

El sistema Climático

Fundamentos físicos
del clima

© Universidad de Valparaíso-Editorial, 2002.
Errázuriz 1108 - Valparaíso, Chile.
Fono: 507648 - Fax: 507656

Inscripción N°: 124.095
I.S.B.N.: 956-214-032-6

Derechos Reservados

Tiraje: 500 ejemplares
Supervisión de textos: Rubén Dalmazzo Peillard
Diseño gráfico y diagramación: Gonzalo Catalán Valencia

Impreso en los talleres de

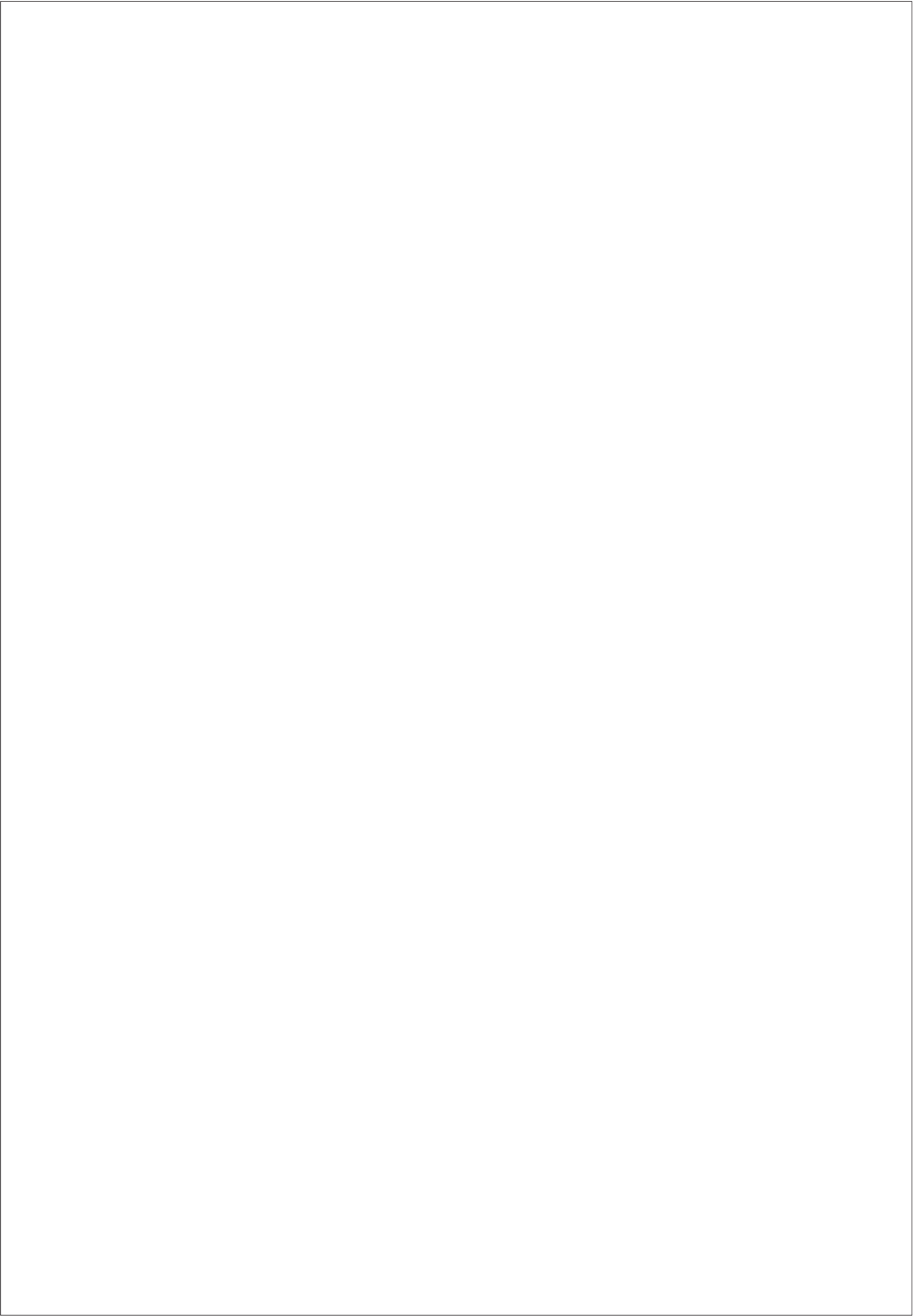
HECHO EN CHILE/MADE IN CHILE

El Sistema Climático

Fundamentos físicos
del clima

Alvaro Mauro Morales





Indice

Prólogo

Capítulo 1

La atmósfera

- 1.1. Introducción
- 1.2. La atmósfera
 - 1.2.1. Introducción:
 - 1.2.2. Composición de la atmósfera:
 - 1.2.3. Regiones de la atmósfera y sus características físicas y químicas
 - 1.2.4. Reacciones en la atmósfera:
 - 1.2.5. El ozono estratosférico
 - 1.2.6. Importancia de la capa de ozono

Capítulo 2

Radiación solar y terrestre

- 2 1. Introducción
- 2.2. Transmisión de la energía. Tipos de transferencias
 - 2.2.1. Por conducción
 - 2.2.2. Por convección:
 - 2.2.3. Por radiación.
- 2.3. Procesos de transferencia de calor
- 2.4. Distribución espectral de la radiación solar
- 2.5. Conceptos, definiciones y leyes:

- 2.5.1. Constante Solar:
- 2.5.2. Poder absorbente del cuerpo
- 2.5.3. Cuerpo Negro:
- 2.5.4. Cuerpo Blanco y Cuerpo Gris:
- 2.5.5. Ángulo Sólido:
- 2.5.6. Energía Irradiada:
- 2.5.7. Intensidad de Emisión o Poder Emisivo Total:
- 2.5.8. Flujo de Energía Radiante
- 2.5.9. Poder Emisivo Monocromático
- 2.6. Leyes de emisión de la radiación
 - 2.6.1. Introducción
 - 2.6.2. Ley de Kirchhoff
 - 2.6.3. Ley de Planck
 - 2.6.4. Ley de Wien :
 - 2.6.5. Ley de Stefan-Boltzmann:
- 2.7.- Distribución espacial y temporal de la radiación solar
 - 2.7.1. Análisis de la distribución espacial de la radiación solar
 - 2.7.2. Variación estacional de la radiación
 - 2.7.3. Distribución horaria
 - 2.7.4. Distribución latitudinal y estacional
 - 2.7.5. Efectos de la superficie sobre la radiación
 - 2.7.6. Energía Reflejada. Albedo
- 2.8. Radiación terrestre
 - 2.8.1. Introducción
 - 2.8.2. Características de la Radiación Terrestre
 - 2.8.3. Flujo de radiación Terrestre
 - 2.8.4. Distribución Latitudinal de la Radiación
- 2.9. Balance calórico de la atmósfera
 - 2.9.1. Introducción
 - 2.9.3. Balance de Calor en la Superficie Terrestre
 - 2.9.4. Balance de calor para el sistema Tierra – Atmósfera
 - 2.9.5. Resumen del Balance Calórico medio para el sistema Tierra-
Atmósfera
 - 2.9.6. Radiación Neta

Capítulo 3

Termodinámica del aire

- 3.1. Introducción
- 3.2. Teoría cinética de los gases
- 3.3. Gas ideal: Una descripción microscópica.
- 3.4. Leyes de los gases ideales.
 - 3.4.1. Ley de Boyle-Mariotte
 - 3.4.2. Ley de Gay-Lussac.
 - 3.4.3. Ley de Dalton
 - 3.4.4. Variables físicas
- 3.5. Ecuación de estado de un gas
- 3.6. Mezcla de gases ideales
- 3.7. Expansión de un gas a presión constante
- 3.8. La ley de conservación de la energía
 - 3.8.1. Introducción
 - 3.8.2. Principio de conservación de la energía.
- 3.9. Cantidades de calor. Calor específico
 - 3.9.1. Introducción
 - 3.9.2. Calor específico
 - 3.9.3. Calor específico y capacidad calórica
 - 3.9.4. Determinación del calor específico
 - 3.9.5. Medida del calor
- 3.10. Calor y trabajo
 - 3.10.1. Introducción
 - 3.10.2. Calor y trabajo
 - 3.10.3. Aplicación de la relación calor / trabajo
- 3.11. Leyes de la termodinámica
 - 3.11.1. Introducción
 - 3.11.2. Primera ley de la termodinámica
 - 3.11.3. Segunda ley de la termodinámica.
- 3.12. Proceso adiabático
- 3.13. Temperatura potencial

- 3.13.1. Conservación de la Temperatura Potencial en un proceso adiabático.

Capítulo 4

Termodinámica de la atmósfera

- 4.1. Los estados del agua
- 4.2. Presión de vapor de saturación
- 4.3. Calor latente
- 4.4. Evaporación
- 4.5. Ecuación de Clausius – Clapeyron
 - 4.5.1. Equilibrio Líquido - Vapor: curva TC: Punto de Ebullición
 - 4.5.2. Equilibrio Sólido - Líquido: curva BT : Punto de Fusión
 - 4.5.3. Equilibrio Sólido - Vapor : curva TA : Punto de Sublimación
 - 4.5.4. Equilibrio Líquido sobreenfriado - Vapor : curva ST.
 - 4.5.5. El punto triple : T
- 4.6. Condensación y enfriamiento
 - 4.6.1. Enfriamiento por Contacto:
 - 4.6.2. Enfriamiento por Mezcla:
 - 4.6.3. Enfriamiento Dinámico o Enfriamiento Adiabático:
- 4.7. Variables de humedad
 - 4.7.1. Presión de Vapor : e
 - 4.7.2. Relación de Mezcla: w
 - 4.7.3. Humedad Específica : q
 - 4.7.4. Humedad Relativa : r
- 4.8. Ecuación de estado del aire húmedo
 - 4.8.1. Temperatura virtual
- 4.9. Clasificación de las nubes
 - 4.9.1. Introducción
 - 4.9.2. Clasificación según la altura

Capítulo 5

Procesos en la atmósfera

- 5.1. Enfriamiento isobárico. Punto de rocío. Nieblas
 - 5.1.1. Niebla de radiación y de advección
- 5.2. Temperatura de bulbo húmedo y equivalente.
- 5.3. Mezcla isobárica de masas de aire (mezcla horizontal)
 - 5.3.1. Niebla de mezclas
- 5.4. Expansión adiabática del aire no saturado
- 5.5. Expansión adiabática del aire saturado
 - 5.5.1. El proceso reversible
 - 5.5.2. El proceso irreversible
 - 5.5.3. La ecuación pseudoadiabática

Capítulo 6

Procesos de precipitación

- 6.1. Introducción
- 6.2. Núcleos de condensación
- 6.3. Mecanismos de crecimiento
 - 6.3.1. Crecimiento por Difusión o Condensación
 - 6.3.2. Crecimiento por Coalescencia
 - 6.3.3. Crecimiento de Bergeron
 - 6.3.4. Unión de gotas de agua
- 6.4. Origen de las precipitaciones
 - 6.4.1. Precipitación Ciclónica
 - 6.4.2. Precipitación Convectiva
 - 6.4.3. Precipitación Orográfica
- 6.5. Tipos de precipitación
- 6.6. Medidas de la precipitación
- 6.7. Modificación artificial del proceso de precipitación
 - 6.7.1. Introducción
 - 6.7.2. Métodos usados

- 6.7.3. Control y evaluación de un programa de estimulación de la precipitación.
- 6.8. Influencia de los bosques
 - 6.8.1. Precipitación horizontal
- 6.9. Lluvia ácida
 - 6.9.1. Efectos generados
- 6.10. Distribución latitudinal de la precipitación
 - 6.10.1. Introducción
 - 6.10.2. Campo de viento
 - 6.10.3. Consecuencias climáticas de la componente de circulación.
 - 6.10.4. Perfil meridional de precipitación
 - 6.10.5. Zonas de precipitación y su variación anual.

Capítulo 7

Campo térmico

- 7.1. Introducción
- 7.2. Calor almacenado
- 7.3. Distribución espacial de la temperatura
 - 7.3.1. Efecto tierra-océano
 - 7.3.2. Efecto del relieve
 - 7.3.3. Variación vertical
- 7.4. Medida de la temperatura
 - 7.4.1. El Desarrollo de Termómetros y Escalas de Temperaturas
 - 7.4.2. Tipos de termómetros
 - 7.4.3. Escalas termométricas
 - 7.4.4. Relación entre escalas
- 7.5. Variación por la advección
 - 7.5.1. Advección térmica positiva
 - 7.5.2. Advección térmica negativa
 - 7.5.3. Advección térmica neutra
- 7.6. Inversiones de temperatura
 - 7.6.1. Introducción
 - 7.6.2. Inversión por radiación

- 7.6.3. Inversión por subsidencia.
- 7.6.4. Inversión frontal.
- 7.6.5. Inversión por advección.

Capítulo 8

Estabilidad vertical de la atmósfera

- 8.1. Introducción
- 8.2. Principios relacionados con el movimiento vertical
 - 8.2.1. Parcela o masa de aire
 - 8.2.2. Factores de flotabilidad
- 8.3. Gradiente vertical de temperatura
 - 8.3.1. Introducción
 - 8.3.2. Gradiente adiabático seco
 - 8.3.3. Gradiente vertical adiabático saturado
 - 8.3.4. Gradiente térmico del entorno
 - 8.3.5. Altura de mezcla
- 8.4. Estabilidad atmosférica
 - 8.4.1. Introducción
 - 8.4.2. Método de la parcela
 - 8.4.3. Aceleración vertical de la parcela.
 - 8.4.4. Criterios de estabilidad
 - 8.4.5. Estabilidad e inestabilidad condicional
 - 8.4.6. Estabilidad latente

Capítulo 9

La componente geográfica del clima.

- 9.1. Procesos de calentamiento y enfriamiento de continentes y océanos.
- 9.2. Consecuencias climáticas
 - 9.2.1. En la superficie sólida
 - 9.2.2. En la superficie líquida

- 9.2.3. En la distribución geográfica de la temperatura
- 9.2.4. En la distribución de presión y viento en zonas costeras. Circulación térmica diurna. Brisa de mar
- 9.2.5. En la distribución de presión y vientos en zonas costeras. Circulación térmica nocturna. Brisa de tierra
- 9.2.6. En la formación de corrientes marinas superficiales
- 9.3. Modificaciones producidas por los continentes
- 9.4. Modificaciones producidas por las corrientes oceánicas superficiales.
- 9.5. Efectos producidos por el relieve (topoclima).
 - 9.5.1. Factores topoclimáticos
 - 9.5.2. Efectos topoclimáticos
- 9.6. El efecto sotavento.
 - 9.6.1. Proceso termodinámico del efecto de barlovento y sotavento.
- 9.7. Brisas de valle y de montaña.
- 9.8. Variaciones en los elementos climáticos.
 - 9.8.1. Introducción
 - 9.8.2. Variaciones aperiódicas de corta duración
 - 9.8.3. Variaciones aperiódicas de larga duración
 - 9.8.4. Variación de la circulación y de los elementos según factores geográficos

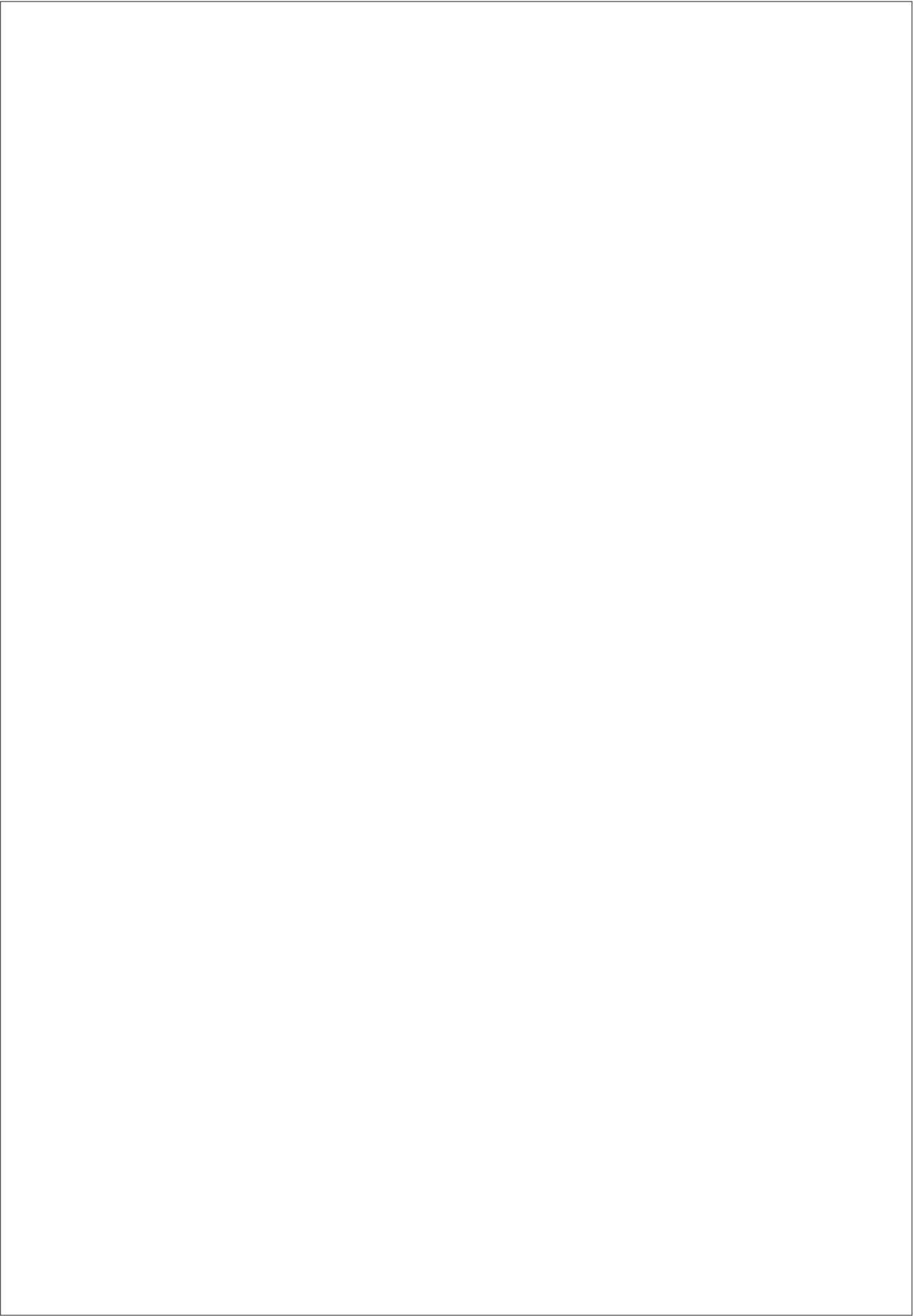
Capítulo 10

Guía de ejercicios

- 10.1. Ejercicios de radiación
- 10.2. Ejercicios de termodinámica del aire seco
- 10.3. Ejercicios de termodinámica del aire húmedo
- 10.4. Ejercicios de estabilidad
- 10.5. Ejercicios de diagrama termodinámico
- 10.6. Ejercicios de equilibrio hidrostático

Glosario

Prólogo



Prólogo

Hacia el inicio de la década de los 80, comencé una serie de apuntes con fines docentes relacionados con aspectos físicos del clima. Hoy día, al inicio del tercer milenio, he visto la urgencia de actualizar y complementar aquellas notas tendientes a satisfacer una necesidad cada vez mayor en cuanto al conocimiento del clima, en general, y de los procesos físicos, en particular, que ocurren en la atmósfera. Esta publicación está orientada a un universo de lectores mucho más amplio y, por lo mismo, tiene hoy un enfoque más variado, más general y dirigido a una gama más amplia de interesados en aspectos atmosféricos y a un número mayor de estudiantes de nivel superior de diversas carreras universitarias, como, asimismo, a quienes se interesan por el tema ambiental y que requieren de un conocimiento del clima.

La atmósfera y sus correspondientes procesos físicos, dentro de un análisis ambiental actual, resultan una necesidad cada vez mayor en un ámbito de estudiosos de una amplitud muy variada que va desde estudiantes universitarios de la Geografía, del Turismo, de la Ingeniería Geográfica, de la Ingeniería Agronómica como de la Ingeniería Forestal, de la Ingeniería Ambiental, de la Oceanografía, de la Meteorología y de ciencias afines, hasta aquellos interesados y estudiosos de las ciencias atmosféricas.

Para entender las características físicas del tiempo atmosférico y del clima de un lugar y, por ende, las características que adquieren los elementos atmosféricos, es necesario comprender que ello ocurre a partir del desigual calentamiento de la superficie terrestre producto de su forma y que el equilibrio que alcanza el sistema tierra atmósfera que se observa, se logra a través del movimiento que adquiere el sistema atmosférico.

El punto de partida de las transformaciones energéticas que ocurren en *La Atmósfera*, cuyas características serán señaladas en el capítulo 1, es el desigual calentamiento de la superficie terrestre producto, por una parte, de la forma de la Tierra y de su posición en el sistema solar, como por la absorción por parte de la superficie terrestre de la energía que proviene del Sol, el cual es la fuente energética básica o fundamental para el desarrollo y funcionamiento del sistema climático.

Por lo anterior es necesario analizar, en primer lugar, en el capítulo 2, las características de la *Radiación Solar*, su comportamiento y cómo es absorbida por la superficie terrestre y convertida en *Radiación Terrestre*. A partir de ahí se debe analizar el *Balance de Radiación*, para discutir la distribución de radiación que da origen al calentamiento diferencial de la superficie terrestre.

El calentamiento diferencial de la superficie terrestre genera un gradiente térmico horizontal que da origen a inestabilidad desde la escala planetaria (circulación general de la atmósfera) hasta la pequeña escala (movimientos convectivos), transformando estos procesos de inestabilidad de energía calórica (energía interna) en energía potencial, es decir, elevación o levantamiento de masas de aire que poseen más energía calórica. Estos aspectos físicos de transformación de energía tanto en energía calórica, energía interna como energía potencial, son discutidos en los capítulos 3, 4 y 5 referidos a *Termodinámica del Aire*, como un aspecto introductorio a las transformaciones que ocurren en la atmósfera, a *Termodinámica de la Atmósfera* y a *Procesos en la Atmósfera* respectivamente.

Las diferentes transformaciones en energía potencial generan variaciones horizontales en la variable presión atmosférica, es decir, modifican horizontalmente el campo bórico, la que da origen a movimientos circulatorios, es decir, la energía se transforma en energía cinética, la que en primer lugar es de gran escala (Circulación General de la Atmósfera), tema que será analizado en una próxima publicación relativa a los fundamentos dinámicos del clima.

Producto de las transformaciones dinámicas, el vapor de agua condensa a través de los movimientos verticales, entre otros, dando origen a los *Procesos de Precipitación*, los que son analizados en el capítulo 6

Finalmente, esta energía es disipada continuamente por efecto del roce interno y el roce superficial y transformada en energía potencial a través de la energía cinética del movimiento molecular (energía calórica). El capítulo 7 analiza el efecto que la superficie introduce en el *Campo Térmico*.

En el capítulo 8 se discuten los aspectos relativos a las características de la atmósfera desde el punto de vista de la *Estabilidad Vertical de la Atmósfera*, como un elemento esencial en la generación o inhibición de los movimientos verticales, responsables principales del cambio de fase de la sustancia agua.

Por último, el capítulo 9 analiza la *Componente Geográfica del Clima* en el que se discuten las consecuencias climáticas y las modificaciones que introduce la superficie terrestre.

Como un complemento al análisis de cada capítulo se presenta una lista Bibliográfica que le permita al lector profundizar los aspectos señalados en estas notas. Al mismo tiempo, se anexa un extenso *Glosario* de términos que son necesarios para la discusión de cada tema, así como una lista de ejercicios que son importantes para la comprensión teórica.

Con la esperanza de que esta publicación sea una ayuda y una fuente de consulta para todos aquellos estudiosos interesados en los aspectos del clima, se publican hoy estas notas bajo el auspicio de la Universidad de Valparaíso, en cuyo seno se imparte la única carrera de Meteorología en Chile. Mis agradecimientos a las autoridades de la Universidad de Valparaíso que hacen posible la presente publicación.

Alvaro Mauro Morales

Departamento de Física y Meteorología

Facultad de Ciencias

Universidad de Valparaíso

