 ppmv a los 35 km y cae a 2 ppmv en la estratopausa (Schlatter, 2009).

### ***2.3.3 La mesósfera***

Se extiende desde la estratopausa hasta los 80 o 90 km de altitud. Se caracteriza por un decrecimiento de la temperatura con el aumento de la altitud alcanzando unos 180 K a los 80 km. Las concentraciones de vapor de agua y ozono son despreciables (Mohanakumar, 2008).

### ***2.3.4 La termósfera***

Se extiende aproximadamente desde los 86 km y gradualmente se mezcla con las nubes de hidrógeno neutral que rodean la Tierra, la temperatura incrementa rápidamente en la baja termósfera, unos 120 km (Schlatter, 2009). Las temperaturas en esta región varían desde los 500 K hasta los 2 000 K, aproximadamente y sus densidades son muy bajas. El incremento en la

temperatura en la termósfera se debe a la absorción de la intensa radiación solar por la limitada presencia de oxígeno molecular (Mohanakumar, 2008).

#### ***2.4. La atmósfera estándar***

Para estudiar el comportamiento de la atmosfera se tomaron datos experimentales y se establecieron ciertos patrones para caracterizarla; en primer lugar como función de la altitud, cuyo principal uso es en las aplicaciones ingenieriles y meteorológicas. A esta serie de parámetros experimentales se les denomina la atmósfera estándar.

En el modelo, para el aire, se asume que debe estar libre de polvo, humedad y vapor de agua y en reposo, respecto a la Tierra, esto es; sin viento ni turbulencia (Talay, Theodore A., 2006).

El primer modelo de la atmósfera estándar, fue desarrollado en el año 1920, entre Europa y los Estados Unidos de Norte América. Las diferencias encontradas entre ambos fueron discutidas y consensuadas en el año 1952 por la Organización Internacional de Aviación (ICAO) (Talay, Theodore A., 2006).

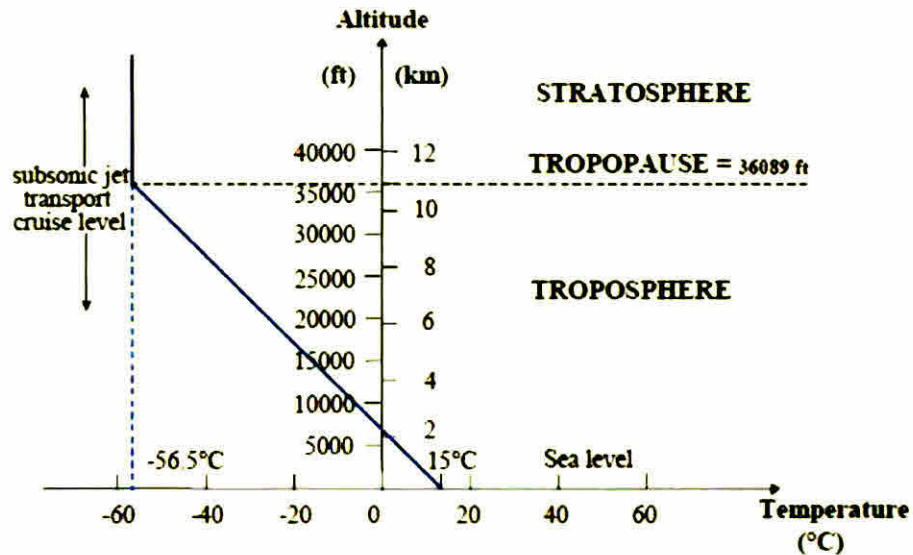
Los parámetros atmosféricos considerados para la atmósfera estándar se

encuentran en la tabla 1, considerando la elevación a nivel del mar.

<i>Tabla 1: Parámetros tomados para caracterizar la atmósfera estándar. (Cavcar, 2010)</i>	
Presión	$p_0 = 101\,325 \text{ N/m}^2 = 1\,013,25 \text{ hPa}$
Densidad	$\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3$
Temperatura	$T_0 = 288,15 \text{ K}$
Rapidez del sonido	$a_0 = 340,294 \text{ m/s}$
Módulo del campo gravitatorio	$g_0 = 9,80665 \text{ m/s}^2$

### 2.4.1 Modelando la temperatura

La temperatura decrece con la altitud a una tasa constante de  $-\frac{6,5^\circ\text{C}}{\text{km}}$  hasta la tropopausa. La tropopausa estándar tiene un espesor de 11 km. Sobre la tropopausa, la temperatura se mantiene constante a un valor de  $-56,5^\circ\text{C}$  (AIRBUS, 2002).



**Figura 14:** Variaciones de temperatura en la atmósfera estándar. Fuente (AIRBUS, 2002)

El aire es considerado como un gas ideal para este modelo. A continuación se presenta la ecuación que describe el comportamiento de la temperatura para la tropósfera (AIRBUS, 2002):

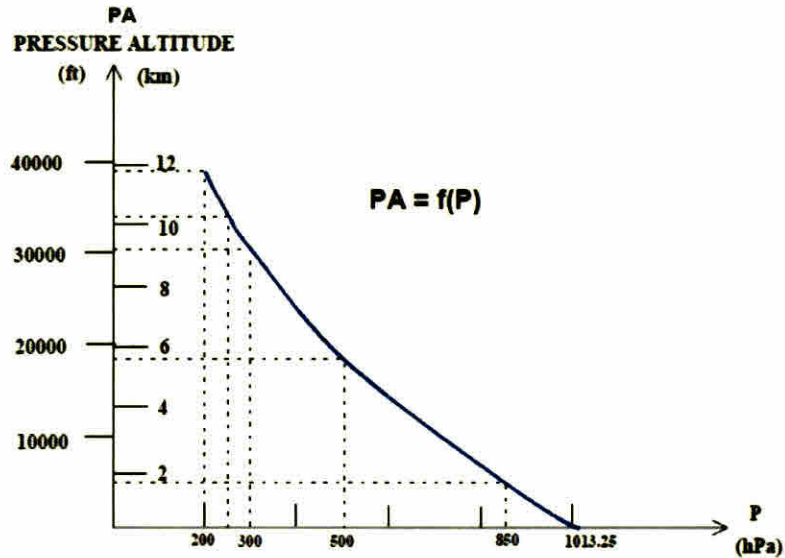
$$T = T_0 - \Gamma h (km) \quad (4)$$

donde:  $T$  es temperatura,  $T_0$  es temperatura inicial,  $\Gamma$  es la tasa a la que varía la temperatura con la altitud y  $h$  la altitud.

## 2.4.2 Modelando la presión

Para calcular la presión estándar  $p$ , a una determinada altitud  $h$ , debemos asumir dos situaciones: la temperatura es estándar y el aire se considera como un gas

ideal. La presión obtenida aquí se llamará **presión altitud** (PA) (AIRBUS, 2002).



**Figura 15:** Presión altitud como función de la presión. Fuente (AIRBUS, 2002).

Asumiendo que el aire está en equilibrio estático, con la ayuda de la ecuación de los gases ideales, sustituyendo el valor de  $T$  de la ecuación (4) e integrando y realizando un cambio de variables  $u = T_0 - \Gamma z$ , obtenemos:

$$p = p_0 \left( 1 - \frac{\Gamma z}{T_0} \right)^{\frac{g_0}{R\Gamma}} \quad (5)$$

donde  $R = 287,053 \frac{J}{kgK}$ ,  $p$  es la presión estándar,  $p_0$  la presión inicial,  $g_0$  el valor del campo gravitatorio inicial.

### **3. ASPECTOS METODOLÓGICOS**

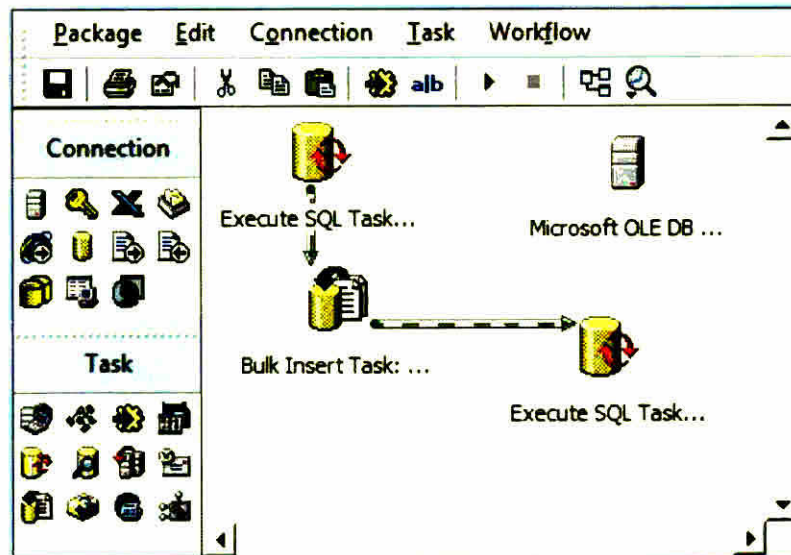
En el año 2007 se realizó un trabajo conjunto entre la NASA, la Universidad de Panamá y la Universidad de Costa Rica con el fin de estudiar la atmósfera en el pacífico oriental de Costa Rica y el Golfo de Panamá. La información obtenida se puso a disposición, en primera instancia, de los miembros participantes, para que pudieran hacer sus propios análisis, de acuerdo a sus necesidades.

Por parte de la Universidad de Panamá participó el equipo de Física de la Atmósfera quien es el responsable de manejar y realizar los estudios sobre la información obtenida.

En este trabajo, se tomó la información, disponible, desde el sitio <http://www.espo.nasa.gov/tc4/> , la cual está en formato de texto y se creó una base de datos en MicroSoft Structured Query Language (MSSQL). Esta base de datos, nos permitió el manejo más ágil y preciso, de los diferentes parámetros atmosféricos medidos en dicho estudio.

Los datos originales utilizados son los correspondientes al acrónico TC4, Sonde (<http://espoarchive.nasa.gov/archive/browse/tc4/Sonde>). Una vez obtenido los archivos planos, se procedió a ubicar aquellos correspondientes a la región de Las

Tablas. En la base de datos se creó una tabla con los nombres de los parámetros atmosféricos registrados (tiempo, presión, altitud, temperatura, humedad relativa, ozono parcial, mezcla de ozono, dirección del viento, rapidez del viento, latitud, longitud, ubicación, fecha data).



**Figura 16:** DTS utilizado para la adquisición de datos.

Luego, se procedió a crear una DTS (Data Transformation Services), la cual nos permitió tomar el archivo plano y almacenarlo, temporalmente, en una tabla, para luego, ejecutar un SP (Stored procedure), que se encargó de ingresar los datos del archivo plano, en la tabla que contiene las etiquetas de los parámetros estudiados.

Con la data disponible, de una manera más accesible y fácil de trabajar, se creó

una página web, en lenguaje Active Server Page (asp), para tener acceso a los datos, de una manera sistemática y ordenada.

Al momento de seleccionar una fecha específica, se despliega la data completa, obtenida durante el estudio y luego se da la opción de seleccionar los campos (parámetros atmosféricos) que desee obtener (por separado de la data completa), para realizar, ya sea, un gráfico u otro tipo de trabajo estadístico.

The screenshot shows the website header for 'Física de la Atmósfera' at the University of Panama. The navigation menu includes 'Inicio', 'TC4', 'Estaciones', 'Datos UV', 'Datos Meteo', 'Investigadores', and 'Manuales'. Below the header, there is a breadcrumb trail: 'Usted está aquí: TC4 » Globo Sonda'. There are two radio buttons for 'Globo Sonda' and 'DC18', with 'Globo Sonda' selected. The main content area displays 'Data tomada en la región de las Tablas, Panama [2007-07-13]' and a 'SELECCIONAR' button. A data table is shown with the following columns: #, Tiempo (s), Presión (hPa), Elev. (km), Temp. (K), H. (%), P. Oz. (mPa), P. Oz. Mix. (ppmv), Dir. Viento (°), Rap. (m/s), N (°), and W (°). The table contains 17 rows of atmospheric data.

#	Tiempo (s)	Presión (hPa)	Elev. (km)	Temp. (K)	H. (%)	P. Oz. (mPa)	P. Oz. Mix. (ppmv)	Dir. Viento (°)	Rap. (m/s)	N (°)	W (°)
1	68308.6	998.1	0.12	300.3	79	2.13	0.021	164	0.3	7.75	-80.25
2	68313.4	997.2	0.127	300.2	78	2.13	0.021	146.9	0.2	7.75	-80.25
3	68317	996.6	0.133	300.3	78	2.16	0.022	133.6	0.1	7.75	-80.25
4	68323.6	993.8	0.138	300.2	78	2.16	0.022	119.8	0.5	7.75	-80.25
5	68328.4	994.9	0.148	300.4	78	2.2	0.022	110.3	0.7	7.75	-80.25
6	68332	994.1	0.156	300.3	78	2.24	0.023	103.4	0.9	7.75	-80.25
7	68338.6	992.8	0.167	300.3	78	2.25	0.023	115.7	1	7.75	-80.25
8	68343.4	992.6	0.169	300.3	78	2.27	0.023	124.3	1	7.75	-80.25
9	68347	992.6	0.168	300.3	79	2.27	0.023	131.3	1.1	7.75	-80.25
10	68351.8	992	0.174	300.3	79	2.28	0.023	138.1	1.1	7.75	-80.25
11	68358.4	990.5	0.187	300.2	79	2.33	0.023	138.4	1.2	7.75	-80.25
12	68362	990.5	0.187	300.2	79	2.34	0.024	138.6	1.2	7.75	-80.25
13	68366.8	990.2	0.19	300.1	79	2.36	0.024	138.8	1.2	7.75	-80.25
14	68370.4	989.7	0.195	300.1	81	2.4	0.024	139	1.2	7.75	-80.25
15	68377	988.4	0.207	300	82	2.39	0.024	137.6	1.2	7.75	-80.25
16	68381.8	987.4	0.215	300	82	2.41	0.024	136.7	1.1	7.75	-80.25
17	68385.4	987.3	0.217	299.9	82	2.42	0.024	135.8	1.1	7.75	-80.25

**Figura 17:** Página web utilizada para el manejo de la información necesaria para realizar las comparaciones con el modelo estándar.

Data tomada en la región de las Tablas, Panamá (2007-07-13)  
Favor seleccionar el par de columnas que desea para realizar su análisis, llámese gráfico o tabla de valores:

Tiempo  
Presión  
Elevación  
Temperatura  
Humedad Relativa  
Ozono  
Ozono Mixto  
Dir. Viento  
Rap. Viento  
Temperatura Bomba  
Latitud  
Longitud



**Figura 18:** *Seleccionador de parámetros atmosféricos para ser utilizados en la obtención de los perfiles.*

Para realizar el trabajo, se requirieron las siguientes tablas de valores, para la tropósfera (0 km hasta los 14 km):

- a) altitud, temperatura y error estadístico de la temperatura
- b) altitud, temperatura, presión y presión calculada
- c) altitud, presión, temperatura y humedad relativa
- d) altitud, temperatura y ozono parcial

Para la obtención de la **tabla a** se realizaron los cálculos, por el método de mínimos cuadrados, del error estadístico de la temperatura, luego se graficó la altitud en función de la temperatura.

Para la **tabla b** se utilizó la relación matemática

$$p = -p_0 \exp\left(\frac{g_0}{RT_0} \int dz\right) \quad (6)$$

que nos permite obtener los valores para la presión pero de una manera teórica y así poder compararla con los valores experimentales obtenidos de la misión TC4

Con los datos obtenidos aquí se procedió a realizar los diferentes perfiles para iniciar la comparación de la atmósfera local con el modelo de la atmósfera estándar

Para los perfiles restantes se utilizaron las tablas obtenidas a partir de la tabla general que contiene todos los parámetros atmosféricos



serían utilizados para el estudio en mención.

La tabla que contiene la información completa de los parámetros atmosféricos es *i\_fa\_temp\_data*. La que contiene información, ya separados por campos, de los parámetros atmosféricos es *i\_fa\_globo\_sonda*. Para el cálculo de los errores absolutos de las temperaturas se utilizó la tabla *i\_fa\_tabla\_error*. Para obtener el valor de la presión, utilizando una ecuación (6), se utilizó la tabla *i\_fa\_tabla\_presion\_teo\_exp*.

Las estructuras de las tablas (en MS SQL Server 2008) antes mencionadas son las siguientes:



Column Name	Data Type	Allow Nulls
data	text	<input checked="" type="checkbox"/>

**Figura 20:** *Diseño de la tabla utilizada para almacenar, temporalmente, los datos provenientes del archivo plano (txt).*

Column Name	Data Type	Allow Nulls
hora	int	<input type="checkbox"/>
presion	numeric(18, 1)	<input type="checkbox"/>
altura	numeric(18, 3)	<input type="checkbox"/>
temperatura	numeric(18, 1)	<input type="checkbox"/>
hrelativa	numeric(18, 0)	<input type="checkbox"/>
ozonoparcial	numeric(18, 2)	<input type="checkbox"/>
ozonomezda	numeric(18, 3)	<input type="checkbox"/>
dirviento	numeric(18, 1)	<input type="checkbox"/>
rapidezvient	numeric(18, 1)	<input type="checkbox"/>
pumptemperat	numeric(18, 1)	<input type="checkbox"/>
latitud	numeric(18, 2)	<input type="checkbox"/>
longitud	numeric(18, 2)	<input type="checkbox"/>
ubicacion	nchar(10)	<input checked="" type="checkbox"/>
fecha_data	date	<input checked="" type="checkbox"/>
ingreso	datetime	<input type="checkbox"/>

**Figura 21:** Diseño de la tabla utilizada para almacenar los parámetros atmosféricos provenientes de la tabla temporal.

Column Name	Data Type	Allow Nulls
col1	float	<input type="checkbox"/>
col2	float	<input type="checkbox"/>
errorcol2	float	<input type="checkbox"/>

**Figura 22:** Diseño de la tabla utilizada para realizar los cálculos de los errores del parámetro atmosférico temperatura que será utilizado para la obtención del perfil de temperatura y altitud.

La primera columna (**col1**) corresponde al parámetro atmosférico **altitud** ( $z$ ), la segunda columna (**col2**) corresponde al parámetro atmosférico **temperatura** ( $T$ ) y la tercera columna (**errorcol2**) corresponde al **error** del parámetro atmosférico **temperatura**.

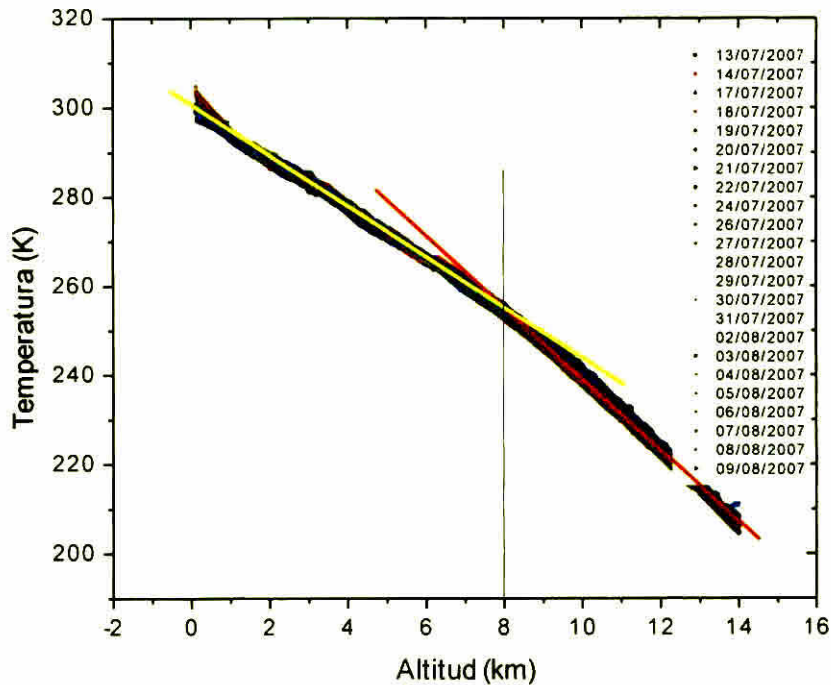
Column Name	Data Type	Allow Nulls
id	int	<input type="checkbox"/>
col1	float	<input type="checkbox"/>
col2	float	<input type="checkbox"/>
col3	float	<input type="checkbox"/>
col4	float	<input checked="" type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>

**Figura 23:** Diseño de la tabla utilizada para la realización del cálculo de la presión utilizando la ecuación (6).

La primera columna (**col1**) corresponde al parámetro atmosférico **altitud** ( $z$ ), la segunda columna (**col2**) corresponde al parámetro atmosférico **temperatura** ( $T$ ), la tercera columna (**col3**) corresponde al parámetro atmosférico **presión** ( $P_e$ ) y la cuarta columna (**col4**) corresponde al parámetro atmosférico **presión calculada** ( $P_c$ ).

#### 4.2. Estudio de los perfiles de temperatura y altitud en la tropósfera.

De la **figura 25** se obtuvo que los perfiles de **altitud vs temperatura** presentan una doble pendiente, lo cual, no se pone de manifiesto en el modelo de la atmósfera estándar.



**Figura 24:** Perfil de temperatura para los días en que se llevó a cabo el estudio en la región de Los Santos por parte de la NASA, Física de la Atmósfera (UP) y la Universidad de Costa Rica.

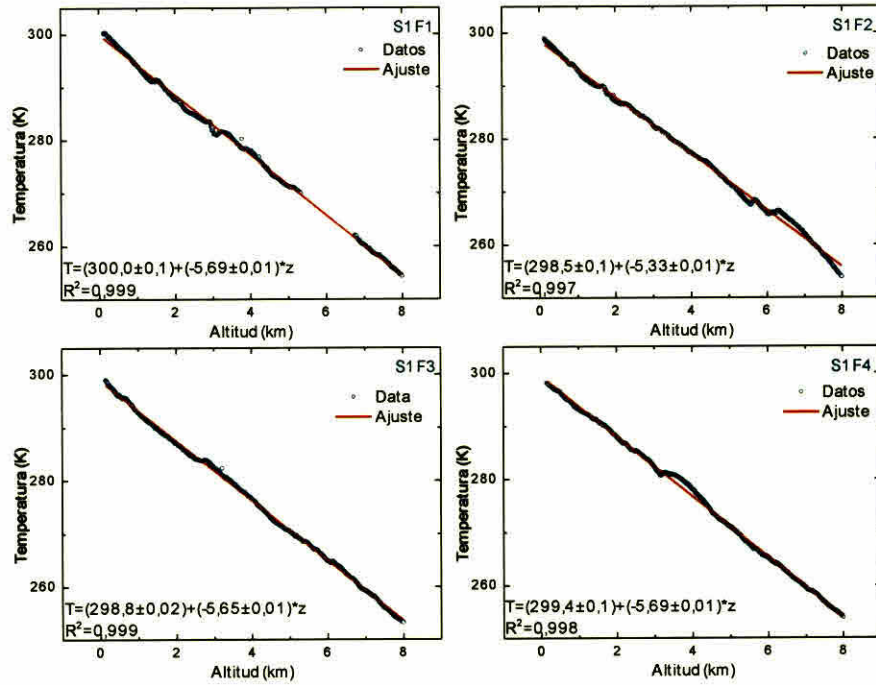
Estos perfiles muestran que la altitud media en la cual se da el cambio de pendiente es alrededor de los ocho kilómetros (8 km). Con esta información se calcularon las pendientes en cada uno de los perfiles tomados por fecha y dividido en dos secciones: de 0 km a 7,99 km y de 8,0 a 14 km.

Para iniciar el estudio de las diferentes pendientes para los diferentes días en cada una de las secciones se les asignaron los siguientes códigos:

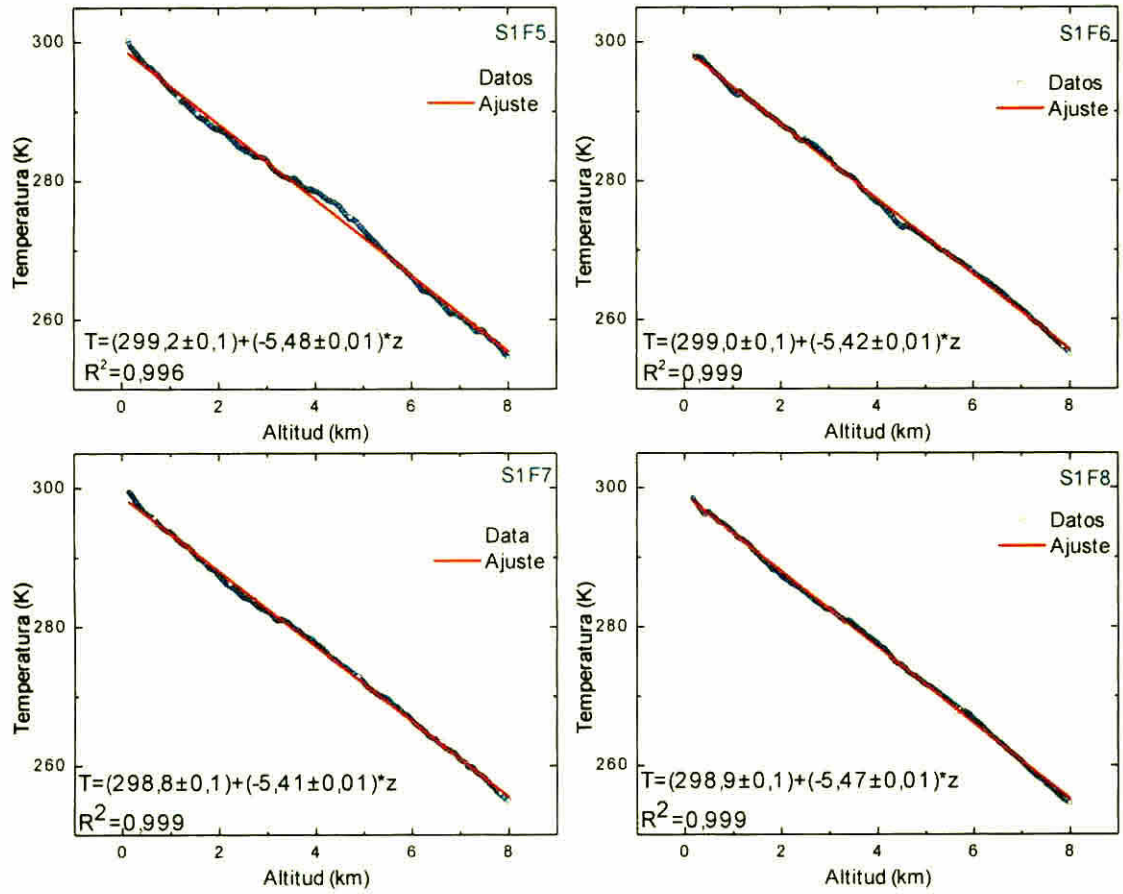
- primera sección S1,
- segunda sección S2,
- para el (13,14,17,18,19,20,21,22,24,25,26,27,28,29,30,31)/07/2007, F1-F16 para el (02,03,04,05,06,07,08,09)/08/2008, F17-F 24.

De esta forma podemos decir que el código del día 22/07/2007 de la sección uno

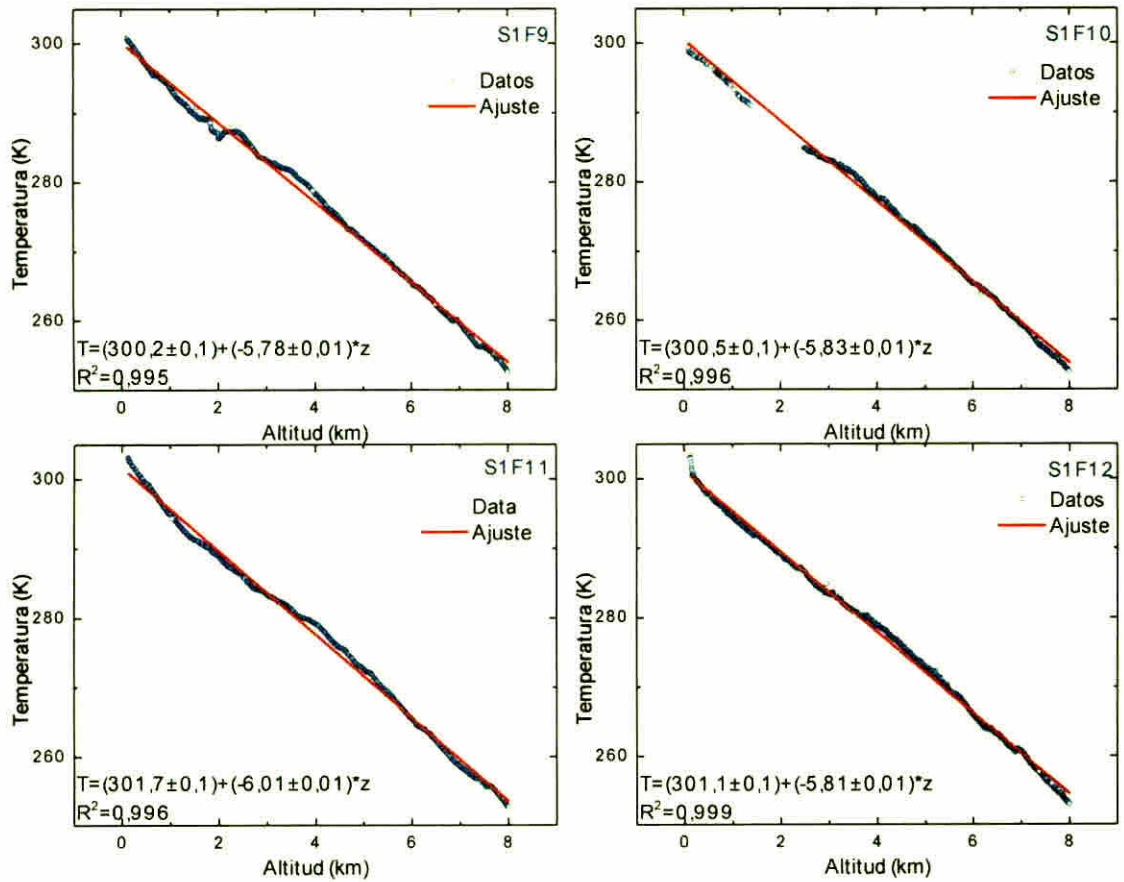
se escribe así: S1F8.



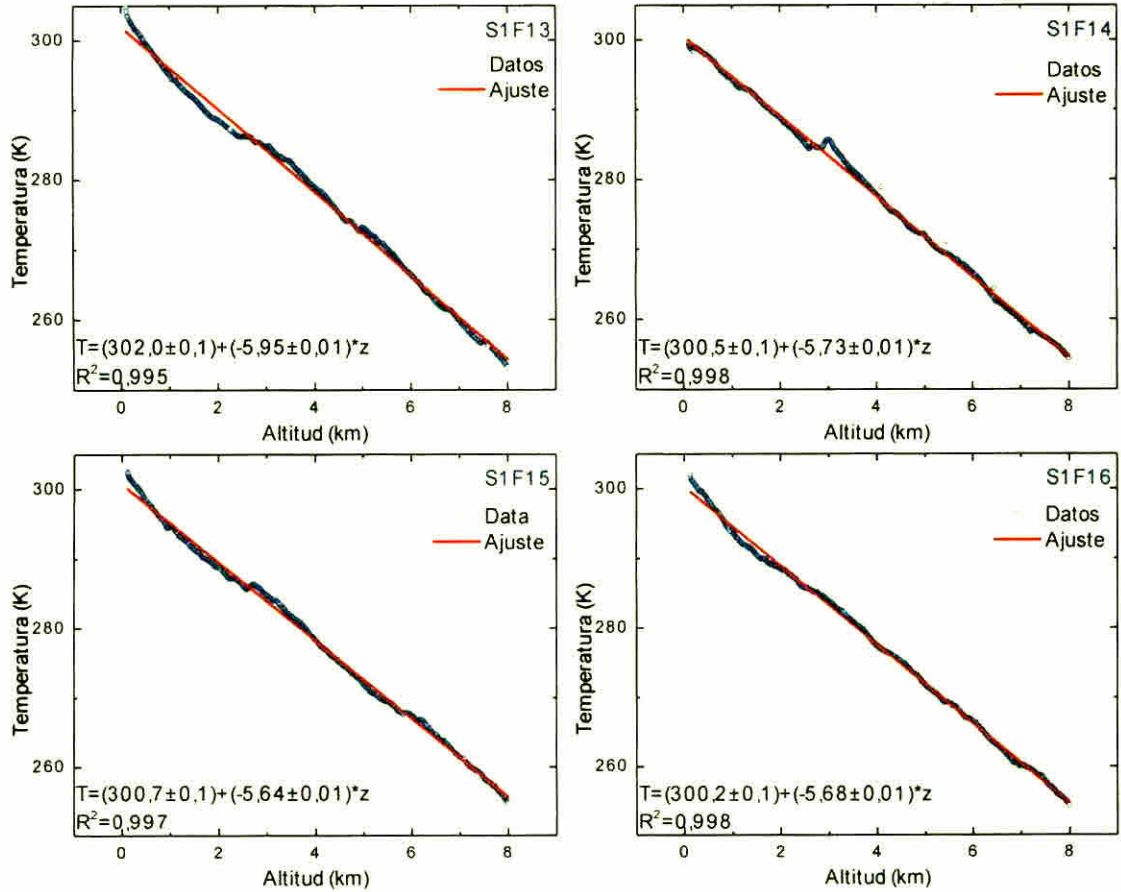
**Figura 25:** Ajuste de los espectros de temperatura-altitud de S1F1 a S1F4.



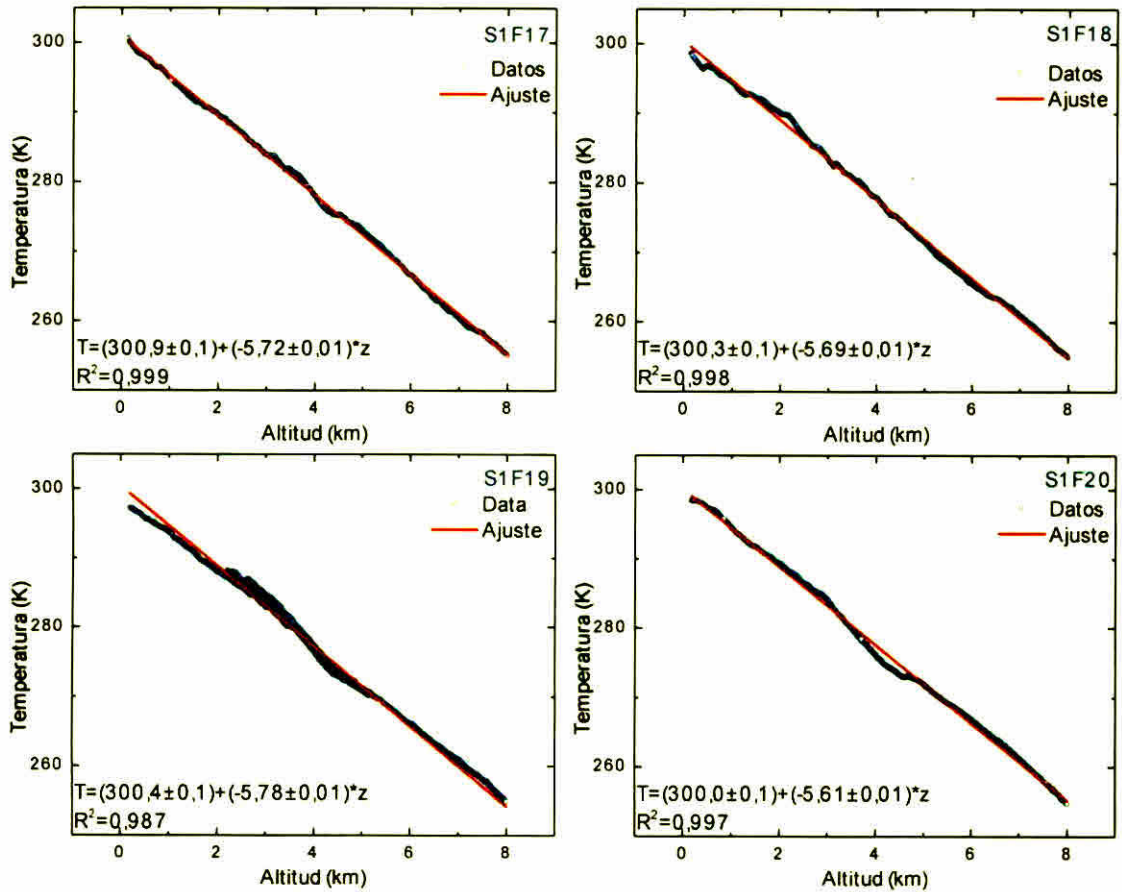
**Figura 26:** Ajuste de los espectros de temperatura-altitud de S1F5 a S1F8.



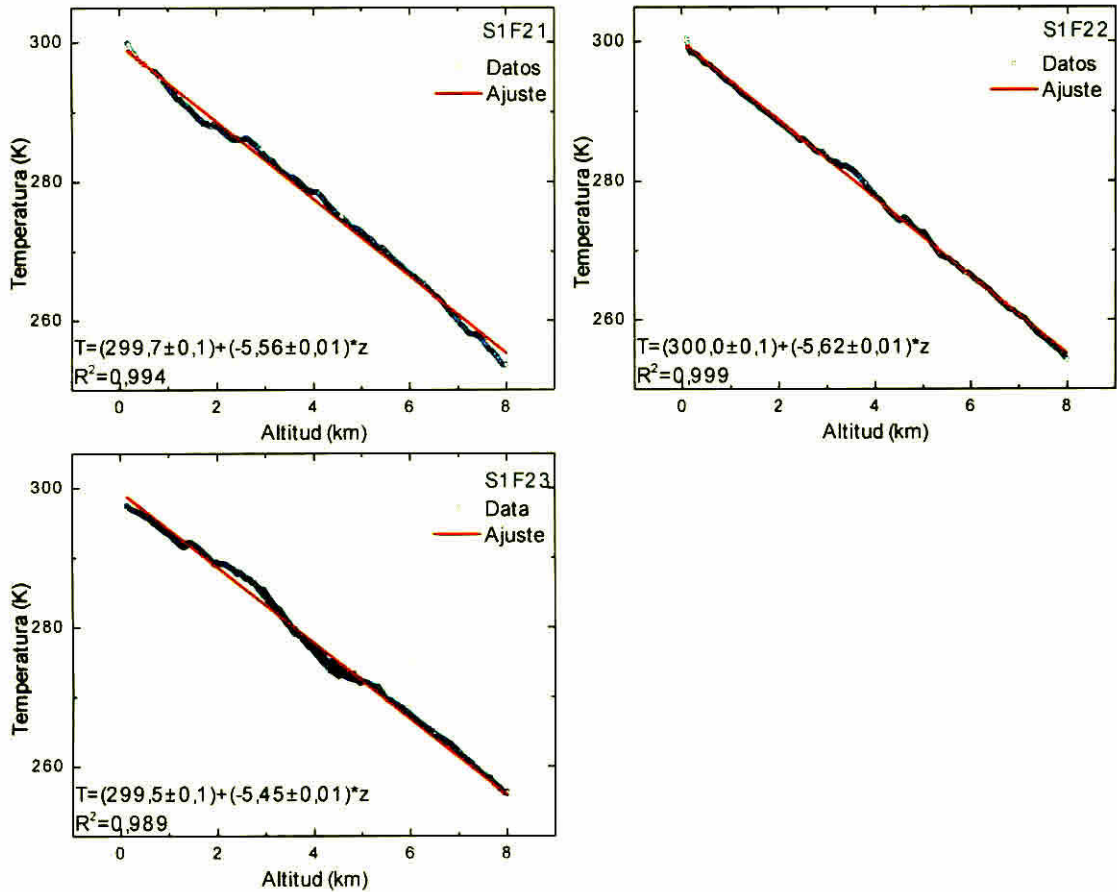
**Figura 27:** Ajuste de los espectros de temperatura-altitud de S1F9 a S1F12.



**Figura 28:** Ajuste de los espectros de temperatura-altitud de S1F14 a S1F16.



**Figura 29:** Ajuste de los espectros de temperatura-altitud de S1F17 a S1F20.



**Figura 30:** Ajuste de los espectros de temperatura-altitud de S1F21 a S1F23.

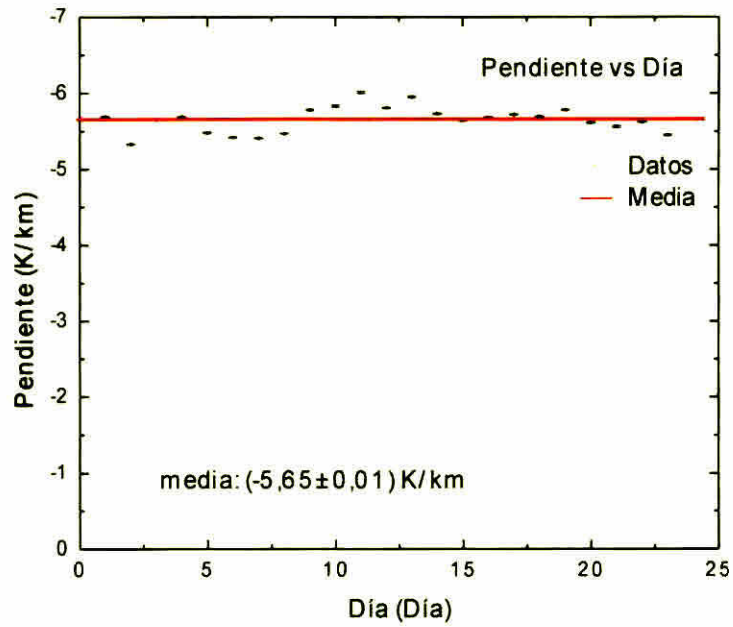
Una vez expuestos los gráficos ajustados con un modelo matemático lineal, podemos apreciar que la tendencia de cada uno de los espectros, en esta sección del perfil, es lineal como se esperaba que fuera, según lo indica el modelo estándar de la atmósfera. Una vez realizado los análisis pertinentes a este tipo de ajustes, pudimos obtener los valores de las pendientes y el coeficiente de correlación de cada uno de los perfiles.

Para observar mejor el comportamiento de dichas pendientes, las presentamos en una tabla de valores y luego procedimos a realizar un gráfico que muestra la

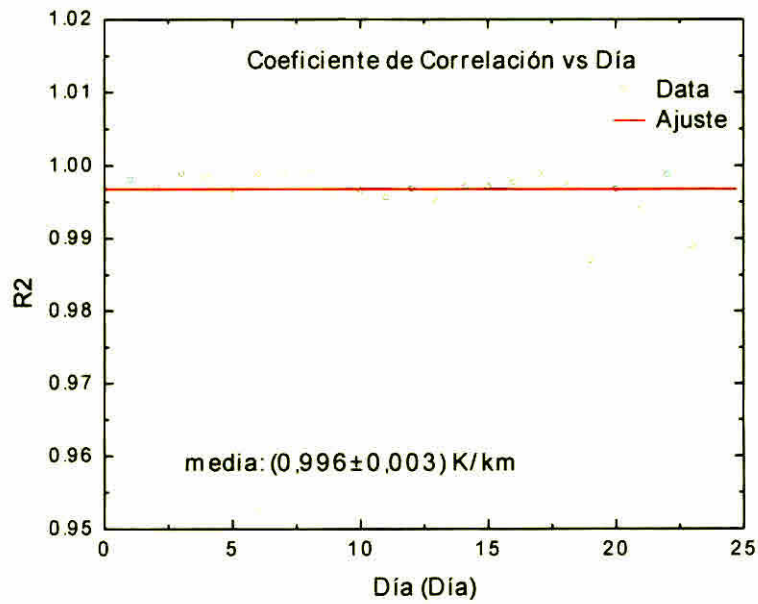
tendencia que tienen los mismos.

**Tabla 2:** Valores de pendiente, error absoluto y coeficiente de correlación obtenidos de los ajustes de los perfiles correspondientes a la Fig. 19-22.

Día	Pendiente (K/km)	Desviación Estándar (K/km)	Coeficiente de correlación
1	-5,69	0,01	0,998
2	-5,33	0,01	0,997
3	-5,65	0,01	0,999
4	-5,69	0,01	0,998
5	-5,48	0,01	0,996
6	-5,42	0,01	0,999
7	-5,41	0,01	0,999
8	-5,47	0,01	0,999
9	-5,78	0,01	0,995
10	-5,83	0,01	0,997
11	-6,01	0,01	0,996
12	-5,81	0,01	0,997
13	-5,95	0,01	0,995
14	-5,73	0,01	0,998
15	-5,64	0,01	0,997
16	-5,68	0,01	0,998
17	-5,72	0,01	0,999
18	-5,69	0,01	0,998
19	-5,78	0,01	0,987
20	-5,61	0,01	0,997
21	-5,56	0,01	0,994
22	-5,62	0,01	0,999
23	-5,45	0,01	0,989



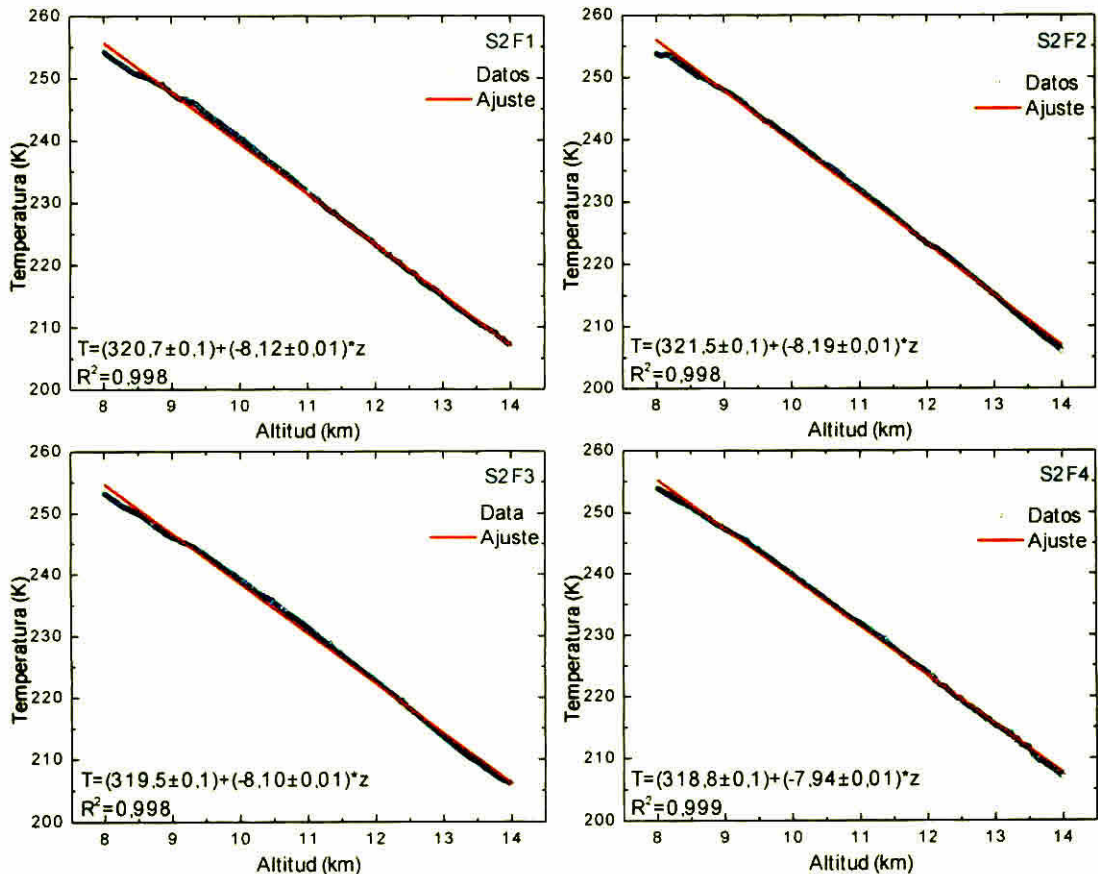
**Figura 31:** Gráfico de las pendientes de los perfiles S1F1-F24 en función de los días.



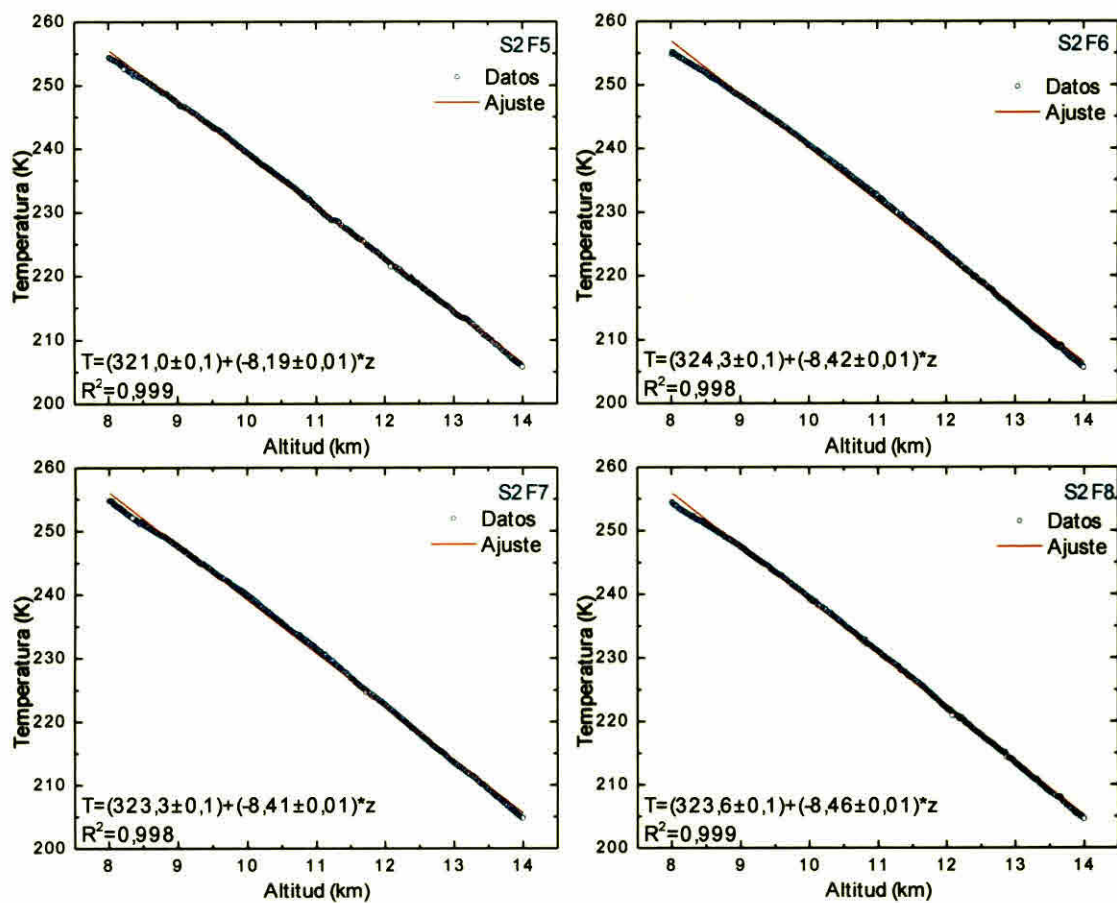
**Figura 32:** Gráfico de los coeficientes de correlación obtenidos de los ajustes de las pendientes de los perfiles S1F1-F24 en función del día.

De la figura 32 se obtiene que el valor medio de las pendientes obtenidas al realizar el ajuste de los perfiles S1F1-F24 corresponde a  $(-5,65 \pm 0,01)$  K/km. Este resultado está sustentado por el comportamiento de los coeficientes de correlación en función del día que se muestra en la figura 33 y que muestra una media de  $(0,996 \pm 0,003)$  K/km.

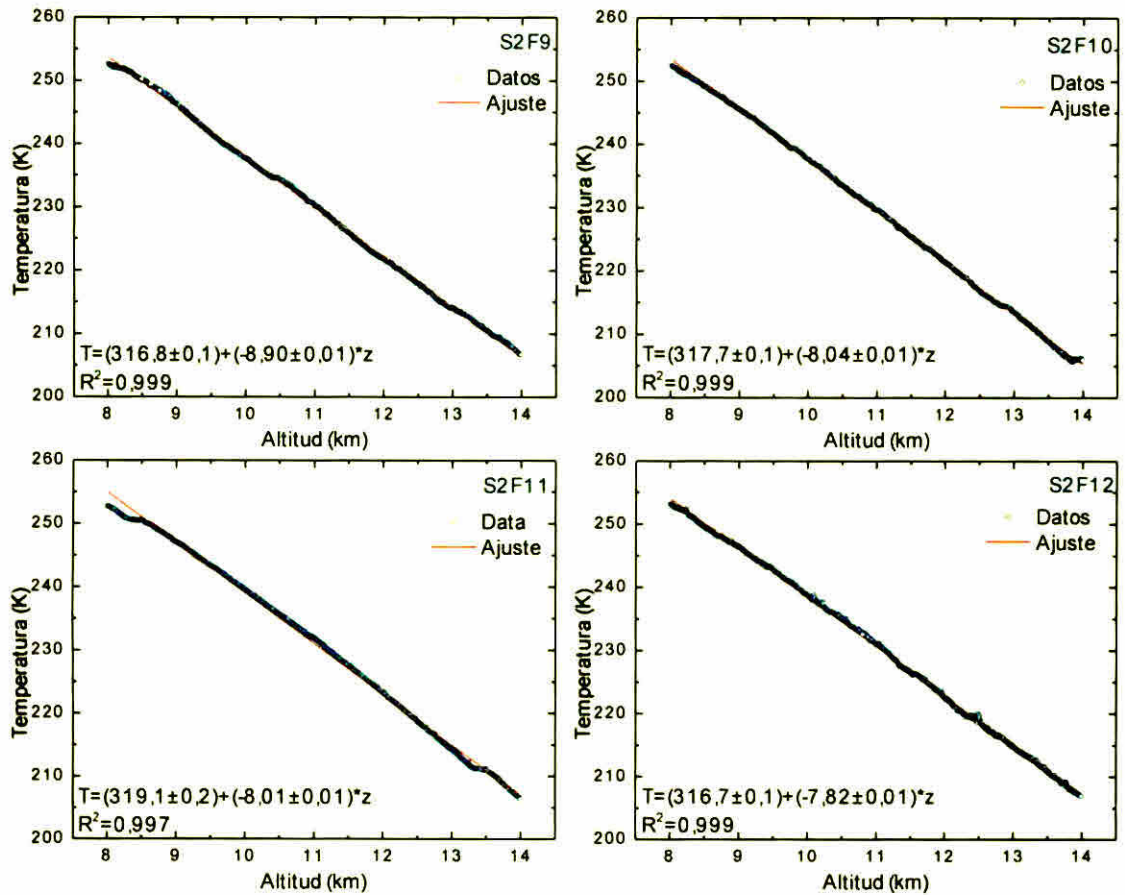
Corresponde ahora mostrar los ajustes de los perfiles para segunda sección de espectro, esto es, de 8 km a 13,99 km.



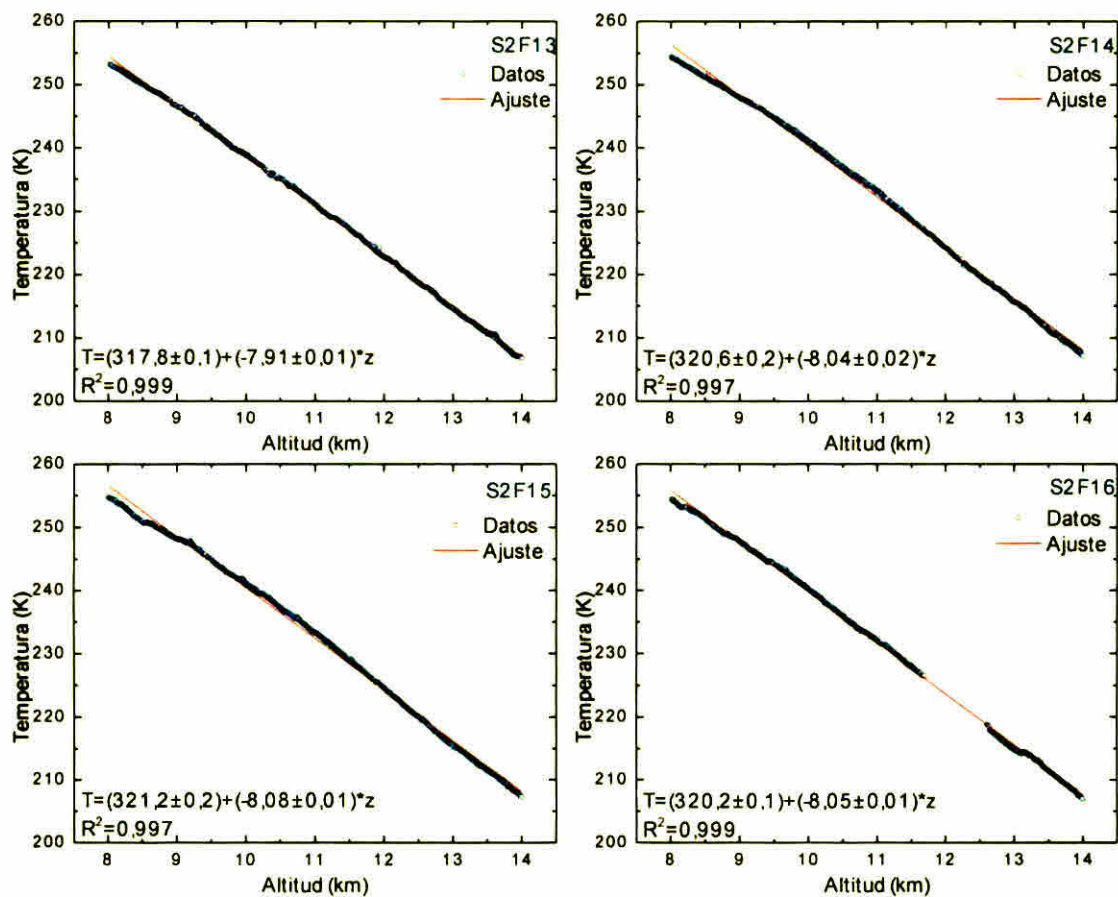
**Figura 33:** Ajuste de los espectros de temperatura-altitud de S2F1 a S2F4.



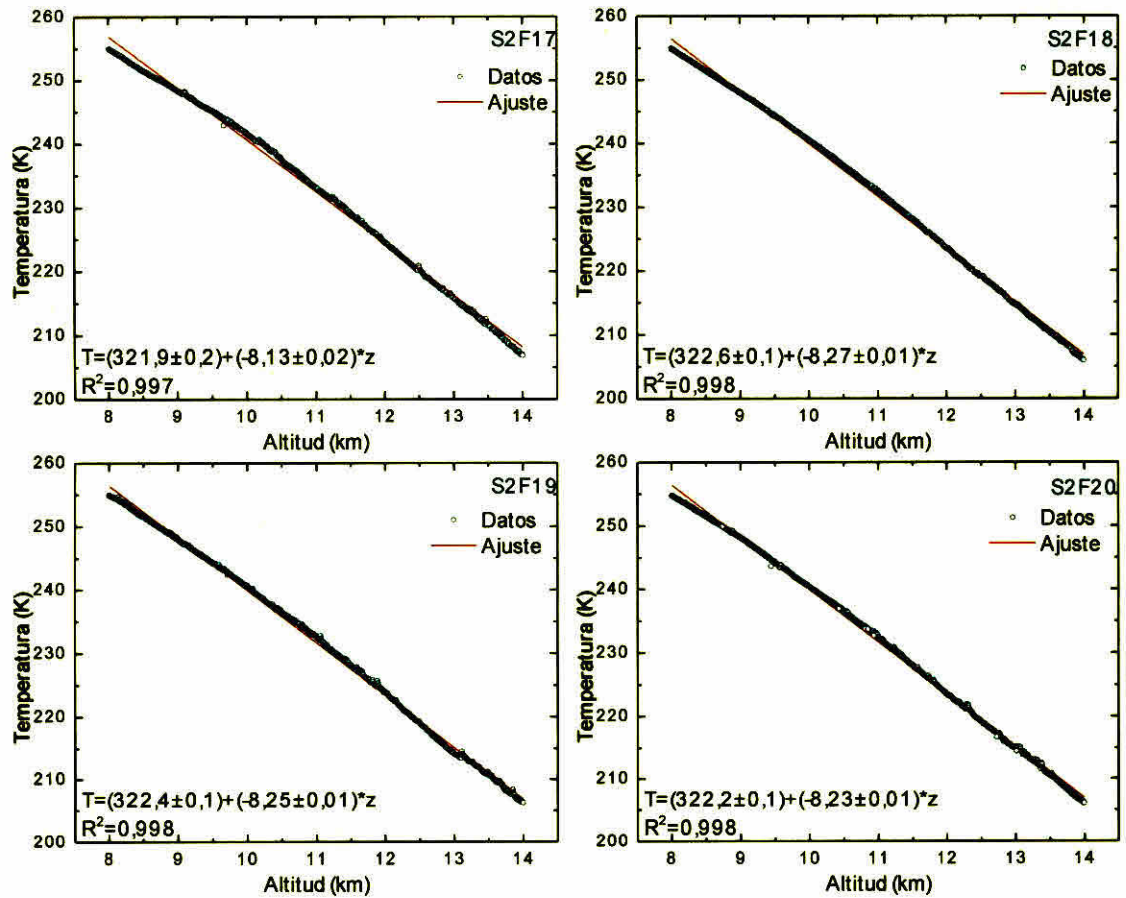
**Figura 34:** Ajuste de los espectros de temperatura-altitud de S2F5 a S2F8.



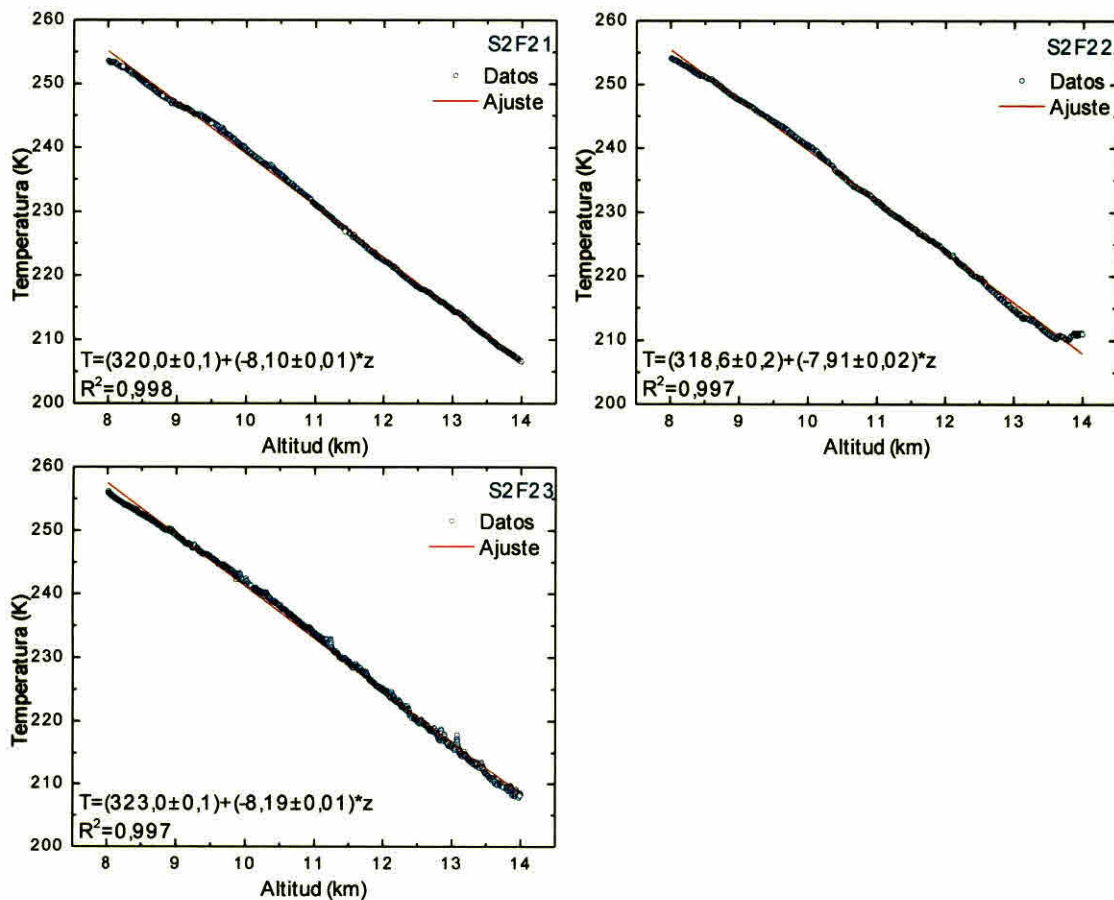
**Figura 35:** Ajuste de los espectros de temperatura-altitud de S2F9 a S2F12.



**Figura 36:** Ajuste de los espectros de temperatura-altitud de S2F13 a S2F16.



**Figura 37:** Ajuste de los espectros de temperatura-altitud de S2F17 a S2F20.



**Figura 38:** Ajuste de los espectros de temperatura-altitud de S2F21 a S2F23.

Al realizar los respectivos análisis de los perfiles de S2 se obtuvo una tabla de valores en donde se muestra el comportamiento de las diferentes pendientes para luego obtener un valor medio de dicha pendiente dando por resultado:

**Tabla 3:** Valores de pendiente, error absoluto y coeficiente de correlación obtenidos de los ajustes de los perfiles correspondientes a la Fig. 25-27.

Día	Pendiente (K/km)	Desviación estándar (K/km)	Coefficiente de correlación
1	- 8,12	0,01	0,998
2	-8,19	0,01	0,998
3	-8,10	0,01	0,998
4	-7,94	0,01	0,999
5	-8,19	0,01	0,999
6	-8,42	0,01	0,998
7	-8,41	0,01	0,998
8	-8,46	0,01	0,999
9	-8,9	0,01	0,999
10	-8,04	0,01	0,999
11	-8,01	0,01	0,997
12	-7,82	0,01	0,999
13	-7,91	0,01	0,999
14	-8,04	0,02	0,997
15	-8,08	0,01	0,997
16	-8,05	0,01	0,999
17	-8,13	0,02	0,996
18	-8,27	0,01	0,998
19	-8,25	0,01	0,998
20	-8,23	0,01	0,998
21	-8,10	0,01	0,998
22	-7,91	0,02	0,997
23	-8,19	0,01	0,997

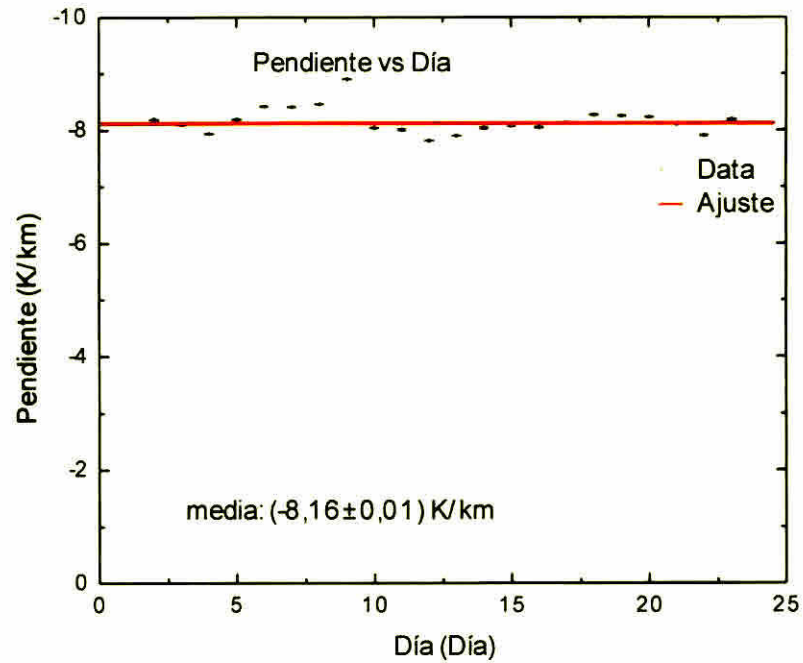


Figura 39: Gráfico de las pendientes de los perfiles S2F1-F23 en función de los días.

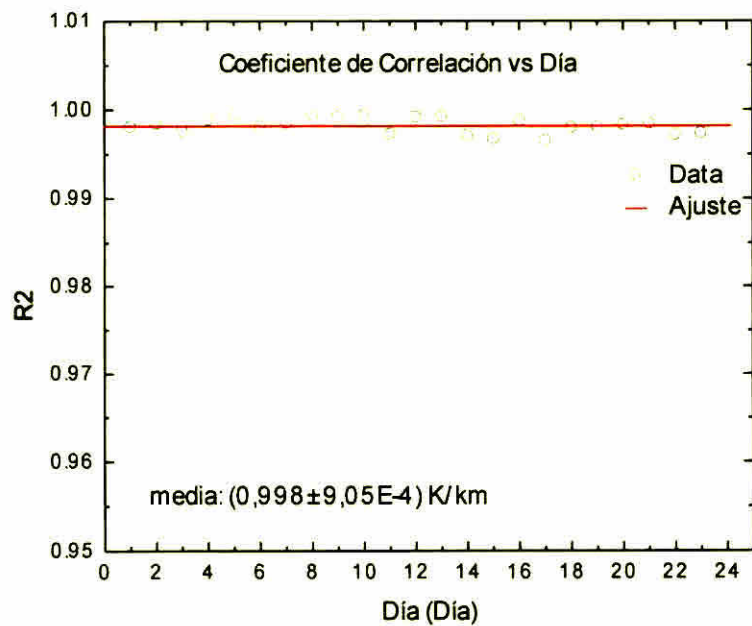
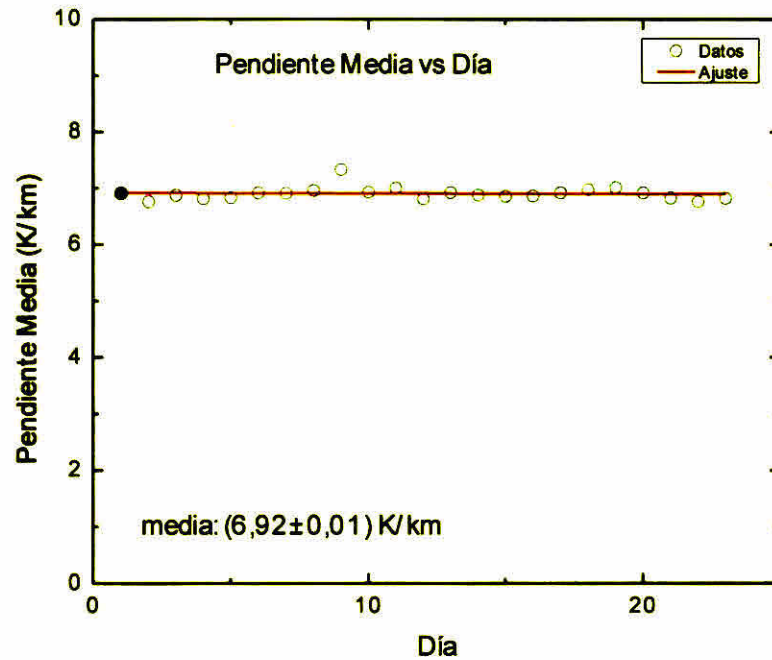


Figura 40: Gráfico de los coeficientes de correlación obtenidos de los ajustes de las pendientes de los perfiles S2F1-F24 en función del día.

De la figura 40 se obtuvo que el valor medio de las pendientes obtenidas al realizar el ajuste de los perfiles S2F1 F23 corresponde a  $(8.16 \pm 0.01)$  K/km. Este resultado está soportado por el comportamiento de los coeficientes de correlación en función del día que se muestra en la figura 35 y que muestra un valor medio de  $(0.998 \pm 9.05 \times 10^{-4})$  K/km.

Una vez determinadas las dos tendencias que presentan los perfiles de temperatura en función de la altitud y mostrando que estos perfiles tienen una doble pendiente, obtuvimos en primera instancia un valor promedio para compararlo con el valor de  $\Gamma$  predicho por el modelo estándar de la atmósfera y en segundo lugar se brinda una explicación del porqué de esta doble pendiente.

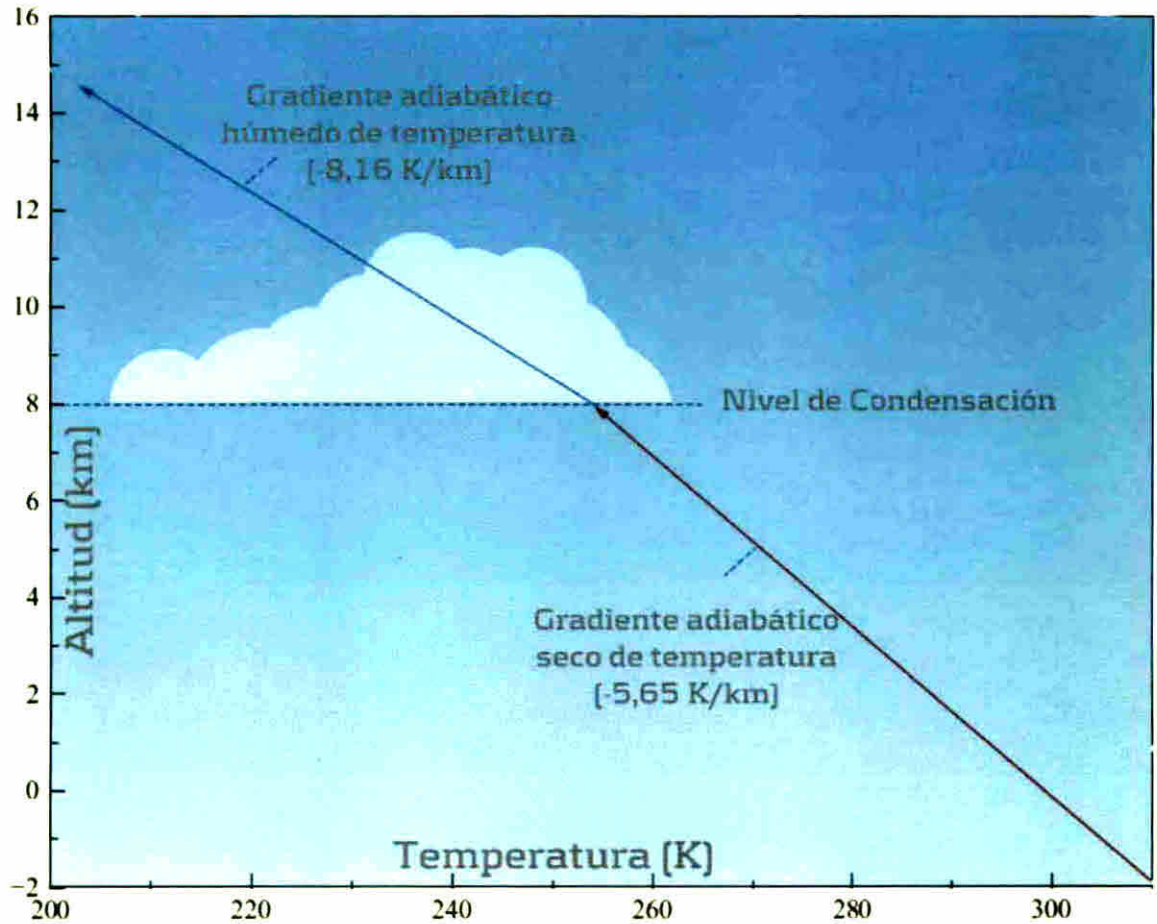
Se utilizó el valor obtenido en los gráficos 32 y 40 para calcular el valor medio de las pendientes.



**Figura 41:** Gráfico de los valores medios de las pendientes para los días en estudio.

De la Figura 42 se obtuvo que, en promedio, nuestros perfiles para las fechas utilizadas se comportan de la misma forma que lo predice el modelo estándar de la atmósfera, ya que, según dicho modelo,  $\gamma$ , tiene un valor aproximado de  $6,5 \text{ }^\circ\text{C/km}$ .

Al observar la figura 32 y la figura 40 se obtuvo una nueva figura que podría explicar el comportamiento de estos perfiles haciendo uso de los conceptos de gradiente de temperatura adiabática seco y gradiente de temperatura adiabática húmeda.



**Figura 42:** Explicación probable a la presencia de la doble pendiente en los perfiles de temperatura en función de la altitud.

De la figura 43 se desprende que el nivel de condensación para la zona en estudio y durante los días de estudio se da alrededor de los 8 km.

Esta conclusión a la que hemos llegado, utilizando los datos experimentales tomados por el equipo, desplegado en el sitio de la investigación, la analizamos, desde el punto de vista termodinámico.

Si definimos la temperatura potencial como

$$\theta = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{R}{c_p}} \quad (7)$$

con  $p_0$  como la presión de referencia Relacionando ésta con la entropía por

$$\theta = T_0 e^{\frac{s}{c_p}} \quad (8)$$

con  $T_0$  como la temperatura de referencia Al igual que la entropía la temperatura potencial se conserva bajo un proceso adiabático transformaciones reversibles

En un proceso adiabático se tiene que

$$T_0 p_0^{\frac{-R}{c_p}} = T p^{\frac{-R}{c_p}} \quad (9)$$

T y p son la temperatura y presión de inicio de aquí que

$$T_0 = \theta \quad (10)$$

En este proceso se consideró que la estructura de temperatura es tal que  $\theta$  es constante ya que el proceso es adiabático En esta región la atmosfera es compresible la temperatura varia con la altitud dando como resultado que su tasa de cambio se le llame gradiente adiabático seco como ya era conocido por nosotros

El término seco quiere decir que cuando la parcela de aire va en ascenso no contiene suficiente humedad para que se lleve a cabo el proceso de condensación

Ahora como la atmosfera presenta un proceso adiabático se debe cumplir que

$$\frac{d\theta}{dz} = 0$$

$$\frac{dO}{dz} = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{-R}{c_p}} \left(\frac{dT}{dz} + \frac{g}{c_p}\right) = 0 \quad (11)$$

de aquí se desprende que

$$\Gamma_d = \frac{g}{c_p} \quad (12)$$

Y para cumplir la igualdad se debe cumplir que

$$T = T_0 - \Gamma_d z \quad (13)$$

Para un aire perfectamente seco se tiene que el gradiente adiabático de temperatura seco tiene un valor de 9.8 K/km. Este reporte es concordante con los resultados obtenidos por nuestro estudio ya que indica que en esta región de la atmósfera la temperatura se comporta de manera lineal y la pendiente se interpreta como el gradiente adiabático de temperatura húmedo y se obtuvo un valor de 8.16 K/km que se aproxima bastante a lo que se obtendría si la atmósfera fuera perfectamente seca.

El nivel en donde la parcela de aire inicia el proceso de saturación es llamado elevación del nivel de condensación (LCL). Si la parcela se eleva más se forman nubes. En nuestro estudio está alrededor de los 8 km.

Luego de pasar el LCL la parcela de aire se comienza a saturar adiabáticamente. Para una parcela de aire saturada la energía interna se puede escribir como

$$U = M_d u_d + M_v u_v + M_l u_l \quad (14)$$

con d, v y l indicando seco, vapor de agua y agua líquida. De igual manera podemos escribir el volumen de una parcela de aire como

$$V = M_l \alpha_l + M_d \alpha_d \quad (15)$$

Ahora diferenciando ambas ecuaciones y multiplicando esta última por  $p$  obtenemos

$$\frac{dU}{dt} = M_d \frac{du_d}{dt} + M_v \frac{du_v}{dt} + M_l \frac{du_l}{dt} + (u_v - u_l) \frac{dM_v}{dt} \quad (16)$$

$$p \frac{dV}{dt} = p_d M_d \frac{d\alpha_d}{dt} + p_v M_v \frac{d\alpha_v}{dt} + p(\alpha_v - \alpha_l) \frac{dM_v}{dt} \quad (17)$$

La ley de la conservación de la energía puede ser expresada como

$$\frac{dU}{dt} = Q - p \frac{dV}{dt} \quad (18)$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores y recordando que el volumen de una masa fija de líquido es esencialmente constante y utilizando  $dM_u/dt = -dM_l/dt$  obtenemos

$$(M_d c_{vd} + M_v c_{vv} + M_l c_l) \frac{dT}{dt} + l_v \frac{dM_v}{dt} + p_d M_d \frac{d\alpha_d}{dt} + p_v M_v \frac{d\alpha_v}{dt} = Q \quad (19)$$

Utilizando la definición del calor latente de vaporización

$$l_v = u_v - u_l + p(\alpha_v - \alpha_l)$$

Dividiendo por  $M_d T$  sabiendo que  $w$  es razón de vapor mixto y  $w_l$  es la razón de agua líquida mixta y utilizando la ecuación Clausius Clapeyron obtenemos

$$\left[ c_{pd} + (w + w_l) c_l \right] \frac{1}{T} \frac{dT}{dt} - \frac{R_d}{p_d} \frac{dp_d}{dt} - \frac{w R_v}{e} \frac{de}{dt} + \frac{w R_v}{e_s} \frac{de_s}{dt} + \frac{d}{dt} \left( \frac{l_v w}{T} \right) = \frac{Q}{M_d T} \quad (20)$$

Para una parcela de aire en ascenso adiabático a una rapidez  $dz/dt$  sobre la ecuación anterior se tiene

$$c_p \frac{dT}{dz} - \frac{R_d T}{p_d} \frac{dp_d}{dz} + T \frac{d}{dz} \left( \frac{l_v w_s}{T} \right) = 0 \quad (21)$$

Desarrollando el segundo término de la ecuación anterior y utilizando la ecuación

de Clausius Clapeyron y recordando que la temperatura de los alrededores y de la parcela es la misma obtenemos

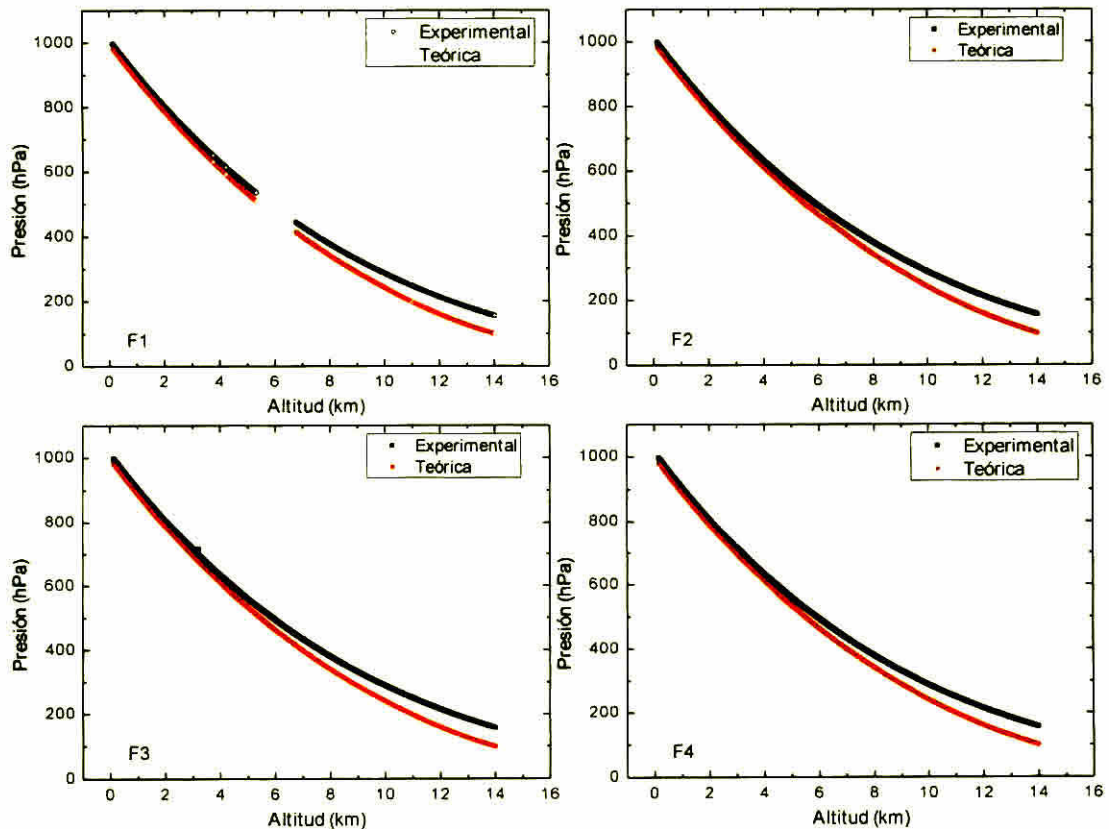
$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{c_p} - \frac{1}{c_p} \frac{d}{dz} (l_v w_s) \quad (22)$$

Esto nos indica que el gradiente adiabático humedo es simplemente el gradiente adiabático seco más las contribución debido a la condensación. Esto significa que el gradiente adiabático humedo es siempre menor que el gradiente adiabático seco.

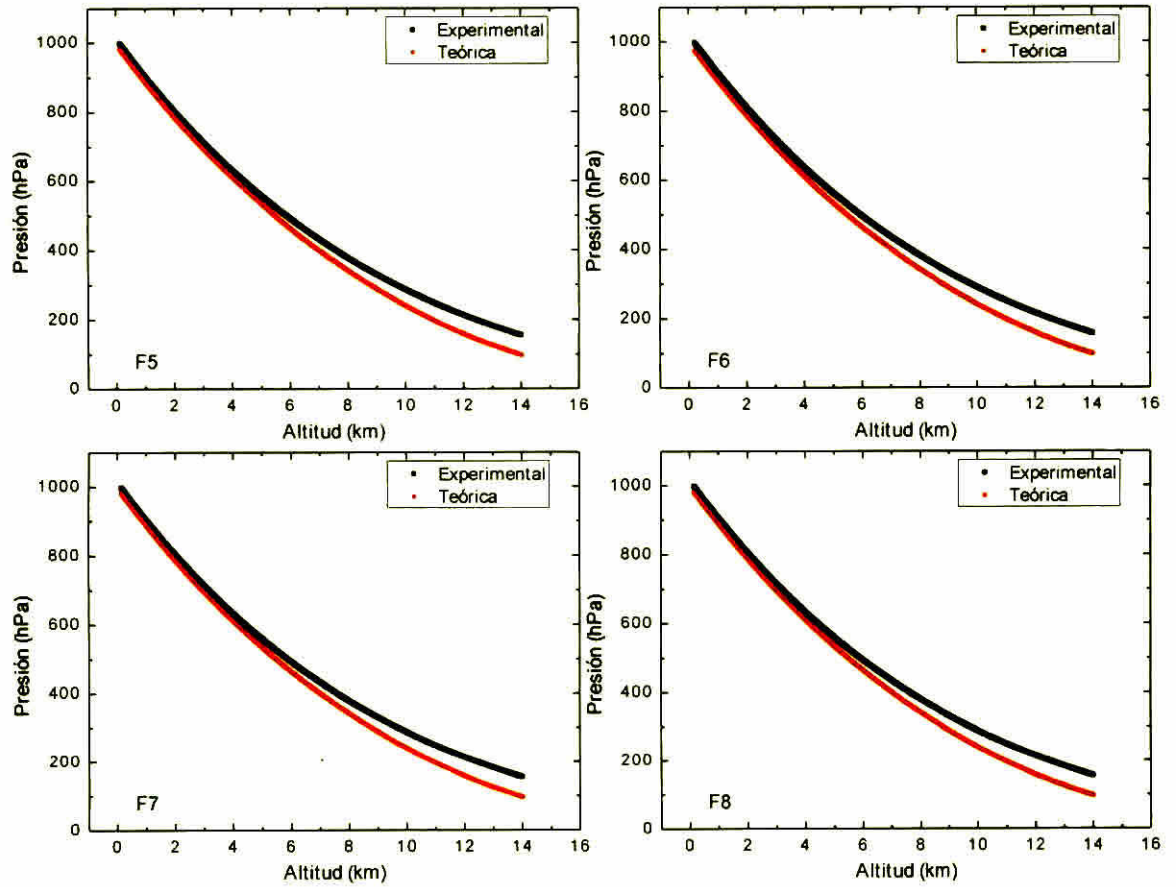
### 4.3. Estudio de los perfiles de presión y la altitud en la tropósfera.

Para el estudio se graficó la presión en función de la altura y se comparó con las predicciones hechas por el modelo estándar de la atmósfera; el cual indica que si utilizamos la ecuación 6, se debería reproducir el perfil experimental de cualquier toma de muestra, que involucrara la presión y la altitud.

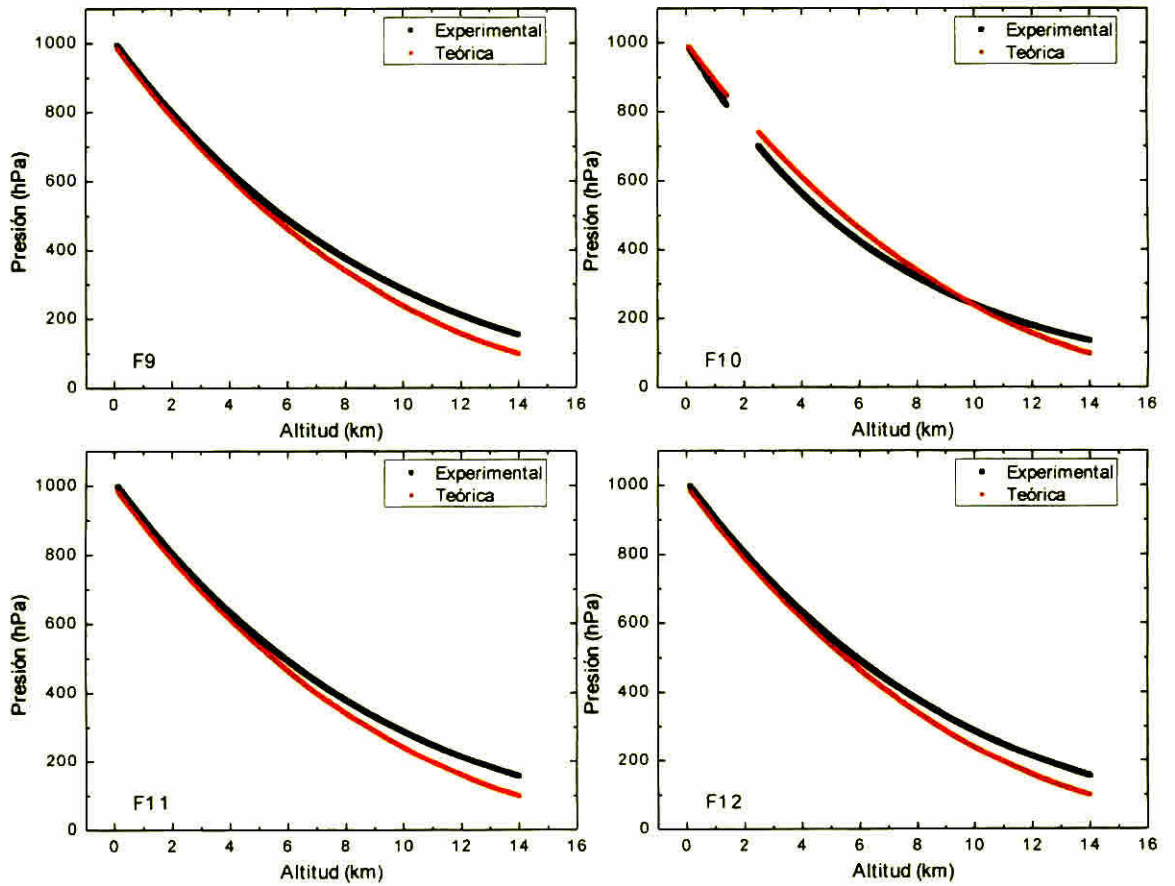
A continuación se muestran los perfiles experimentales y los perfiles teóricos de la presión en función de la altitud para verificar el modelo estándar.



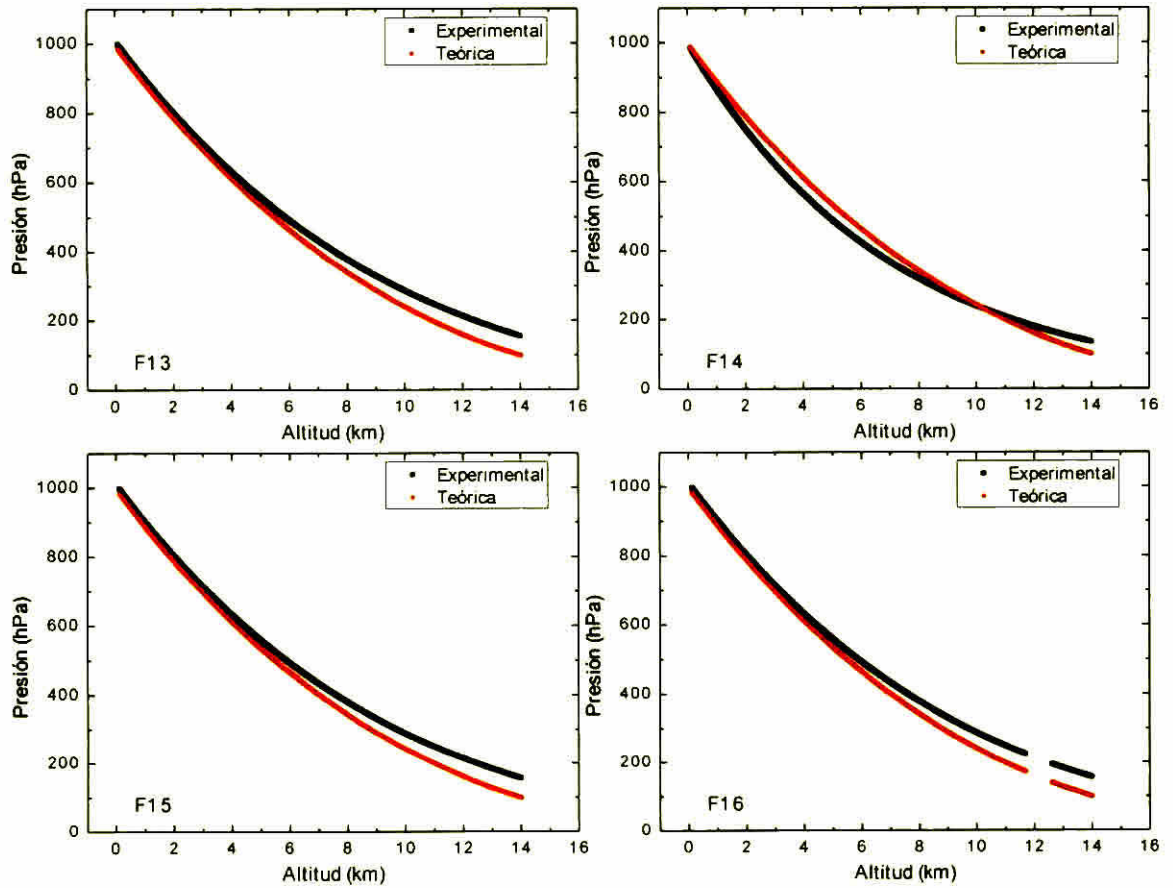
**Figura 43:** Perfiles de presión en función de la altitud para las fechas 1 a la 4.



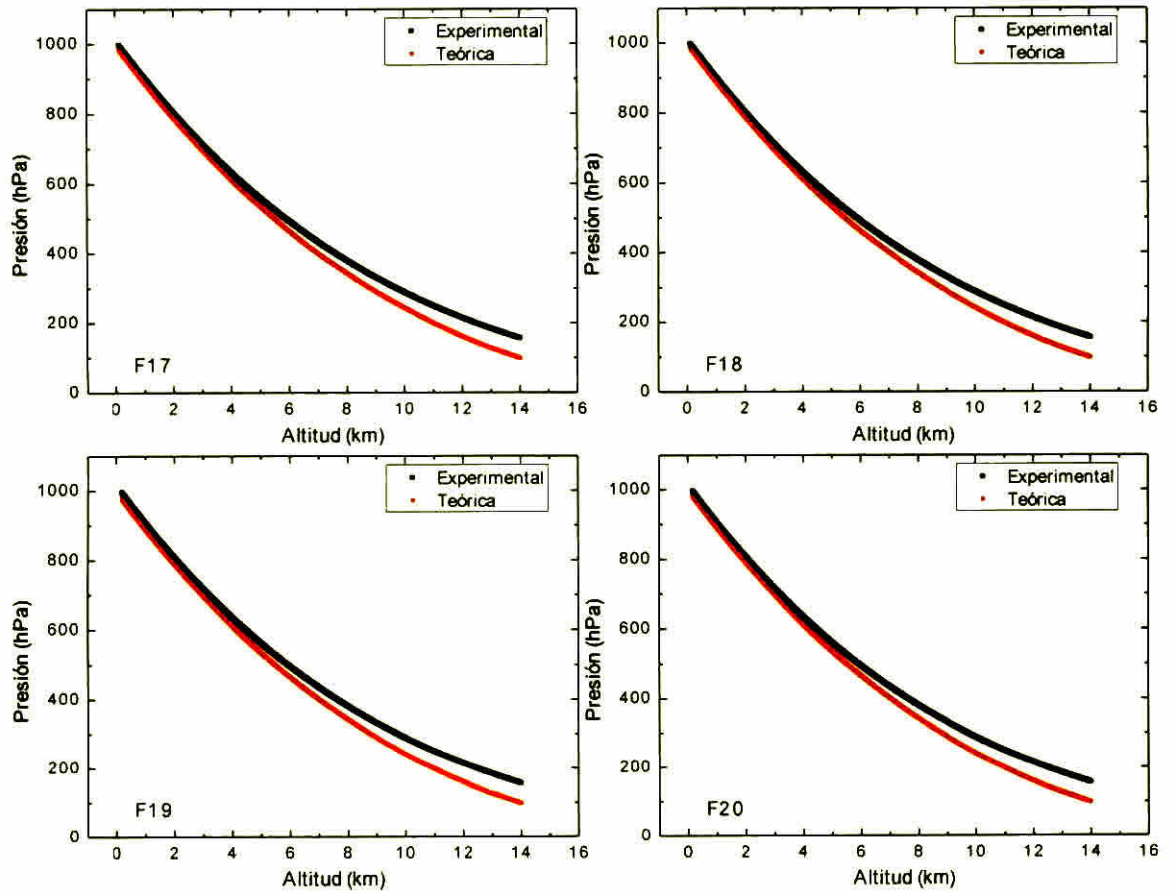
**Figura 44:** Perfiles de presión en función de la altitud para las fechas 5 a la 8.



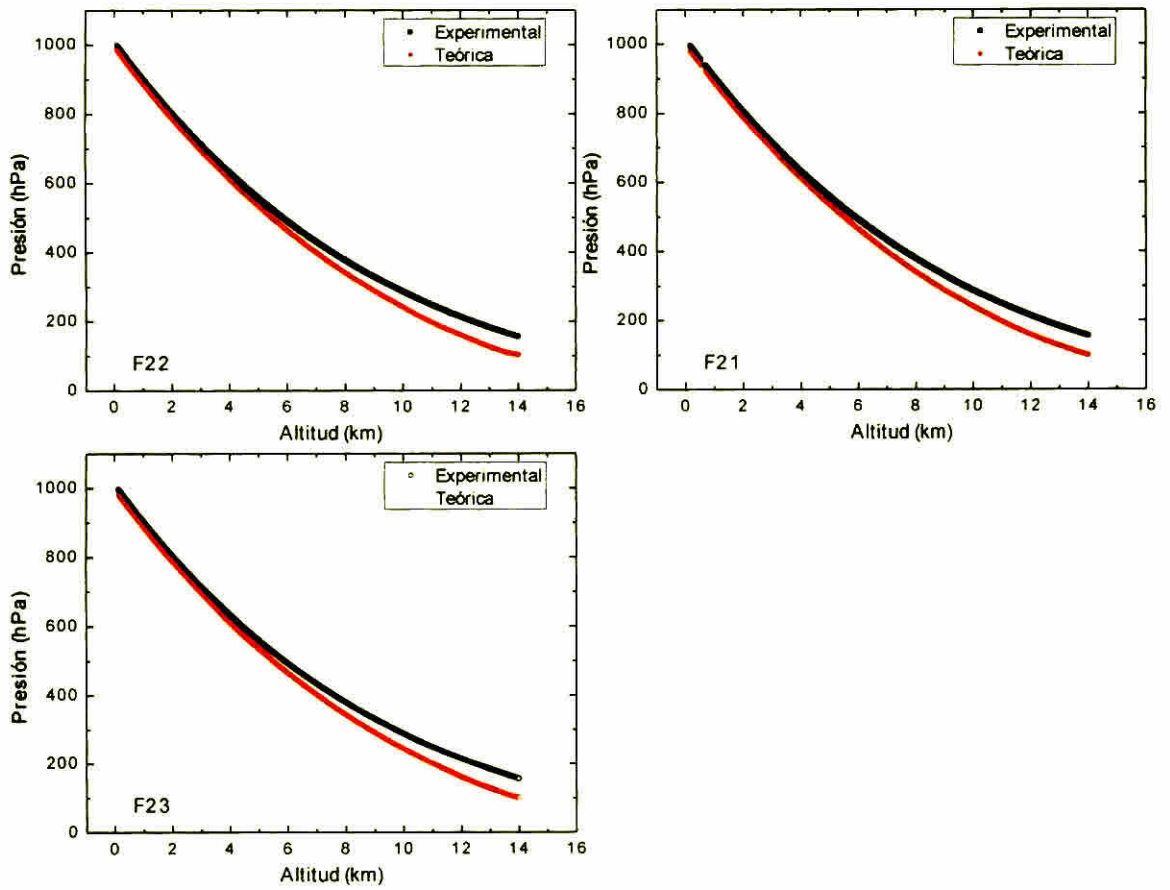
**Figura 45:** Perfiles de presión en función de la altitud para las fechas 9 a la 12.



**Figura 46:** Perfiles de presión en función de la altitud para las fechas 13 a la 16.



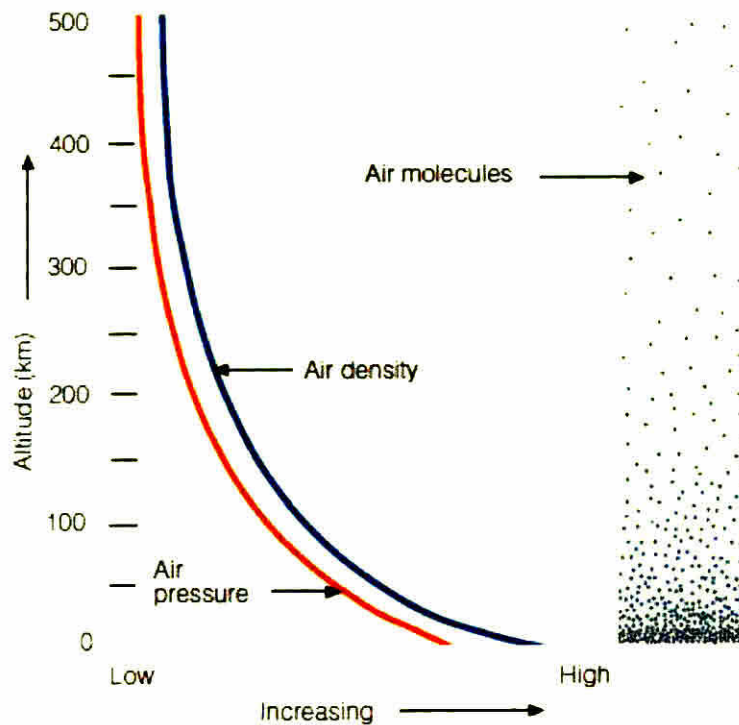
**Figura 47:** Perfiles de presión en función de la altitud para las fechas 17 a la 20.



**Figura 48:** Perfiles de presión en función de la altitud para las fechas 13 a la 16.

De las figuras 44 a 49 se obtuvieron que los perfiles de presión experimentales se comportan de forma muy similar a los perfiles de presiones teóricas que se obtuvieron utilizando la ecuación 6. De esta se concluye que el modelo estándar de la atmósfera es una buena aproximación del modelo real de la tropósfera del área de estudio.

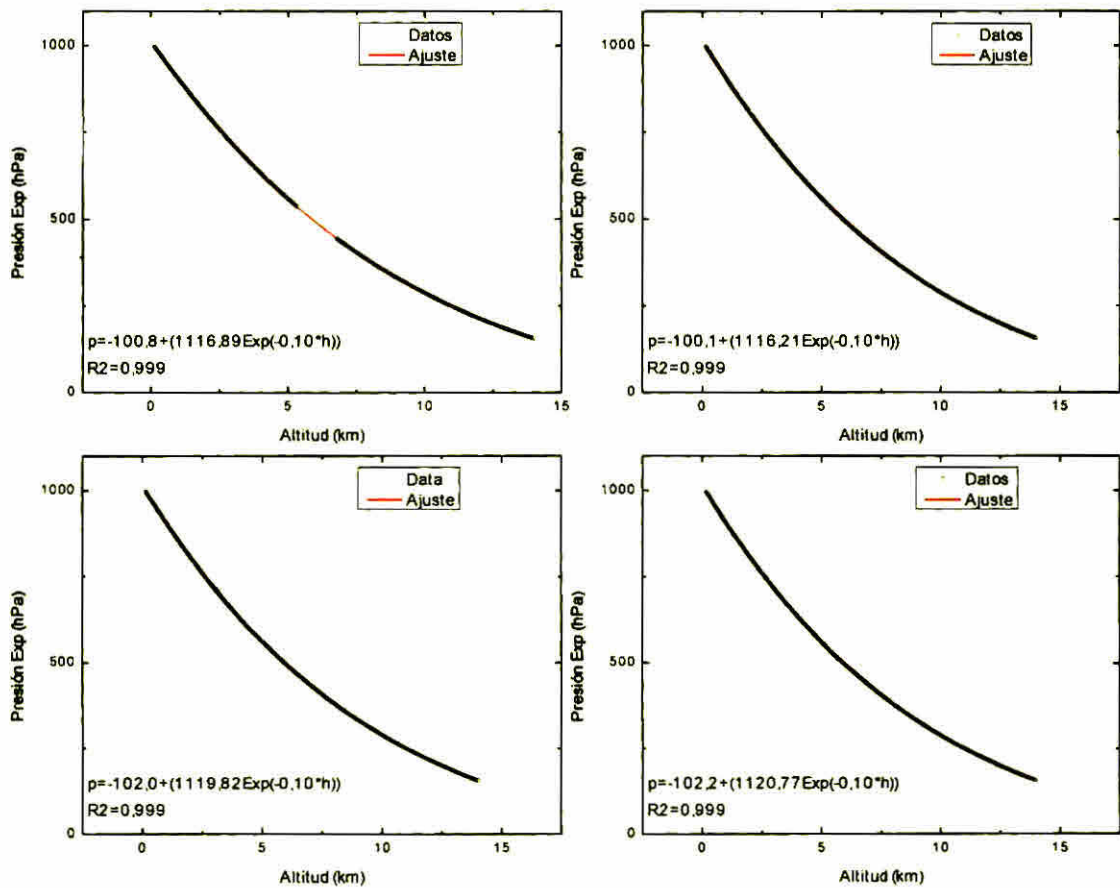
Como sabemos la presión atmosférica depende de la altitud sobre el nivel del mar y decrece con la altitud. Para altitudes altas, la densidad y la temperatura del aire son más bajas. Así que el número de colisiones entre moléculas son menores y la presión es baja.



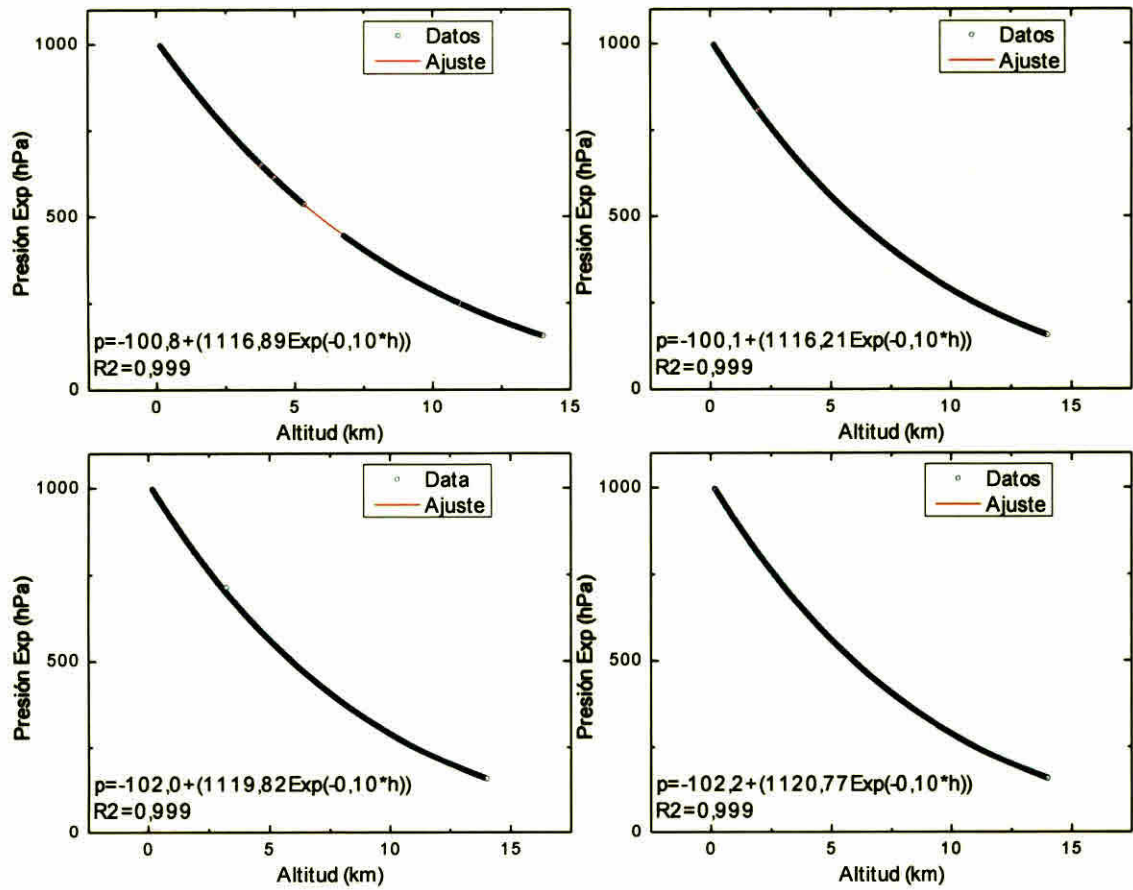
**Figura 49:** Ambos, presión y densidad del aire decrecen con el incremento de la altitud (Ahrens, 2011).

A continuación mostramos los perfiles de presión en función de la altitud para las

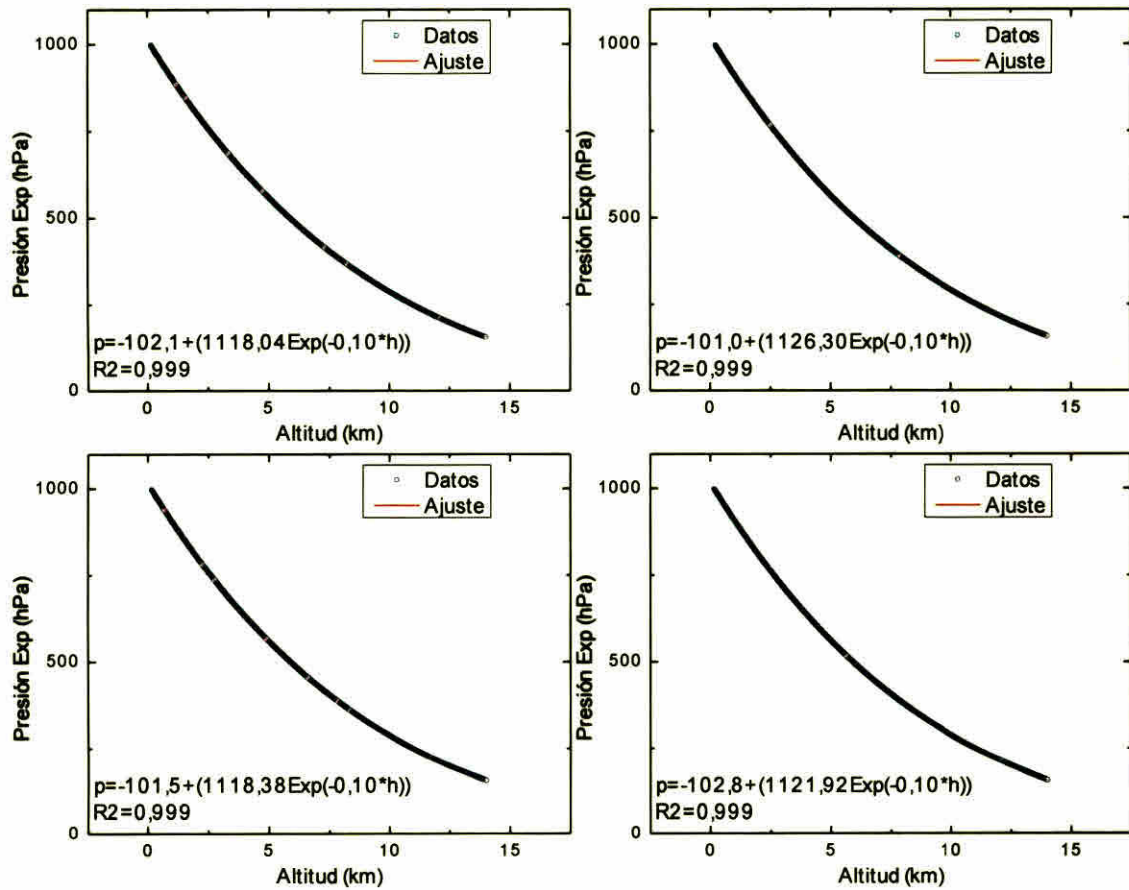
diferentes fechas utilizadas durante la investigación y sus respectivos ajustes empleándose un programa de tratamiento de datos como Microcal Origin.



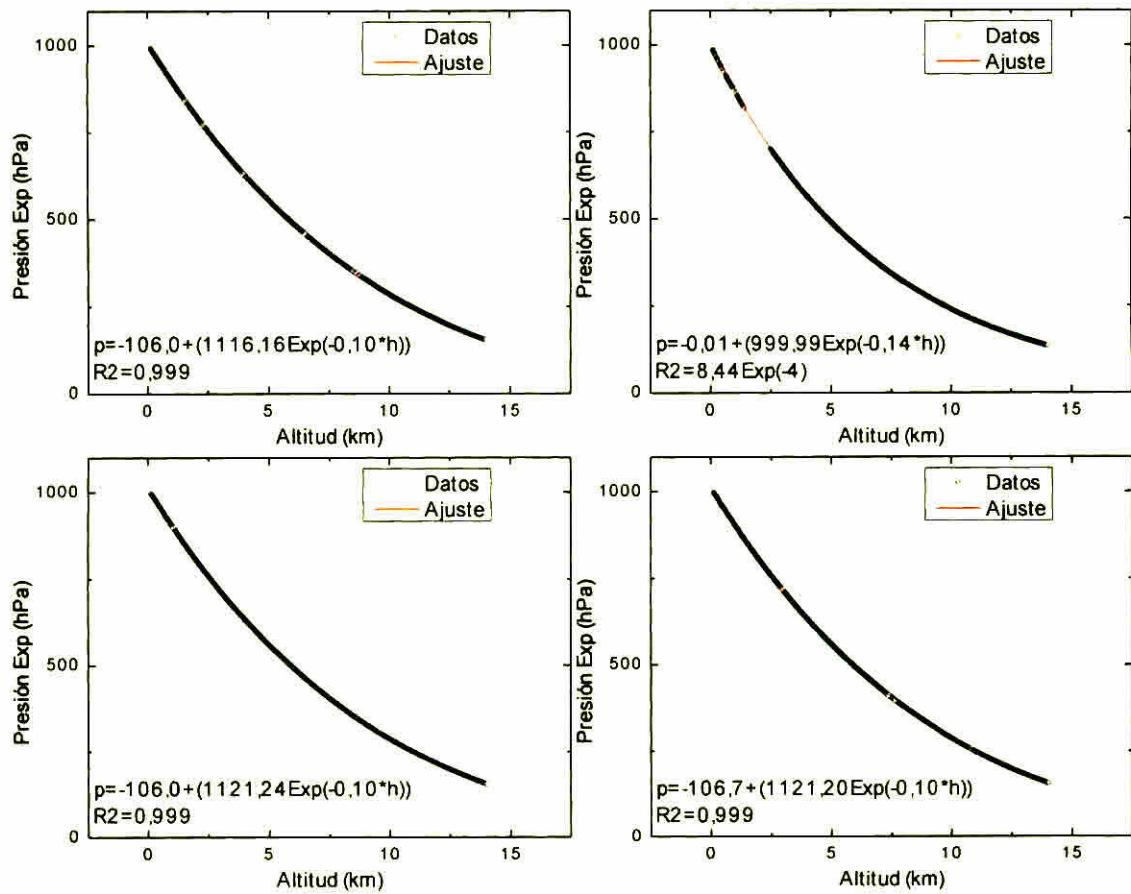
**Figura 50:** Ajuste de los perfiles de presión en función de la altitud para F1 a F4.



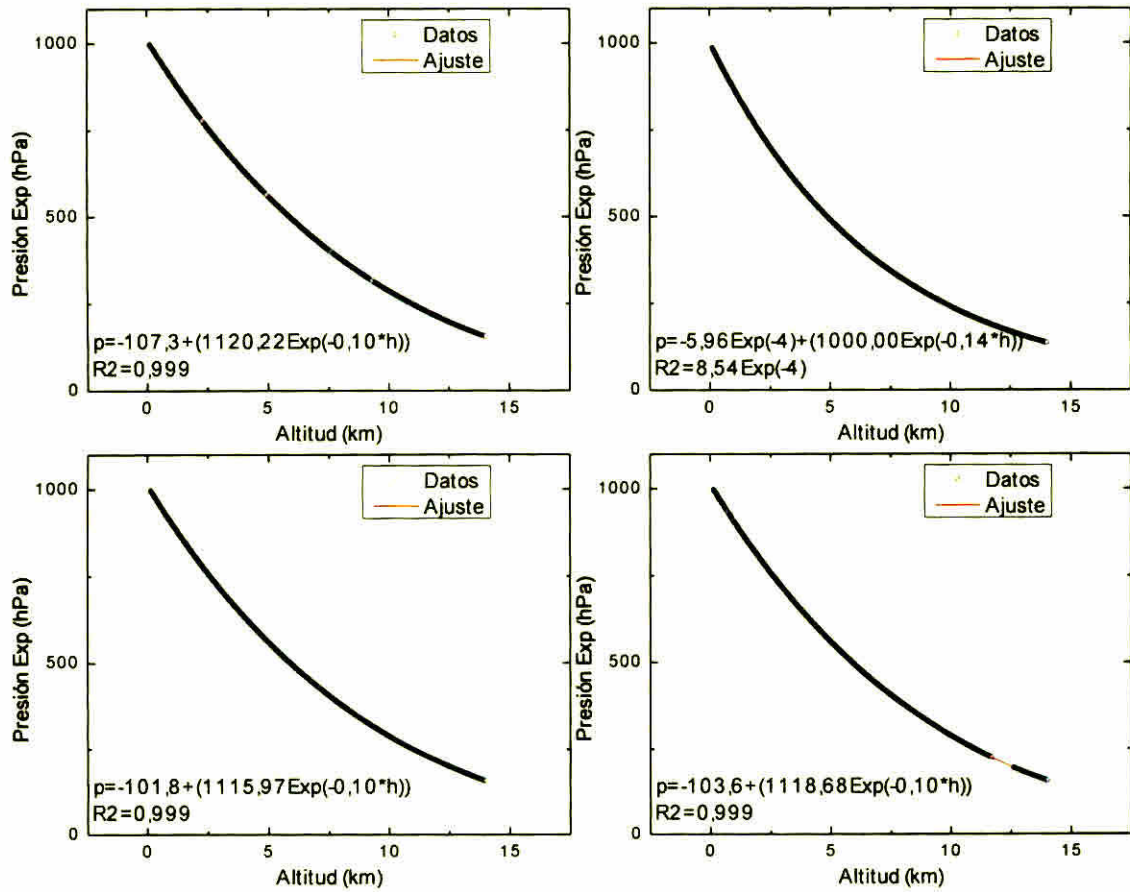
**Figura 51:** Ajuste de los perfiles de presión en función de la altitud para F1 a F4.



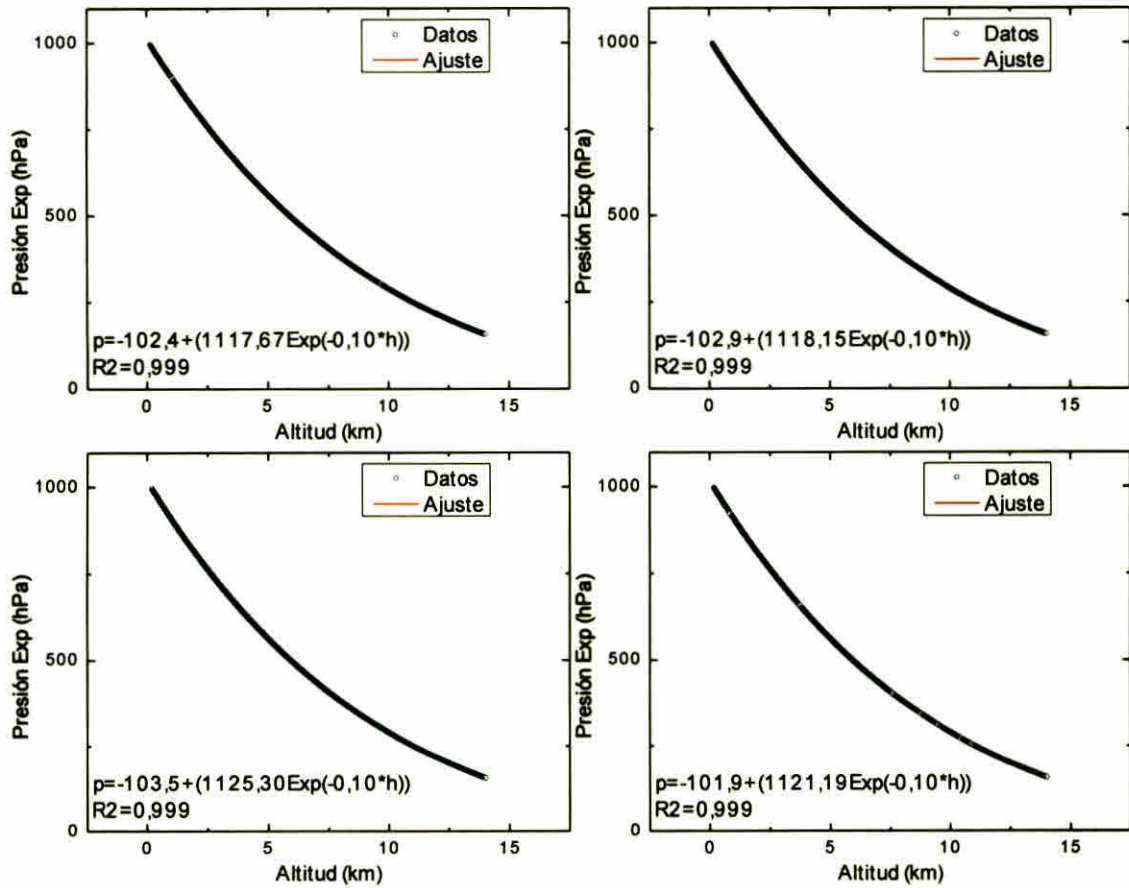
**Figura 52:** Ajuste de los perfiles de presión en función de la altitud para F5 a F8.



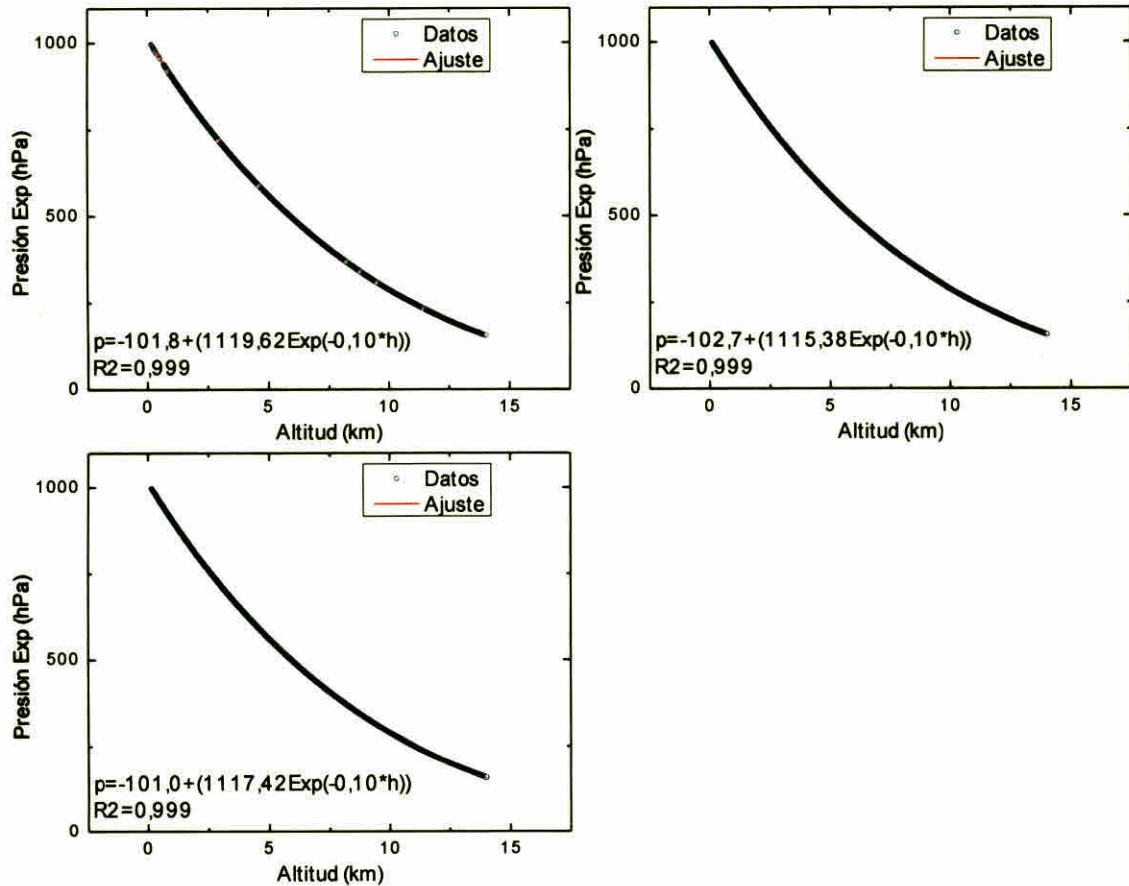
**Figura 53:** Ajuste de los perfiles de presión en función de la altitud para F9 a F12.



**Figura 54:** Ajuste de los perfiles de presión en función de la altitud para F13 a F16.



**Figura 55:** Ajuste de los perfiles de presión en función de la altitud para F17 a F20.



**Figura 56:** Ajuste de los perfiles de presión en función de la altitud para F21 a F23.

Con estos ajustes se obtuvo la ecuación matemática que relaciona la presión y la altitud para el área de estudio de nuestra investigación.

**Tabla 4:** Valores del intercepto, presión inicial y coeficiente de correlación de los perfiles de presión en función de la altitud para el área de estudio en las fechas asignadas, correspondiente al mes de julio-agosto de 2007.

Día (Día)	Intercepto (hPa)	P0 (x 10 <sup>3</sup> ) (hPa)	Coficiente de correlación
1	100,8	1,111	0,999
2	100,1	1,116	0,999
3	102,0	1,119	0,999
4	102,2	1,121	0,999
5	102,1	1,118	0,999
6	101,0	1,126	0,999
7	101,5	1,118	0,999
8	102,8	1,122	0,999
9	106,0	1,116	0,999
10	106,0	1,121	0,999
11	106,7	1,121	0,999
12	107,3	1,120	0,999
13	101,8	1,116	0,999
14	103,6	1,119	0,999
15	102,4	1,118	0,999
16	102,9	1,118	0,999
17	103,5	1,125	0,999
18	101,9	1,121	0,999
19	101,8	1,120	0,999
20	102,7	1,115	0,999
21	101,0	1,117	0,999
	Media= 102,8	Media= 1,119	

De la tabla 4 y utilizando el programa Microcal Origin, obtuvimos la ecuación que describe el comportamiento de los perfiles de presión en función de la altitud,

$$p = (-102,85 + 1119,36e^{-0,10h}) \text{ hPa} \quad (23)$$

Utilizando la ecuación (13) en la (2) obtenemos:

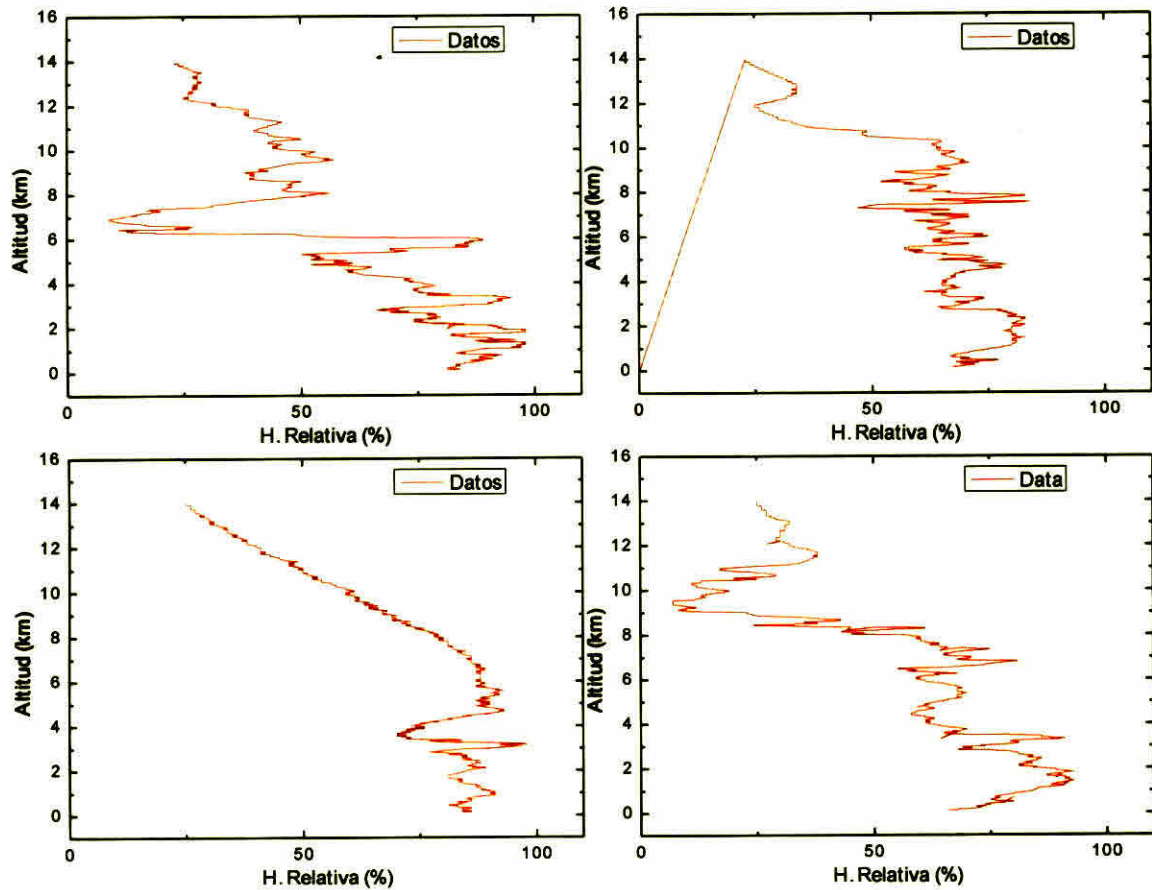
$$\frac{dp}{dz} = -p(z) \frac{g}{R(T_0 - \Gamma_d z)} \quad (24)$$

Realizando la integración y realizando un cambio de variables obtenemos

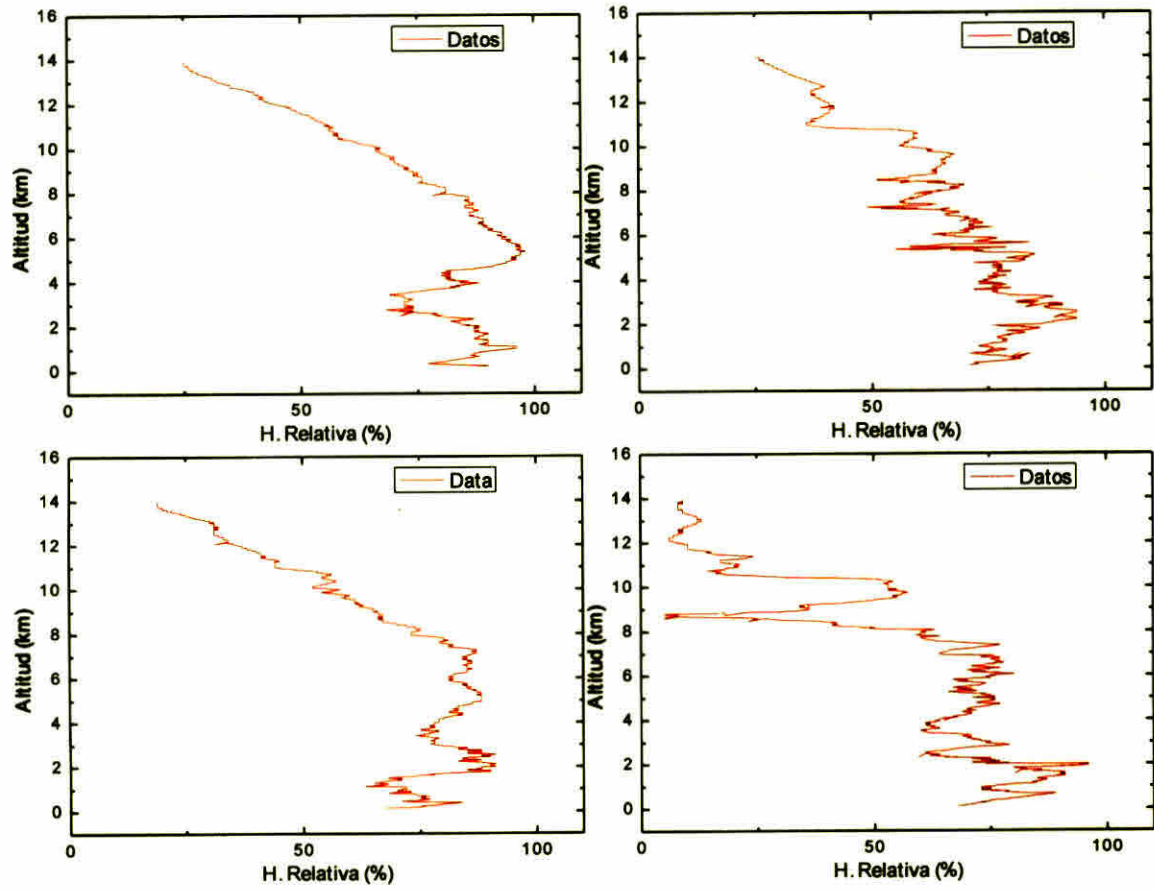
$$p = p_0 \left(1 - \frac{\Gamma_d z}{T_0}\right)^{g/R\Gamma_d} \quad (25)$$

Que es la ecuación que se utiliza en el modelo estándar para explicar el comportamiento de la presión cuando varia la altura en la baja troposfera. El comportamiento de dicha función es el mismo que el de la ecuación (23) lo cual indica que en nuestro caso de estudio se está cumpliendo con lo que indica el modelo estándar de la atmosfera en lo que se refiere al comportamiento de la presión en función de la altura en la tropósfera.

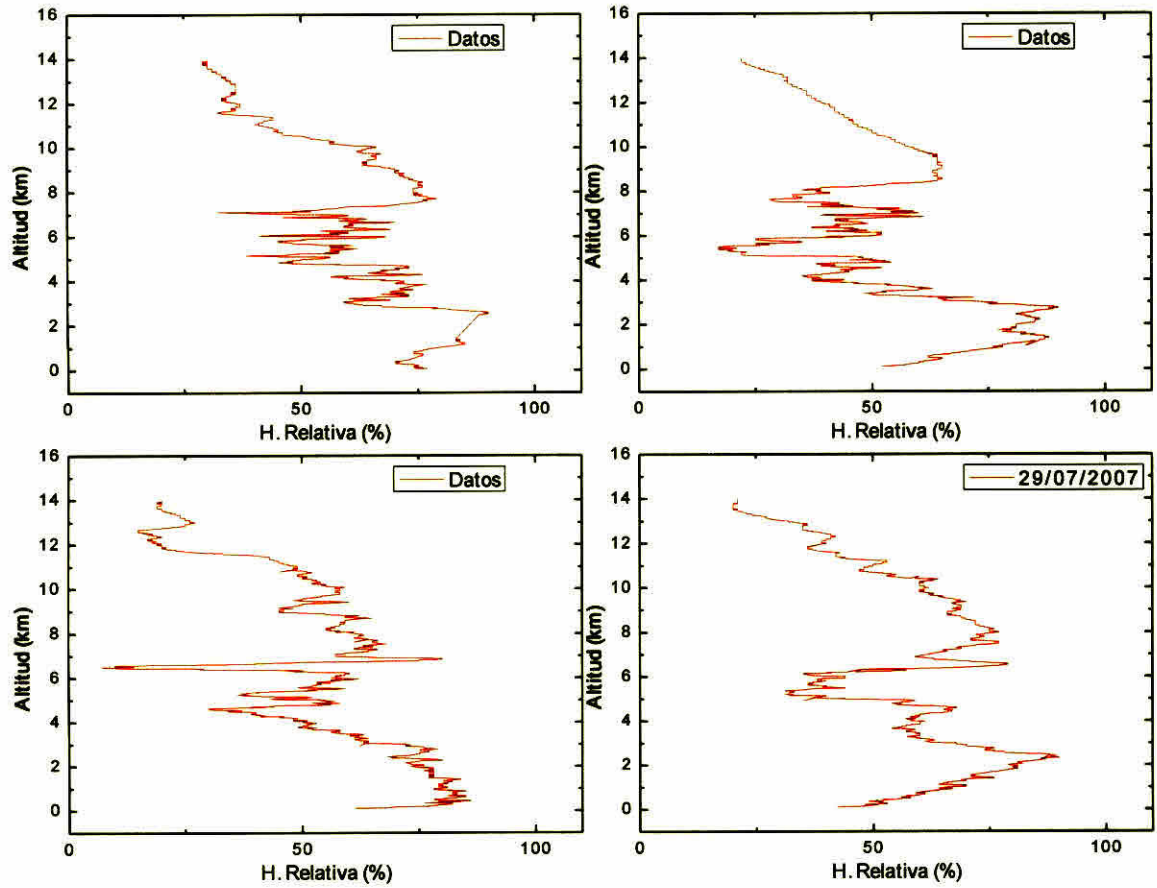
#### 4.4. Estudio de los perfiles de humedad relativa y la altitud en la tropósfera.



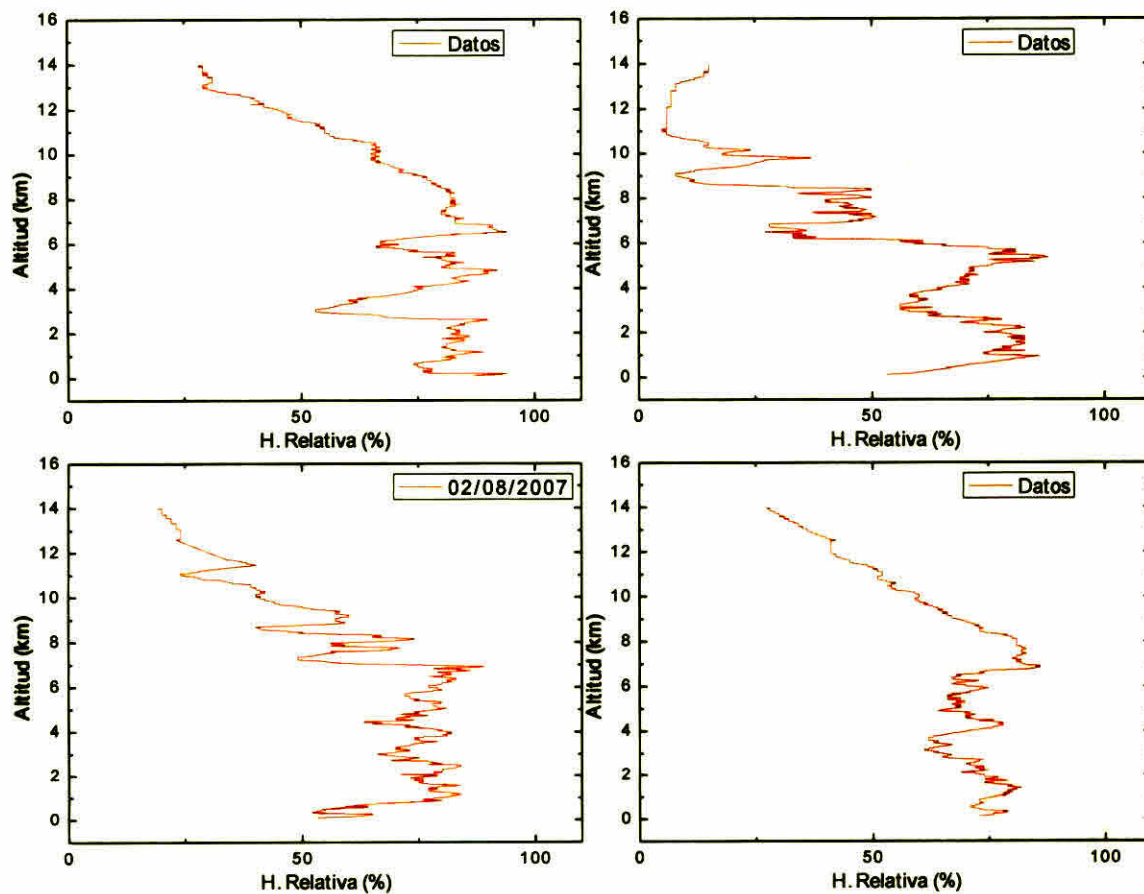
**Figura 57:** Comportamiento de la humedad relativa cuando varía la altitud en el área de estudio para F1 a F4.



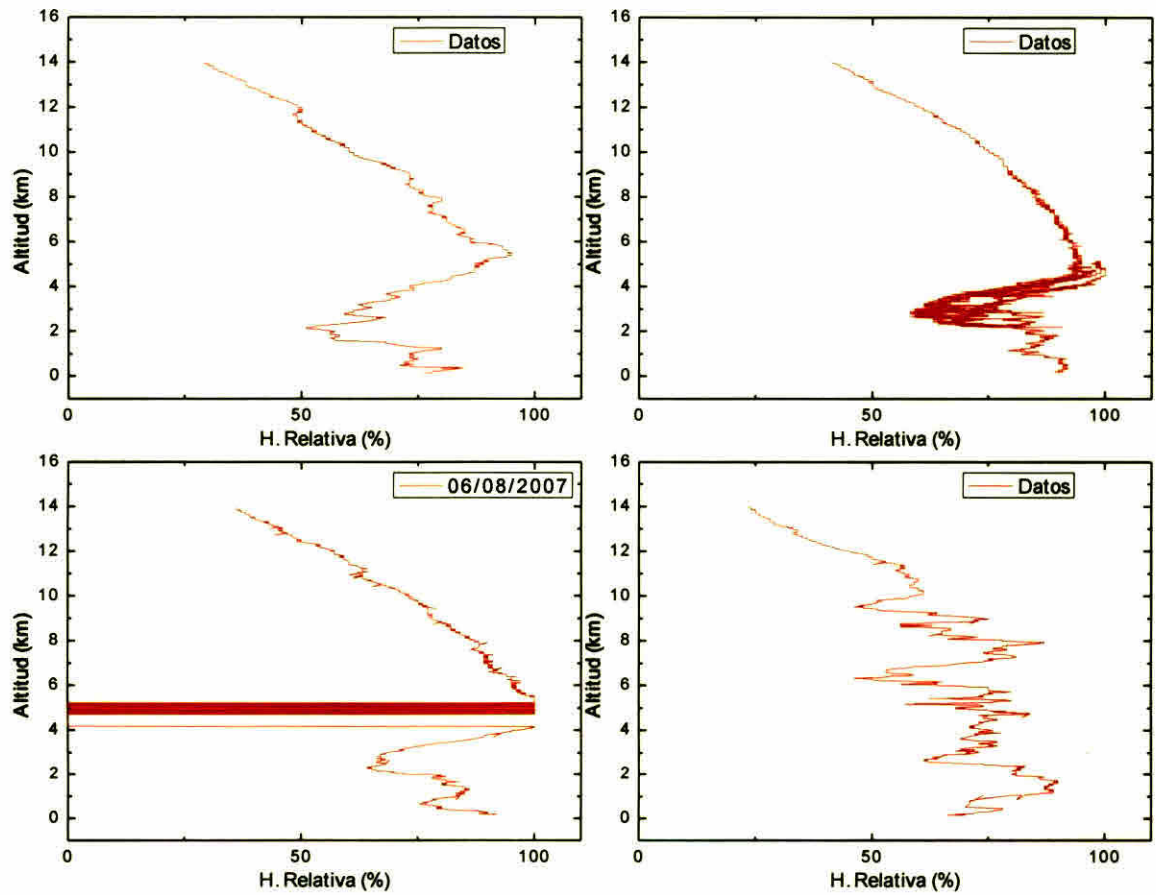
**Figura 58:** Comportamiento de la humedad relativa cuando varía la altitud en el área de estudio para F5 a F8.



**Figura 59:** Comportamiento de la humedad relativa cuando varía la altitud en el área de estudio para F9 a F12.



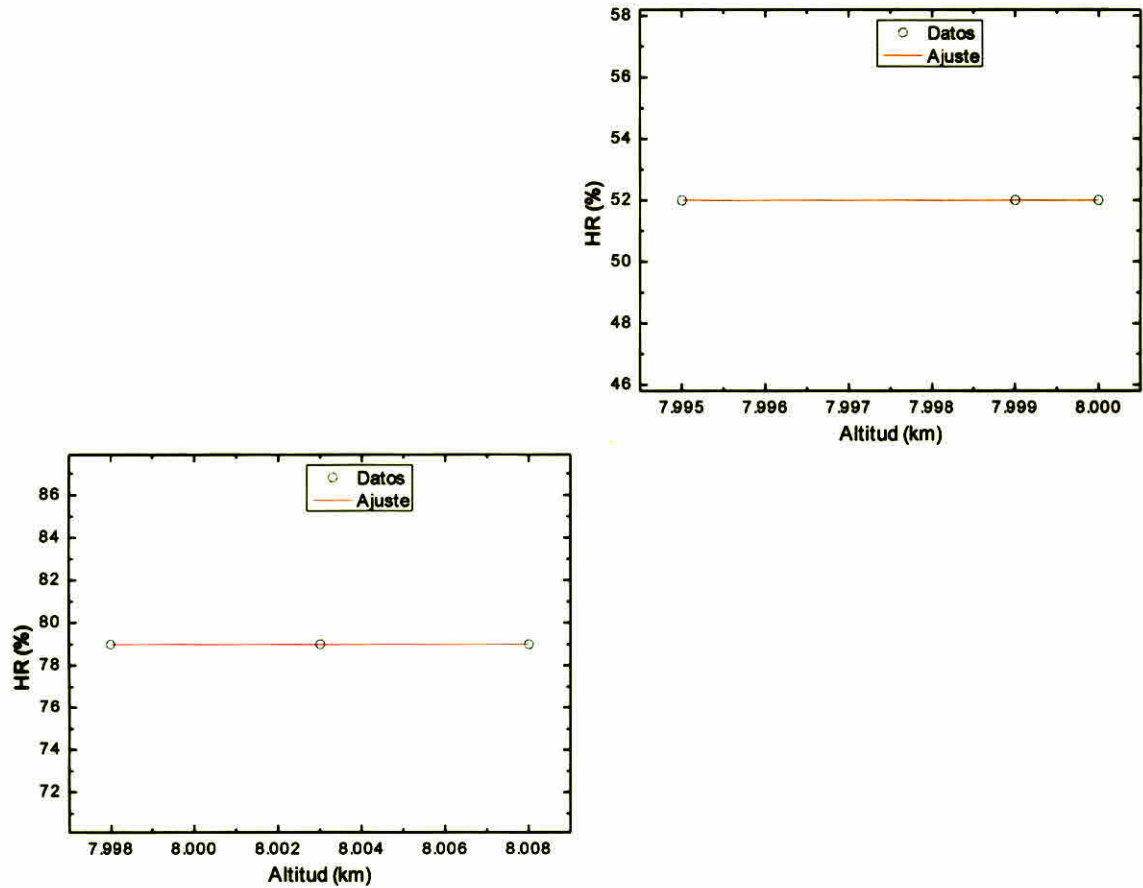
**Figura 60:** Comportamiento de la humedad relativa cuando varía la altitud en el área de estudio para F13 a F16.



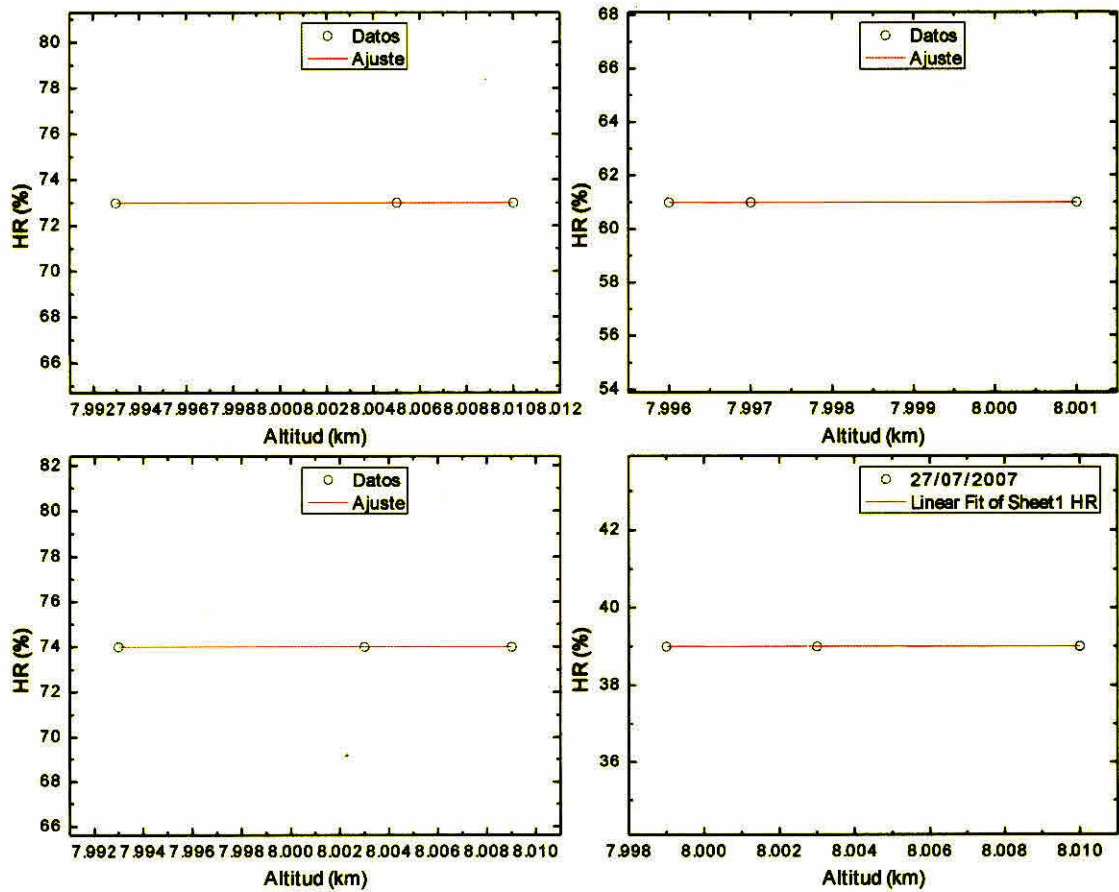
**Figura 61:** Comportamiento de la humedad relativa cuando varía la altitud en el área de estudio para F17 a F20.

De la figura 58 a la 62 se puede observar que a medida que la altitud aumenta la humedad relativa disminuye hasta llegar a un área en donde vuelva a aumentar;

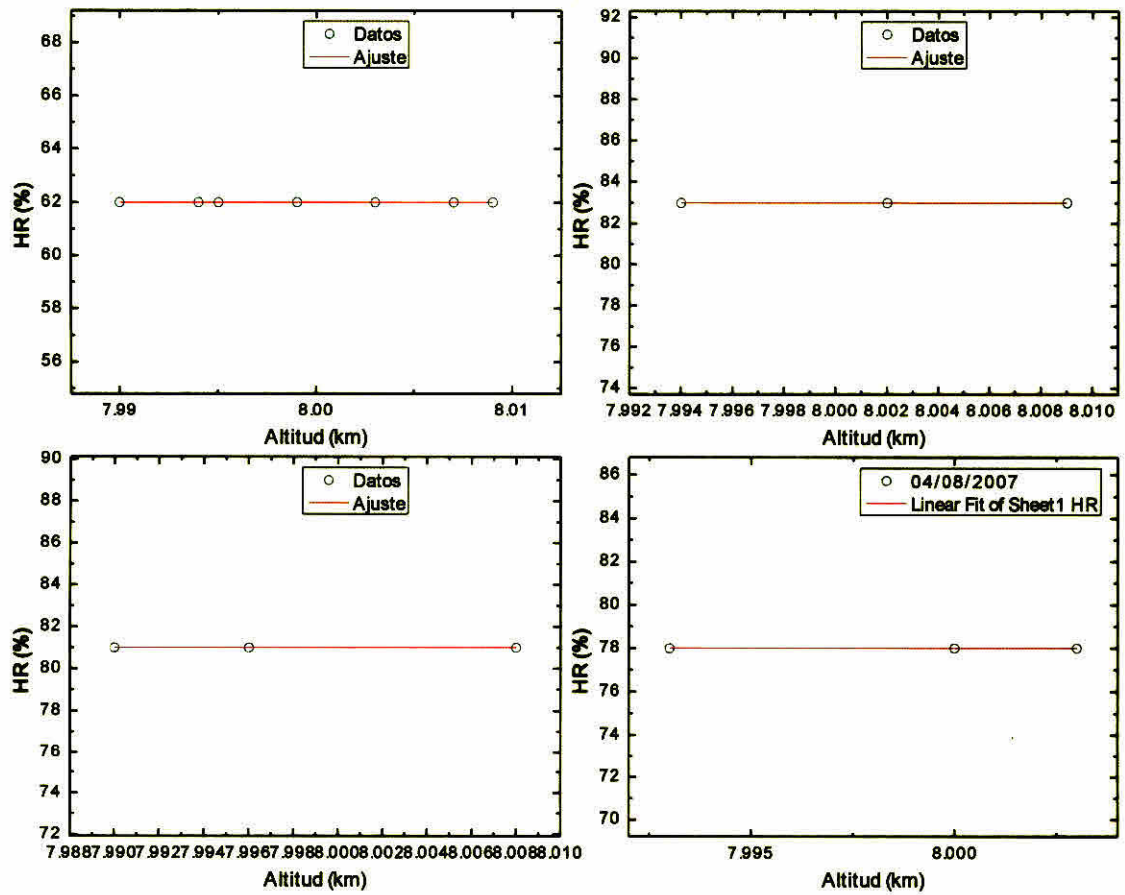
esta región está comprendida entre los 6 km y 8 km. Esto produce un pico en el valor de humedad relativa, lo que se puede explicar debido a que a esta altitud se tiene presente un proceso de convección por la inversión térmica por subsidencia. Como sabemos que nuestro punto de condensación está localizado alrededor de los 8 km y que este es el punto en donde se da el cambio, de gradiente de temperatura, veremos cómo se comporta la humedad relativa en dicha zona.



**Figura 62:** Comportamiento de la humedad relativa en los alrededores de los 8 km para los primeros días del estudio.



**Figura 63:** Comportamiento de la humedad relativa en los alrededores de los 8 km para los siguientes días del estudio.



**Figura 64:** Comportamiento de la humedad relativa en los alrededores de los 8 km para los últimos días del estudio.

De las figuras 57 a 59 obtenemos la tabla de valores que muestra la tendencia de la humedad relativa para el período en estudio.

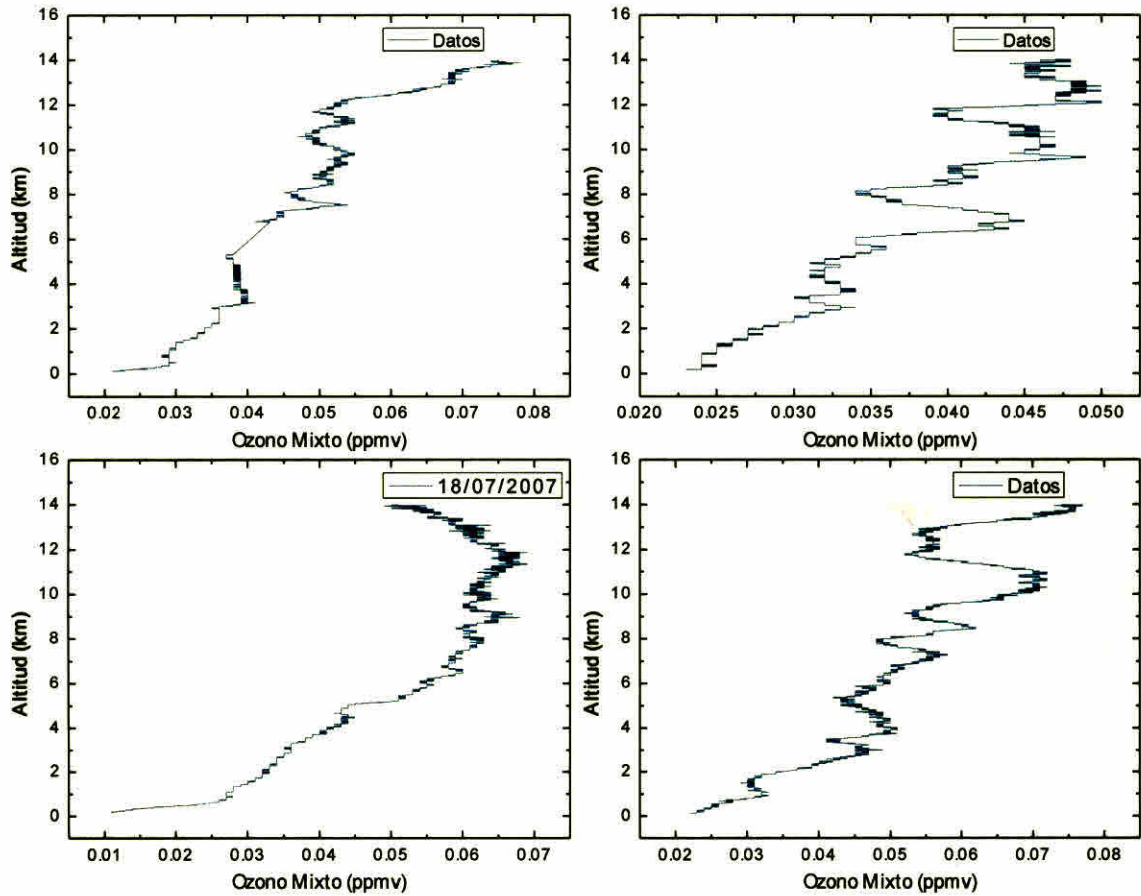
**Tabla 5:** Tendencia de la humedad relativa durante el período de estudio alrededor de los 8 km

Fecha	Humedad Relativa (%)
14/07/2007	52
18/07/2007	79
21/07/2007	66
22/07/2007	73
24/07/2007	61
26/07/2007	74
27/07/2007	39
28/07/2007	62
29/07/2007	77
30/07/2007	83
03/08/2007	81
04/08/2007	78
06/08/2007	87

Aplicando estadística, se obtuvo que el valor medio de la humedad relativa, para las fechas arriba expuestas es de 77%; lo cual nos indica, que alrededor de los 8 km de altitud, la humedad relativa tiene un valor aproximado de 77%.

#### 4.5. Estudio de los perfiles de ozono y la altitud en la tropósfera.

A continuación se presentaran los gráficos de los datos experimentales de la presencia de ozono con relación a la altitud.



**Figura 65:** Perfiles de Ozono para las fechas F1 a F4.

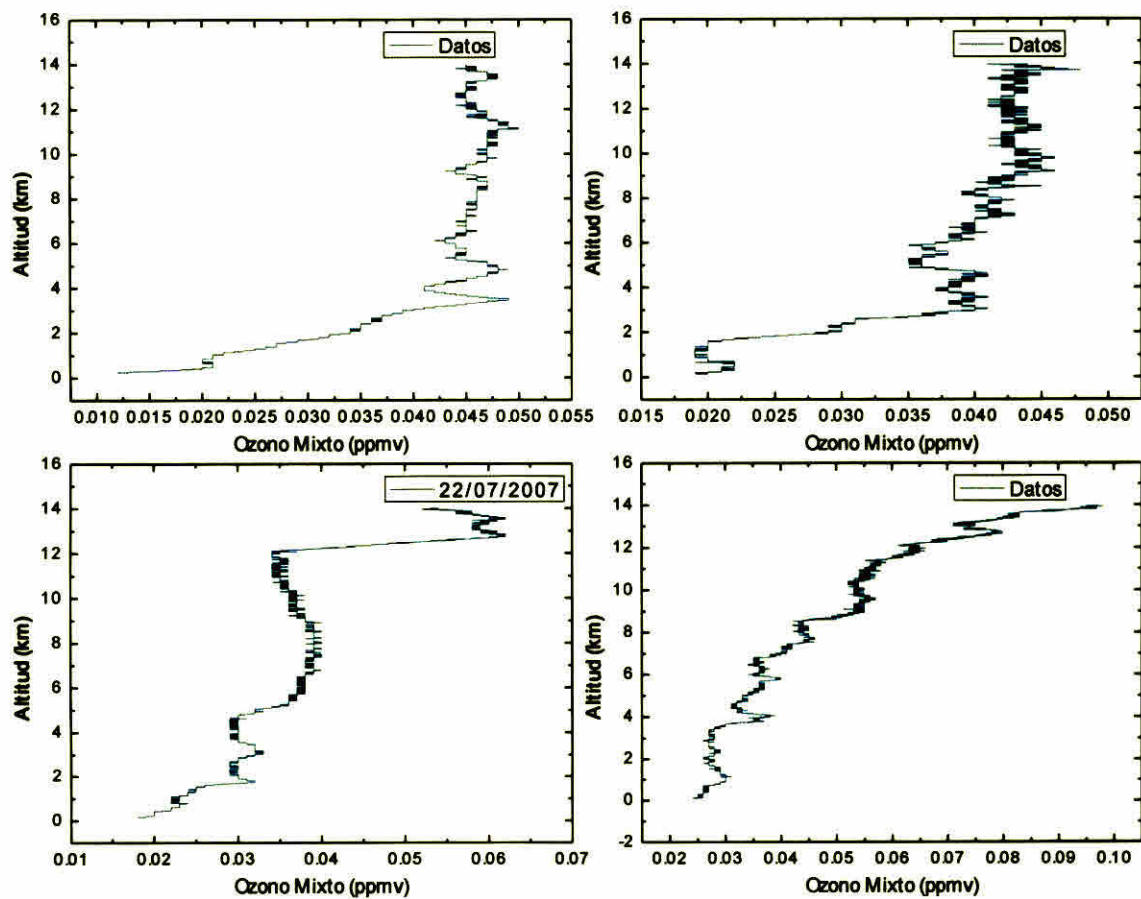


Figura 66: Perfiles de Ozono para las fechas F5 a F8.

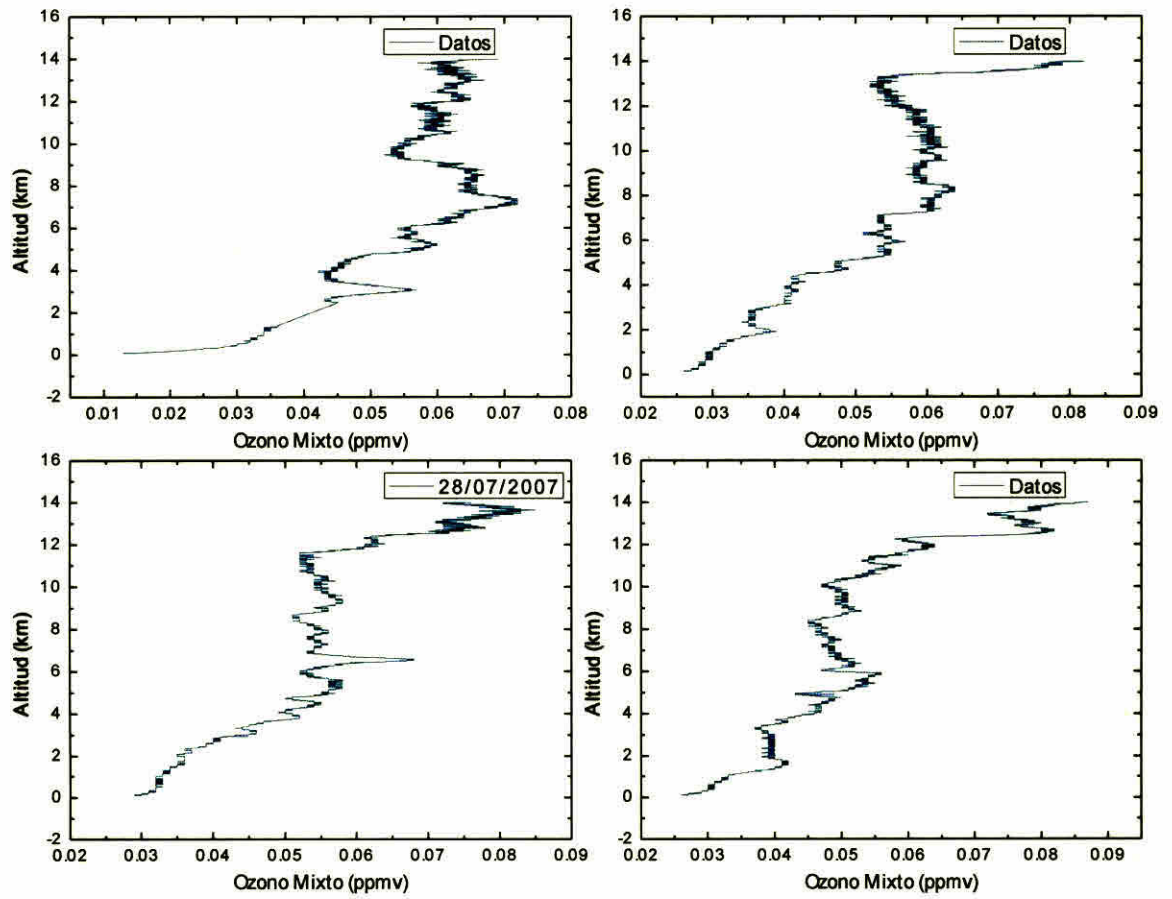
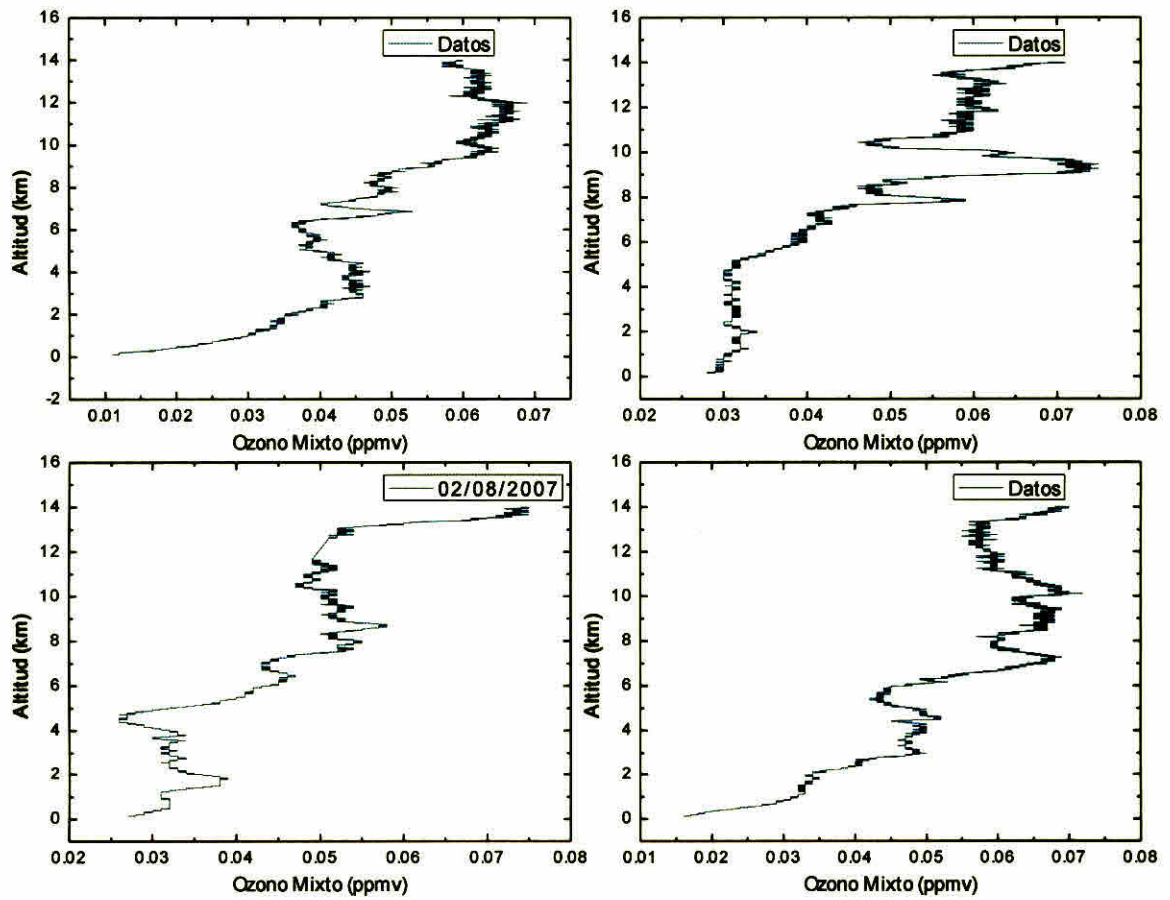


Figura 67: Perfiles de Ozono para las fechas F9 a F12.



**Figura 68:** Perfiles de Ozono para las fechas F13 a F16.

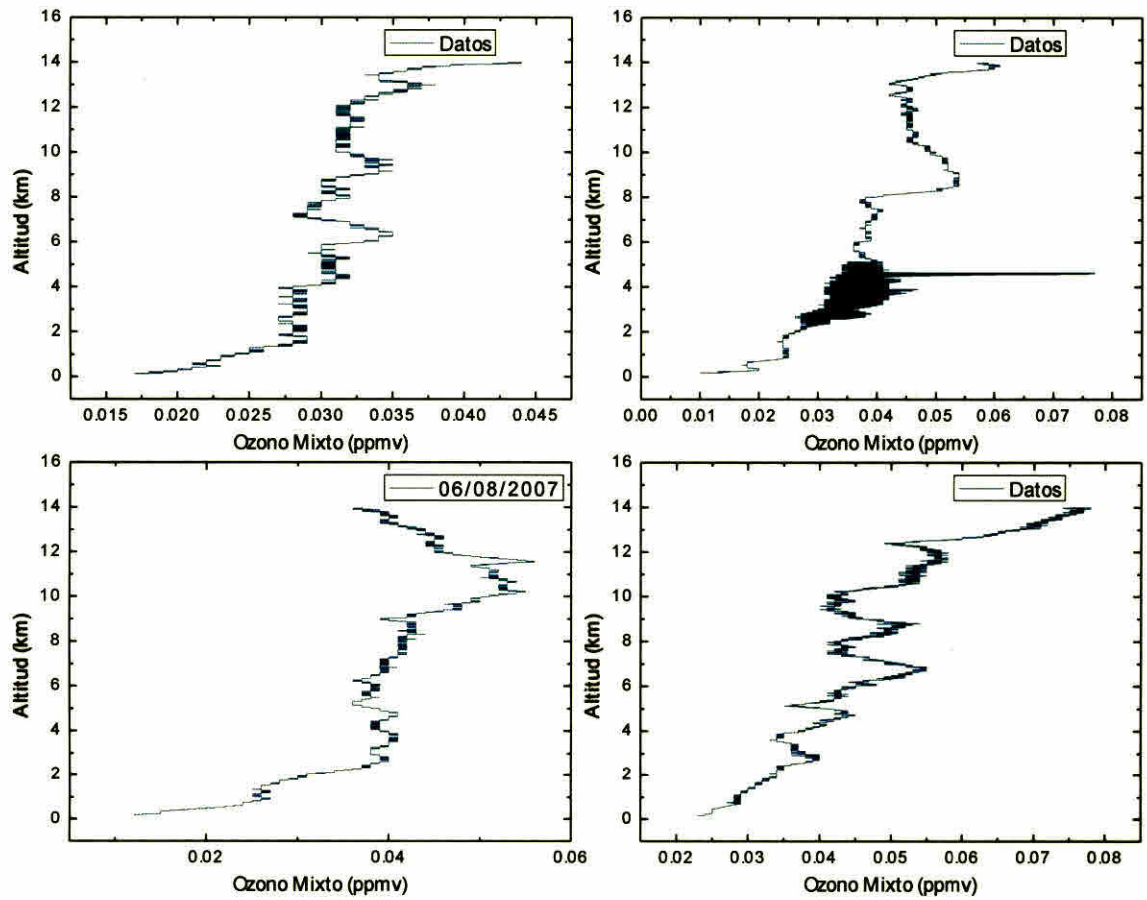
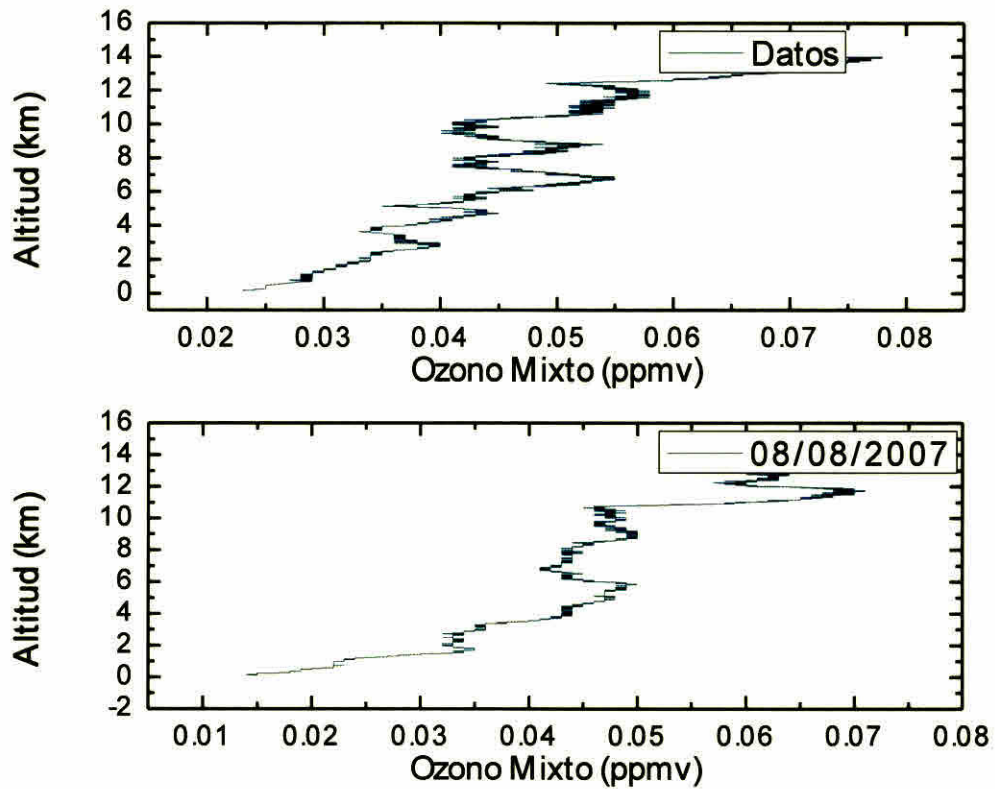


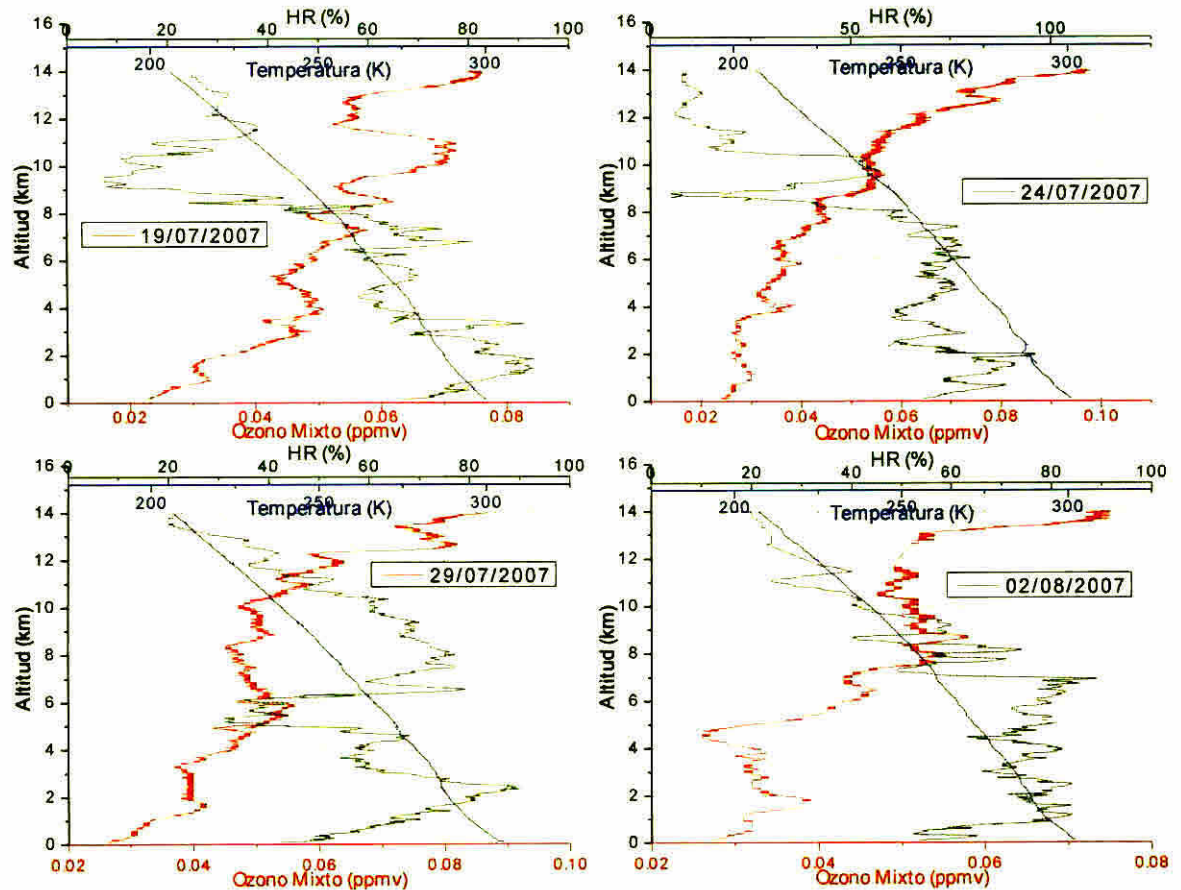
Figura 69: Perfiles de Ozono para las fechas F17 a F20.



**Figura 70:** *Perfiles de Ozono para las fechas F21 a F22.*

De las figuras 66 a la 71, se observa la evolución de los perfiles de ozono, para las diferentes fechas en las que se llevó a cabo el estudio. Se puede notar, una tendencia a aumentar los niveles de concentración de ozono mixto, a medida que

aumenta la altitud, hasta aproximadamente, los 12 km. Del análisis de estos perfiles, se puede concluir que el mayor nivel de concentración de ozono, se da, a una altitud entre los 8 y 12 km. El valor máximo reportado en los perfiles, está entre los 0,065 ppmv y 0,070 ppmv.



**Figura 71:** Perfiles de Ozono, Temperatura y Humedad Relativa para el área de estudio.

De la figura 72, puedo concluir, que el ozono presenta un máximo relativo de ozono mixto, con respecto a la altitud sobre 1 km. La magnitud de este máximo relativo esta sobre los 0,03 ppmv.

Los máximos relativos de ozono mixto, coinciden con un máximo relativo en la

**humedad relativa** Esta ocurrencia simultánea de un máximo en el ozono mixto y la humedad relativa (sobre 70%) indican que el ozono ha llegado mediante producción fotoquímica o convección de la capa límite (Leung Chang & Chan 2004) Este continua incrementándose a una mayor tasa obteniendo un máximo relativo alrededor de 0.045 ppmv cercano a los 4 km

Entre los 0 km y los 3 km encontramos un máximo relativo en la humedad relativa con un valor sobre los 70% De esto nuevamente pudimos concluir que el ozono a esta altitud tiene su origen en el transporte o producción troposférico (Ahrens 2011)

## 5. CONCLUSIONES

Para una investigación como la que se desarrolló aquí, es necesario contar con una buena base de datos, para así poder manejar los inmensos volúmenes de datos que se obtienen con los aparatos que tenemos en la actualidad.

Nuestra investigación se llevó a cabo, en la región de la atmósfera, denominada tropósfera, ya que, es aquí, en donde se dan la mayoría de los procesos atmosféricos que inciden directamente con los seres humanos. El límite superior utilizado para realizar nuestro estudio de la tropósfera fue de 14 km

La temperatura potencial se mantiene constante respecto de la altitud en un proceso adiabático.

Los perfiles de temperatura en función de la altitud, para las fechas del 13 de julio del 2007 al 8 de agosto del 2007, muestran la presencia de una doble pendiente, alrededor de los ocho kilómetros (8 km), en contraste con lo expuesto por el modelo de la atmósfera estándar, que indica, que esta es una zona en la cual se da un comportamiento lineal. El comportamiento en cada una de las regiones, antes y después de los 8 km, es lineal.

Ésta doble pendiente puede ser entendida observando el pico relativo que se presenta en los perfiles de humedad relativa – altitud debido a los procesos convectivos que se presentan en la región comprendida entre los 6 km y 8 k

con esto se tiene un proceso de inversión térmica por subsidencia en el cual el aire más frío se ubica por debajo de la zona de condensación mientras que el aire caliente se ubica sobre esta región. El comportamiento de la atmósfera para altitudes inferiores a los 8 km en el área de estudio es lineal entre la temperatura y la altitud. La tasa de variación de la temperatura con la altitud determina el gradiente adiabático seco. En nuestro estudio obtuvimos un valor para este gradiente de  $(5.65 \pm 0.01)$  K/km.

A partir de los 8 km hacia arriba se inicia el proceso de condensación. En este punto se determina la elevación del nivel de condensación (LCL) por sus siglas en inglés. De aquí en adelante se puede llevar a cabo la formación de las nubes para ello la parcela de aire inicia su proceso de saturación que trae como consecuencia la condensación. Para este estudio se pudo determinar que a partir de los 8 km hacia arriba se tiene un valor de  $(8.16 \pm 0.01)$  K/km para el gradiente adiabático húmedo. Si obtenemos el valor medio de los valores del gradiente adiabático húmedo y el gradiente adiabático seco obtenemos un valor de  $6.86$  K/km lo que está próximo al del modelo estándar de la atmósfera  $6.5$  C/km con un error porcentual de aproximadamente 5%.

A partir de la ecuación (22) se puede obtener que el gradiente adiabático húmedo siempre es menor que el gradiente adiabático seco. Esto explica la existencia de una aparente doble pendiente en el gráfico de temperatura en

función de la altitud para la troposfera de la región en estudio

Al estudiar los perfiles de presión en función de la temperatura se muestra que los datos experimentales pueden ser ajustados con una buena aproximación utilizando un modelo matemático dado por la ecuación (5) Además se observa que a medida que se va incrementando la altitud la densidad de aire decrece ((Ahrens 2011))

Así mismo se puede concluir que los perfiles de presión en función de la altitud para la región de estudio se comportan de la siguiente forma (ecuación 23)

$$p = (-102.85 + 1119.36e^{-0.10h}) \text{ hPa}$$

Lo que está de acuerdo con lo predicho por el modelo de la atmósfera estándar Al apreciar la comparación entre el modelo experimental y el teórico de la presión en función de la temperatura se obtiene que las curvas inician unidas pero al ir incrementándose la altitud las mismas se van separando Esto se debe a que según el modelo estándar (ecuación (25)) la presión decrece con la altitud y además depende la constante de los gases a medida que se va aumentando la altitud las moléculas se van haciendo más pesadas lo que trae como consecuencia un menor valor para la constante de los gases En otras palabras a altas temperaturas tenemos moléculas más energéticas

Al estudiar los perfiles de altitud en función de la humedad relativa se concluye

que alrededor del punto de condensación 8 km tenemos un valor aproximado de 77%

Por su parte los perfiles de la altitud en función del ozono mixto muestran una tendencia a incrementar los niveles de concentración de ozono mixto a medida que aumenta la altitud hasta aproximadamente los 12 km

La mayor concentración de ozono mixto se da entre los 8 km y los 12 km con un valor aproximado entre los 0 065 ppmv y 0 070 ppmv

## **6. RECOMENDACIONES**

Para continuar con la caracterización meteorológica de la República de Panamá, se recomienda, utilizar la data existente en la región del Canal de Panamá y realizar los estudios pertinentes, para así poder correlacionarla con la información obtenida en la región de Los Santos.

Además, se recomienda realizar estos estudios en las áreas rurales, de las provincias centrales para medir el impacto que tiene el cambio climático, en la agricultura, ganadería, etc. de la región y así poder ayudar, a los campesinos a sobrellevar la situación, sin que se den muchas pérdidas y los mismos estén preparados, para afrontar los cambios que se ven venir, por el constante cambio climático.

Se recomienda, que el laboratorio de Física de la Atmósfera de la Universidad de Panamá, cuente con los medios de divulgación de los estudios científicos que se realizan en las diferentes zonas del país y que los mismos lleguen a toda la comunidad, tanto para los profesionales, como para los campesinos, de una manera fácil de comprender y con las recomendaciones necesarias, para ayudar a salvaguardar su patrimonio familiar y cultural.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Ahrens, C. D. (2011). *Essentials of Meteorology An Introduction to the Atmosphere*. Belmont, CA: Brooks Cole, Cengage Learning.
- AIRBUS. (2002). *Getting to grips with aircraft performance*. BLAGNAC Cedex FRANCE: AIRBUS.
- Brasseur, G. P., & Solomon, S. (2005). *Aeronomy of the Middle Atmosphere*. Netherlands: Springer.
- Cavcar, M. (30 de Agosto de 2010). *The International Standard Atmosphere (ISA)*. Obtenido de Física de la Atmósfera: <http://fisicaatmo.at.fcen.uba.ar/practicas/ISAweb.pdf>
- Folkins, I. (2002). A simple explanation for the increase in relative humidity between 11 and 14 km in the tropics. *Journal of Geophysical Research*, 26\_1-26\_7.
- Folkins, I. (2002). Origin of Lapse Rate Changes in the Upper Tropical Troposphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 992-1005.
- Folkins, I., & Martin, R. (2005). The Vertical Structure of Tropical Convection and Its Impact on the Budgets of Water Vapor and Ozone. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1560-1573.
- Folkins, I., Braun, C., Thompson, A., & Witte, J. (2002). Tropical ozone as an indicator of deep convection. *Journal of Geophysical Research*, 13\_1-13\_10.
- Helmis, C. G., Asimakopoulos, D. N., & Flocas, H. A. (2002). Experimental Study of the Vertical Structure of the Lower Troposphere over a Small Greek Island in the Aegean Sea. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1181-1192.
- Holton, J. (2004). *An introduction to Dynamic Meteorology*. San Diego, California: Elsevier Academic Press.
- Leung, Y. K., Chang, W. L., & Chan, Y. W. (2004). Some Characteristics of Ozone Profiles above Hong Kong. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1-14.
- Lutgens, F. K., & Tarbuck, E. J. (2007). *The atmosphere: an introduction to meteorology*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Lutgens, F. K., & Tarbuck, E. J. (2013). *The Atmosphere an Introduction to Meteorology*. United States of America: Pearson.
- Mike Craig. (8 de Julio de 2008). *ESPO-TC4-Mapas*. Obtenido de NASA-ESPO; Tropical Composition Cloud and Climate Coupling: [http://www.espo.nasa.gov/tc4/map\\_panama.php](http://www.espo.nasa.gov/tc4/map_panama.php)
- Mike Craig. (8 de Julio de 2008). *TC4 Página Principal*. Obtenido de NASA-

- ESPO Tropical Composition Cloud and Climate Coupling  
[http://www.espo.nasa.gov/tc4\\_esp/](http://www.espo.nasa.gov/tc4_esp/)
- Mohanakumar P K (2008) *Stratosphere Troposphere Interactions An Introduction* Cochin 682016 India Springer Science + Business Media B V
- Peixoto J & Oort A (1996) The Climatology of Relative Humidity in the Atmosphere *American Meteorological Society* 3443 3463
- Sacchetti F Z & Gisbert R F (2003) *La Radiación Ultravioleta en Bolivia* La Paz Bolivia CREATIVA 2488588
- Schlatter T W (2009) Atmospheric Composition and Vertical Structure *Environmental Impact and Manufacturing* 1 54
- South Durban Community Environmental Alliance (2004) Applied Meteorology and Climatology in South Durban *South Durban Community Environmental Alliance* 13 19
- Spencer R & Braswell W (1997) *How Dry is the Tropical Free Troposphere? Implications for Global Warming Theory* Huntsville Alabama Bulletin of the American Meteorological Society
- Sun D Z & Oort A H (1995) Humidity Temperature Relationships in the Tropical Troposphere *Journal of Climate* 1974 1987
- Talay Theodore A (2006) *Introduction to the Aerodynamics of Flight* Colorado NASA's History Office
- Wallace J M & Hobbs P V (2006) *Atmospheric Science An Introductory Survey* Canada Elsevier Inc