

# NAVEGANDO EN LA ATMÓSFERA

METEOROLOGÍA AERONÁUTICA

CHRISTIAN GONZÁLEZ DEL CARPIO



INSTITUTO  
POLITÉCNICO  
NACIONAL

MÉXICO 2010  
INSTITUTO • POLITÉCNICO • NACIONAL

100 AÑOS DE LA AVIACIÓN EN MÉXICO

# **NAVEGANDO EN LA ATMÓSFERA**

**METEOROLOGÍA AERONÁUTICA**



# NAVEGANDO EN LA ATMÓSFERA

## METEOROLOGÍA AERONÁUTICA

**CHRISTIAN GONZÁLEZ DEL CARPIO**



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
-MÉXICO-

*Navegando en la atmósfera. Meteorología Aeronáutica*  
Christian González del Carpió

Primera edición, 2006

Primera reimpresión, 2009

D.R. © 2009

Instituto Politécnico Nacional

Luis Enrique Erro s/n

Unidad profesional "Adolfo López Mateos"

Zacatenco, 07738, México, DF

Dirección de Publicaciones

Tresguerras 27, Centro Histórico

06040, México, DF

ISBN 970-36-0117-0

Impreso en México / *Printed in México*

<http://www.publicaciones.ipn.mx>

*A mi madre, quien puede viajar más lejos que  
yo jamás... y a la familia Del Carpio, dispersa  
por los países buscando venturas.*



# CONTENIDO

Prólogo .....	11
Introducción .....	15
I. Una delgada capa de aire como escudo.....	19
Un océano de aire pesado sobre nosotros .....	21
Barómetro.....	25
Altímetro de aneroide.....	27
Altitud, altura y elevación .....	27
Altimetría .....	28
La presión atmosférica y los oídos .....	28
Origen de la meteorología.....	29
Diferencias entre clima y tiempo.....	31
II. Las capas de la atmósfera. ¿Qué tan alto es el cielo y cómo se calienta desde abajo? .....	35
División en capas.....	36
Diferencias entre el calor y la temperatura .....	40
Escala de temperatura.....	40
La luz solar como combustible para la máquina atmosférica y el albedo de la Tierra .....	42
El clima: inclinación y calentamiento desigual .....	45
Las cuatro estaciones .....	47
Inercia térmica .....	49
III. Montañas y valles de aire.....	53
Altas y bajas .....	54
Atmósfera estándar.....	55

IV. El viento y la presión diferencial.....	59
Las presiones barométricas y los vientos.....	61
Las isóbaras o líneas isobáricas.....	61
Análisis isobárico.....	62
La extraña fuerza de coriolis.....	64
Vientos legendarios.....	65
Efectos en la fisiología.....	68
Localizando los centros de presión.....	68
Localizando el rumbo del viento en un aeropuerto.....	69
Escala de viento de Beaufort.....	70
V. Circulación global y el secreto de Colón.....	75
Colón y el anticiclón de las azores.....	77
Nudos, millas y pies.....	80
VI. El agua en la atmósfera y de dónde vienen las nubes.....	85
Las moléculas y los tres estados de la materia.....	85
Estructura interna.....	86
Formas del agua.....	88
La humedad relativa.....	89
El punto de rocío.....	90
Calor latente: la energía escondida.....	91
Condensación y nubes.....	92
Lluvia y precipitación.....	93
VII. Inestabilidad del aire y las formas de las nubes.....	97
Inversión térmica.....	101
Nubes.....	103
Tipos de nubes.....	103
Los terribles cumulonimbos (Cb's).....	107
Carácter de la precipitación.....	110
Peligros de la precipitación.....	111
Formación de rayos.....	112
VIII. Peligros en vuelo.....	117
Turbulencia.....	117
Turbulencia mecánica.....	117
Onda de montaña.....	118
Turbulencia por calentamiento diferencial.....	118
Turbulencia frontal.....	120
Turbulencia de estela.....	120
Turbulencia de aire claro.....	121

Intensidad de turbulencia.....	121
Cizallamiento (wind shear).....	122
Microburst .....	123
Vientos de las alturas .....	124
Visibilidad y nieblas .....	126
Condición del cielo .....	127
Volando visual o por instrumentos .....	127
Nieblas y neblinas.....	130
Hielo en las alas.....	132
Volcanes y cenizas.....	134
IX. Calentamiento global y efectos de la actividad humana.....	139
Niveles de anhídrido carbónico y el calentamiento de la atmósfera .....	140
La ciudad como isla de calor .....	141
Hacer llover: sembrando las nubes.....	141
Lluvia, erosión y consecuencias .....	142
Derrumbes y deslaves .....	144
X. Masas de aire, ciclones y frentes del norte .....	151
Latitudes, trópicos y zonas templadas .....	151
Al norte del trópico .....	152
Frente frío vs frente caliente.....	153
Frente frío .....	153
Frentes ocluidos .....	156
Frente caliente .....	156
Frentes estacionarios.....	156
Ciclones extratropicales.....	157
XI. El trópico y sus alisios.....	161
Los alisios .....	161
La Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) .....	162
Frentes fríos.....	162
Onda tropical u onda del Este .....	163
XII. Ondas, huracanes y tifones.....	167
Ciclo de vida del huracán .....	168
Ciclones tropicales: clasificación internacional .....	173
Intensidad de huracanes: escala Saffir-Simpson.....	173
Aviones caza huracanes .....	174
XIII. Información disponible: reportes y pronósticos del tiempo .....	179

Símbolos para interpretar el METAR.....	183
Lista de abreviaturas para el código METAR.....	187
Designadores IATA y OACI para los aeropuertos nacionales .....	188
Mapas del tiempo significativo y vientos a gran altura.....	191
<b>XIV. Misteriosos meteoros en la atmósfera.....</b>	<b>197</b>
Arco iris.....	197
Halos.....	198
Fuegos de San Telmo.....	199
Estelas de condensación (Contrails).....	199
Estelas de disipación.....	200
Estelas aerodinámicas .....	200
Parhelio.....	200
Centellas .....	201
Azul cielo.....	201
Luces en el cielo.....	202
<b>Anexo de información aeronáutica .....</b>	<b>205</b>
Conversión de temperaturas.....	205
Chill factor (Factor de viento).....	206
Respiración e hipoxia.....	206
Tiempo útil de conciencia.....	207
Alfabeto fonético y Morse .....	208
<b>Fotografías.....</b>	<b>211</b>
<b>Glosario .....</b>	<b>233</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>239</b>

# PRÓLOGO

El comportamiento del cielo a menudo nos sorprende: Puede arruinar planes y viajes a veces ocurren catástrofes y desgracias; pareciera que nunca estamos bien preparados o suficientemente alertas. Sea por los actuales cambios en el clima o porque aún no conocemos bien al océano de aire en el que vivimos, su comportamiento nos afecta cada día; quienes por nuestras actividades dependemos de la atmósfera, podemos estar en serio peligro si no la comprendemos bien. Este libro, en su segunda edición, busca mejorar la comprensión de la atmósfera, de interpretar sus fenómenos y anticipar sus condiciones para estar prevenidos.

En la carrera de Piloto Aviador se empieza el estudio de la meteorología desde los primeros cursos. Los fenómenos atmosféricos se analizan aquí con un enfoque práctico, visualizando de un modo simplificado el estado del tiempo, sin perder por ello la precisión científica; con el objetivo de poder tomar decisiones rápidas y seguras; se considera que la información útil para situaciones de presión y riesgo debe ser enseñada de manera directa y práctica.

Así como en su primera edición, este libro ha sido redactado con este criterio práctico, tratando, a veces con dificultad, de no simplificar demasiado. El texto, diseñado en principio para la instrucción de los cursos de Meteorología Aeronáutica para Piloto Privado, incumbe también a aquellas personas con actividades al aire libre o que simplemente tengan sensibilidad por la naturaleza; por esta razón se han añadido temas y explicaciones sobre diversos fenómenos, ilustrándolos con anécdotas, leyendas y descripciones para su observación directa en campo.

El estilo de la exposición se basa en mi experiencia como instructor en la materia de Meteorología Aeronáutica y Vuelo. Mucho de lo expuesto son

respuestas a las preguntas de mis alumnos. Varios conceptos son repetidos para su reafirmación mientras que otros han sido simplificados al máximo para su facilidad de aplicación. A los futuros pilotos, sin perder por ello precisión científica, se les recomienda la lectura crítica de los temas y los datos técnicos que se presentan, consultando otras fuentes. Algunas explicaciones son ilustradas en figuras, gráficas, tablas o en recuadros.

Esta nueva edición se ha redactado de modo conciso, se ha conseguido aumentar y actualizar la información sin omitir nada de la edición anterior, siguiendo el tono directo y anecdótico. Por comentarios de lectores y especialistas hemos agregado temas y ampliado capítulos, debido a la cada vez mayor influencia del clima y sus efectos en la vida moderna.

Estudiar a la atmósfera además de útil, puede ser también fascinante; observar y entender los procesos del cielo es una experiencia inolvidable y sólo hay que mirar hacia arriba con un poco de curiosidad. Se pretende que éste también sea un texto de difusión para el público y sirva como guía de campo en viajes y paseos, debe ser imprescindible tenerlo a mano cuando se viaje en avión y preferirlo a leer una revista o dormir en el asiento; mejor aún, recomendamos mirar por la ventanilla el increíble panorama desde las alturas y experimentar la oportunidad de contemplar maravillas que no deberían dejarse pasar. Las figuras y fotografías de los anexos tienen el propósito de apoyar estas observaciones de campo.

En los capítulos se describe progresivamente a nuestra atmósfera. En un inicio se ve desde una perspectiva planetaria; estructura y dinámica atmosférica, vientos y fenómenos se analizan a partir de su origen, composición y funcionamiento con la energía que llega del Sol. Se distingue al agua como el factor activo al almacenar y transportar esta energía, explicándose el origen de las nubes, las lluvias, los relámpagos, las tormentas y de los huracanes. De igual forma se muestra cómo reconocer peligros y prevenir sus efectos y también cómo encontrar e interpretar la información disponible a fin de estar advertido, para en determinado momento saber qué hacer.

Cabe aclarar que las unidades métricas de este libro se expresan generalmente en el sistema métrico inglés como: millas náuticas (NM), nudos (KTS), pies (ft) y pulgadas de presión (PSI). Esto debido a que tanto los medios de difusión internacional de meteorología, los instrumentos de vuelo, mapas y manuales de procedimientos u operación de los aviones utilizan este sistema, por lo que el usuario práctico debe familiarizarse con estas

unidades; no obstante cuando fue posible se agregaron conversiones al sistema decimal.

Debo insistir, el libro es una aproximación personal a la meteorología aeronáutica y aunque cubre el temario del curso para piloto privado, la formación de un piloto profesional es un proceso complejo y personalizado. Los instructores y capitanes a cargo del adiestramiento siempre tendrán la última palabra, de acuerdo a sus criterios y experiencias; los alumnos deberán referirse a ellos o a los manuales oficiales de sus centros de adiestramiento sobre los procedimientos apropiados para cada circunstancia. Para obtener información más analítica o detallada sobre los temas expuestos, deben hacer referencia a los textos citados en la bibliografía ya que explican a profundidad los fundamentos de la física atmosférica. El Colegio de Pilotos Aviadores de México, posee una excelente biblioteca de temas aeronáuticos y meteorológicos.

Expreso un reconocimiento al Ing. Mario Méndez Acosta, difusor de la ciencia en México, por iniciarme en disfrutar y compartir el conocimiento de la naturaleza.

Así también, mi agradecimiento a los Capitanes Asesores: Arturo Vargas, Javier M. Damm, Moisés Carreón, Miguel A. Sánchez, Arturo Raya y todos los Capitanes y Compañeros de la Línea por sus consejos en el privilegio de pilotear el B-737. Al Cap. Sergio Villa R. por su amistad tan franca, así como a Diana Berenice González por la investigación en Internet y apoyo en la redacción.

Finalmente un personal reconocimiento a la Dirección de Publicaciones del Instituto Politécnico Nacional, por creer en este proyecto de divulgación de ciencia aplicada; cuyo personal de edición, formación, corrección de estilo y diseño gráfico ha sido fundamental para la buena aceptación que ha tenido este libro.



# INTRODUCCIÓN

La atmósfera de la Tierra es fresca, transparente y protectora de la vida. Otros planetas no poseen atmósfera o si la tienen está formada de gases tóxicos y corrosivos, el aire de esos mundos puede almacenar tanto calor como para derretir el plomo o sus temperaturas pueden ser tan bajas que congelan en hielo a los mismos gases.

El aire que respiramos es una mezcla de varios gases: el más abundante es el nitrógeno que como refracta el azul da ese color al cielo, no sirve mucho para la respiración, por eso casi todo lo que inhalamos lo volvemos a exhalar. El oxígeno forma la quinta parte del volumen del aire que aspiramos y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), exhalado por los humanos, animales e incendios constituye una minúscula proporción, pero muy importante, pues lo necesitan las plantas y apenas una ligera variación en el porcentaje de ese gas afecta la temperatura de todo el planeta.

La atmósfera de la Tierra no siempre ha sido así en un inicio estaba compuesta mayormente de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), como en Venus y Marte. Fue la vida quien modificó el aire primitivo hace unos 2 800 millones de años, unos microorganismos de los océanos: las cianobacterias evolucionaron la capacidad de absorber el anhídrido carbónico y con la energía de la luz del sol procesarlo en materia viva al mismo tiempo que exhalaban oxígeno como desecho. Con este proceso, llamado actualmente fotosíntesis, estas algas microscópicas llenaron la atmósfera primitiva de oxígeno, cambiándola y volviéndola respirable para los animales y en la alta atmósfera se formó el ozono que absorbía los rayos ultravioletas.

En el aire de la Tierra encontramos también una sustancia que es químicamente mágica y generadora de vida: el agua. Ésta se originó también hace unos 4 500 millones de años, de erupciones volcánicas y de impactos de

cometas. Desde ese tiempo el agua en la Tierra se ha estado evaporando, condensando y precipitando; erosionando montañas, formando valles y océanos. Por si eso pareciera poco el agua tiene la capacidad de absorber, transportar y liberar la energía que llega del sol, impulsando los procesos que mueven la inmensa máquina del aire por toda la Tierra.

El cielo se relaciona con todo lo viviente y parece que influye también en nuestras emociones. Observemos, por ejemplo, una mañana limpia y brillante crea una sensación de bienestar y optimismo, o de lo contrario una tarde húmeda y calurosa que es agobiante, o también puede relacionarse con sentimientos tristes cuando es sombría y lluviosa (sobre todo si es lunes). Una puesta de sol en un horizonte lejano, es siempre majestuosa y hasta ahora nadie sabe por qué resulta en una sensación tan evocadora y nostálgica. La meteorología pues, se relaciona innegablemente con el corazón. Pero la atmósfera puede ser igualmente violenta y peligrosa, con una sorprendente capacidad de destrucción y muerte en forma de tormentas o huracanes. Razón tenían las antiguas culturas que llenaban al cielo de poderosos dioses y dramáticas leyendas para intentar entenderlos y obtener su benevolencia.

Es de igual forma significativo que a través de la historia la exploración de la atmósfera esté rodeada de leyendas y peligrosas aventuras hasta que apenas con el avance del conocimiento científico y la tecnología se pudo empezar a entender al cielo: se encontraron patrones y ciclos naturales que producían fenómenos asombrosos, se ha visto que dependemos en múltiples formas de la atmósfera.

Sin embargo, es cuando se navega en ella, que necesitamos más de su entendimiento, cuando el clima se ve desde adentro, desde la cabina de un avión entre las nubes de tormenta, en un velero en el océano o incluso en tierra enfrentando un desastre climático, se descubre a la atmósfera con una perspectiva diferente, se siente el poder y real significado de los fenómenos del aire y eso vale la pena. Empecemos pues a conocer la atmósfera en la que vivimos inmersos.

# I

UNA DELGADA CAPA DE  
AIRE COMO ESCUDO



La atmósfera es la mezcla de gases que envuelven a la Tierra. A escala planetaria esta capa gaseosa es muy delgada, apenas tiene el espesor de *1%* del diámetro de la Tierra, si este planeta fuera del tamaño de una naranja envuelta en una bolsa de plástico, la capa de aire que podemos respirar sería apenas del grosor del plástico. No obstante, este tenue manto gaseoso bajo el que vivimos es nuestra única protección contra el espacio exterior y funciona como la cúpula transparente de la nave que es nuestro planeta Tierra mientras navega por el espacio.

La atmósfera terrestre es como un escudo espacial. Meteoritos y estrellas fugaces arden como bólidos, apenas rozan sus partes altas a unos 80 km de altura y sólo los muy grandes llegan a impactar el suelo. Las superficies de otros mundos están llenos de cráteres por impactos de meteoros y cometas ocurridos hace millones de años; sin embargo en la Tierra la erosión del viento y la lluvia borran rápidamente la mayoría de estas cicatrices.

Esta bóveda de aire es además selectiva, pues permite que pase la luz visible que llega desde el sol y algo de sus rayos infrarrojos a los que sentimos como calor. El aire filtra, en cambio, la parte nociva de la radiación solar como los peligrosos: rayos X, rayos gamma y rayos ultravioleta, los cuales son atrapados por las moléculas del aire en la alta atmósfera evitando que nos molesten, generalmente sólo requerimos un sombrero o un poco de bloqueador en la playa; mientras que más arriba de la protección del aire, los astronautas deben utilizar un grueso y sofisticado traje para protegerse de todas estas radiaciones.

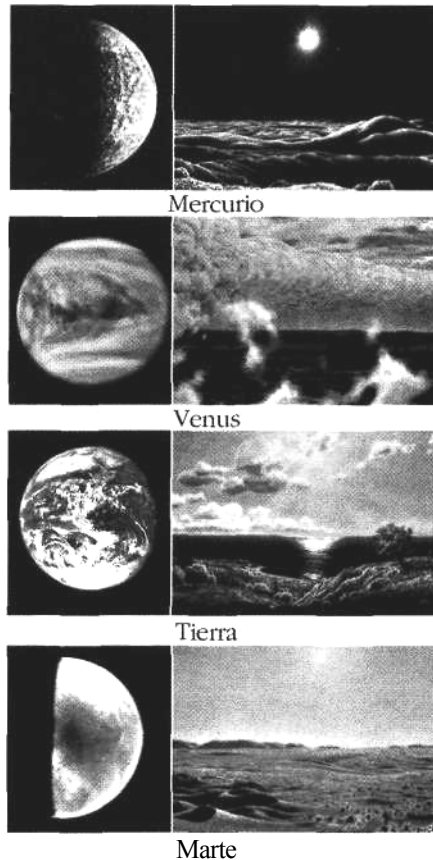


Figura 1. Comparación de atmósferas en diferentes planetas.

Son las 8 de la mañana en cada uno de los planetas analizados:

- En Mercurio se pueden ver las estrellas pues casi no tiene atmósfera, el Sol muy cercano ilumina intensamente su rocosa superficie calentándola hasta unos  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; pero la energía escapa rápidamente al espacio por no haber aire que retenga el calor.
- En Venus existe una gruesa atmósfera compuesta principalmente de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y abundantes nubes amarillas de ácido sulfúrico, que atrapan la radiación del sol en un efecto de invernadero, mantiene unos ardientes  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  capaces de derretir metales en su superficie.
- En la Tierra a esa hora se forman algunas nubes en el cielo azul, su atmósfera, más evolucionada, hecha de nitrógeno y oxígeno generado

por las plantas y abundante vapor de agua, mantiene una temperatura de 15 °C promedio.

En Marte existe una atmósfera muy rala compuesta principalmente de anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ), el mismo gas que exhalamos al respirar, por lo que su atmósfera es de color rosa o naranja. Al estar alejado del Sol casi el doble que la Tierra, tiene una temperatura promedio superficial de -55 °C, un ambiente similar a estar a 50 000 pies, en la alta atmósfera de nuestro planeta.

## UN OCÉANO DE AIRE PESADO SOBRE NOSOTROS

El aire que respiramos es una mezcla de diferentes gases retenidos por la gravedad sobre la superficie del planeta y que forman una capa cristalina azulosa y compacta que se va haciendo más tenue con la altura.

### *Composición de la atmósfera*

El aire está compuesto de nitrógeno 78.9%, oxígeno 20.95%, argón 0.93% y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) 0.03%; debido a la continua mezcla con el viento, esta composición es muy homogénea y es casi idéntica hasta unos 260 000 pies de altitud (unos 80 km) en la alta atmósfera.

Un gas muy especial que no está en la lista es el vapor de agua, el vapor varía mucho en proporción ya que siempre está cambiando de estado, evaporándose del mar y ríos, condensándose como nubes o precipitándose en forma de lluvia, granizo, hielo o nieve.

Si la Tierra se encontrara sólo un poco más lejos del Sol, toda su agua sería hielo y si estuviera un poco más cerca el agua estaría en forma de vapor, todo sería diferente y en ningún caso sería favorable para la vida.

### *Presión atmosférica*

La fuerza de gravedad de la Tierra atrae a todos esos gases componentes, evitando que sus agitadas moléculas escapen al espacio, como ocurrió en las lunas y planetas pequeños.

Kilómetros de espesor de nitrógeno, oxígeno, argón y vapor de agua sobre nosotros, tienen juntos un gran peso que se le llama: *presión atmos-*

*férica*. El peso de todo ese aire aplasta y compacta a las capas bajas de la atmósfera apretujando a las moléculas entre sí, de este modo a nivel del mar el aire es muy denso y respiramos muy a gusto pues con cada aspiración muchas moléculas de oxígeno entran a nuestros pulmones, al mismo tiempo que la presión atmosférica las introduce rápidamente en la sangre. En la alta montaña, con poco peso arriba para comprimirlo, el aire es ralo y la presión escasa; es necesario aspirar mucho aire para respirar suficiente.

Hay que aclarar que en la altura sí hay oxígeno (dijimos que la proporción de la mezcla de gases es constante hasta muy arriba), lo que no hay es presión y sin ésta, el oxígeno del aire no puede ingresar a los alvéolos de los pulmones, ni disolverse en nuestra sangre.

Técnicamente hablando: *La presión atmosférica es la fuerza que ejerce el peso del aire sobre una unidad de superficie*. Al nivel del mar esta presión equivale aproximadamente a un kilogramo de peso sobre cada centímetro cuadrado de superficie. Ésta es mucha presión ¡300 kg sobre el área de la tapa de este libro!, podemos decir que la suma de la presión atmosférica sobre la superficie de la piel de una persona equivaldría al peso de ¡tres elefantes!, claro que toda esta presión no se siente, pues se encuentra balanceada por todas partes, por arriba y por debajo. En la Tierra la vida ha evolucionado con esta presión y no soportamos su disminución, cuando los astronautas salen de sus naves al espacio o en la Luna, deben usar trajes presurizados artificialmente para mantener la presión de aire sobre sus cuerpos.

El aire es muy elástico y con cada vez menos peso arriba, la presión disminuye rápidamente con la altura y éste se enrarece. Al escalar una montaña o al volar en un avión sin cabina presurizada, se sienten los efectos de la falta de presión. En la cima del volcán Popocatepetl a 5 452 m de altura (alrededor de 18 000 pies), la presión es ya la mitad que a nivel del mar. Casi la mitad de toda la masa de la atmósfera se encuentra comprimida a este nivel y los alpinistas sienten dificultad para respirar, o incluso sufren de mal de altura si no están aclimatados.

Los primeros aeronautas que realizaban ascensos en globo no sabían que existía el peligro de no poder respirar en las alturas, y en 1875 una exploración de la atmósfera a 30 000 pies (9 000 m), costó la vida a dos de los tres tripulantes por *mal de altura*, como llamaron desde entonces a la asfixia por hipoxia o falta de oxígeno. La exploración de la atmósfera estuvo, desde el principio llena de peligros desconocidos.

La densidad de la atmósfera es importante también para el vuelo y el funcionamiento de los aviones. Los aviones pequeños a pistón vuelan mucho mejor a nivel del mar donde el aire es denso y produce mayor sustentación al pasar sobre las alas, así mismo entra más oxígeno al motor y la hélice da mayor tracción al atornillarse más eficientemente en la masa de aire compacto.

De modo diferente los jets hechos para la velocidad, se desplazan rápidamente en la altura, al no encontrar resistencia en un aire enrarecido. En los jets comerciales la cabina se presuriza para comodidad y facilidad de respiración de los viajeros, generalmente en el equivalente a una elevación de 8 000 pies, aunque se vuele a más de 35 000 pies.

En un avión comercial en crucero, si se rompiera una ventana o fallara el sello de hule de las puertas la presión interior escaparía y nos encontraríamos queriendo respirar más alto que en la cima del monte Everest. Esto está previsto y si la presión de la cabina subiera a 14 000 pies, de la repisa que se encuentra sobre los asientos caerían unas mascarillas, sólo se tienen que jalar ligeramente para disparar un interruptor que iniciará la dotación de oxígeno puro, mientras el piloto descenderá rápidamente a una altitud con más presión, (ver Anexo. Respiración e hipoxia).

A los 53 000 pies de altitud (unos 16 km) casi todo el aire, el 90% de su masa, se halla debajo, aquí el cielo es azul oscuro y pueden verse las estrellas más brillantes en pleno día. A los 150 000 pies de altitud (unos 50 km), prácticamente todo el aire 99.9%, ha quedado abajo; ningún avión puede volar aquí donde la presión es sólo 0.1% de la del nivel del mar, únicamente los cohetes llegan a estas alturas donde el cielo es negro y la radiación del sol es muy dañina pues no es filtrada por el aire.

Podría pensarse que la atmósfera termina aquí: a los 50 km, pero la composición del aire 78% de nitrógeno y 21% de oxígeno se mantiene aún constante, esta zona es llamada *ionosfera*, porque los átomos de los gases pierden electrones, es decir se ionizan y hacen rebotar algunas ondas de radiofrecuencia. La ionosfera funciona como una antena parabólica en el cielo, apuntando hacia abajo y se utiliza esta propiedad para transmitir radio de acción más allá del horizonte.

A los 90 km la composición del muy escaso aire al fin empieza a cambiar y se detectan capas ricas en nitrógeno molecular. A los 200 km de altitud, la densidad es tan baja que los satélites pueden orbitar sin ser afectados por la fricción. Se puede decir que estamos en el espacio exterior pero aún

existe más arriba una zona de oxígeno atómico, compuesta principalmente de algunos agitados y dispersos átomos de este elemento. A los 1 000 km se encuentran mayormente unos pocos átomos de helio y de hidrógeno y a los 10 000 km, casi el equivalente al diámetro de la Tierra, la densidad de átomos es casi la misma que la del espacio interplanetario.

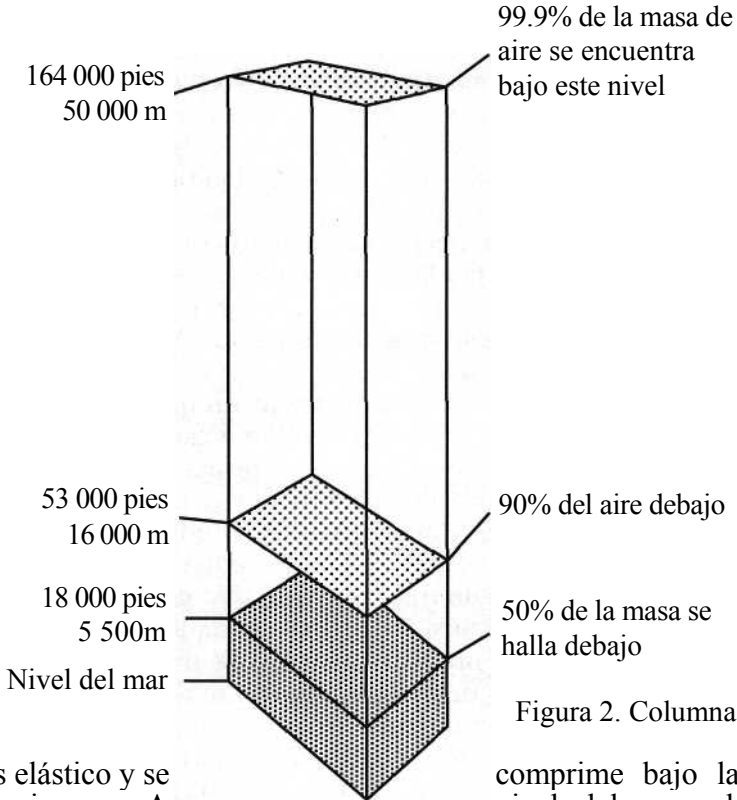


Figura 2. Columna de aire.

El aire es elástico y se de su propio peso. A denso y compacto, la presión equivale a 1 kg por  $\text{cm}^2$ , pero disminuye rápidamente con la altura y apenas a 5 500 metros, la mitad de la masa de la atmósfera ha quedado abajo.

comprime bajo la presión nivel del mar el aire es

denso y compacto, la presión equivale a 1 kg por  $\text{cm}^2$ , pero disminuye rápidamente con la altura y apenas a 5 500 metros, la mitad de la masa de la atmósfera ha quedado abajo.

## BARÓMETRO

Antiguamente se ignoraba que vivíamos en el fondo de un océano de aire y el vacío absoluto era solo un concepto teórico difícil de concebir. Demostrar científicamente la existencia del aire alrededor de nosotros con un peso y presión posibles de medir no fue fácil. Cuando alguien sorbía algún líquido con un popote, estaba intentando crear vacío: el líquido sube por el conducto para compensar esa falta de aire; parecía como si la naturaleza aborreciera el vacío y siempre tendiera a llenarlo rápidamente.

Aunque este concepto satisfacía a todos en esa época, existían circunstancias donde no ocurría así. Como cuando las bombas de agua instaladas en el borde de un pozo no lograban succionar la pesada columna de agua del tubo por más fuerza que se les imprimiera, si éste tenía más de diez metros. Parecía que la ley que consistía en 'un vacío siempre se llenaba' no se cumplía para una columna de agua de más de diez metros.

Fue Evangelista Torricelli, quien a fines del siglo xvii efectuó experimentos para encontrar una explicación. Para no manejar los estorbosos tubos con varios metros de agua, utilizó mercurio: un fluido más denso, para resaltar los efectos. Colocó este metal líquido en un tubo de vidrio de un metro de largo, cerrado por un extremo y abierto por el otro. Al invertir el tubo con el extremo abierto dentro de una vasija, parte del mercurio se vaciaba, pero dentro del tubo se mantenía una columna de exactamente 760 mm ó 29.92 pulgadas.

¿Qué fuerza sostenía al mercurio dentro?, la respuesta era: la presión del aire, empujando desde afuera con una fuerza exactamente igual al peso de la columna del metal líquido. Igualmente, cuando se sorbe un popote, la presión atmosférica exterior empuja el líquido hacia arriba. A menos presión exterior es más corta la presión de la columna dentro del tubo, así en lo alto de una montaña con menos presión de aire para empujar la columna de mercurio, ésta se hace más pequeña.

Este sencillo pero efectivo invento se llamó *barómetro* o sea: medidor de presión y fue el instrumento más empleado en el estudio de la atmósfera durante los siguientes 300 años. Midiendo qué tanta atmósfera había sobre nosotros, el barómetro permitía saber la altitud a la que uno se encontraba. El barómetro se convirtió en el instrumento indispensable para los aeronautas en globo y de otros aventureros de las alturas quienes lo llamaban *altímetro*. Famosos diarios de viaje, así como relatos de

exploraciones en globo y pioneros de ascensos a montañas, se refieren con frecuencia a este instrumento, llevado con muchos cuidados en sus mochilas.

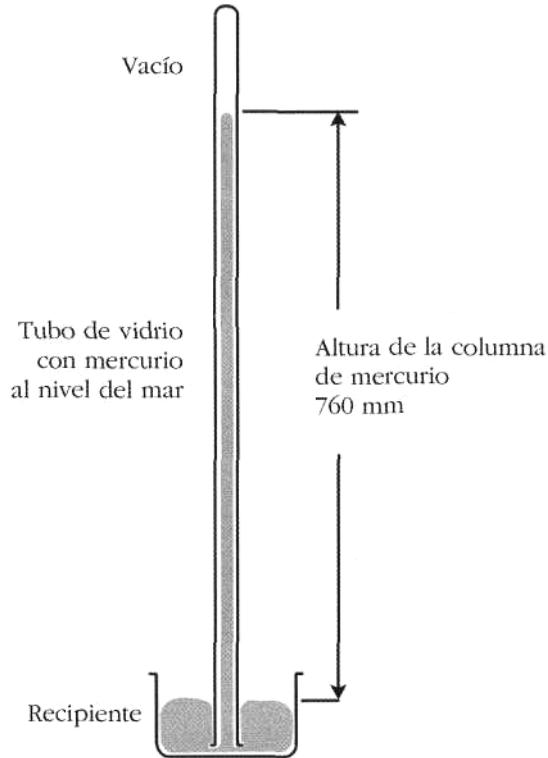


Figura 3. Barómetro de Torricelli.

En un barómetro la presión atmosférica empuja al mercurio hacia arriba del tubo de vidrio, la altura o el peso de la columna del metal líquido equivale al peso del aire que hace la presión desde afuera. La mayoría de barómetros o altímetros están graduados en pulgadas de mercurio. Técnicamente la presión es una fuerza ejercida sobre una unidad de área y le corresponde ser expresada en unidades de fuerza llamadas *dinas*. Una fuerza de 1 000 dinas ejercida sobre un centímetro cuadrado equivale a un milibar (mb), 760 mm ó 29.92 pulgadas de mercurio en el barómetro equivalen a una presión de 1 013.25 mb. Los milibares se utilizan en los mapas meteorológicos, al granear puntos con presiones barométricas similares.

## ALTÍMETRO DE ANEROIDE

El altímetro en los aviones no es un tubo con mercurio, es más bien una pequeña cápsula de forma aplanada llamada *aneroide*, sellada casi sin aire en su interior, de allí su nombre. El aneroide, al contraerse o expandirse, según la presión exterior, mueve un mecanismo de palancas y engranajes que hace girar las manecillas del altímetro en el panel de instrumentos. La carátula de un altímetro de avión es como la de un reloj, pero con números de uno a diez. La manecilla pequeña indica miles y la más larga cientos de pies sobre el nivel del mar.

Como la presión atmosférica varía de un lugar a otro en la superficie y los altímetros responden a ésta, para obtener una indicación precisa, los altímetros de los aviones se deben ajustar a la presión del aeropuerto más cercano. La torre de control comunica al piloto, la presión en esa estación (llamada QNH) a fin de que realice este reglaje altimétrico.

Actualmente también existe el radio altímetro, el cual emite ondas de radio hacia abajo y calcula la altura de acuerdo al tiempo que tarda la onda en regresar al rebotar en el suelo. Aunque relativamente preciso, no es confiable arriba de 2 500 pies, pero se utiliza en los aviones comerciales para una mayor precisión al momento del aterrizaje.

## ALTITUD, ALTURA Y ELEVACIÓN

Un piloto siempre debe estar pendiente de su altitud, altura y la elevación del terreno debajo por lo que deben diferenciarse estos términos.

1. Altitud: es la distancia vertical de una aeronave sobre el nivel del mar. Para evitar confusiones, los altímetros de todos los aviones siempre indican altitudes sobre el nivel del mar.
2. Altura: es la distancia vertical que existe entre una aeronave y el terreno sobre el que vuela.
3. Elevación: es la distancia vertical de un lugar en la superficie, digamos un aeropuerto, con respecto al nivel del mar.

Ejemplo, un avión que sobrevuela la Ciudad de México a 10 000 pies de altitud, sobre el nivel del mar, se encuentra a 2 684 pies de altura sobre el

aeropuerto Benito Juárez, el cual a su vez se encuentra a 7 316 pies de elevación sobre el nivel medio del mar.

## ALTIMETRÍA

Recordemos que un altímetro no indica realmente la altura, sino que este instrumento sólo reacciona a la presión de la masa de aire sobre él y la relaciona con una escala de altitud y nos da una idea. La presión no sólo depende de la altura sino también de la temperatura y densidad del aire, se crea cierta discordancia en las indicaciones de altitud por los cambios de aquéllas, pudiendo llegar a cientos de metros de diferencia. Todo piloto debe saber que existen cuatro tipos de altitudes:

1. Altitud indicada: es la lectura directa en el altímetro y como ésta puede variar por la temperatura o diferencias de la presión atmosférica en un determinado lugar, el instrumento debe ser ajustado según la presión reportada en ese momento para cada aeropuerto, llamada QNH.
2. Altitud verdadera: es la altitud indicada, pero corregida por la temperatura del aire fuera del avión.
3. Altitud de presión: es la lectura del altímetro cuando éste se ha calibrado con la presión de la atmósfera estándar a 29.92 pulgadas ó 1 013 milibares.
4. Altitud de densidad: es la altitud en que pareciera estar realmente el altímetro por la temperatura y densidad del aire. Equivale a la altitud de presión corregida por una temperatura diferente a la estándar. Esta altitud es utilizada para determinar los rendimientos precisos de un aeroplano de acuerdo a condiciones establecidas.

## LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA Y LOS OÍDOS

Los cambios de presión atmosférica se sienten en los oídos. En un viaje de la costa a la sierra parece como si se taponaran, incluso llegan a doler los tímpanos, o al zambullirnos en el agua donde la presión de ésta se suma a la atmosférica también nos duelen si nos sumergimos unos metros. Lo que ocurre es que nuestro oído medio, situado detrás del tímpano, es una cavidad hermética, comunicada al exterior únicamente por unos finos conductos llamados Trompas de Eustaquio, que desembocan en la garganta.

Al ascender a una menor presión atmosférica o al bajar para estar a una mayor profundidad, el oído medio iguala la presión del exterior por esos conductos. Normalmente se encuentran cerrados y para abrirlos basta deglutir, bostezar o soplar apretándose la nariz hasta sentir que se destapan. Sin embargo, un resfrío o inflamación de la garganta pueden obstruir estas delgadas trompas, impidiendo la equalización de las presiones. Por esta razón se deben evitar los cambios bruscos de presión al encontrarse en estas condiciones.

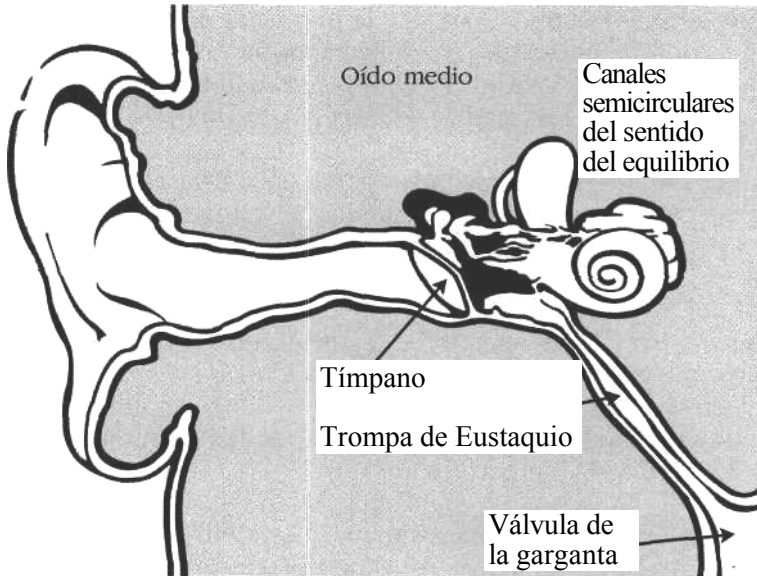


Figura 4. El oído medio.

El oído medio se encuentra conectado con el exterior por un pequeño tubo llamado Trompa de Eustaquio. Cuando ascendemos y la presión disminuye, el aire en el oído medio presiona el tímpano y sentimos tapados los oídos. Al deglutir se abren estos conductos igualando las presiones interiores y exteriores.

## ORIGEN DE LA METEOROLOGÍA

Además de comprobar la presión del aire y medir la altitud, el barómetro también reveló un hecho sorprendente para la época: la presión atmosférica.

rica podía relacionarse con el estado del tiempo. La columna de mercurio del barómetro se hacía ligeramente más corta siempre antes de las tormentas y subía antes del buen tiempo. Las bajas presiones se asociaban al mal tiempo y los días claros y soleados correspondían a barómetros con altas presiones. A fines del siglo xvii se comenzaron a emplear barómetros para anticipar tormentas, en lugar de basarse en el vuelo bajo de las aves o los dolores en las articulaciones de los abuelos, el estado del tiempo podía predecirse con un sencillo instrumento científico.

Se observó también que la columna de mercurio aumentaba y disminuía ligeramente dos veces al día y se descubrió que al igual que en los océanos, las atracciones de la Luna y el Sol generaban mareas en las masas de aire produciéndose las llamadas *mareas barométricas*.

Diariamente existen dos máximos de presión, una elevación de aire se desplaza sobre nosotros alrededor de las 10 de la mañana y las 10 de la noche y dos mínimos ocurren como a las 4 de la madrugada y a las 4 de la tarde.

Con el barómetro y la invención del telégrafo en 1843, los datos meteorológicos y pronósticos podían enviarse y recibirse de muy lejos. Así mismo la determinación de las bajas y altas presiones en el mundo permitió elaborar un modelo global de la dinámica de los vientos y nubes: había nacido la ciencia de la Meteorología.

En 1960, se colocaron en órbita los primeros satélites meteorológicos, que transmitían imágenes de los patrones nubosos a la Tierra; actualmente el sistema Geosynchronous Operational Environmental Satellite (GOES) tiene su propia página de consulta en Internet y proporciona imágenes de toda la atmósfera en tiempo real.

En México el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CNA), tiene 2 750 puntos de medición, 77 observatorios, 12 estaciones de radar y 15 de sondeo. Elabora pronósticos y participa en la toma de decisiones sobre medidas preventivas, de atenuación y de evacuación. Coordinándose con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Se puede acceder a diversos sitios de Internet y a volúmenes de información con la palabra weather, tales como:

<http://smn.cna.gob.mx/smn.html>

<http://www.ncep.noaa.gov>

<http://weather.gov>

## DIFERENCIAS ENTRE CLIMA Y TIEMPO

Aclaremos términos: decir clima es diferente a decir tiempo atmosférico, *weather* o estado del tiempo. El clima se refiere a las condiciones de la atmósfera en periodos largos, generalmente un promedio de 30 años o más de estadísticas y registros de las condiciones atmosféricas en una región o ciudad. En cambio estado del tiempo son estas condiciones en un solo momento y lugar determinado. Así, si deseamos visitar algún lugar, preguntamos sobre su clima.

Ejemplo 1: en la Ciudad de México el clima en el mes de julio nos dirían que es lluvioso con tormentas, con temperaturas entre 19 °C a 30 °C, y con vientos suaves soplando del noreste. En cambio, si debemos aterrizar en el aeropuerto de esta Ciudad, requerimos mucha más precisión y necesitamos conocer el estado del tiempo, es decir las condiciones de la atmósfera para un lugar y tiempo determinados. Así requerimos un reporte meteorológico.

Ejemplo 2: para el día 29 de julio a las 00:48 horas tenemos un viento de los 210 grados del suroeste, con 6 Kts de intensidad, 10 SM O millas estatuto, de visibilidad, con una condición del cielo con medio nublado a 2 000 pies y nublado a 8 000 pies, la temperatura es 23 °C y el punto de rocío 12 °C, también se dan otros datos, como presión atmosférica. Con esta información y conociendo las limitaciones de nuestro avión ya podríamos tomar decisiones.

Casi siempre existe una estación meteorológica en cada aeropuerto y cada hora se emite un Reporte Meteorológico de Aeropuerto (METAR) por sus siglas en inglés, el cual es enviado a todos los aeródromos a fin de que los pilotos visualicen las condiciones meteorológicas que les esperan en sus destinos.

Igualmente se emiten pronósticos de cómo se espera el estado del tiempo en las próximas 24 horas. Estos son los Pronósticos de Área (TAF) por sus siglas en inglés; en el Anexo de información aeronáutica, se explica cómo obtener y descifrar estos reportes. Pero para visualizar el estado del tiempo y prevenir lo que pudiera pasar, requerimos conocer más sobre sus procesos y fenómenos.



# II

LAS CAPAS DE LA ATMÓSFERA.  
¿QUÉ TAN ALTO ES EL CIELO Y  
CÓMO SE CALIENTA DESDE ABAJO?



Antiguamente no se tenía idea donde terminaba el cielo. Aun escalando las montañas nadie había llegado o había visto algún límite. ¿Qué podría encontrarse allá arriba, qué tan alto podría ser?

El primer relato de un vuelo de exploración de la atmósfera nos remonta a los tiempos mitológicos de Grecia: a la leyenda del laberinto de la isla de Creta. Se cuenta que Minos, un tirano rey de esa isla, había encargado a Dédalo, famoso arquitecto, diseñar y edificar un complejo laberinto para servir de habitáculo seguro a su deforme hijo: un monstruo llamado Minotauro. Como era de esperarse, tras terminar la obra, para prevenir que Dédalo revelara la salida del laberinto se le prohibió abandonar la isla. El célebre arquitecto utilizó nuevamente su ingenio para escapar del injusto arraigo y diseñó unas alas para huir volando.

Tanto él como su hijo Ícaro, pegaron con cera plumas de ave en sus brazos. El invento funcionó y agitando las improvisadas alas, ambos se remontaron volando sobre el Mediterráneo; pero el exceso de entusiasmo y confianza hizo que Ícaro fuera temerario, como a menudo ocurre con el piloto principiante después de su primer vuelo solo; y desestimando las instrucciones del padre, el joven se elevó tanto que se aproximó al Sol y según el relato, el calor derritió la cera desprendiéndole las plumas y ocasionando que el desobediente cayera en una incontrolable barrena hasta estrellarse contra el mar. Un dictamen actual hubiera definido las causas del accidente como: exceso de confianza y calor del sol que ocasionó una falla estructural.

Esta leyenda tuvo sentido por más de dos mil años. Con su impecable lógica, los griegos pensaban que arriba, más cerca del Sol, debería hacer más calor y según las leyes de la termodinámica, cerca de la fuente de energía

hay más calor. No obstante, en nuestra atmósfera se observa lo contrario, cuando ascendemos una montaña hace más frío, sus altas cumbres y la del mismo monte Olimpo muestran nieve cada invierno. ¿Cómo explicamos esta contradicción?

Sucede que la atmósfera se calienta principalmente desde abajo. Entre más cerca del suelo, más caliente está el aire. La baja de temperatura con la altitud se debe también a que el aire se enrarece y enfría al ascender, como lo analizaremos en capítulos posteriores, pero por ahora nos limitaremos al calentamiento de la superficie.

La radiación del sol atraviesa la transparente atmósfera hasta llegar al suelo, en la superficie la luz es convertida en rayos infrarrojos, los cuales calientan al aire como si estuviera sobre un comal ardiente.

## DIVISIÓN EN CAPAS

La disminución de la temperatura del aire con la altitud es tan significativa para los fenómenos meteorológicos, que para estudiar a la atmósfera se le ha dividido en capas, según ocurre este cambio. No olvidemos que la composición de los gases permanece siempre constante, y tenemos nitrógeno y oxígeno en proporción idéntica hasta muy arriba, alrededor de unos 260 000 pies (unos 80 km).

Para conocer las diferentes capas en que se divide la atmósfera ascendemos desde el nivel del mar hasta los difusos límites del aire en el espacio. Como instrumentos sólo necesitamos un altímetro y un termómetro para medir la temperatura del aire conforme ascendemos. En teoría la temperatura debe bajar en un gradiente de unos 2 °C por cada 1 000 pies (300 m) que nos elevemos.

Despegamos pues, de una cálida playa en la costa del Pacífico, donde hay una temperatura de 35 °C y nos remontamos hasta 9 000 pies (3 km). Desde la ventanilla de la aeronave se ve claramente la línea de la playa y las olas rompiendo en ondulantes bandas blancas junto a la costa, al verificar nuestro termómetro exterior vemos que la temperatura ha bajado a frescos 17 °C, según lo esperado. Ascendemos a través de la primera capa de la atmósfera, llamada *troposfera o esfera del cambio*, porque en esta capa la temperatura cambia con regularidad conforme subimos. Pasamos sucesivas capas de nubes, mientras el termómetro sigue bajando.

Desde 18 000 pies, más o menos la altura del volcán Popocatepetl, la playa de donde despegamos apenas se aprecia abajo, a lo lejos se ven las montañas de la sierra, entre cierta bruma por el polvo suspendido, las cenizas de volcanes e incendios, cristales de sal de brisa marina, polen, etcétera. Estas partículas que conforman la bruma, dispersan la luz durante el atardecer y amanecer, originando esos tonos de violeta, rojo y dorado.

Subiendo más vemos que se ha formado hielo en el parabrisas al pasar entre las nubes y si en la cabina no tuviéramos calefacción tendríamos mucho frío pues afuera el termómetro marca menos 5 grados. Pero como la temperatura sigue bajando, regularmente sabemos que aún seguimos en la troposfera, la capa donde se condensan las nubes, se forman las lluvias, nevadas y soplan los huracanes.

Continuamos elevándonos sobrepasando los niveles de vuelo de los jets comerciales, entre los 29 000 a 40 000 pies y hasta los 45 000 pies (15 km) observamos que el termómetro ha llegado a 56 °C bajo cero. Afuera hace un frío como en una noche de invierno en Siberia o en el Ártico, pero en nuestra cabina presurizada saboreamos un café caliente y observamos unas nubes de tormenta como motas de algodón que han quedado muy abajo.

Advertimos sin embargo, que aunque continuamos ascendiendo el termómetro ya no sigue bajando y la temperatura se mantiene en -56 °C. Oficialmente esto indica que hemos pasado el límite de la troposfera y llegado a otra capa llamada *tropopausa* (pausa en el cambio de temperatura), aquí la temperatura se estabiliza a -56 °C. La composición química de este aire enrarecido sigue siendo de nitrógeno y oxígeno, pero ya casi no hay vapor de agua, y claro no hay nubes, sólo las cúspides de algunas que llegan con gran fuerza desde niveles inferiores.

La meteorología y sus fenómenos han quedado abajo en la cambiante y turbulenta troposfera. Los mapas meteorológicos publicados periódicamente indican a los pilotos la altitud precisa a la cual se encuentra la tropopausa, deben saberlo, pues aunque pareciera que todo es claro y apacible, aquí existen peligrosos ríos de vientos extremos y severa turbulencia de aire claro, que veremos en capítulos posteriores.

Por la fuerza centrífuga de la rotación terrestre y por la temperatura, la atmósfera es abultada en el ecuador y es achatada en los polos, así que la troposfera es más gruesa o alta en el ecuador, donde alcanza unos 60 000 pies, mientras que en los polos es de sólo unos 25 000 pies. En México el

límite de la troposfera se halla generalmente a 45 000 pies, aunque tanto la altitud de la troposfera como de la tropopausa varían con la época del año.

Subiendo más aún, más allá de 60 000 pies, a la altitud donde volaba el Concordé, la temperatura empieza a aumentar ligeramente de los  $-56^{\circ}\text{C}$  que teníamos. Efectivamente eso nos indica que estamos dejando la tropopausa para entrar en la siguiente capa llamada *estratosfera*, a esta altitud, algo de la luz del sol que atraviesa es convertida en calor, pero sólo alcanza a calentar el enrarecido aire hasta los  $0^{\circ}\text{C}$ . Aquí arriba casi no hay partículas de polvo, el aire es estable y no hay nubes, abajo el aire relumbra con la luz reflejada que ilumina la parte baja de nuestra nave y en el horizonte se aprecia la curvatura de la Tierra, el cielo es azul oscuro y pueden verse las estrellas en pleno día.

Es peligroso permanecer mucho tiempo en la estratosfera, pues los rayos ultravioleta del sol son absorbidos al romper y rearmar las moléculas de oxígeno para formar ozono ( $\text{O}_3$ ), moléculas de oxígeno de tres átomos en vez de dos, como las que respiramos. Las moléculas de ozono protegen desde la altura a los seres vivos en la superficie de los dañinos rayos ultravioleta.

Seguimos hacia arriba hasta los 160 000 pies (50 km) de altura, donde el ligero entibiamiento del aire se detiene y esto indica que pasamos a otra capa llamada *estratopausa* o sea el límite de la estratosfera.

Más arriba aún, nuestro termómetro empieza otra vez a descender. Hemos llegado a la mesosfera, a unos 180 000 pies (60 km), donde la temperatura sigue bajando hasta casi los  $-83^{\circ}\text{C}$  y al arribar los 80 km de altura, el aire es tan ralo que los cohetes que alcanzan a llegar, deben llevar su propio oxígeno en forma líquida para arder. A estos niveles es donde se encienden como estrellas fugaces los fragmentos de cometas y asteroides que arden por la fricción con este aire tan enrarecido.

En su reentrada a la atmósfera las naves espaciales antes tienen que atravesar esta capa de aire que no los puede frenar, sin embargo, la fricción las hace soportar altísimas temperaturas antes de bajar a capas más densas para abrir sus paracaídas o en el caso del trasbordador, empezar a planear como un avión.

A la altitud de la mesosfera la radiación de rayos X y rayos gamma es absorbida por las dispersas moléculas y átomos de nitrógeno y oxígeno, los cuales pierden electrones y se ionizan; por lo que a esta capa se le conoce también como *ionosfera*. La temperatura empieza otra vez a subir a los 80

kilómetros, pero el aire es tan escaso que hay pocos átomos y moléculas que calentar.

¿Hemos llegado al final de la atmósfera? No, como dijimos antes, no existe un límite definido y depende de la definición estricta de atmósfera, pues aquí todavía existen átomos, partículas cargadas, cinturones de radiación, etcétera. Podemos estimar que la capa de aire llega hasta unos 80 km (apenas la distancia de México a Toluca) antes de disiparse casi en un vacío interplanetario. El trasbordador y las estaciones espaciales orbitan a unos 250 km y ya se considera que están en el espacio exterior.

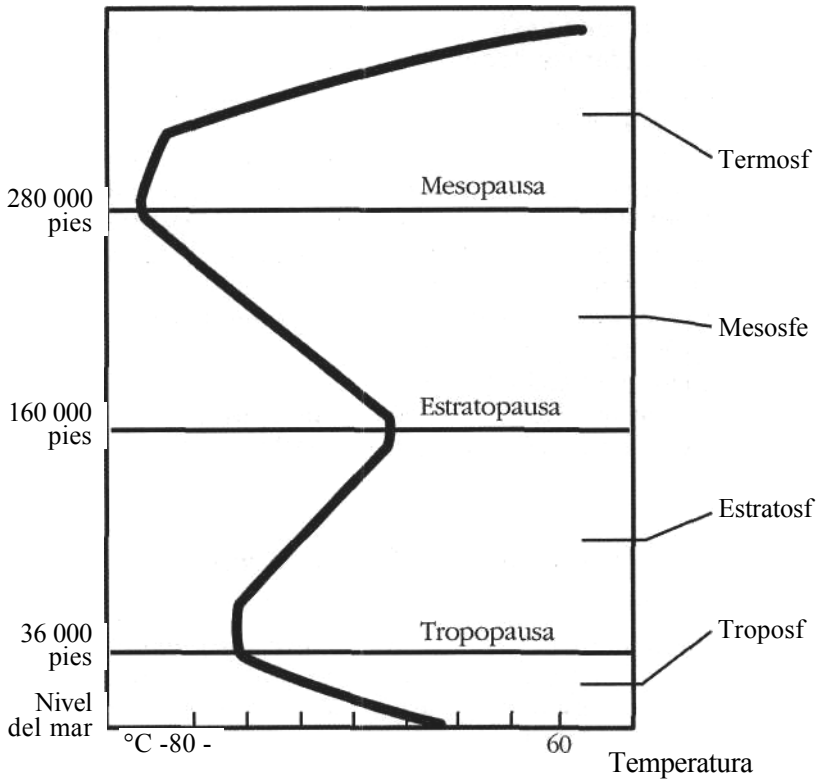


Figura 5. División de la atmósfera en capas de acuerdo con la variación de la temperatura respecto de la altitud. La primera capa es llamada troposfera, donde la temperatura disminuye regularmente con la altitud y donde ocurren casi todos los fenómenos meteorológicos.

## DIFERENCIAS ENTRE EL CALOR Y LA TEMPERATURA

Para aclarar estos términos observemos las diferencias:

- **Calor:** es una forma de energía. Cuando colocamos algo cerca del fuego o lo iluminamos intensamente estamos dándole energía a sus moléculas, las cuales se agitan y vibran. Esta agitación molecular causa la dilatación de los objetos o hace que sus moléculas fluyan como líquidos o escapen como gas.
- **Temperatura:** es sólo una medida de este calor o más bien de la agitación de las moléculas, comparándola con alguna escala conocida. El calor dilata los metales y el mercurio un metal líquido se dilata de manera muy regular con la temperatura. Si se compara esta dilatación con una escala graduada tendremos un excelente sistema medidor del calor, mejor conocido como termómetro.
- **Calor específico:** la cantidad de calor que es absorbida o liberada por cada objeto varía con su composición. Un metal puesto al fuego se calienta rápidamente y se enfría al poco tiempo de retirarlo. En cambio, el agua tarda mucho en calentarse y también en enfriarse. Piensen en lo que tarda en hervir una olla de agua y todo el calor que necesita para evaporarse; por tal razón se dice que el agua tiene gran calor específico, mucho más que los metales.
- **Caloría:** la medida oficial del calor es la caloría, que se define como la cantidad de calor necesaria para subir la temperatura de un centímetro cúbico de agua en un grado. Por ejemplo, de 14.5 °C a 15.5 "Centígrados.

## ESCALAS DE TEMPERATURA

Para medir las temperaturas se utilizan las escalas Celsius o centígrado (°C) y Fahrenheit (°F). De acuerdo a la escala Celsius, a nivel del mar el agua pura se congela a los 0 °C y hierve a los 100 °C. En cambio en la escala Fahrenheit, el agua se congela a 32 °F sobre cero y hierve a 212 °F al nivel del mar.

Existen otras escalas de medida, la de grados Absolutos o Kelvin, la cual equivale a la de Celsius o centígrado más 273°. Los 0° Kelvin o sea -273 °C corresponderían a una temperatura en la cual no existe vibración ni movimiento de las moléculas; esta temperatura es tan baja que no existe en el universo, siendo la menor encontrada de -270 grados centígrados.

Aunque la mayoría de los termómetros actualmente indican en grados centígrados, el piloto debe saber de memoria las fórmulas de las conversiones de temperaturas:

- Para convertir de °F a °C la fórmula es:  $^{\circ}\text{C} = ^{\circ}\text{F} - 32 / 1.8$ ; donde se resta 32 de la cantidad en Fahrenheit y se divide entre 1.8.
- Para convertir de °C a °F se utiliza:  $^{\circ}\text{F} = 1.8 ^{\circ}\text{C} + 32$ ; donde se multiplica la temperatura en °C por el factor de conversión 1.8 y se suma 32 al resultado.

Todos los aviones tienen uno o dos termómetros que indican la temperatura exterior. Se vuela mejor con el aire frío, pues sus moléculas se encuentran más compactadas. Los aviones pueden despegar con mayor peso o menor potencia de los motores cuando hay menor temperatura. En un día caluroso se dilata el aire, cuya densidad baja como si se estuviera a mayor altura, afectando el rendimiento del aeroplano por las tres razones siguientes:

- Reduce la potencia, ya que el motor absorbe menos masa de aire para la combustión.
- Se disminuye la tracción, ya que las palas de la hélice no agarran suficiente aire debido a la baja densidad del mismo.
- También se reduce la sustentación producida por las alas, ya que al haber menor densidad, pasa menos masa de aire entre aquéllas.

El aire caliente funciona como si se operara a mayor altura, por los efectos mencionados el avión alargará la distancia de su carrera de despegue y de aterrizaje, requiriéndose una mayor longitud de pista, reduciéndose también el régimen de ascenso. En cambio, un aire frío y seco, al ser más denso, permite mejor rendimiento de los aeroplanos.

Existen tres escalas de medir la temperatura:

- Fahrenheit: el agua al nivel del mar hierve a 212 °F y se congela a -32 °F.
- Celsius: en la escala centígrada o Celsius, el agua hierve a 100 °C y se congela a 0 "Centígrados.
- Kelvin: la temperatura a la que hierve un líquido no es constante, varía con la presión atmosférica; en lo alto de una montaña el agua hierve a menor temperatura que en la costa, se considera que el agua se congela a 273 °K, teniendo un mínimo teórico de 0 °K donde no habría movimiento alguno de las moléculas.

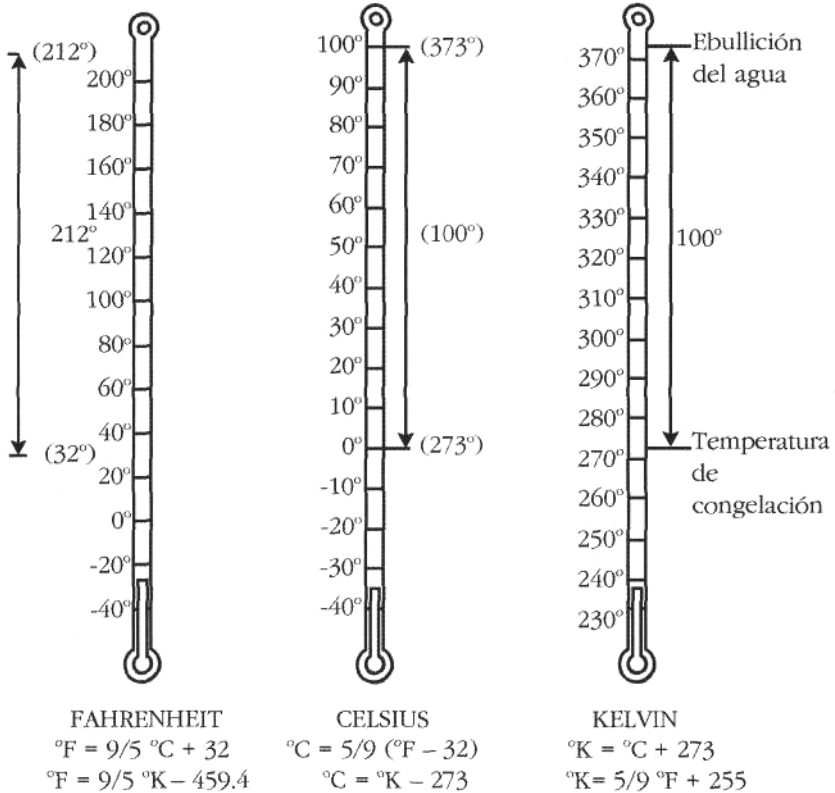


Figura 6. Termómetros.

## LA LUZ SOLAR COMO COMBUSTIBLE PARA LA MÁQUINA ATMOSFÉRICA Y EL ALBEDO DE LA TIERRA

La atmósfera es como una gran máquina que siempre está en movimiento, formando vientos y ciclones o evaporando y condensando agua en forma de nubes. Esta máquina funciona a base de energía solar y su dinámica varía día a día, acorde a cuanta energía le llega y a cuanta es absorbida.

Cuando los astronautas contemplaron la Tierra desde la Luna, la describieron como una esfera de navidad azul, salpicada de blanco, muy brillante, refulgiendo suspendida sobre un fondo negro del espacio. Aun desde

más lejos, a millones de kilómetros de distancia, en las fotografías de las sondas interplanetarias como el Voyager, la Tierra parece como un brillante punto azul entre la estrellas.

La atmósfera refleja mucha de la luz que llega del sol, el porcentaje de luz reflejada por un objeto se llama *albedo*; el color claro refleja mucha luz y puede tener un albedo como 1.0 ó 100%, tal como un espejo. Los tonos oscuros, en cambio absorben la luz y tienen albedo bajo; por experiencia sabemos que la ropa blanca es más fresca pues refleja la luz, la oscura al absorberla es calurosa.

La Tierra tiene un albedo promedio de 0.32, reflejando el 32% de la luz que llega del sol. La nieve, los desiertos, las nubes y el mismo aire reflejan mucha luz. A gran altura el reflejo del aire alumbra la parte inferior de las alas y fuselaje de los aviones haciéndolos brillantes y sin sombra por debajo.

Al contrario nuestra Luna sin aire ni nubes luce apagada y gris con un débil albedo de 0.1 reflejando sólo 10% de la luz del sol, incluso así nos ilumina bastante, pero si nuestro satélite tuviera atmósfera tendríamos unas noches increíblemente claras. Marte con sus desiertos y tenue atmósfera de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), tampoco refleja mucha luz alcanzando un albedo de 0.16. Al contrario Venus el 'lucero del amanecer' por su cubierta de nubes amarillas de ácido sulfúrico, relumbra con un albedo de 0.76 reflejando 76% de luz que le llega.

Cuando el albedo varía hay consecuencias en el clima, por ejemplo, cuando un volcán en erupción arroja muchas cenizas a la alta atmósfera, éstas actúan como una gigantesca sombrilla haciendo rebotar la luz del sol al espacio; el albedo aumenta y la temperatura desciende.

Hace unas décadas las erupciones de los volcanes Santa Helena en los Estados Unidos y del Chichonal en México, llenaron de ceniza a la atmósfera, por varios días la Luna se vio pálida y amarillenta y se produjo un leve descenso de la temperatura del planeta. El volcán Pinatubo, con sus cenizas que opacaron por meses el ecuador hizo disminuir la temperatura en un grado.

De hecho, el inicio de la última época glaciaria hace unos 75 000 años, estaría asociado a una serie de gigantesca explosiones volcánicas en Indonesia (volcán Toba) que habrían velado con cenizas a la atmósfera. Las bajas temperaturas resultantes ocasionaron la formación de gruesas ca-

pas de hielo glacial de miles de metros de espesor sobre Canadá, Europa y Groenlandia, dañando a la ecología existente y aniquilando a muchas poblaciones de la época. La nieve, a su vez, reflejó la escasa luz solar al espacio mermando más el balance general de calor en el planeta.

Como todo está relacionado, la acumulación de esta agua congelada sobre los continentes hizo descender el nivel de los océanos en decenas de metros, descubriendo puentes entre continentes e islas por los que los animales y humanos sobrevivientes se dispersaron.

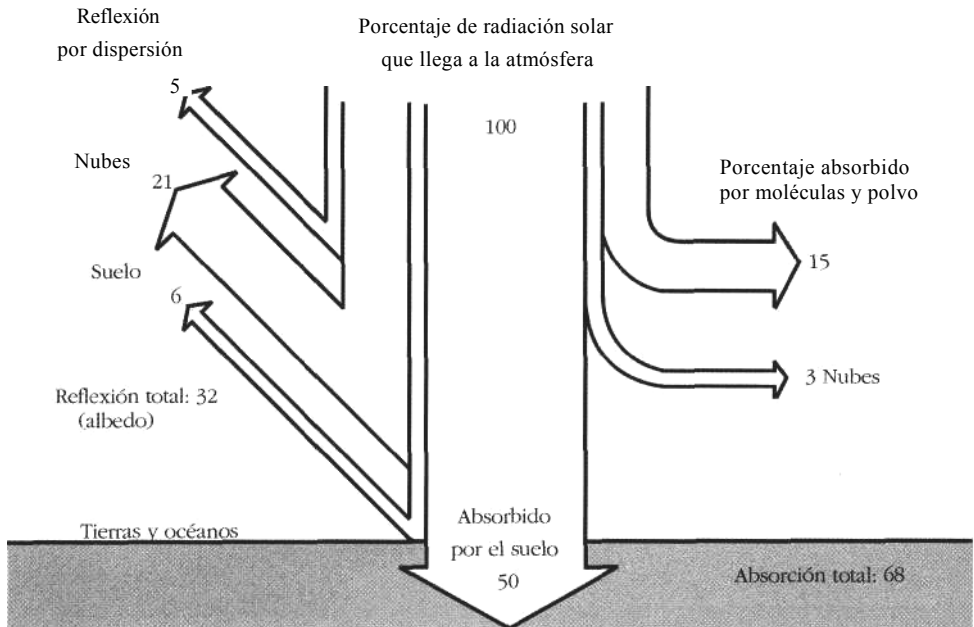


Figura 7. Albedo de la Tierra.

Aunque para nuestros antepasados que perseguían mamuts, los glaciares parecieran eternos, hace unos 15 000 años estos empezaron a derretirse, el nivel del mar subió inundando las costas y valles, dando origen a leyendas de diluvios y ciudades sumergidas por todo el mundo.

Existen teorías de catástrofes aún mayores, que afectaron el clima de todo el mundo, tales como la caída de un gran meteoro o erupciones volcánicas generalizadas. Parece que hace 65 millones de años, las cenizas del impacto de un cometa en lo que sería la península de Yucatán

actual, ocasionaron una penumbra planetaria cuya temperatura bajó varios grados. Las plantas se marchitaron y rota la cadena alimenticia, innumerables poblaciones de animales y vegetales murieron de hambre o frío, lo que provocó extinción de muchas especies, entre ellas, los dinosaurios.

Desde la superficie del Sol a 6 000 °C una gran cantidad de energía llega a la Tierra. Esta radiación se compone aproximadamente de 10% de rayos alfa, rayos gamma y rayos ultravioleta; 40% de luz visible y 50% de rayos infrarrojos, es decir: calor. Esta energía es absorbida, refractada o reflejada por los diferentes gases componentes de la atmósfera.

## EL CLIMA: INCLINACIÓN Y CALENTAMIENTO DESIGUAL

La cantidad de radiación solar que llega a la superficie de la Tierra no sólo depende del albedo, sino también de lo vertical que caen los rayos de luz. Cuando el Sol está vertical, al mediodía, su luz atraviesa un menor espesor de atmósfera y concentra más energía por unidad de área, a esa hora se siente una mayor intensidad de la radiación y parece como si quemara la piel; mientras que al amanecer o atardecer, la luz del sol cae inclinada y calienta menos.

Como nuestro planeta es una esfera, la luz del sol en un momento dado cae vertical en un solo punto, mientras el planeta rota sobre su eje. Las zonas al norte y sur de este punto se calientan menos, pues los rayos solares caen oblicuos. Este calentamiento desigual o diferencial es la causa de la mayor o menor temperatura en diferentes lugares de la Tierra y a su vez es la causa de la dinámica de la atmósfera.

La palabra clima proviene del griego *klima* o inclinación y se refiere precisamente al ángulo de incidencia de los rayos del sol. Las estaciones del año se determinan por este ángulo. Cuanto más inclinados están los rayos del sol al medio día, menos calor.

En la antigüedad, las sociedades con su precaria e incierta economía basada en la agricultura, necesitaban conocer bien el cielo para diseñar calendarios y predecir los días que podrían traer lluvias, estiaje o fríos severos. Al igual que en nuestras casas, donde observamos que los rayos del sol entran con ángulos diferentes por las ventanas según el mes del año, muchos templos y pirámides por todo el mundo se construyeron

como grandes observatorios a fin de determinar estos ángulos y posiciones del sol y asociarlos con el estado del tiempo. Toda actividad, ceremonia o fiesta importante se realizaba en relación con algunas posiciones del Sol de la Luna o las estrellas, que se convertían en dioses protagonistas del bienestar, hambre o desgracias.

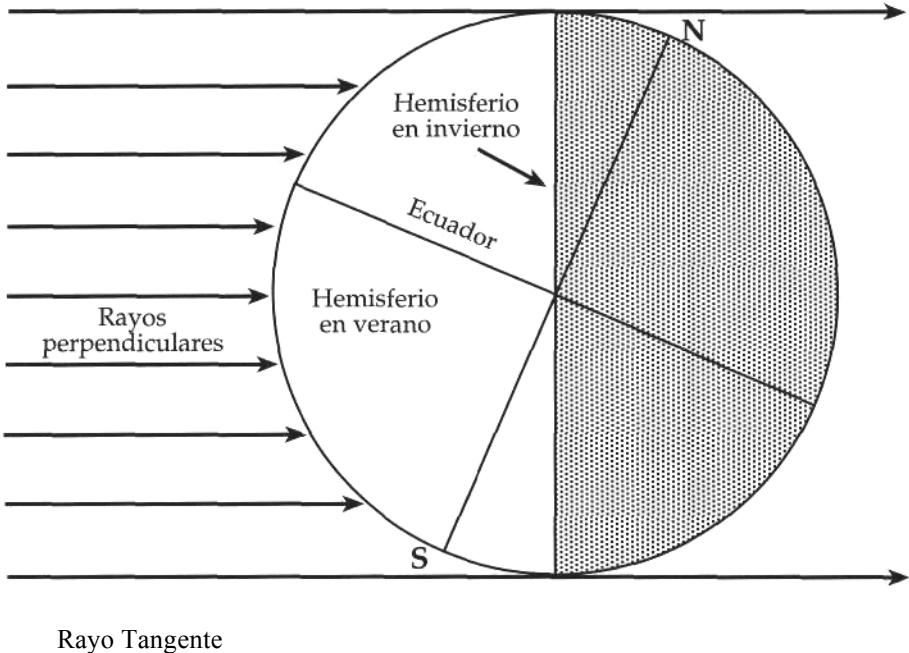


Figura 8. Inclinación del eje e iluminación diferencial. La iluminación o sea la cantidad de energía luminosa que llega por unidad área, varía bastante si los rayos caen verticales u oblicuos. Por este motivo, al mediodía quema mucho el sol y en la tarde o en invierno calienta poco, pues sus rayos llegan muy inclinados.

Las construcciones y monumentos de civilizaciones se edificaban en cuidadosa alineación con las posiciones de los astros a lo largo del año y cada fecha importante revelada por la posición de las estrellas, ameritaba una significativa ceremonia. Por ejemplo, la célebre pirámide del Castillo, en Chichén Itzá está orientada de modo que por su posición produce un curioso efecto luminoso en los días cercanos a los equinoccios de primavera o de otoño. A fines de marzo o septiembre, como a las 3 de la tarde, las aristas de las nueve plataformas en la esquina noreste de la pirámide proyectan su sombra sobre la alfarda norte.

Las sombras de forma delimitan otras áreas iluminadas, las cuales van apareciendo de una en una, de arriba hacia abajo. Conforme avanza la tarde, el cambio de ángulo de la luz, produce una lenta ondulación luminosa que parece descender desde la parte alta del templo. Los siete triángulos luminosos parecen los diseños del cuerpo de una gran serpiente de 35 metros de largo, cuya cabeza es un feroz monolito con las fauces abiertas, en la base de la alfarda. Este espectáculo ritual, que debe haber impresionado a los antiguos pobladores, tanto como a los turistas actuales, simbolizaba el descenso de Kukulcán de su pirámide y era una señal: tiempo de ocuparse de la tierra y de tomar grandes decisiones.

Pareciera que el conocimiento de la mecánica del cielo ha estado siempre unido al misterio, a la religión y al poder. Si de este modo se podían determinar las lluvias ¿por qué no también los destinos de los hombres y naciones?, fue así como el cielo se pobló de dioses caprichosos con sus respectivos intérpretes y representantes en la Tierra... pero volvamos a lo técnico del aire.

## LAS CUATRO ESTACIONES

Dejemos en claro que el verano o invierno no depende de la distancia de la Tierra al Sol, sino más bien si aquella es iluminada desde abajo o desde arriba. Mientras viaja en su órbita alrededor del Sol, nuestro planeta va dando vueltas, como un trompo y su eje de rotación está inclinado en un ángulo de  $23.5^\circ$ . Es como un trompo girando ladeado, sobre una mesa alrededor de una vela, con la parte de arriba apuntando siempre hacia una esquina del techo de la habitación. De igual modo, el eje de rotación de la Tierra, que atraviesa los polos, apunta siempre a un punto del cielo cercano a una estrella conocida como *polar*.

La Tierra al girar inclinada alrededor del Sol, asume diferentes posiciones con respecto a los rayos solares, dejándose iluminar unos meses por la parte de arriba y otros por abajo. Desde la superficie, el Sol parece que cambia de camino en su recorrido diario por el cielo y nuestra casa se ilumina de modo diferente cada mes. Son estos diferentes ángulos de incidencia de los rayos solares a lo largo del año la causa de las estaciones.

Cada 21 ó 22 de junio la Tierra está inclinada al máximo con su hemisferio norte dando hacia el Sol. Éste, al medio día, está casi arriba

de nosotros, sus rayos caen verticales y es el inicio de la estación de verano. El hemisferio sur, mientras tanto, queda inclinado hacia el lado opuesto al Sol y allí es invierno. Este momento se conoce como solsticio de verano y los días son más largos que las noches en el hemisferio norte. En latitudes bajas, al mediodía, el Sol pasa casi directamente por encima de ciudades como La Paz, Mazatlán, Calcuta, Hong Kong, Honolulu. A lo largo de estas ciudades donde el día del solsticio de verano los rayos del sol caen verticales, pasa una línea que circunda la Tierra en los  $23.5^\circ$  de latitud norte y se llama trópico de Cáncer. Cerca del solsticio de verano los días son más largos y en ciudades como Londres o Moscú, aún hay luz natural a las 9 de la noche. Más hacia el norte, en el círculo polar, durante el solsticio de verano, incluso se puede ver el famoso Sol de media noche.

Seis meses después, en diciembre 21 ó 22 ocurre exactamente lo opuesto, en Norteamérica es el solsticio de invierno y es el inicio de esta estación, ya que el hemisferio norte recibe menos iluminación. Ahora, el hemisferio sur queda viendo hacia el Sol, el cual pasa exactamente por encima de una línea situada a los  $23.5^\circ$  de latitud sur, llamada trópico de Capricornio, cayendo la luz perpendicularmente, en un tórrido verano, sobre ciudades como Río de Janeiro, Asunción y los desiertos de Atacama en Chile o el del Kalahari en África del Sur.

El eje de rotación de la Tierra se encuentra inclinado  $23.5^\circ$  con respecto al plano de su órbita, esto ocasiona que en diferentes épocas del año los rayos del sol incidan más sobre el hemisferio norte o el sur respectivamente. Esta inclinación produce al mismo tiempo un periodo de luz diferente para cada hemisferio, ocasionando que en verano los días sean más largos y en invierno más cortos. Este fenómeno se visualiza en un experimento sencillo, en el cual una esfera se hace orbitar en torno a un foco, al inclinar el eje de la esfera, en un momento dado se iluminará más un hemisferio de la misma.

A medio camino entre ambos solsticios, ocurren los equinoccios, en los cuales el eje de rotación de la Tierra queda en ángulo recto con los rayos del sol que en esos días caen perpendiculares a la línea ecuatorial. El equinoccio invernal ocurre en marzo 20 ó 21 y el de otoño en septiembre 22 ó 23. En la antigüedad estas fechas se consideraban místicas e indicaban los inicios de las temporadas de siembra o cosecha con respectivas ceremonias.

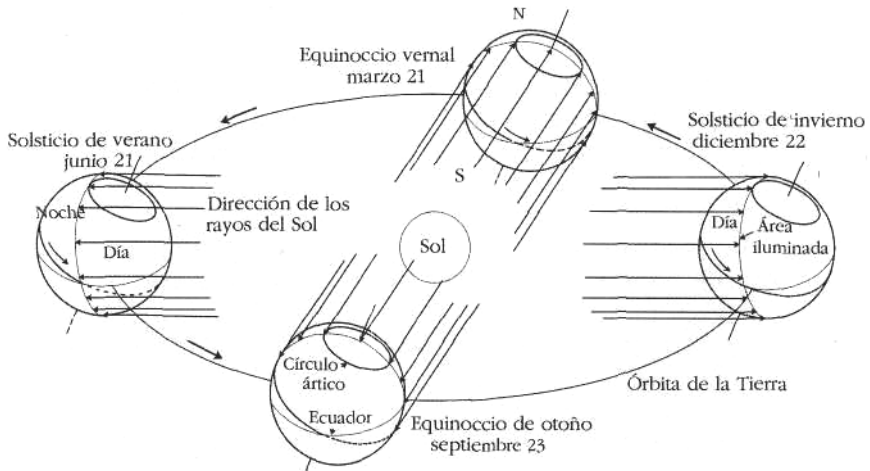


Figura 9. Las Estaciones.

Como la órbita de un planeta no es un círculo perfecto sino una elipse, durante la primera semana de enero la Tierra se encuentra a 147 millones de kilómetros del Sol mientras que a principios de julio se halla un poco más lejos, a 152 millones de kilómetros. Esta pequeña variación de distancia apenas influye en las temperaturas. La causa de las estaciones, como vimos, es la inclinación del eje de rotación del planeta y como consecuencia produce días más largos por los rayos solares que llegan verticalmente, y no debido a la distancia al Sol.

## INERCIA TÉRMICA

Por experiencia sabemos que la temperatura ambiental no aumenta inmediatamente al salir el Sol, sino que el aire tarda en alcanzar su máxima temperatura y descender a la mínima; este efecto es llamado: *inercia térmica*. Las temperaturas mínimas y máximas del aire, tan mencionada en los reportes meteorológicos de la televisión, ocurren justo antes de la salida del Sol y después del mediodía respectivamente.

Este mismo efecto sucede con las estaciones del año. En los solsticios, a fines de junio y diciembre el Sol ilumina al máximo a un hemisferio y al mínimo al otro, pero los efectos en la temperatura promedio se sienten uno o dos meses después, en agosto y enero.

## *Transporte de energía*

Para entender el funcionamiento de la atmósfera por la energía solar, debemos entender como se distribuye esta energía al llegar a la Tierra. Recordemos que: *La materia y la energía, no se crea ni se destruye sólo se transforma.*

La energía luminosa que llega del sol al aire y al suelo, no puede desaparecer, sino que viaja, saltando de sustancia en sustancia, transformándose cada vez y originando fenómenos, mientras se distribuye y viaja por el mundo. Estas migraciones de la inmortal energía de objeto en objeto ocurren principalmente de cinco maneras:

- Por radiación: es cuando la energía viaja en forma de ondas electromagnéticas. La frecuencia y longitud de las ondas varía con la temperatura a la que fueron emitidas. Cuanta más alta la temperatura de un cuerpo, la longitud de onda electromagnética irradiada es menor. Por ejemplo, la radiación del sol es en general de menor longitud de onda (luz visible) que la radiación del suelo (calor o infrarroja).
- Por absorción: todo cuerpo irradiado absorbe energía según sus características, un objeto de color oscuro absorberá más energía que uno claro.
- Por conducción: la energía calorífica puede transmitirse de un cuerpo a otro por contacto. Si ponemos al fuego el extremo de una barra metálica, toda la barra calienta rápidamente. Igual, al tocarla sentimos su calor conducido a nuestra piel. El sol calienta el suelo y éste le transmite energía al aire en contacto.
- Por convección: cuando una sustancia se calienta, se expande, y se hace menos densa, de tal modo el aire caliente se expande y se eleva, transportando con él calor a las capas superiores de la atmósfera. Las corrientes termales de aire ascendente sobre el suelo del desierto son un ejemplo de convección.
- Por advección: cuando el aire se mueve sobre la superficie, transporta el calor de un lugar a otro. Una masa de aire tropical desplazándose hacia el Norte, en forma de viento, calienta a las zonas frías.

Se puede decir que cada movimiento de aire siempre está acompañado de un movimiento de energía en una de esas cinco formas. La simple brisa es un fenómeno que transporta energía, y no digamos del agua y su vapor, que por su alto calor específico es un verdadero almacén de energía que llega a la atmósfera y la agita como veremos en el capítulo del agua.

# III

## MONTAÑAS Y VALLES DE AIRE



Un altímetro no marca la altura real, recordemos que este instrumento sólo reacciona a la presión barométrica sobre él. La presión sobre el altímetro y la altitud en su escala no siempre coincide, se puede ir volando a una presión constante, con el altímetro indicando una misma altitud, pero en realidad ir bajando o subiendo con respecto al suelo ya que las diferentes masas de aire frías, calientes, densas o ligeras en las que se va volando varían en espesor.

Supongamos, por ejemplo, que vamos volando recto y nivelados, con una altitud, velocidad y rumbo fijo, digamos a 7 000 pies sobre el nivel del mar, con una presión barométrica de 875 mb, todo bien, pero cuando pasamos una zona de aire frío más compactado, la presión continúa en 875 mb. ¡Pero ojo!, en realidad estamos más abajo ya que por el frío, la masa de aire se ha encogido como un acordeón.

Cuando el aire es más frío, el altímetro indica una altitud mayor a la real; cuando es más caliente, indica una altitud menor (from hot to cold, look out below, como dicen en EE.UU).

Por precaución siempre se vuela con márgenes de seguridad a una mínima de 1 000 ó 2 000 pies arriba del obstáculo más alto en el área. Pero se debe tener en cuenta al volar de región en región regular el altímetro con la presión atmosférica local. Al descender para aterrizar el Controlador de Tránsito Aéreo (CTA) de la torre en el aeropuerto de destino siempre le informa al piloto la presión local, en pulgadas de mercurio o milibares, para que éste ajuste su altímetro y la indicación del instrumento sea más precisa.

## ALTAS Y BAJAS

Así, por todo el planeta tenemos zonas de altas y bajas presiones atmosféricas, siempre desplazándose por la superficie. Una red de observatorios meteorológicos registra cada hora la presión en sus barómetros para generar mapas meteorológicos donde las áreas de alta presión se marcan con la letra *H*, las cuales generalmente se asocian con buen tiempo. Mientras que las áreas de baja presión barométrica, se marcan con la letra *L*, se relacionan con mal tiempo.

Todos los puntos con presiones barométricas iguales se les une con unas líneas llamadas *isóbaras* o *líneas isobáricas*. Las isóbaras son líneas concéntricas a los centros de alta y de baja presión y su lectura se hace en m̄ibares. Cada isóbara de los mapas meteorológicos generalmente indica una diferencia de 4 mb con la isóbara vecina (ver figura 16).

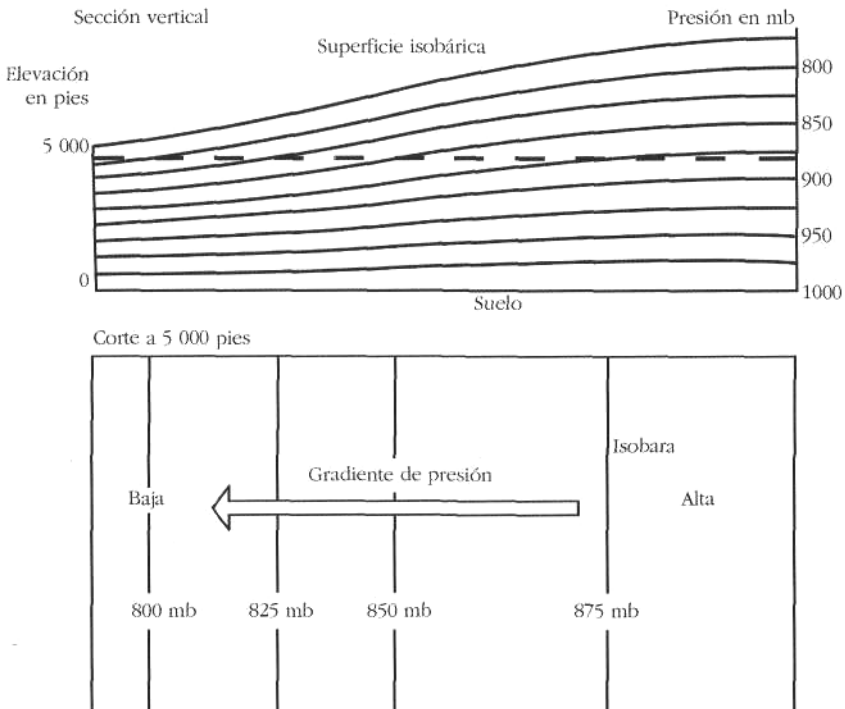


Figura 10. Montañas de aire de alta presión y valles de baja.

Las áreas con alta presión barométrica pueden también concebirse como grandes acumulaciones o montañas de aire, desde las cuales descienden vientos. Por el contrario, a las áreas de baja presión entre las altas se les denomina bajas y son como valles entre las montañas de aire con alta presión. La diferencia de presiones entre los centros de alta y baja se llama *gradiente*. Los vientos son sólo aire en movimiento por este gradiente, desde una zona de alta a otra de baja presión.

Al observar los gradientes de presión y granear las isóbaras, si efectuamos un corte vertical de los mismos se hace notorio que los centros de alta presión parecen elevaciones de aire. Estas variaciones de presión, ajenas a la altitud pueden dar falsas indicaciones en los altímetros. Si consideramos a las líneas isobáricas o isóbaras como a la topografía de montañas y valles, podemos visualizar los sistemas de presión atmosférica como: altas y bajas.

## ATMÓSFERA ESTÁNDAR

Como las condiciones atmosféricas, de temperatura, humedad y presión fluctúan todo el tiempo y son diferentes para cada lugar; para homologar y calibrar los instrumentos y equipos fue necesario considerar algún patrón fijo, por tal motivo la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) dictaminó que para cálculos, tablas y calibraciones de instrumentos se considere una "atmósfera tipo o atmósfera estándar", en la cual se toman como constantes los siguientes valores:

- Considera al aire totalmente seco, desprovisto de humedad y polvo.
- La presión del nivel del mar es de 760 mm de mercurio, 1 013.25 milibares ó 29.92 PSI (libras por pulgada cuadrada).
- La temperatura a nivel del mar es de 15 °Centígrados.
- El gradiente adiabático es de -1.89 °C por cada 1 000 pies de altitud hasta la tropopausa, en donde se tiene una temperatura constante de -56.5 °Centígrados.

Las tablas, gráficas, cálculos y procedimientos de los manuales de vuelo se basan en estos parámetros. Idealmente se considera que la presión disminuye 1 pulgada de mercurio por cada 1 000 pies y la temperatura baja 2 °C por cada 1 000 pies.



# IV

## EL VIENTO Y LA PRESIÓN DIFERENCIAL



Al mediodía el suelo del desierto empieza a calentar el aire sobre el que se expande y flota, elevándose como una gran burbuja gaseosa. A este movimiento vertical del aire por calentamiento, se le llama *convección*.

En un día soleado sobre las llanuras y desiertos continuas e invisibles burbujas de aire caliente ascienden desde el suelo formando flujos ascendentes llamadas también *corrientes convectivas* o *corrientes termales*. Las águilas y zopilotes las conocen bien y las utilizan para volar sin apenas mover las alas, planeando en círculos, aprovechando el flujo ascendente de aire que los eleva mientras patrullan la región. Estas termales también son buscadas por los pilotos de planeadores, aves y alas delta pueden viajar lejos pasando de una corriente ascendente a otra.

Ahora bien, el vacío dejado en la superficie por el aire que sube, crea un área de baja presión a nivel del suelo, hacia donde fluye rápidamente el aire circundante desplazándose horizontalmente en un movimiento llamado de *advección*. A este movimiento más o menos horizontal del aire, sobre la superficie, se le llama *viento*. La brisa fresca del mar, que agita las toallas en la playa o los vientos de circulación global que cruzan mares y continentes es siempre aire que se mueve de un lugar de mayor presión a otro de menor. Toda la circulación general de vientos en el mundo al final se basa en este principio... pero mejor visualicemos el fenómeno.

En la costa, el suelo se calienta más rápido que el mar, el aire calentado sobre la arena ardiente sube por convección como corriente termal, mientras que el aire relativamente más frío del mar, se mueve hacia la costa para llenar este vacío, soplando como brisa marina. Este tipo de viento refresca las playas de todo el mundo e impulsa a los veleros y paracaídas turísticos hacia la costa. Durante la noche, ocurre lo contrario, el suelo se enfría más

rápido mientras que el aire aún tibio sobre el océano ahora se eleva y el viento corre desde la costa al mar en lo que se llama *brisa de tierra*.

Este calentamiento diferencial del aire también se presenta en las montañas, con el sol naciente sobre las cumbres y laderas, el aire se calienta y dilata rápidamente y desde los valles asciende, montaña arriba, un viento llamado *viento de valle*. En la noche sucede lo contrario, el aire frío de las cumbres baja por las laderas como viento de montaña.

A gran escala sobre continentes, grandes masas de aire también se calientan y elevan mientras otras se mueven a ocupar su lugar. Esto produce una circulación general de vientos que abarca todo el planeta. Así ocurre el monzón, donde toda la región sur de Asia, durante el verano se calienta más rápido que el vecino océano Índico, creando una inmensa brisa marina que lleva intensas lluvias a la India y Pakistán, el monzón al subir por los montes del Himalaya trae las temidas nevadas que acumulan nieve y causan peligrosas avalanchas a los alpinistas en camino a las cumbres del Everest o montes del Karakorum.

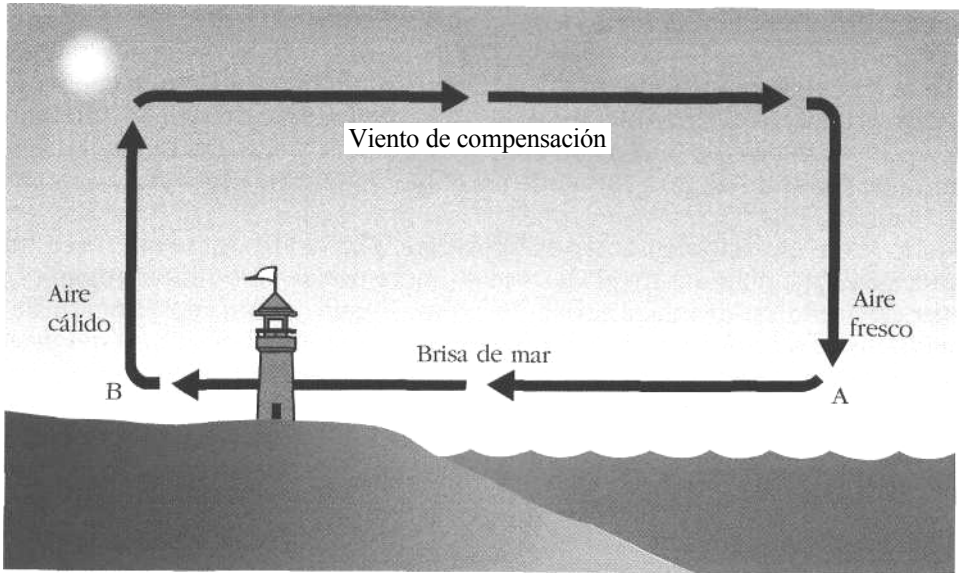


Figura 11. Brisa marina y brisa de tierra.

Durante el invierno los vientos soplan desde tierra hacia el tibio océano Índico. Estos vientos se detienen unos pocos días entre ambos monzo-

nes, momentos de relativa calma, que son aprovechados por los alpinistas para llegar a las azotadas cumbres del Himalaya.

Al calentarse el suelo más rápido que el agua, el aire caldeado se expande y se eleva, ocasionando un área de baja presión. El aire fresco del mar se mueve hacia esa zona de baja presión, creando un patrón de circulación de viento y una brisa refrescante. Durante la noche ocurrirá lo contrario, como el suelo se enfría rápidamente, el aire tibio sobre el mar ascenderá invirtiéndose este ciclo.

## LAS PRESIONES BAROMÉTRICAS Y LOS VIENTOS

Como vimos, lo que mueve al viento es la presión diferencial. La fuerza que empuja al aire de un punto de mayor presión a otro de menor es llamada *gradiente de presión* y cuanto mayor diferencia exista entre una zona de alta y una baja presión, el gradiente será más fuerte, consecuentemente la velocidad del viento será mayor. Estos centros de presión se ubican en diversas zonas de la superficie de la Tierra y como los vientos se desplazan de las altas a las bajas, forman patrones de circulación semi-permanentes y característicos.

## LAS ISÓBARAS O LÍNEAS ISOBÁRICAS

Si en un mapa unimos todos los puntos de igual presión barométrica, tenemos que se forman unas líneas concéntricas llamadas *Isóbaras*, cada una con presión atmosférica ligeramente diferente a la vecina. El centro de estas isóbaras concéntricas son las zonas con la mayor o menor presión atmosférica y son simbolizadas en las cartas por una *Ho L* respectivamente.

Ahora, si unimos ambos centros (H y I) con una línea y observamos la diferencia de presión entre ambos centros, obtenemos el gradiente de presión perpendicular a las líneas de las isóbaras. Cuando las isóbaras se encuentran separadas, la diferencia es poca y el gradiente débil; mientras que cuando están juntas, indican un gradiente fuerte y los vientos serán más veloces. Hay que estar alerta cuando en los mapas se ven las líneas isobáricas muy juntas pues existirá un viento intenso.

Así, parece que bastaría con colocar barómetros en diferentes puntos y obtener la distribución de las presiones para conocer la dirección y velocidad del viento, sin embargo, en la práctica vemos que el viento no viaja directamente hacia los centros de baja presión; una extraña fuerza siempre lo desvía y hace que se mueva en círculos paralelos a las isóbaras, girando en grandes remolinos alrededor de los centros de alta o baja presión. ¿Por qué ocurre esto?, para una explicación de tal desvío, nos tenemos que remontar a la época de los galeones y piratas del Caribe.

## ANÁLISIS ISOBÁRICO

El análisis isobárico se realiza para estudiar y pronosticar la dirección e intensidad de los vientos. Como pueden imaginar aquí se localizan los centros de alta presión (*H*) y los centros de baja presión (*I*).

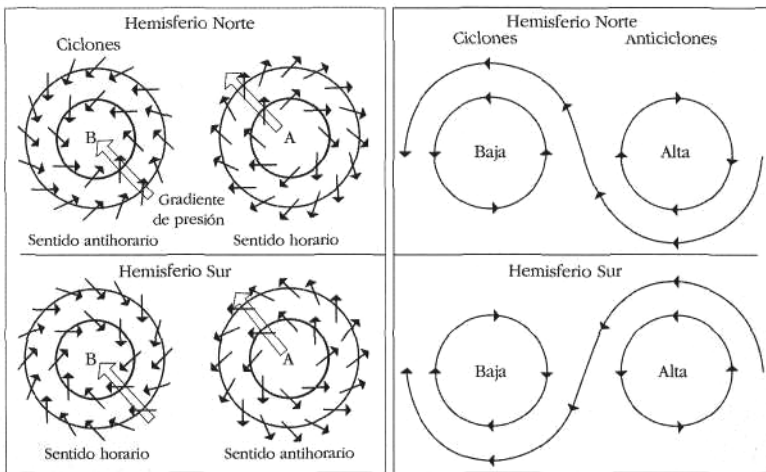


Figura 12. Ciclones y anticiclones.

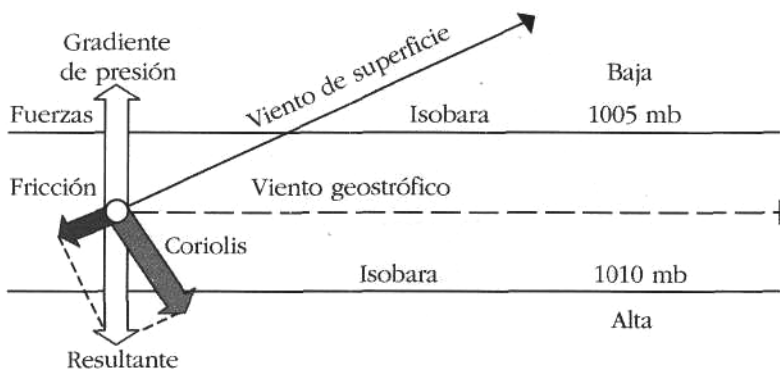
A los puntos de igual presión se les une con líneas isobáricas, formándose círculos concéntricos. Cuanto más juntas están las líneas isóbaras mayor será la velocidad del viento viajando de mayor a menor presión.

Siempre recordemos que los vientos no viajan directamente de un área de alta a una de baja, sino por la fuerza de coriolis van paralelos a estas líneas isobáricas girando en espiral.

Alrededor de los centros de alta y baja, el viento circula paralelo a las isóbaras formando enormes remolinos llamados *ciclones* y *anticiclones*. En un ciclón, los vientos giran en sentido antihorario, en el hemisferio norte, mientras que un anticiclón es un centro de alta presión (*H*) del cual salen vientos en espiral en sentido de las manecillas del reloj. Debido también al efecto coriolis, en el hemisferio sur ocurre lo contrario. Los ciclones en la troposfera ocasionan todo un rango de fenómenos, desde nubosidad y precipitación a intensas tormentas. No hay que confundir estos términos con huracanes o tormentas, que son fenómenos violentos asociados a los centros de baja presión.

Analizando las gráficas de líneas isobáricas o isóbaras se identifican características como:

- Alta: simbolizada con una *Ho A*; es un centro de alta rodeado por otros de menor presión, alta también es llamada *anticiclón*.
- Baja: simbolizada con una *Lo B*; define un centro de baja rodeado por otros de alta presión, este centro también se conoce como ciclón.
- Vaguada: las isóbaras de baja presión se elongan o estiran a lo largo de una línea marcada.
- Cresta: área alargada de alta presión con la mayor presión a lo largo de la línea marcada, penetra entre las isóbaras de baja presión.
- Col o collado: es una zona neutral entre montañas de alta presión y valles de baja.



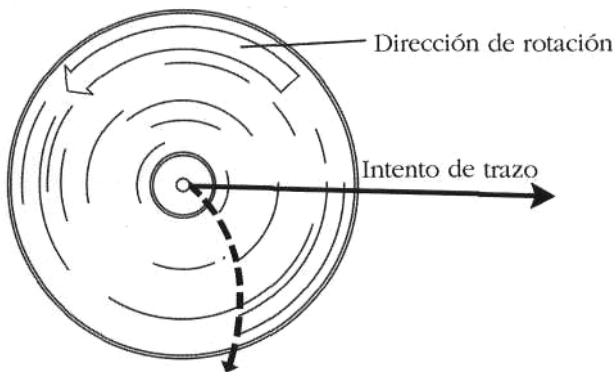
**Figura 13. Vectores del viento geostrófico o resultante final de todas las fuerzas que actúan en el aire en movimiento, generalmente resulta casi paralelo a las isóbaras.**

## LA EXTRAÑA FUERZA DE CORIOLIS

En aquéllos tiempos, todo artillero naval sabía que por bien que apuntara su cañón, existía una misteriosa fuerza que siempre hacía que sus disparos se desviarán a la derecha; ésto se tomaba como un hecho y el buen corsario experimentado en combate corregía apuntando un poco a la izquierda. Curiosamente, cuando empezaron las batallas en los mares del hemisferio sur, sucedía el fenómeno inverso; ahora la misteriosa fuerza desviaba las balas a la izquierda. Algo hacía que los objetos en movimiento tendieran a desviarse siempre a la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur.

La misteriosa fuerza fue denominada efecto de *coriolis*, por el francés que la estudió en el siglo xix, y ahora sabemos se produce por la rotación de la Tierra: nuestro planeta sigue rotando por debajo de un objeto mientras éste viaja por el aire.

Un sencillo experimento muestra el efecto coriolis: si giramos un disco o tornamesa en sentido contrario a las manecillas de un reloj (tal como lo hace el hemisferio norte) y tratamos de pintar una línea recta, el trazo siempre será desviado hacia la derecha, pues mientras se pinta, el disco sigue girando debajo de la pluma. Si imaginamos el centro del disco como al polo norte, es fácil darse cuenta qué ocurre con las balas, misiles y con el mismo viento, por supuesto.



Trazo registrado en el disco

Así que mientras la fuerza de gradiente de presión empuja el viento en una dirección, la fuerza de coriolis lo desvía hacia la derecha en el hemisferio norte y a la izquierda en el hemisferio sur. Tenemos entonces que los vientos se desplazan girando en grandes círculos desde *Ha L* y las nubes marcan esos enormes remolinos cuando se observan desde el espacio.

Existen otras fuerzas que también afectan al viento, tales como el rozamiento con las colinas, bosques o superficie del agua, las cuales lo afectan frenando algo su velocidad. A su vez, el viento al girar es influido por las fuerzas centrífuga y centrípeta que influyen en su dirección e intensidad final; a esta dirección final se le llama *viento geostrófico*, que es la resultante de la fuerza del gradiente horizontal de presión de la fuerza de coriolis, de la fuerza centrífuga, de la fuerza centrípeta y de la fuerza de fricción actuando en conjunto.

En el hemisferio norte, todo cuerpo que se desplaza en el aire sufre una desviación hacia la derecha, mientras que en el hemisferio sur lo hace a la izquierda. Esta desviación se debe a la rotación de la Tierra y es fácil de comprobar trazando una línea en un disco girando. La línea siempre será desviada a la derecha, sin importar el sentido del trazo mientras el disco gira en sentido opuesto a las manecillas del reloj, tal como lo hace el hemisferio norte si se ve desde el espacio.

## VIENTOS LEGENDARIOS

Hace un siglo no se conocía de la circulación global de los vientos, ni de ciclones o anticiclones, se pensaba que el estado del tiempo era más bien traído por el viento. Los vientos, según de donde soplaran podían traer nubes, lluvia, sequías, nieve o incluso estados de ánimo.

Con tales poderes, en cada región se le daba nombre propio a los vientos, quienes se convertían en importantes personajes causantes del bienestar o desgracia de los habitantes; sus nombres se hicieron célebres a través de leyendas. Los navegantes griegos creían, por ejemplo, que las tempestades se originaban en un país legendario: Eolia (al parecer la isla volcánica de Stromboli) y cuenta la Odisea que fueron esos vientos los que impulsaron a Ulises de aventura en aventura a través del Mediterráneo.

Los vientos son importantes y han afectado el curso de la historia. Tormentas repentinas en momentos críticos han destruido flotas enteras cambiando el curso de las guerras. La invasión China al Japón fue frus-

trada por un aire repentino que arrastró a los barcos invasores y por ese hecho al viento salvador del mar del Japón se le llamó Viento Sagrado o Kamikaze, nombre que después pondrían a sus pilotos suicidas.

En 1588 la armada invencible de España, construida con el oro y plata de la Nueva España, en camino para la invasión de las Islas Británicas fue dispersada por tormentas en el mar del Norte, frustró la invasión e inició la Era de Oro de Inglaterra.

El comprender el comportamiento de los vientos fue muy beneficioso para los descubrimientos de los navegantes del siglo xv y el ignorarlos fue un desastre, tal como pasó con la flota española de Indias al mando de Bobadilla quien zarpó de las Antillas, pese a las advertencias de Cristóbal Colón sobre un posible próximo huracán del Caribe, dicha flota nunca llegó a España.

En la Europa del Renacimiento algunos vientos eran famosos: el Bóreas que soplaba desde el norte, el Céfito del oeste, el Austro del sur y el Afeliotte del este. Estos aires eran el motor y las vías para la navegación, mantenidas como secretos de Estado por marinos, comerciantes y aventureros.

En las provincias campiranas de España: el Cierzo, el Ábrego, el Tramontano, el Gallego, el Levante o el Solano, eran sinónimo de fríos, lluvias o borrascas, alegrías, enfermedades o tristezas. Existían vientos como los Efesios que venían del norte y soplaban durante exactamente seis semanas, otros vientos eran caprichosos e impredecibles; bien podían volverse una tempestad o traer un cielo despejado.

En Francia: el Mistral, es un intenso viento frío y seco que sopla desde el norte a través de todo el valle del Ródano, trae un clima seco y polvoso, en Italia lo llaman Maestral o Maestro. En la región del Mediodía, al sur de Francia, se le da el nombre de Aután al viento tempestuoso de alta mar, proveniente del sur o del sureste con humedad y malestares. El Bóreas es un viento arrachado y frío del noroeste que golpea las costas del Adriático,- es típico en las regiones donde las montañas o las mesetas elevadas descienden abruptamente hacia el Mediterráneo. Vientos similares, soplando desde el continente, existen a lo largo de las costas septentrionales del mar Negro y en cada lugar aún tienen nombre propio.

En Norteamérica, el viento seco y caliente llamado Santa Ana (ninguna alusión al general) sopla hacia el Pacífico, proveniente de las planicies, atravesando la Sierra Nevada de California, y cuando aparece, pocos pilotos de los aviones monomotores de la región se atreven a elevarse.

Otros vientos son el Pampero de las llanuras costeras de Argentina y el Brick Fielders del sur de Australia, que es un viento fuerte proveniente del desierto interior y que toma su nombre de las tolvaneras de polvo de las ladrilleras cerca de Sydney.

En México, Fray Bernardino de Sahagún cuenta que los aztecas atribuían el origen de los vientos a Quetzalcóatl, los cuales provenían de las cuatro partes del mundo y acorde a sus características, algunos podían representar un peligro para las frágiles canoas y trajineras en los canales y lagos de Tenochtitlan. El viento del oriente era Tlalocáyotl, un viento suave que permitía la navegación. El que venía del norte era Mictlampa Ehécatl, que quiere decir 'viento del infierno' temido por su intensidad que cuando sopla nadie debía utilizar las canoas. El tercer viento sopla de occidente y era llamado Cihuatlampa Ehécatl o Cihuatecáyotl o 'viento que sopla donde habitan las mujeres', el cual aunque frío y veleidoso, no era violento. El cuarto viento Huitztlampa Ehécatl sopla del sur, del Huitznahua y su intensidad levantaba olas que lograban volcar las canoas o inundar las chinampas. Tal vez ahora el único recuerdo de estos legendarios aires son las tolvaneras en la zona del ex lago de Texcoco.

En el golfo de México, la mayor parte del tiempo soplan vientos del noroeste llamados *alisios* que traen humedad y lluvia, también ocurren ocasionales incursiones de frentes fríos del norte llamados obviamente *nortes*.

Las cordilleras como la Sierra Madre Oriental y Occidental y el eje neovolcánico desvían estos flujos en cada región. En el Istmo de Tehuantepec, por ejemplo, las masas de aire del golfo, aprisionadas entre las sierras, fluyen velozmente entre los valles y cañones en un efecto llamado *de venturi*. Volar a través de una cañada en Tehuantepec es una temeridad, un avión en estos vientos encañonados puede ser arrastrado como una hoja seca por este laberinto eólico.

Por otro lado, un proyecto sobre energías alternativas planea producir electricidad, instalando molinos generadores en algunas montañas para aprovechar la energía del acelerado viento del Istmo. En el norte del país, en el desierto, los vientos pueden ocasionar repentinas tolvaneras, tempestades de arena y humo de los incendios de herbazales que pueden reducir la visibilidad al mínimo.

## EFFECTOS EN LA FISIOLÓGÍA

El estado de la atmósfera curiosamente parece afectar a las personas de maneras sutiles, se sabe que existen individuos sensibles, tanto fisiológica como psicológicamente a cambios en la humedad o presión atmosférica.

Los vientos cálidos que descienden a los valles y costas como el Mistral en el sur de Francia o el Foehn en Alemania y Suiza, tradicionalmente son portadores de augurios y causantes de malos temperamentos.

Extensos estudios de compañías aseguradoras han encontrado que el Foehn con sus nevadas repentinas es una pesadilla para los alpinistas escalando la pared norte del Monte Eiger en Suiza, pero que además influye y sí existe un incremento en accidentes de trabajo y de tránsito, así como de la tasa de mortalidad e incidencia de suicidios. El aumento de accidentes y actos violentos asociados a este viento es conocido oficialmente como la 'enfermedad del Foehn', condición tomada en cuenta a la hora de evaluar un seguro.

En experimentos con personas sensibles en cámaras de presurización, éstas han manifestado síntomas similares de malestar y escasa coordinación, durante oscilaciones de la presión barométrica entre 3 y 5 milibares arriba de la media. Otra explicación a la enfermedad del Foehn, sostiene que este viento haría descender ozono desde la estratosfera, el cual causaría efectos nocivos en el aparato respiratorio de las personas, empero, aunque las estadísticas ya son válidas, el misterio no está resuelto.

## LOCALIZANDO LOS CENTROS DE PRESIÓN

En el campo, sin cartas meteorológicas a la mano, existen dos maneras empíricas para localizar un centro de baja presión en el hemisferio norte y anticipar hasta cierto punto la dirección del viento y las condiciones meteorológicas que uno podría encontrar:

- La primera se conoce como la Ley de Buy Ballot dice: *Cuando se tiene el viento en la espalda, la mano izquierda señala hacia el centro de baja presión (L) y la derecha hacia el centro de alta presión (H).*
- La segunda regla afirma: *cuando se vuela con el viento proveniente de la izquierda se estará en rumbo al centro de baja presión y por consiguiente hacia el mal tiempo.*

## LOCALIZANDO EL RUMBO DEL VIENTO EN UN AEROPUERTO

Para conocer de un vistazo la dirección del viento en los aeródromos se utiliza el cono de viento. Éste es una manga de nylon abierta en un anillo sobre un pivote: el viento hace girar el cono y la boca siempre apunta rumbo de donde viene el viento. La horizontalidad de la manga indica su velocidad. Estos conos de tela naranja se ven cerca de las pistas de aterrizaje o en las azoteas de edificios donde se posan helicópteros.

Otros mecanismos utilizados son la veleta y el anemómetro (un molinillo con cuatro copas que giran con el viento), ambos instrumentos transmiten sus datos a un indicador en la torre de control, donde el Controlador de Tránsito Aéreo (CTA) comunica la dirección e intensidad del viento a los aviones que se aproximan o despegan. Ejemplo, un viento del norte se reporta por radio de la siguiente manera: viento de los 360 con 10 nudos de velocidad. Cuando el reporte es por escrito simplemente se coloca 360/10 (véase apartado Reportes y pronósticos).

La dirección del viento es tan importante en las operaciones aeronáuticas, que se estudian antes las direcciones e intensidades de los vientos predominantes en el área, para determinar los rumbos en que serán construidas las pistas. Como los aviones vuelan por la velocidad a que el aire pasa por sus alas, tener viento de frente ayuda a su sustentación sin aumentar la velocidad respecto al suelo. Los números que aparecen en las cabeceras de todas las pistas de aterrizaje señalan el rumbo magnético al que apuntan. Por ejemplo, ambas pistas del aeropuerto Benito Juárez en la Ciudad de México, están numeradas con un 05, lo que quiere decir que apuntan hacia el rumbo de la brújula 052, o sea al noreste, el mismo rumbo del que habitualmente proviene el viento en el Valle de México.

Las pistas opuestas con el número 23 en sus cabeceras indican que éstas están dirigidas hacia los 232° (redondeando ese número) o sea al suroeste y se utilizan cuando el viento viene más o menos de esa dirección. Ocasionalmente, aparecen vientos cruzados que empujan al avión hacia un lado de la pista y hacen del aterrizaje una prueba de habilidad del piloto. Dependiendo del tipo de avión, si un viento cruzado, es digamos, de 35 nudos o más, el piloto deberá dirigirse a un aeropuerto alterno con vientos más favorables.

La intensidad del viento varía durante el día. Al amanecer casi siempre se encuentra en calma, es la hora en que generalmente vuelan los aviones ultraligeros y se elevan los globos. Hacia el mediodía, con el calentamiento de la superficie, empiezan la convección y advección, el viento se hace más fuerte, alcanzando su máxima velocidad y turbulencia hacia la tarde. Los vuelos de alumnos pilotos principiantes y los paseos aéreos se recomiendan en las horas de la mañana, para disfrutar de un vuelo suave y apacible.

## ESCALA DE VIENTO DE BEAUFORT

Esta escala se desarrolló en 1806 por F. Beaufort para describir la intensidad del viento y al igual que las escalas de terremotos, se basa en los efectos para determinar el grado. En la práctica las consecuencias varían según la región y sus protecciones naturales, infraestructura, rachas o duración de la intensidad.

ESCALA EN GRADOS NUMÉRICOS	VELOCIDAD DEL VIENTO EN NUDOS	EFFECTOS EN TIERRA	EFFECTOS EN EL AGUA
0	0	El humo se eleva verticalmente.	El espejo de agua brilla quieto.
1	1-3	El humo se inclina y las hojas se agitan.	Aparecen pequeñas ondas en la superficie.
2	4-7	Se siente el viento en la cara.	Ondas con pequeñas crestas.
3	7-10	Ramas se mueven, el viento levanta polvo.	Aparecen olas que rompen en sus crestas.
4	11-16	Ramas se agitan y se levanta basura.	Las olas que rompen son más frecuentes.
5	17-21	Se agitan y se elevan nubes de polvo.	Olas grandes, el viento arrastra espuma.

6	22-27	Las ramas se agitan y el viento suena.	Olas con crestas espumosas.
7	28-33	Árboles se balancean y es difícil caminar.	Olas liberan espuma al romper.
8	34-40	Pequeñas ramas de los árboles se rompen.	Olas grandes que rompen.
9	41-47	Las ramas secas se rompen.	Grandes olas que sobrepasan los muelles.
10	48-55	Los árboles caen.	Olas muy altas que invaden costa.
11	56-63	Daños en casas e infraestructuras.	Olas muy altas destruyen costa.
12	64 o más	Daños graves, destrucción general.	



# V

## CIRCULACIÓN GLOBAL Y EL SECRETO DE COLÓN



Al igual que ocurre con la brisa de mar por el calentamiento diferencial entre arena y agua, a nivel planetario existen masas de aire que suben y bajan dentro de la troposfera por una razón semejante.

Existe calentamiento diferencial entre las regiones cercanas a la línea del ecuador que reciben mayor cantidad de irradiación solar, y aquí las masas de aire calentado se elevan hasta la alta troposfera donde se extienden horizontalmente en la altura dirigiéndose hacia el norte y sur; al enfriarse descienden hacia la superficie desplazándose nuevamente al ecuador.

Visto de manera muy simplificada, este modelo forma un ciclo de circulación llamado *célula de Hadley*. Este modelo considera al aire girando en ciclos verticales como gigantescas bandas transportadoras, cuya parte superior lleva aire del ecuador hacia los polos para luego regresarlo por la superficie. Existen tres células de circulación para cada hemisferio: 1. Tropical, 2. Latitudes medias, 3. Polar (ver figura 15).

En la práctica, como la Tierra está rotando sobre su eje, estas bandas eólicas se distorsionan y se desvían hacia la derecha en el hemisferio norte, hasta que aproximadamente en los 30° de latitud el aire enfriado cae de la alta troposfera, como si fuera una cascada, creando puntos de alta presión en esas latitudes medias.

Estas zonas de alta presión son llamadas *anticiclones*. Desde estos anticiclones salen los vientos, girando también en sentido de las manecillas del reloj por la inflexible fuerza de coriolis que los desvían hacia la derecha. De este modo, los vientos aunque se originan en el Norte, parecen venir del Este. Éstos son los famosos y constantes vientos alisios, también llamados *trade winds*, por impulsar galeones y barcos mercantes a través del Atlántico.

A los 60° de latitud se encuentra otra región donde el aire se eleva, igualmente una porción se dirige al sur descendiendo también a los 30° de latitud y otra desciende sobre el polo. Forma los vientos del suroeste o Westerlies en Norteamérica. La porción que desciende sobre el polo crea los vientos polares del este que soplan gélidos por la tundra siberiana y canadiense (ver figuras 17 y 18).

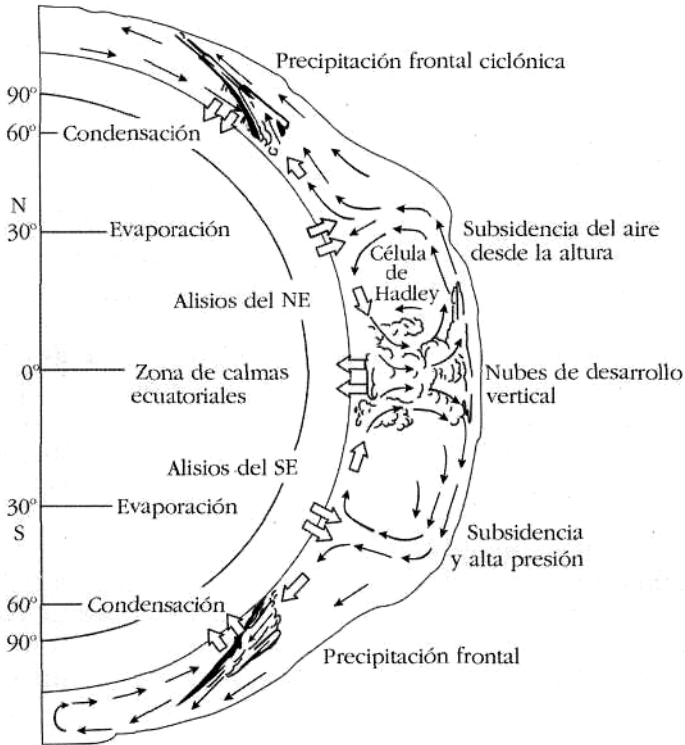


Figura 15. Célula de Hadley.

Con el calentamiento diferencial del aire en las zonas tropicales y templadas del planeta, se tiene un movimiento donde el aire asciende del ecuador y se mueve hacia los polos. Posteriormente este aire enfriado desciende y se mueve por la superficie nuevamente hacia el ecuador.

Tenemos así varias regiones de baja presión cerca de la línea ecuatorial, que elevan masas de aire y se expanden hacia los polos y regiones donde este aire desciende, creando centros de alta presión como a los 30° de latitud. Aproximadamente en la latitud de los paralelos de 60°, cerca de los

polos, también hay centros de baja que atraen el viento de la superficie y lo elevan para caer nuevamente en los polos, formando en ellos otras zonas de alta presión (ver figura 16).

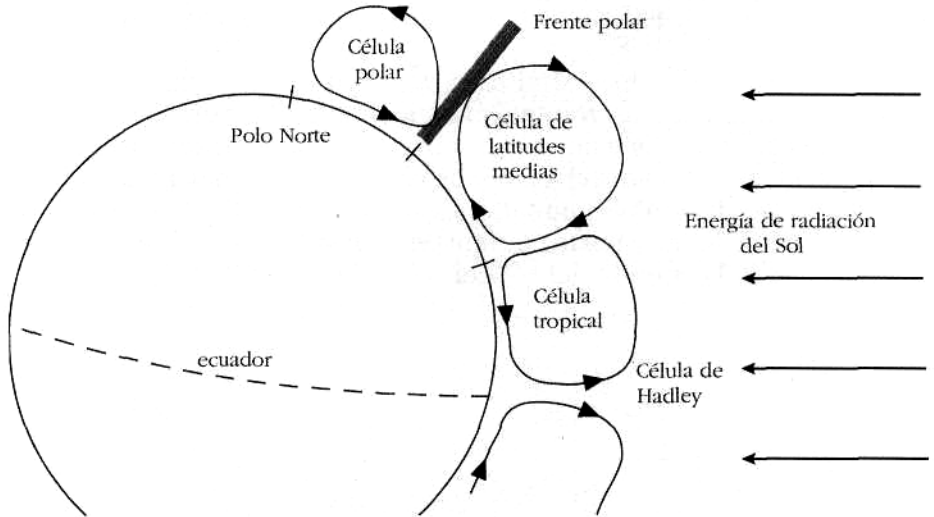


Figura 16. Células de circulación en diferentes latitudes.

## COLÓN Y EL ANTICICLÓN DE LAS AZORES

Desde la superficie es difícil visualizar la dinámica de la circulación atmosférica global de los vientos sin considerar el concepto de los ciclones y anticiclones. Sin embargo, Cristóbal Colón, antes que descubridor, fue un excelente navegante, probablemente en sus viajes hasta Inglaterra e Islandia entendió o intuyó, tal vez basándose en cartas vikingas o portuguesas que en el centro del misterioso mar u océano Atlántico existía un gran círculo de aires que permitía obtener vientos favorables, si primero se viajaba un poco hacia el Sur para venir a América y un poco hacia el Norte para regresar a Europa.

Este fue su gran secreto por el cual se atrevió a cruzar el océano, con vientos favorables del este, seguro que para regresar sólo tenía que dirigirse al Norte y encontrar vientos del oeste. Actualmente este gran remolino es llamado *anticiclón de las Azores*. Con vientos del este en el Sur y vientos soplando generalmente desde África del Norte hacia el Caribe y más al norte, desde Florida hacia Europa.

En la parte central del anticiclón se tiene un área sin vientos, conocida como *latitud de los caballos*, llamada así porque los colonos que venían a América, sus barcos eran atrapados debido a esta ausencia de vientos y tenían que sacrificar a sus caballos y demás animales por falta de agua o insuficiente comida, esperando alguna brisa que los sacara del apuro.

Existen varios anticiclones similares, tanto en el Atlántico como en el Pacífico, que impulsan la circulación atmosférica y las corrientes marinas en todos los océanos. Esta amplia circulación también transporta el calor, por lo que la zona ecuatorial es menos cálida, y las zonas polares menos frías de lo que debían ser; aunado a esto, el aire caliente que asciende desde la superficie transporta energía de manera convectiva a las alturas, redistribuyendo la energía del sol por todo el mundo.

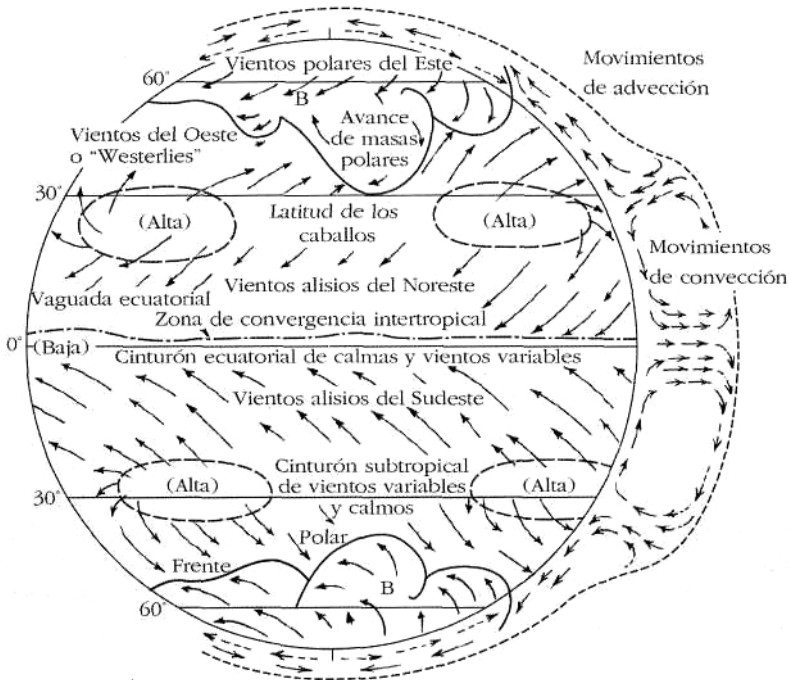


Figura 17. Circulación global a baja altura.

La rotación de la Tierra y la fuerza de coriolis hacen que los vientos se desplacen girando en patrones ciclónicos y anticiclónicos. Con los antici-

clones (aproximadamente en las latitudes de  $30^\circ$ ) el viento producido tendrá una dirección general desde el este, en el sur en los llamados *vientos alisios*; mientras que al norte de los anticiclones se tendrá una dirección general de vientos desde el suroeste conocidos como vientos del oeste y se indica con las flechas.

En el hemisferio sur ocurre lo mismo y los alisios soplan desde el sureste y convergen también hacia el ecuador para chocar con los alisios del hemisferio norte en una región conocida como Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Aquí la elevación del aire crea una zona de baja presión (L) llamada también *de doldrums* donde se forman abundantes y repentinas tormentas como veremos en posteriores capítulos.

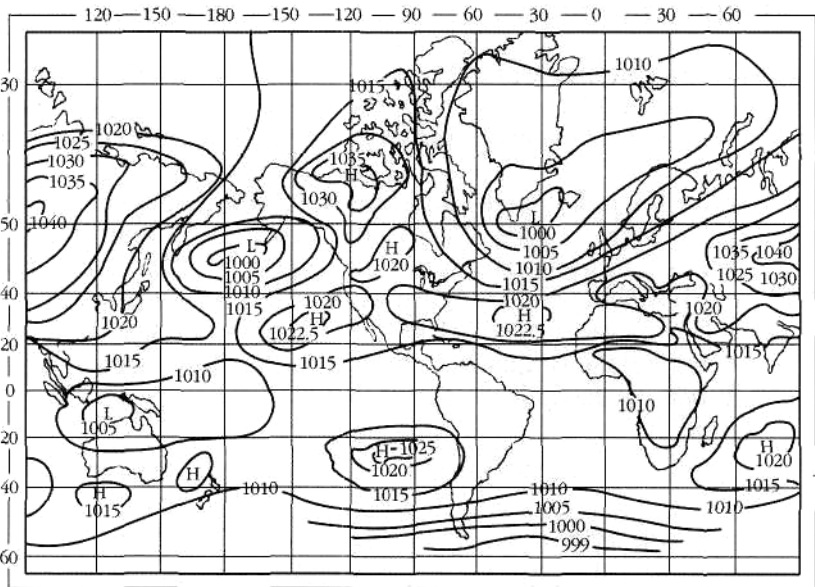


Figura 18. Centros de alta y baja presión.

El aire que asciende desde la zona ecuatorial se precipita alrededor de los  $30^\circ$  de latitud, formando amontonamientos o centros de alta presión, llamados anticiclones. En la figura 18, se muestran estos centros de alta presión (H) generadores de los vientos alisios y vientos del oeste, durante el verano en el hemisferio norte.

## NUDOS, MILLAS Y PIES

En la aeronáutica occidental generalmente se utilizan unidades del sistema métrico inglés: millas náuticas (NM) en distancias, nudos (KTS) en velocidad, pies (ft) y pulgadas de presión (PSI) en altitudes. Los instrumentos de vuelo, mapas y manuales de procedimiento u operación de los aviones, así como los medios de difusión meteorológica, utilizan este sistema.

Para definir un viento se dice que proviene del rumbo... con tantos nudos de intensidad. Un nudo (KT) es una medida de velocidad que equivale a una milla náutica por hora. A su vez una milla náutica (NM) equivale a 1 852 metros. Por ejemplo, a un viento del este se le podría definir como: de los 090 con 15, es decir, proviene del rumbo  $90^\circ$  (Este) con 15 nudos de velocidad.

El término nudo es náutico y proviene de cuando las carabelas y veleros medían su velocidad remolcando una cuerda con nudos y un peso al extremo, cuantos más nudos de la cuerda sobresalían del agua, más veloz se iba.

La milla náutica (NM) tiene mucho sentido como unidad de navegación pues equivale a un minuto de arco de latitud. Cada grado de latitud tiene 60 minutos o millas náuticas y si damos la vuelta al mundo atravesando los polos, la circunferencia polar de la Tierra de  $360^\circ$  equivaldría a 21 600 nm. En las cartas aeronáuticas WAC, 1:1 000 000 utilizadas en vuelos visuales; es fácil saber distancias ya que cada minuto de latitud marcado equivale a una milla náutica. Muestra de unidades de medidas:

UNIDADES DE MEDIDA	EQUIVALENCIAS	UTILIDAD	CONVERSIÓN
Milla náutica = Nautical Mile (NM)	Una milla náutica equivale a 1 852 m	Se utiliza en aeronáutica para expresar distancias	Si se desea convertir NM a kilómetros, se multiplica por 1 852
Nudo = Knot (Kts)	Un nudo equivale a una milla náutica por hora (1 nm/h)	Se utiliza para expresar velocidades	

Milla estatuto = Statute Mile (SM)	Una milla estatuto equivale a 1609m	La visibilidad en una pista de aterrizaje se expresa en SM.	
Pie = Foot (Ft)	Un pie equivale a 30.48 cm	Expresa altitudes, altura y elevaciones	Para convertir metros a pies se multiplica el número de metros por 3.28

FACTORES DE CONVERSIÓN	
1 metro (m) = 3.28 pies (ft) = 39.37 pulg. (in)	1 km <sup>2</sup> = 2553 acres = 1 000 000 m <sup>2</sup>
1 pie (ft) = 12 pulgadas (in) = 0.305 metros (m)	1 ft <sup>2</sup> = 0.093 m <sup>2</sup> = 144 in <sup>2</sup>
1 milla estatuto (sm) = 1609 m = 5280 pies (ft)	1 acre = 4047 m <sup>2</sup>
1 milla náutica (nm) = 1853 m = 6080 pies (ft)	1 litro = 0.26 US galón
1 m <sup>2</sup> «= 10.76 ft <sup>2</sup> = 1550 in <sup>2</sup>	1 US galón = 3.79 litros
1 hectoPascal (hPa) = 1 milibar (mb)	29.92 inHg = 1013.25 hPa = 760 mmHg
1 pulgada de mercurio (inHg) = 33.86 hPa	29.92 inHg = 14.7 lbs/in <sup>2</sup> = 1 atmósfera (atm)



# VI

EL AGUA EN LA ATMÓSFERA Y  
DE DÓNDE VIENEN LAS NUBES



Algo especial de la atmósfera terrestre es que contiene agua. Si no existiera vapor de agua en el aire, el cielo siempre estaría despejado, sin lluvias, nieblas, nieve, ni arco iris, con vientos secos soplando sobre enormes desiertos; exceptuando las ocasionales tormentas de arena, el cielo sería monótono y la meteorología se explicaría con los cinco capítulos anteriores.

Pero en este planeta existe el agua bastante de ella, en océanos, ríos, lagos, glaciares y nubes; en sus tres estados: líquido, hielo y gas o vapor. El agua en sí misma debe ser una de las sustancias más notables del universo, puede almacenar, transportar y liberar gran cantidad de energía.

Químicamente tiene propiedades extraordinarias, tanto que a base de agua se creó la vida y sus cambios de estado son en gran medida los que hacen a la atmósfera terrestre tan dinámica y diversa.

Para comprender por qué el agua es tan notable primero debemos conocerla a fondo, penetrar hasta su más íntima estructura molecular que es donde empiezan sus secretos.

## LAS MOLÉCULAS Y LOS TRES ESTADOS DE LA MATERIA

Todas las sustancias están hechas de átomos, unidos en moléculas, las cuales vibran en sus enlaces o se agitan moviéndose todo el tiempo. Esta agitación varía según la temperatura. Por ejemplo, en el hielo las moléculas de agua se encuentran casi quietas, ordenadas en una estructura cristalina, casi rígida. Pero cuando se les aplica calor, el ritmo y la ampli-

tud de vibración de éstas crece, hasta que al fin se separan y el cristal se deshace y las moléculas se deslizan entre sí, fluyendo como un líquido.

Diríamos que en un cuerpo sólido las moléculas están estructuradas como tabiques, mientras que en un líquido están sueltas rodando como canicas. Con aún más calor, las moléculas energizadas se agitan tan violentamente que salen disparadas y se entremezclan con las del aire y el líquido se evapora.

## ESTRUCTURA INTERNA

Una molécula de agua está formada por dos átomos de hidrógeno unidos a un átomo de oxígeno (de ahí su fórmula:  $H_2O$ ), tiene una forma que se parece algo así como la cabeza de Mickey Mouse, donde la cabeza sería el oxígeno y las orejas los átomos de hidrógeno, más pequeños. Esta peculiar estructura hace que la carga negativa propia de los átomos de hidrógeno se encuentre en un extremo, mientras que la carga positiva propia del oxígeno esté al lado opuesto.

Las cargas separadas polarizan a la molécula, que se convierte en un diminuto imán y por consiguiente todas se atraen unas a otras. Esta fuerza de atracción entre las moléculas del agua constituye las uniones intermoleculares llamadas enlaces o *puentes de hidrógeno*.

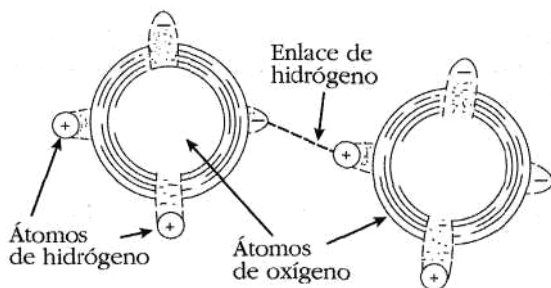


Figura 19. Las moléculas mágicas del agua.

Una molécula de agua está formada por un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno ( $H_2O$ ), tal estructura permite también una atracción del átomo de oxígeno con los hidrógenos de las moléculas vecinas. Esta atracción mutua entre todas las moléculas del agua produce la tensión superficial que permite la forma de las gotas.

Estos puentes de hidrógeno dan cohesión extra a la superficie del agua, que forma una capa resistente de moléculas enlazadas, que soporta a algunos insectos sobre ella sin que sus patas rompan esa membrana; incluso podemos colocar un alfiler sobre el agua sin que éste se hunda por la fuerte cohesión de las moléculas.

A la fuerza que mantiene la superficie del agua unida se le llama *tensión superficial*, y es lo que permite la forma de las gotas. Sin estos enlaces de hidrógeno entre la moléculas del  $H_2O$ , el hielo se fundiría a una temperatura de  $-100\text{ }^\circ\text{C}$  y el agua líquida se evaporaría burbujeando e hirviendo a los  $-80\text{ }^\circ\text{C}$ ; a las temperaturas normales de la Tierra no tendríamos océanos, sólo vapor.

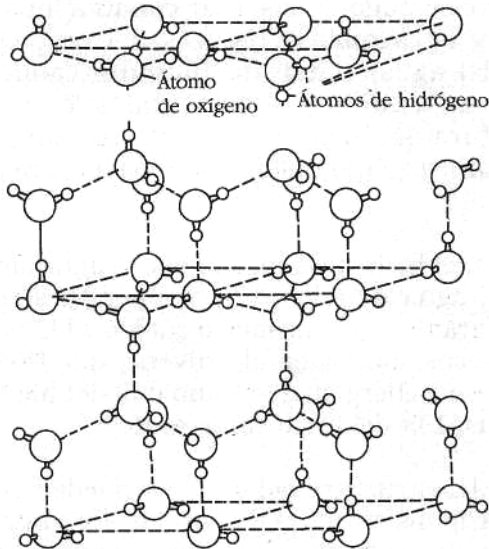


Figura 20. Estructura molecular del hielo.

Las moléculas de agua, por su estructura, a bajas temperaturas, se cristalizan como hielo, formando un vacío o cavidad en medio de ellas que permite que el hielo flote en el agua.

## FORMAS DEL AGUA

Comparadas con cualquier otra sustancia del universo las propiedades del agua parecen mágicas, tanto así, que es fundamental para algo tan extraordinario como la vida. En los rangos de temperatura de la Tierra (que bien podía llamarse planeta Agua), esta sustancia existe en suspires estados, cada uno con sus peculiaridades.

### *El hielo*

Como cualquier cristal, el hielo presenta una estructura molecular ordenada; cada molécula de H<sub>2</sub>O del hielo se encuentra enlazada a las otras y casi no puede moverse, ni fluir.

En los copos de nieve se pueden observar con una lupa, pequeños cristales puntiagudos y hexagonales, réplicas del ordenamiento interno de las moléculas del agua; como un diminuto calidoscopio natural, cada cristal hexagonal es diferente entre todos los miles que forman un copo. La estructura del hielo no es continua, sus moléculas no se amontonan como canicas, sino que forman estructuras huecas, con espacios internos.

Debido a estos vacíos, el hielo pesa menos que el agua (aproximadamente unos 0.92 g/cm<sup>3</sup>); el agua líquida a una temperatura similar tiene una densidad de casi un gramo por centímetro cúbico. El hielo flota en el agua siendo uno de los pocos sólidos en el universo que flotan en su propio líquido; la punta de un iceberg en el océano o la del hielo del refresco en un vaso sobresale casi 10% del resto sumergido.

En esos espacios en la estructura del hielo no pueden encajarse impurezas de tal suerte que la mayor parte de la sal es excluida al congelarse el agua de mar. El hielo de los témpanos es puro y puede ser tomado en las bebidas en los cruceros, si un barco se atreve a acercarse para recoger un poco y comprobarlo.

## *El líquido*

Un líquido fluye porque sus moléculas no están totalmente ligadas y pueden moverse libremente unas sobre otras. Pero cuando se funde el hielo en agua líquida, muchas de sus estructuras parecidas a cristales permanecen entre las moléculas de agua, la proporción de moléculas unidas como cristales disminuye a medida que aumenta la temperatura del agua líquida. Al beber agua que no ha sido hervida, ingerimos esos grupos similares a cristales y nadie sabe por qué es bueno para la salud. Quizá por eso el agua de montaña, derretida de los glaciares sabe bien y hace que uno se sienta saludable.

## *Gas o vapor*

Cuando el agua se evapora, sus moléculas agitadas llenas de energía pasan a formar parte de la mezcla de gases del aire y el vapor se hace invisible, el vapor de agua casi siempre está presente en el aire aunque no se le vea.

Al condensarse, por un descenso de la temperatura, se forman diminutas gotitas que se hacen visibles en forma de nubes o de niebla, peligrosas para pilotos y navegantes ya que pueden perder las referencias visuales.

Como la materia y la energía no se crea ni destruye, sólo se transforma; cuando el vapor se condensa, devuelve al aire circundante el calor que en un inicio se necesitó para evaporarlo. La condensación de vapor de agua en la atmósfera forma nubes y la formidable energía liberada calienta el aire y puede impulsar a tormentas y huracanes.

Al volar o navegar es primordial tener idea de la cantidad de vapor de agua invisible que se encuentra en el aire y qué tan probable es que se condense y formen nieblas o neblinas. Para ésto, en meteorología aeronáutica se deben conocer dos conceptos básicos: la humedad relativa y el punto de rocío.

## LA HUMEDAD RELATIVA

La cantidad de vapor de agua que puede incorporarse a una masa de aire depende de la temperatura, a más calor más vapor en el aire. La humedad

relativa es la cantidad (en porcentaje) de vapor de agua que contiene una masa de aire, respecto al máximo que podría contener a una temperatura determinada. Se dice que el aire se encuentra saturado cuando la humedad relativa es de 100% y ya no puede contener más vapor entre sus moléculas y este empieza a condensarse en diminutas gotitas que forman niebla y nubes. Cotidianamente en la regadera caliente saturamos el aire y el vapor se condensa en las superficies relativamente frías del espejo y ventanas.

Cuando la humedad relativa es menor a 100%, el aire está insaturado y el vapor es invisible. Un aire cálido puede contener bastante más vapor de agua disuelto que uno frío. Por ejemplo, en una mañana fría, a una temperatura digamos de 15 °C, se puede tener una humedad relativa de 70%; pero si más tarde la temperatura sube a 30 °C, con la misma cantidad de vapor, la humedad relativa bajaría 25% y tendríamos un aire seco. En cambio, si en la noche la temperatura descendiera a 8 °C, la humedad relativa sería 100%, y el vapor de agua empezaría a condensarse en forma de niebla o rocío sobre las hojas.

Si la temperatura bajara al punto de congelación, el rocío se cristalizaría como escarcha. Esto son las heladas, dañinas para los cultivos pues los cristales de hielo destruyen las células vegetales arruinando la planta.

## EL PUNTO DE ROCÍO

Técnicamente punto de rocío o dew point es la temperatura a la cual debe enfriarse el aire para que se sature de vapor y éste empiece a condensarse como niebla o cristales de hielo. Entre más se acerque la temperatura del aire al punto de rocío, mayor será la probabilidad de condensación, si la diferencia entre la temperatura y el punto de rocío es pequeña, podría pronosticarse niebla en la madrugada ya que la temperatura es baja justo antes de salir el sol.

En los reportes meteorológicos aeronáuticos se indican la temperatura del aire en la superficie y la temperatura de punto de rocío a fin de que el piloto pueda inferir qué tan probable es que el aire se enfríe hasta su saturación y ocurran nieblas o nubes.

## CALOR LATENTE: LA ENERGÍA ESCONDIDA

Recordemos otra vez: *La materia y la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma.* Cuando cualquier sustancia cambia del estado líquido a gas o de sólido a líquido, ocurre una liberación o almacenamiento de energía. Este principio se hace evidente en nosotros mismos, al sudar evaporamos agua disipando calor que se va junto con lo evaporado.

A esta energía se le llama *energía latente de evaporación*. Cuando el vapor del sudor -con nuestro calor perdido, incluido como latente-, se condensa nuevamente en la atmósfera, el calor latente se libera y habremos calentado a la distancia un poco el aire de alguna nube.

Todas las transformaciones del estado del agua van acompañadas de intercambios de calor, absorbido o liberado. La energía solar que se emplea en evaporar agua del océano es acumulada, transportada y liberada posteriormente en algún momento y en algún lugar. Sus efectos pueden sentirse a la distancia ¡y de qué manera...!

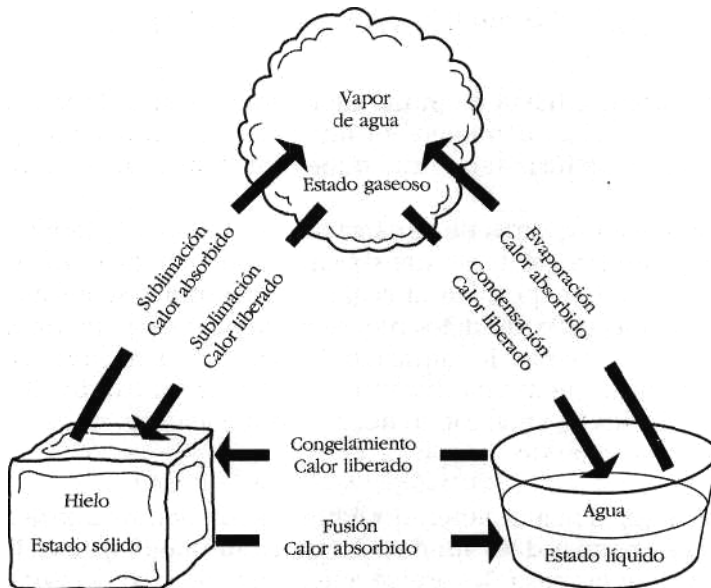


Figura 21. Cambios de estado del agua y calor latente.

El agua al evaporarse absorbe calor y al condensarse lo libera calentando la atmósfera o impulsando alguno de sus fenómenos. Las tormentas, los cumulonimbos o los huracanes, existen alimentándose de este tipo de energía y con ella mantienen sus corrientes ascendentes, relámpagos y vientos. Los huracanes existen mientras tengan una provisión de calor latente del vapor de agua debajo de ellos.

En las nubes la energía del calor latente de evaporación es liberada una y otra vez como veremos adelante, cuando el vapor se condensa, devuelve al aire el calor que se necesitó para evaporarlo y calienta la masa de aire que se eleva como globo. Igualmente al derretir hielo se absorbe calor el cual se almacena en el líquido como calor latente de fusión.

La energía de evaporación es mucha. Piensen cuánto tarda una olla en la estufa para hervir y toda esta energía se queda guardada en el vapor como calor latente. Por cada gramo de agua que se transforma en vapor se almacenan aproximadamente 600 calorías. Al condensarse nuevamente este gramo (unas tres gotas), las 600 calorías vuelven a ser calor sensible.

## CONDENSACIÓN Y NUBES

Al enfriarse un aire hasta su punto de rocío, su vapor de agua, hasta ese momento invisible, se condensa en miríadas de minúsculas gotitas que flotan suspendidas formando una nube o niebla si está pegada al suelo.

Pero para que estas gotitas de agua se formen necesitan también partículas de polvo, ceniza, etcétera, que sirvan como centros o núcleos de condensación, como el espejo en la regadera. Las microscópicas partículas atraen a las moléculas del agua reuniéndolas a su alrededor, billones de gotitas de 2 a 40 micras de diámetro flotan en el aire conformando una nube y cada gotita tiene una diminuta partícula dentro de ella. Si evaporamos agua de lluvia, en el fondo del recipiente estas partículas quedarán como un fino sedimento.

En la atmósfera, normalmente el enfriamiento del aire para la condensación o sublimación del vapor en cristales de hielo, es adiabático, esto quiere decir que la masa de aire se enfría por elevarse y expandirse, por eso las nubes tiene una base muy definida.

## LLUVIA Y PRECIPITACIÓN

Para que se precipiten las gotitas suspendidas en las corrientes de aire de una nube, primero tienen que crecer y aumentar de peso, de modo que la gravedad las atraiga y puedan caer. Las gotas pueden crecer de dos maneras:

- La primera sucede cuando la temperatura continúa descendiendo adiabáticamente y el vapor sigue condensándose sobre cada una de ellas aumentando su tamaño hasta hacerse suficientemente pesadas.
- La segunda es más rápida, la turbulencia dentro de la nube las hace chocar entre sí fusionándolas en gotas grandes y pesadas que se precipitan arrastrando a más gotas en su caída.

Se considera que para que ocurra este proceso de coalescencia de gotas y llueva, la nube debe ser suficientemente densa y al menos tener unos 4 000 pies de espesor. La lluvia es sólo una de las varias formas de precipitación, otras son: granizo, nieve, agua nieve, llovizna, cristales de hielo y prácticamente cualquier forma del agua que cae desde una nube; de ahí que también se les da el rimbombante nombre de *hidrometeoros*.

Si la temperatura es muy baja, como en la alta atmósfera, la condensación de vapor es directa a cristales de hielo, en un proceso llamado *sublimación*, y se forman diminutos cristales de hielo hexagonales que al aglomerarse en copos, se precipitan.

Al caer, si los copos atraviesan una capa de aire caliente, pueden fundirse y convertirse otra vez en lluvia. Por el contrario, si la lluvia atraviesa una capa de aire frío, las gotas pueden congelarse y caer en forma de bolitas de hielo.

En los países fríos también puede suceder que la lluvia atraviese una capa de aire muy frío y caiga como agua sobre-enfriada, debajo de 0 °C, que se congele al impactar algún objeto. Este fenómeno es sumamente destructivo ya que el hielo forma pesadas costras y carámbanos que se adhieren sobre árboles, cables y techos, rompiéndolos con el peso que acumulan.

En el conjunto de nubes de desarrollo vertical como el cúmulo o el cumulonimbo, ocurren procesos de precipitación más complejos. Los cristales de hielo que se forman en las partes altas de esas nubes se derriten como lluvia al llegar a las partes bajas, pero las intensas corrientes ascendentes

propias de tales nubes vuelven a elevar las gotas de lluvia nuevamente hasta el nivel de congelamiento donde se vuelve granizo.

Es posible que una misma gota haga varios viajes nube arriba si es atrapada en las corrientes ascendentes. El granizo crece de esta manera en capas sucesivas y puede alcanzar volúmenes tan grandes como una albóndiga o una pelota de golf. Si un avión se aventura a penetrar dentro de la nube de tormenta, estas bolas de granizo podrían impactar y dañar el fuselaje o abollar los bordes de las alas. En otras ocasiones el granizo es eyectado fuera de la nube por las corrientes de aire.

# VII

## INESTABILIDAD DEL AIRE Y LAS FORMAS DE LAS NUBES



Cuando un gas se expande, se enfría y absorbe calor. Cuando se comprime libera calor (ver leyes de los gases). Esto ocurre diariamente en nuestras cocinas: en la parte baja de todo refrigerador, una bomba eléctrica comprime un gas que luego es conducido hasta el congelador en la parte superior, donde se deja expandir en una red de tubos absorbiendo calor y enfriando el congelador.

El caso contrario es cuando se comprime un gas, sus moléculas agitadas chocan entre sí con mayor frecuencia y su temperatura aumenta. Al llenar aire a las llantas de un coche, éstas se entibian pues sus moléculas se amontonan chocando; y cuando se carga aire comprimido a un tanque de buceo, debe colocarse en un recipiente con agua porque se calienta bastante. Lo que sentimos como calor de un objeto solo son sus moléculas agitadas.

De modo análogo, en la atmósfera, cuando una masa de aire asciende y se expande baja su temperatura. Como sus moléculas se separan se siente una disminución de calor. Este cambio de la temperatura debido sólo al cambio de volumen, sin una liberación o absorción de calor externo, es llamado *cambio adiabático*.

El cambio adiabático o Standard Lapse Rate es la disminución promedio de la temperatura del aire con la altitud y es de aproximadamente 2 °C por cada 1 000 pies que asciende, esto varía en la realidad. Ejemplo: si consideramos un aire seco sin vapor de agua que libere calor, la disminución de su temperatura por cada 1 000 pies de ascenso es de aproximadamente 2 °C; esta disminución de la temperatura con la latitud es llamada *gradiente adiabático seco*. Pero como existe vapor de agua en el aire, el gradiente adiabático en realidad siempre es menor, ya que la conden-

sación del vapor libera el calor latente. Este gradiente modificado por el calor añadido de la condensación del vapor se llama *gradiente adiabático húmedo*.

Una masa de aire caliente que se eleva, se enfriará adiabáticamente hasta alcanzar la misma temperatura que el aire circundante y dejará de subir. Pero si le inyectamos calor latente liberado, la masa de aire podrá seguir subiendo, mientras se mantenga más caliente que el aire que la rodea. Este es el principio de los globos aerostáticos: sólo hay que calentar un poco de aire para que ascienda y uno subir con él, como lo descubrieron los primeros aeronautas que exploraron la atmósfera.

En el París de Luis XVI, los hermanos Montgolfier, dueños de una fábrica de papel, gustaban de elevar globos como los de papel de china de las fiestas pueblerinas. Ellos colocaban un globo abierto por debajo sobre una hoguera y esperaban que el *aeróstato*, como lo llamaban, se llenara de humo y se elevara. Se pensaba que el humo tenía una propiedad ascensional y sólo cuando ésta se agotaba descendía nuevamente a tierra.

Los globos aerostáticos se hicieron una moda en Europa y aconteció algo así como una carrera espacial, para ver quién ponía los primeros hombres en el aire. El éxito de los hermanos Montgolfier los llevó a desarrollar sus globos y en 1783 lanzaron a los primeros aeronautas de la historia: un gallo, un pato y una oveja. Esto tres tripulantes se elevaron una mañana de verano al cielo de Francia en su aeróstato y tras su heroica aventura explorando la atmósfera, regresaron sanos y salvos a tierra.

Ahora se sabe que no es el humo el que asciende, sino el aire que al calentarse, se expande y flota en el relativamente más frío y denso aire circundante. En los globos modernos, con la flama de una hornilla de gas se controla la fuerza ascensional. Si apagamos la hornilla, el aire caliente dentro del globo se empieza a enfriar y el aeróstato se queda suspendido hasta que el aire del interior alcanza la misma temperatura del aire exterior. Al no haber más fuerza ascensional, el peso de los tripulantes empuja a la aeronave otra vez hacia el suelo.

Un fenómeno similar ocurre con una masa de aire que se calienta por el suelo caldeado por el sol. Aplicando el principio de los globos aerostáticos, podemos entender la estabilidad o inestabilidad de las masas de aire. Así, por ejemplo, si tenemos un globo al nivel del mar a una temperatura de 31 °C y lo llevamos hasta 5 000 pies de altitud, el aire dentro se enfría adiabáticamente de acuerdo con el gradiente adiabático seco (-3 °C/1 000

pies), hasta los 16 °C. Ahora que el globo continúe subiendo, se quede estático o descienda, depende de la temperatura del aire circundante. Si éste es más frío, el globo ascenderá y si es más caliente, descenderá.

Lo mismo ocurre con una gran burbuja de aire. Cuando un aire saturado de humedad asciende, su vapor se condensa y conjuntamente se libera el calor latente. Esta liberación de calor es igual al mechero del globo y contrarresta el enfriamiento por la expansión del gas. La parcela de aire entonces, sigue subiendo, la masa de aire caliente sigue siendo más cálida y liviana, flotando dentro de un aire más frío y pesado.

Al elevarse y expandirse, el aire del globo se enfría hasta alcanzar igualdad con el aire circundante. Si a determinada altura su temperatura es mayor que la exterior seguirá elevándose; si es igual permanecerá estacionario, y si es menor descenderá. Esto mismo se aplica a una masa de aire y asimismo puede ser calentada desde adentro al igual que un mechero en el globo, cuando el agua al condensarse libera su calor latente almacenado desde que se evaporara horas o días atrás.

La forma de las nubes depende de la estabilidad del aire en el momento en que se forman, cuando ocurre el ascenso de la parcela de aire. Si éste es húmedo e inestable, continúa elevándose formando nubes como columnas de desarrollo vertical tipo cúmulo (Cu) y cumulonimbo (Cb). Las corrientes ascendentes dentro de estas nubes producen turbulencia, pero sólo hasta el nivel de las cúspides de las nubes, más arriba la turbulencia cesa y el vuelo sobre los cúmulos es apacible y calmo. La visibilidad mejora con el aire inestable, sea porque las ascendentes disipan la neblina o polvos, o porque las lluvias achubascadas arrastran el polvo del aire.

El cambio de temperatura varía con un saturado de humedad. Cuando un aire saturado asciende, parte del calor latente es liberado por condensación en el vapor de agua, contrarrestando el enfriamiento de la expansión, tal como si la hornilla de gas del globo se encendiera. Por tal razón, el gradiente adiabático húmedo se enfría más lentamente que el seco.

En un caso contrario se considera al aire estable cuando una burbuja que asciende tiende a permanecer a una altitud o incluso a descender como un globo cuyo aire ha sido enfriado. Al elevarse y condensarse la humedad dentro de una masa de aire estable, éste no continúa elevándose. Su nubosidad es horizontal y tiene forma de capa estratiforme.

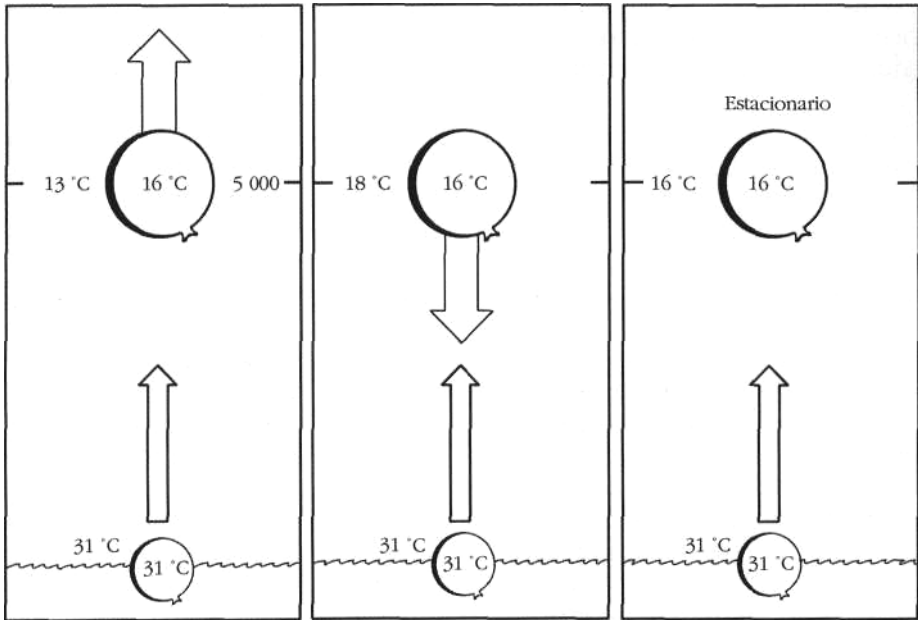


Figura 22. Globos.

Aunque en una atmósfera estable el vuelo es suave y nivelado, la visibilidad disminuye por la acumulación de bruma, humos o neblinas. En el centro de México, en verano, es común ver mañanas con brillantes cúmulos en un aire muy claro y despejado, lo cual indica inestabilidad de la atmósfera. Por el contrario, un paisaje brumoso, con ligeros cúmulos, indica estabilidad del aire durante los meses de invierno. Este tipo de coincidencia propicia el surgimiento de neblinas.

La figura 23, muestra la disminución de temperatura respecto a la altitud, el gradiente adiabático seco de la izquierda indica condiciones de aire estable, mientras que el de la derecha, con un gradiente adiabático húmedo, muestra condiciones de aire inestable. Aquí, al pasar el nivel de condensación, el calor latente proporcionará energía para un ascenso continuo de la masa de aire húmedo.

Una nube se forma cuando el aire se enfría hasta su punto de rocío y el vapor de agua sobrante se condensa en gotitas o cristales de hielo. Esto puede ocurrir porque el aire se enfría adiabáticamente al ascender y expandirse o cuando éste fluye sobre una región fría.

Como el calor puede definirse como energía cinética molecular, la temperatura de un gas equivale al número y energía con que sus moléculas golpean al termómetro. Cuando una parcela de aire asciende se expande ya que disminuye la presión, durante el tiempo en que desciende el volumen disminuye por presión, mientras que se expande la temperatura baja y entre tanto que el aire se comprime se calienta.

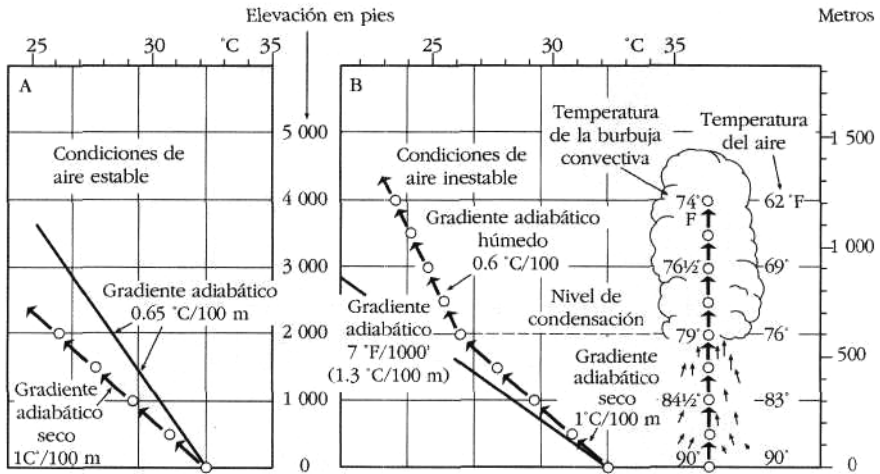


Figura 23. Estabilidad e inestabilidad.

## INVERSIÓN TÉRMICA

Se dice que ocurre una inversión cuando la temperatura, en vez de descender con la altura, de acuerdo con un gradiente adiabático, más bien se incrementa con la altura. Esta inversión del enfriamiento produce una capa de estabilidad que detiene a las corrientes convectivas que usualmente arrastran lejos a las partículas suspendidas, aclarando el aire. Cuando estas corrientes encuentran una capa de aire caliente, dejan de ascender.

Al condensarse las minúsculas gotitas, el calor latente liberado calienta al aire circundante, el cual asciende como si fuera un globo con el mechero encendido. El aire húmedo al ascender nuevamente se enfría adiabáticamente y condensa más gotas, ocurre así una reacción en cadena que moldea las condensaciones sucesivas en los típicos grumos algodonosos

de las nubes. Cada grupo es llamado *celda de convección*. En la figura 24, se muestran los cambios adiabáticos de temperatura en una masa de aire ascendente. Nótese donde el punto de rocío se iguala con el gradiente adiabático y comienza la condensación.

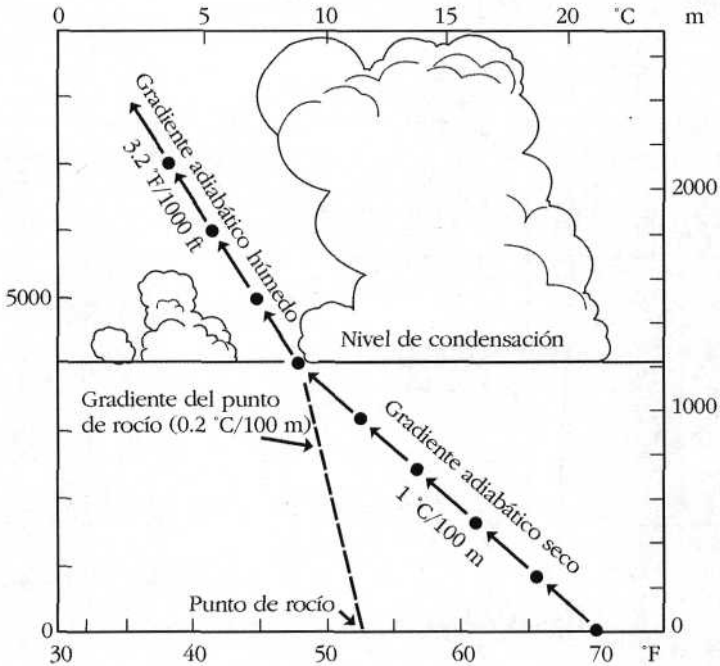


Figura 24. ¿Por qué las nubes tienen esa forma?

El aire se encuentra atrapado y entonces el humo, polvo o contaminación permanecen sobre un área determinada. Estas partículas sólidas oscurecen la visibilidad conformando la bruma, humo o smog y pueden servir a su vez como núcleos de condensación ocasionando nieblas. La visibilidad disminuye bastante, aunque no haya nubes en el cielo. Las inversiones térmicas también suceden por el enfriamiento del aire que entra en contacto con una superficie fría, naciéndose en comparación, de menor temperatura que el aire arriba de él.

## NUBES

Las nubes adquieren significado según la imaginación de quien las contempla. Las formas y colores que vemos han sido los mismos desde hace millones de años y según la época y circunstancias se les ha dado un significado diferente. Para los primeros observadores humanos fueron simples señales de lluvia o cambios de clima.

Nubes de diversas formas deben haber evocado formas de dioses, ovejas, dragones o mamuts; con el tiempo, sin embargo se habrían empezado a asociar con las condiciones del cielo y cada pueblo debe haber desarrollado una meteorología empírica, intentando pronosticar lluvias o heladas de acuerdo con la forma o tamaño de las nubes, según sus experiencias.

En Inglaterra, a principios del siglo xix, el científico Luke Howard, siguiendo la tendencia de la época de clasificar especies de animales y vegetales, clasificó a las nubes dándoles nombres latinos según su forma o carácter aquéllas que lucían amontonadas como motas de algodón las llamó *cúmulos*, a las planas y extensas como capas las llamó *estratos* y las que producen lluvia llevan el sufijo o prefijo *nimbos*.

Estas nomenclaturas siguen aún vigentes y a toda nube con apariencia amontonada como algodón se le denomina *cumuliforme*, así como a toda capa extensa de nubes se le llama *estrato*. A veces se forman varias capas sucesivas de nubes de diferentes características.

## TIPOS DE NUBES

En meteorología aeronáutica se clasifica a las nubes de acuerdo con la altura donde se forman, así como por la manera de su crecimiento. Con este criterio se dividen en cuatro grupos básicos: nubes bajas, nubes medias, nubes altas y nubes de desarrollo vertical.

1. Nubes bajas: se forman desde cerca del suelo, hasta unos 6 500 pies (2 000 m). Se conforman enteramente por billones de gotitas de agua, aunque pueden contenerla sobre enfriada en climas fríos, la cual puede formar hielo en las alas de los aviones que lleguen a atravesarlas. En este grupo tenemos a:

- a. Estratos o stratus (S): son extensas capas planas que cubren la mayor parte del cielo. Ocurren cuando grandes áreas de aire húmedo se elevan suavemente hasta el nivel de condensación en una atmósfera estable; por lo que se relacionan con estabilidad atmosférica, no se asocian comúnmente con tormentas. Producen llovizna continua o nieve ligera cuando el lugar a precipitación es llamada *nimboestratos*. En los mapas meteorológicos este tipo de nubes se abrevian con una (S) y volar sobre ellas se asemeja a estar sobre un mar blanco en el que ocasionalmente asoma la cima de una montaña como si fuera una isla.
  - b. Estratocúmulos o stratocumulus (Sc): aparecen entre 2 000 y 6 000 pies e indican humedad en los niveles bajos de la troposfera. Pueden tener una apariencia oscura y cubren grandes áreas del cielo, pero pocas veces tienen un espesor mayor a 3 000 pies, por lo que sólo producen una llovizna continua. Aparecen cuando masas de aire húmedo son elevadas por un frente o por el terreno.
  - c. Nimboestratos o nimbostratus (Ns): el nombre nimbo significa que acarrearán lluvias continuas por largo tiempo y su espesor es de más de 4 000 pies, el cielo se ve muy oscurecido debajo de ellas. Cuando se tiene una lluvia sostenida bajo un cielo oscuro de nubes grises se está bajo una capa de nimboestratos.
2. Nubes medias: en general estas nubes tienen su base desde los 6 600 a los 24 000 pies (de 2 a 7 km), e indican humedad a esos niveles. Si existe inestabilidad se forman altocúmulos y altoestratos si la capa de aire es estable:
- a. Altocúmulo o altocumulus (Ac): forman curiosos patrones en el cielo que parecen tubos, bandas o cuadrículas. Sus capas tienen un espesor de 3 000 pies y están compuestas principalmente de pequeñas gotas de agua posiblemente sobre enfriada, por lo que pueden ocasionar formación de hielo en las alas de una aeronave. Algunas tienen forma de rollos largos y se llaman *altocúmulos undulatus*.
  - b. Altoestratos o altostratus (As): su composición de cristales de hielo hace que la mayoría de los altoestratos se vean difusos, porque la concentración de cristales de hielo en las nubes es de una centésima a una milésima parte la densidad con que normalmente se juntan las gotitas de agua de nubes bajas, de ahí que éstas parecen tener líneas definidas, mientras que las hechas de cristales de hielo parecen fibrosas o borrosas. Aunque los altoestratos tienen un espesor casi siempre mayor a 6 000 pies, el sol puede verse a través de ellos; estas nubes son indicación de lluvia, pues anuncian que

una masa de aire que se eleva, posiblemente a causa de un frente, condensando su humedad.

- c. **Alto cúmulos lenticulares (ACSC):** SU nombre se debe a su forma oblonga o lenticular, se forman cuando el viento pasa a través de una sierra o cadena montañosa formando una perturbación en el flujo u onda de montaña, la cual crea este tipo de nubes en su parte alta. Su persistencia y peculiar forma ha provocado que sean confundidas con naves o discos voladores, especialmente cuando son iluminadas por el sol poniente al atardecer.
3. **Nubes altas:** se forman en condiciones de aire estable y están compuestas de cristales de hielo, ya que sus bases empiezan arriba de los 20 000 pies arriba del nivel de congelación. Rara vez implican turbulencia o condiciones de engelamiento en las alas, ya que sus cristales de hielo se encuentran muy separados y no se adhieren. Existen tres clases básicas de nubes altas:
- a. **Cirros (Ci):** tienen forma de finas hebras curvadas, como rizos, debido a que sus cristales de hielo se precipitan y son arrastrados por turbulencias en la altura. Generalmente aparecen arriba de 30 000 pies. Debido a su altitud brillan con gran belleza, aún después de la puesta y antes de su salida del sol, exhibiendo colores dorados o naranja intenso sobre el fondo violeta del cielo.
  - b. **Cirroestratos o cirrostratus (Cs):** se presentan en capas y aunque éstas pueden ser muy gruesas, son muy tenues. Estos estratos son los que forman halos, alrededor del Sol o la Luna. Su contenido de humedad es muy bajo y no representan riesgo al volar entre ellas, aunque hacerlo es espectacular pues al atravesarlos verticalmente pareciera estar sobre un tenue y enorme océano.
  - c. **Cirrocúmulos o cirrocumulus (Ce):** semejan pequeñas y lejanas motas de algodón muy en lo alto y se forman por corrientes convectivas a gran altura, pudiendo indicar una ligera turbulencia a esos niveles. Muchas veces las contrails o estelas de condensación dejadas por los motores de los jets, aportan suficiente humedad a la alta troposfera para propiciar la formación de estas nubes.
4. **Nubes de desarrollo vertical:** estas nubes en forma de torres algodonosas se forman en condiciones de inestabilidad atmosférica, crecen rápidamente en forma vertical y atraviesan varias altitudes, son las llamadas:
- a. **Cúmulo (Cu).**
  - b. **Cumulonimbo (Cb).**

Sus bases se encuentran de 500 a 10 000 pies sobre el nivel del suelo, pero sus cúspides pueden llegar a los 60 000 pies, hasta la tropopausa, donde se extienden horizontalmente (ver fotografías).

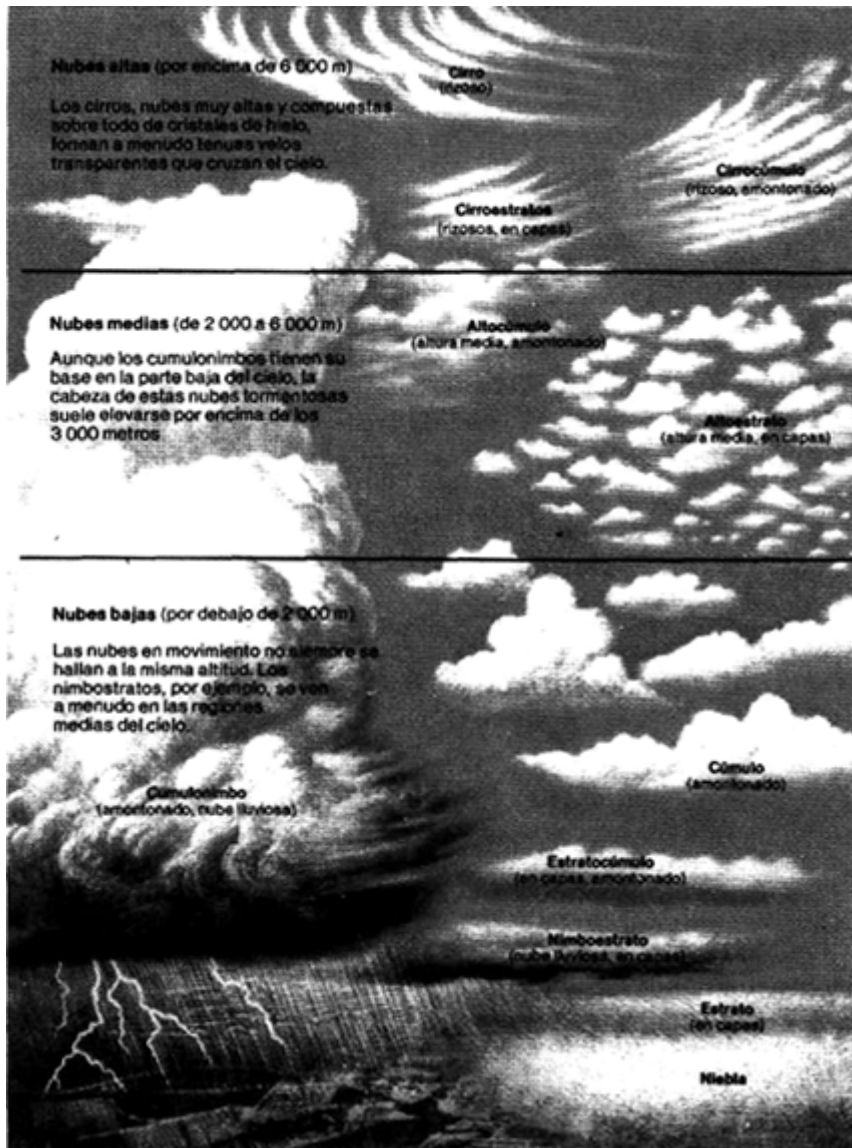


Figura 25. Tipos de nubes.

## LOS TERRIBLES CUMULONIMBOS (Cb 's)

Si hay una nube que todo piloto debe evitar, son los cumulonimbos (Cb's). En el interior de estas gigantes máquinas de condensación y liberación de calor latente pueden encontrarse prácticamente todos los peligros que la meteorología puede ofrecer, veremos algunos:

- Turbulencia extrema que sacude al avión.
- Hielo que se adhiere en las alas.
- Visibilidad nula.
- Rayos y relámpagos.
- Granizo de gran tamaño.

Técnicamente un cumulonimbo o (Cb), como se le conoce en argot aeronáutico, es una masa de aire húmedo muy inestable, es el Tyrannosaurus rex de las nubes. Un relato cuenta que unos planeadores al acercarse a una nube de éstas, fueron succionados por las violentas corrientes ascendentes, la turbulencia hizo incontrollables a los ligeros aeroplanos, que como hojas en un remolino se bamboleaban entre el granizo, lluvia, truenos y relámpagos. Los pasmados pilotos saltaron en paracaídas, pero las corrientes ascendentes no los dejaron bajar. Al final del ciclo de vida del Cb varios pilotos habían muerto y los sobrevivientes cayeron muy lejos, estaban con sus paracaídas rasgados, semicongelados y sangrando, heridos por el granizo.

Además de la humedad e inestabilidad de la masa de aire para formar un Cb, debe existir un primer impulso hacia arriba. Este empuje ascensional puede deberse a convección por calentamiento o porque el viento empuja a la masa de aire inestable ladera arriba de las montañas.

### *Nacimiento o etapa de cúmulo*

Un cumulonimbo (Cb) nace siempre como un blanco y bello cúmulo (Cu). Deben presentarse, sin embargo, tres factores para que esta nube se desarrolle en un violento cumulonimbo: Aire húmedo, Aire inestable, y Un impulso ascendente inicial.

Tenemos que una vez que se inicia el ascenso, el vapor empieza a condensarse, esta condensación libera el calor latente y un consecuente ascenso y nuevamente condensación. Esta reacción en cadena hace desarrollar rápidamente a la nube en grumos sucesivos que se ven como repollos, mien-

tras que violentas corrientes ascendentes a más de 3 000 pies por minuto serpentean hacia arriba por toda la nube.

El ciclo se repite y la nube crece como una torre. Una intensa condensación aglutina gotas y granizo con cristales de hielo en las partes superiores. Arriba del nivel de congelamiento del aire puede existir agua líquida, pero está sobre enfriada y se congelará sobre las superficies de una aeronave si pasa por allí.

El granizo o lluvia que caen de las partes altas de la nube son continuamente arrastrados hacia arriba por las ascendentes y el agua sobre enfriada forma nuevas capas de hielo sobre el granizo haciéndolo crecer. Si se corta un granizo por la mitad, antes que se derrita, se observan estas capas concéntricas como cascaras de sucesivos viajes en las entrañas del cumulonimbo.

### *Madurez*

Cuando las gotas mayores y el granizo al fin empiezan a precipitarse y la lluvia llega al suelo, se dice que la nube ha entrado en la etapa de madurez. El aire es empujado y arrastrado hacia abajo por la precipitación, ahora en bruscas corrientes descendentes y de lluvia que son observables desde lejos como una sombra bajando hacia el suelo. En la misma cúspide de la nube se forma una extraña capa tenue de cristales de hielo llamada *pilleus*, la cual cubre la cima como un velo.

### *Disipación*

Con la precipitación, las corrientes descendentes se generalizan por toda la gran nube y poco a poco disminuyen de intensidad, agotando al Cb y disipándolo; al final la base se ve como deshilachada o fragmentada por estas corrientes. El sol brilla entre estos fragmentos de nube y a veces después de la tormenta aparece un arco iris.

En los trópicos los cumulonimbos pueden crecer hasta unos 20 kilómetros de altitud (unos 67 mil pies) con sus cúspides atravesando la tropopausa y llegando hasta la estratosfera, sus bases cubren áreas hasta de 30 millas de diámetro.

Los cumulonimbos pueden aparecer en 'manadas' o más técnicamente: líneas de turbonada. Éstas son murallas nubosas de muchos Cb's, muy difíciles de franquear por aviones pequeños. En México el aire húmedo

del Golfo y del Pacífico forman líneas sucesivas de Cb sobre las serranías en ambas costas.

Durante el verano, los vuelos por la costa a baja altura atravesando la sierra, son riesgosos al encontrarse verdaderas murallas de líneas de turbonada. Un avión debe desviar su rumbo para evitar atravesar este tipo de nubes, sin embargo en ocasiones, sea porque se vuela de noche o porque se hallan escondidas o incrustadas entre otras capas de nubes, éstas no pueden verse. Al entrar a un Cb, todo se oscurece, pues la altura de kilómetros de nube no deja pasar mucha luz, la turbulencia sacude y arrastra al avión y el granizo golpea el fuselaje, las alas y los nervios. Cuando el granizo es de gran tamaño golpea con tal fuerza que abolla los bordes de ataque de las alas o desprende la pintura. Los rayos aparecen al mismo tiempo que los truenos y lo hacen tan cerca, que huele a cable quemado.

Los radares meteorológicos instalados en las cabinas, tienen como función principal localizar y ver en el interior de nubes tipo cúmulos y cumulonimbos. Las ondas Ultra Alta Frecuencia (UHF) del radar están ajustadas para detectar gotas de agua y granizo, considerando que cuando éstas se presentan, el Cb está en su etapa más turbulenta y peligrosa. En la pantalla del radar los ecos de lluvia se muestran verdes, mientras que las áreas con granizo se ven como manchas amarillas con centros de color rojo o magenta. Cuando se tienen enfrente, el piloto, según procedimientos establecidos, debe desviarse de su ruta y evitarlos al menos por 20 millas de distancia, para después volver a su ruta.

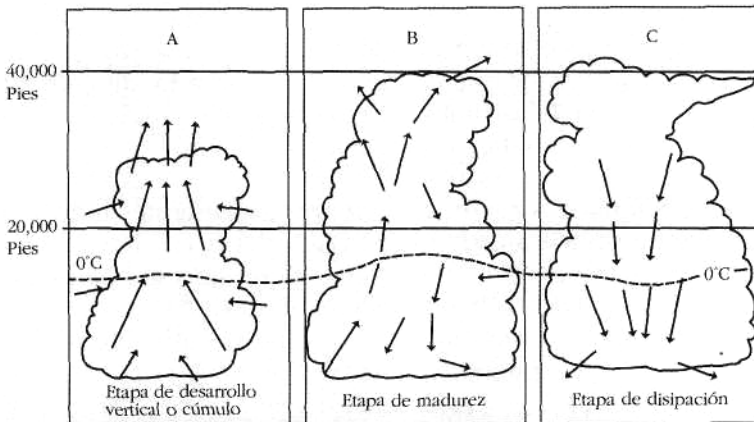


Figura 26. Cumulonimbos: nacimiento, madurez y disipación.

A pesar de todo, los cumulonimbos, como la mayoría de los fenómenos atmosféricos, resultan ser más beneficiosos que dañinos. La mayoría del riego por lluvia en el mundo es producido por los feroces pero fecundos Cb's y sin ellos millones de personas morirían de hambre, bosques y selvas desaparecerían, debemos pues soportarlos.

Los cumulonimbos (Cb's) empiezan siendo simples cúmulos. Inician su desarrollo vertical en un aire inestable y húmedo, dentro de la nube se condensa el vapor de agua, liberando el calor latente que produce un nuevo ascenso del aire y una subsiguiente condensación, formando lo que se llama una *célula de convección*. Miles de estas células convectivas dan a las nubes la apariencia de montículos algodonosos o de coliflores.

## CARÁCTER DE LA PRECIPITACIÓN

La precipitación varía y existen grados por su intensidad y frecuencia, así tenemos:

- Continua: su intensidad aumenta o disminuye gradualmente, pero su duración es superior a una hora.
- Intermitente: cuando se interrumpe y recomienza cuando menos una vez en un lapso de una hora.
- Achubascado: comienza y termina súbitamente y su intensidad varía rápidamente en Cb y nimbostratos.

En un corte esquemático de un cumulonimbo se observa su estructura, en la figura 27, observamos que el viento desplaza a la nube de izquierda a derecha. Arriba se ve la formación del yunque o cúspide de cristales de hielo, extendiéndose sobre la tropopausa.

En el interior de la nube, violentas corrientes ascendentes mantienen suspendido al granizo que en cada viaje arriba del nivel de congelación, se cubre de capas sucesivas de hielo. La fuerza de las corrientes dentro de la nube es tal que puede salir expulsado fuera de la nube. También las corrientes crean energías estáticas que cargan negativamente la base de la nube. La precipitación puede formar un tipo de corriente descendente, violenta y masiva llamada *microburst*, al llegar a tierra levantan polvo. En las cercanías se presenta cizallamiento o cambios bruscos de dirección del viento.

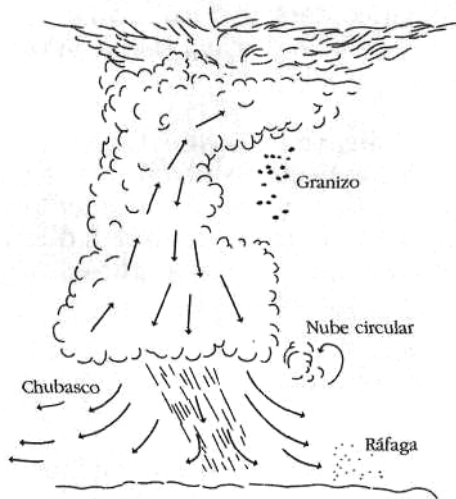


Figura 27. Nube cumulonimbo.

## PELIGROS DE LA PRECIPITACIÓN

Con los instrumentos disponibles en la actualidad volar entre la lluvia no representa inconveniente. Al aterrizar, sin embargo, además de la visibilidad restringida, la lluvia causa charcos en la pista que pueden hacer difícil el frenado de un avión de 50 toneladas tocando una pista resbalosa a 125 nudos (230 km/h) y que sólo cuenta con tres puntos de apoyo para detenerse.

Es obligación de la torre de control indicar a los pilotos que se aproximan, como debe esperar que sea el frenado en la pista bajo la lluvia, las condiciones de frenado pueden ser: 1. Bueno, 2. Medio, 3. Pobre.

Según lo reportado por otros pilotos. Algunos accidentes en los que el avión se ha despistado se deben a las malas condiciones de frenado, las cuales fueron subestimadas.

Otro inconveniente asociado con la lluvia y el encharcamiento en la pista es el acuaplaneo, donde debido a la velocidad las llantas de la aeronave realmente no hacen contacto con la pista sino que se deslizan sobre

el agua encharcada, dificultando el control. Para prevenir este problema existe el sistema automático de Antiskid, similar al frenado ABS de los coches, el cual regula el frenado de cada rueda, al comparar automáticamente sus velocidades de giro.

Una técnica segura es el aterrizaje positivo, donde el piloto no trata de lograr un contacto suave con la pista sino que busca más bien el toque rápido, penetrando los charcos, siempre en el primer tercio de la pista, para tener espacio suficiente para frenado y control. A diferencia de la creencia popular, un aterrizaje suave no es el más seguro.

## FORMACIÓN DE RAYOS

Conforme un cumulonimbo crece verticalmente, ocurre una separación de las cargas eléctricas en el interior. Exactamente cómo sucede es aún un misterio, aunque existen varias teorías:

- Una propone que cuando la nube se desarrolla llegando más arriba del nivel de congelamiento, las gotas de agua empiezan a congelarse y los iones con carga positiva fluyen a sus capas exteriores, esto produce en cada una de las gotas, una corteza exterior positivamente cargada y una parte central con carga negativa. Al congelarse el interior, se rompe la capa exterior y estos fragmentos con cargas positivas son arrastrados hacia arriba de la nube. Las cargas negativas dentro del granizo, o las gotas, se precipitan a las partes bajas de la nube haciendo que la zona superior tenga una carga neta positiva, mientras que la inferior una negativa. Esta polarización aumenta cada vez más hasta que se hace inminente una descarga, que ocurre en forma de relámpago.
- Otra teoría más simplista, afirma que las rápidas corrientes ascendentes y descendentes dentro de la nube, frotan el aire y las gotas, formando cargas que se polarizan arriba y abajo.

Un rayo entonces: es la chispa de descarga eléctrica que salta a otra nube o al suelo, cuando la diferencia de carga o voltaje entre ambos llega a ser lo suficientemente intensa.

En millonésimas de segundo, el rayo desciende de la nube formando un conducto por donde los electrones de la carga negativa empiezan a bajar hacia el suelo. Justo antes de llegar a la superficie, un flujo positivo se eleva, iniciando el balance de cargas entre nube y suelo. El relámpago inicial

es seguido por tres o cuatro más que van y vienen por la misma senda durante medio segundo, por eso se ve al rayo como reverberando, subiendo y bajando electrones hasta que las cargas al fin se equilibran.

La corriente en el relámpago puede alcanzar 10 000 amperes y el aire por el que pasa es calentado a más de 6 000 °C. Este calor origina una dilatación violenta y explosiva en las moléculas del aire, lo que produce las potentes ondas de sonido que escuchamos como trueno. Se puede estimar la distancia del rayo a nuestra posición, multiplicando desde que aparece el relámpago por 360 metros por segundo, que es la velocidad del sonido. Ejemplo: si vemos un relámpago y contamos tres segundos hasta escuchar el trueno, ese rayo habrá ocurrido a  $360 \times 3$ , es decir a 1 080 metros de distancia de nosotros. Es sabido que un rayo alcanza más fácilmente el suelo por medio de un objeto conductor elevado como: un árbol, torre, poste, etcétera, no es recomendable refugiarse debajo de ellos durante una tormenta eléctrica; también caen frecuentemente en las cumbres de las montañas y los alpinistas deben estar pendientes de los fenómenos precursores, que anuncian el rayo. Tal como el llamado 'zumbido de abejas' un sonido que señala una abundante carga estática en el ambiente, la cual ocasiona también el erizamiento en los cabellos, ante esta situación es conveniente alejarse lo más pronto posible y descender de las cumbres.

Para que un rayo impacte debe existir este contacto nube suelo, por eso un objeto aislado del suelo como un coche, normalmente no es impactado. Un albergue metálico en lo alto de una montaña, es muy seguro contra los rayos en la peor de las tormentas, mientras esté aislado del suelo por medio de madera o plástico, formando el efecto conocido como *celda de Faraday*.

No es común que un avión sea alcanzado por un rayo, pero cuando sucede sólo ocasiona daño superficial de algunos centímetros de diámetro en el fuselaje. El aluminio o titanio del que están hechos los aviones conducen o desvían la energía del rayo, no obstante, los materiales compuestos actuales podrían ser más sensibles debido a su ligereza, por lo que la punta o nariz de la mayoría de los aviones, llamada *radomo*, está provista de unas líneas metálicas que transfieren o distribuyen la carga del rayo hacia atrás, protegiendo los delicados instrumentos, tal como la antena del radar meteorológico, que se encuentra en la nariz de los aviones.

En una nube las cargas eléctricas se separan (ver figura 28). La parte inferior de la nube desarrolla una gran carga negativa induciendo cargas positivas en la superficie. Cuando se ha acumulado potencial eléctrico suficiente aparece el rayo, éste es un arco eléctrico que pasa de la nube

a la tierra y nuevamente a la nube en descargas sucesivas alternas. El calentamiento y la dilatación rápida del aire con el calor intenso del rayo, ocasionan el trueno.

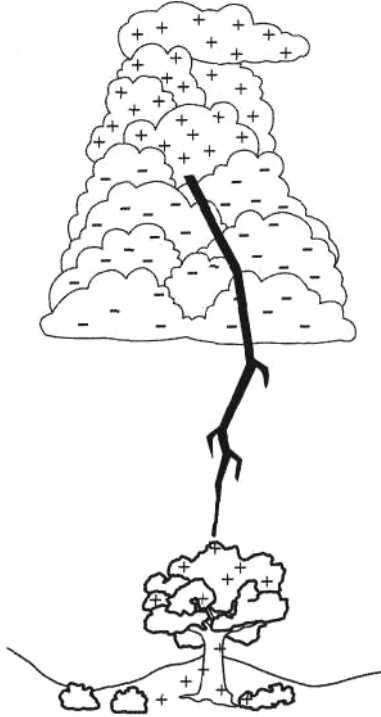


Figura 28. Formación de un rayo.

# VIII

## PELIGROS EN VUELO



# TURBULENCIA

Se le llama turbulencia al movimiento desordenado del aire. Los efectos de la turbulencia en vuelo pueden variar desde ligeros 'baches', las mal llamadas 'bolsas de aire', hasta la turbulencia que puede dejar a un avión fuera de control.

Normalmente, al entrar en una zona de turbulencia debe reducirse la velocidad del avión para evitar esfuerzos en su estructura y facilitar su control.

Hay que estar siempre prevenidos, una turbulencia súbita puede sacarnos de los asientos, por eso se recomienda estar siempre con el cinturón abrochado. Según las causas que la producen se conocen varios tipos de turbulencia que veremos en siguientes subcapítulos.

## TURBULENCIA MECÁNICA

Ocurre cuando el viento encuentra una obstrucción, como una colina o edificaciones que producen remolinos con el viento, al igual que una roca perturba el flujo del río. Este tipo de turbulencia afecta a las aeronaves cuando vuelan cerca del suelo, como durante el despegue o aterrizaje. El viento choca con hangares o árboles que lo perturban, produciéndose remolinos a sotavento, es decir, detrás del obstáculo.

## ONDA DE MONTAÑA

A mayor escala, cuando el viento encuentra una montaña, el flujo forma un gran remolino de arriba hacia abajo, detrás de la montaña. Un piloto desprevenido, que vuele cerca de las cumbres o laderas puede ser arrasado de pronto por este remolino de descendentes. La perturbación por la onda de montaña puede sentirse hasta cientos de kilómetros.

La onda de montaña produce una formación peculiar de nubes, en las cumbres de las sierras y montañas aisladas, la ondulación que eleva al aire también lo enfría adiabáticamente condensando su vapor de agua en una nube lenticular. La nube se disipa rápido en la parte baja de la onda, pues el aire ahora se calienta adiabáticamente pero se forma constantemente en la parte que la onda sube enfriando el aire. Como el efecto dura mientras sople el viento, la nube lenticular (altocúmulo standing lenticular) puede permanecer por horas o días en la misma posición coronando las cimas aisladas de sierras y volcanes.

## TURBULENCIA POR CALENTAMIENTO DIFERENCIAL

Unas superficies se calientan más que otras. Bajo un fuerte sol, un suelo desértico produce abundantes corrientes ascendentes y por cada una, también ocurre una descendente o de compensación, pues el aire circundante sobre las áreas relativamente más frías, como lagos o bosques, baja a llenar el vacío que deja el aire que sube.

Al atravesar estas corrientes, un avión pequeño se agita mucho y es difícil mantener un curso y altitud constantes. Como el efecto no llega muy arriba, se puede ascender hasta donde no lleguen las ascendentes o se puede recortar un poco la velocidad, tal como se haría con un coche en una zona de baches, suavizando el vuelo.

Al aproximarse a aterrizar, la pendiente de planeo de un avión puede ser afectada por estas corrientes tanto ascendentes como descendentes por lo que se recomienda hacerlo con cierta velocidad y potencia para poder corregir cualquier súbita pérdida de altura.

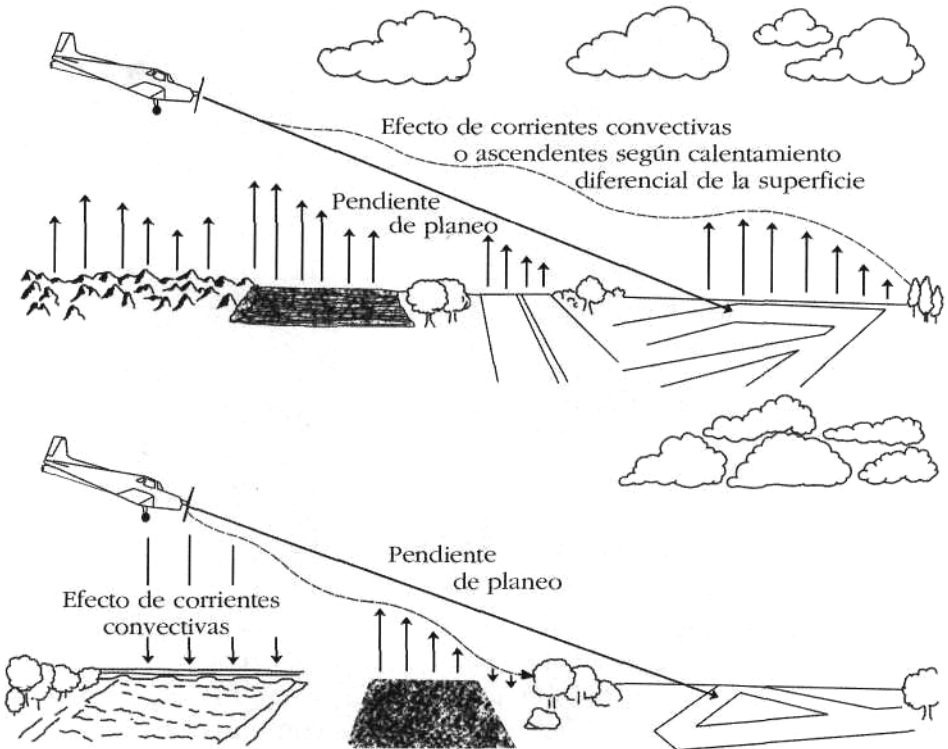


Figura 29. Turbulencia por calentamiento diferencial. Bajo el sol algunas superficies se calientan más que otras y al transmitir su calor al aire crean corrientes ascendentes y descendentes.

En la figura 30, se muestran las convectivas que al ascender y alcanzar la temperatura del punto de rocío, condensan el vapor de agua en forma de nubes; arriba de éstas no existe turbulencia y el avión puede volar recto y nivelado.

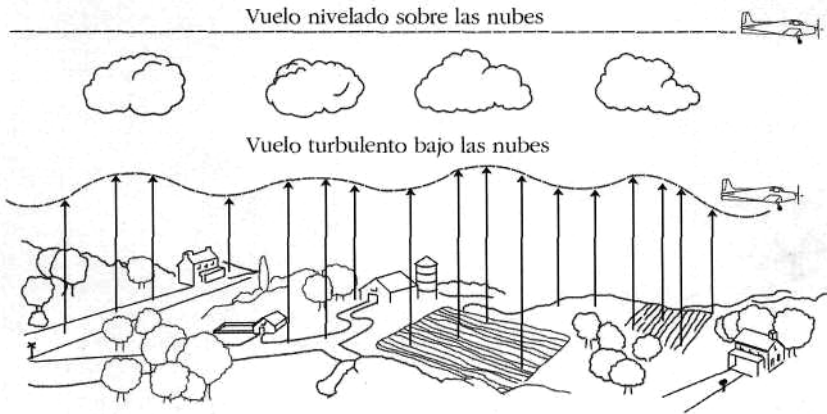


Figura 30. Evitando turbulencia. La turbulencia superficial se limita hasta la altura de la inestabilidad atmosférica, para evitarla se puede volar arriba de las nubes bajas. Otra manera es disminuir un poco la velocidad de crucero.

## TURBULENCIA FRONTAL

Esta turbulencia frontal se produce al llegar un frente frío de aire denso y compacto; como una gigantesca cuña eleva el aire cálido, creando corrientes ascendentes en la masa de aire el fenómeno ocurre a gran escala y abarca regiones enteras a lo largo del frente y puede alcanzar grandes altitudes.

## TURBULENCIA DE ESTELA

Este tipo de turbulencia es generada por las alas de un avión grande y pesado, en momentos como el despegue o el aterrizaje. Sucede porque el flujo del aire que pasa por las alas produciendo la sustentación origina una presión debajo de éstas. Parte de esa presión escapa por los extremos de las alas, generando remolinos a medida que el avión se mueve.

Cuanto mayor sea el peso del avión y el tamaño de sus alas, más grandes serán los remolinos, y si un avión pequeño penetra en uno de estos vór-

tices puede perder el control o voltearse, como ha ocurrido en ocasiones. La turbulencia de estela deja de generarse cuando el avión grande deposita su peso sobre el tren de aterrizaje y el viento bajo sus alas ya no lo sostiene. Los remolinos creados, sin embargo, tardan algunos minutos en dispersarse, y pueden ser empujados por el viento.

Para evitar este tipo de turbulencia, un avión pequeño debe esperar para aterrizar, o debe tocar tierra más allá del punto donde el avión grande hizo contacto con la pista y dejó de producir turbulencia. En caso de despegue, el avión pequeño debe elevarse antes del punto donde el grande despegó y empezó a generar turbulencia de estela de sus alas.

## TURBULENCIA DE AIRE CLARO

A este tipo de turbulencia se le conoce también como Clear Air Turbulence (CAT) y es traicionera, porque no presenta indicio o causa visible de su presencia. Puede encontrarse arriba de los 5 000 pies y no es muy claro su origen, posiblemente sea producto del rozamiento o encuentro de vientos intensos en la altura, por lo que se le asocia con la corriente de chorro. Encontrándose mayor turbulencia donde esta corriente forma curvas o sinuosidades. Una aeronave puede estar en crucero, en cielos totalmente claros cuando súbitamente una CAT puede hacerla descender miles de pies, en un torbellino que dificulta el control.

Esta perturbación fue ignorada hasta hace pocos años, pero debido a su peligrosidad se ha diseñado un Radar de Tecnología Láser (LDAR), el cual mide los cambios de velocidad de las partículas del aire hasta 10 millas adelante, dando el tiempo suficiente para preparar el encuentro o evitarlo. Esta es una de varias razones por la que se recomienda a los pasajeros llevar abrochado el cinturón de seguridad durante todo el vuelo.

## INTENSIDAD DE TURBULENCIA

La turbulencia se reporta según su intensidad por los efectos que produce en el vuelo, oficialmente se divide en:

1. Ligera: produce pequeños cambios en altitud de la aeronave, se percibe como un ligero bache que apenas tira del cinturón de seguridad.

2. Moderada: aunque los cambios producidos en altitud o actitud del avión son fuertes, la aeronave se mantiene en pleno control.
3. Severa: produce grandes cambios en la altitud y actitud (posición con respecto a sus ejes) del avión, y éste puede encontrarse en un momento fuera de control; quien no tenga el cinturón ajustado es posible que salga despedido de su asiento.
4. Extrema: si se ingresa en ella, un avión se torna difícil de controlar y puede ocasionar daño estructural.

Para cada caso también deben reportarse las formas en que deben presentarse y con qué intensidad:

1. Ocasional: si ocurre menos de una tercera parte del tiempo.
2. Intermitente: si se presenta hasta dos tercios del tiempo.
3. Continua: si se siente más de dos tercios del tiempo.

## CIZALLAMIENTO (WIND SHEAR)

Es un cambio repentino en la velocidad o dirección del viento, a altitudes bajas y en un área pequeña. Se detecta como un cambio repentino y sin razón aparente en el velocímetro y el indicador de velocidad vertical, comúnmente más de 15 nudos en el velocímetro y 500 pies por minuto en la velocidad vertical. El cizallamiento puede afectar la sustentación de manera sorpresiva y no se asocia a turbulencia, y en aproximación para aterrizar operando con velocidades y regímenes de descenso específicos, podría ser riesgoso.

Cuando un piloto encuentra características que indican posibilidad de cizallamiento antes de aterrizar es usual aumentar la velocidad de aproximación y debe reportarlo para prevenir a otras aeronaves.

El cizallamiento o wind shear a baja altura podría deberse a inversiones térmicas a bajas altitudes o cerca de nubes tipo cumulonimbos y se relaciona a la precipitación convectiva. A gran altura un cizallamiento se puede deber a turbulencia producida por la corriente de chorro o por frentes climáticos.

## MICROBURST

Esta es una corriente descendente extrema muy peligrosa. Sucede como una repentina cascada de aire que cae de una nube de tormenta o Cb, hasta chocar con el suelo donde se extiende levantando un aro de polvo. Se presenta donde haya actividad convectiva asociada a cumulonimbos y se cree que el 5% de estas nubes producen microbursts.

Aunque normalmente tiene menos de una milla de diámetro y dura menos de 15 minutos, la velocidad vertical de un microburst llega a ser hasta de 6 000 pies por minuto, sobrepasando con mucho la capacidad de ascenso de un avión pequeño monomotor.

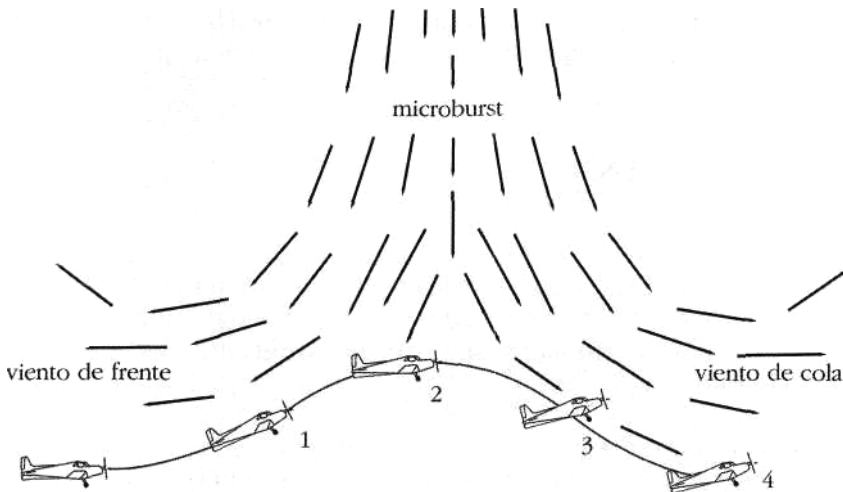


Figura 31. Microburst.

Cuando imprudentemente se vuela debajo de un Cb, y uno entra en un microburst: primero se siente un intenso viento de frente, que engañosamente hace ascender a la aeronave. Un piloto desprevenido podría disminuir la potencia para mantener su altitud, pero inmediatamente adelante se pasa bajo el flujo vertical y el avión es empujado hacia suelo por la cascada de aire con un enorme régimen de descenso.

Si logra atravesarla, lo alcanzará después un rápido viento de cola, ocasionándole un brusco descenso de la velocidad indicada y por ende un probable desplome. Es imperativo evitar áreas con wind shear reportados y aunque las técnicas de control varían, ya en la situación, generalmente se recomienda aumentar toda la potencia, jalar el bastón, procurando mantener la altitud.

Los microburst explicarían algunas aparentemente inexplicables desapariciones de aviones que vuelan sobre el océano en perfectas condiciones. Estos violentos chorros de aire que descienden desde las nubes tipo cumulonimbos, son muy peligrosas para los aviones. Como se muestra en la figura 31, al ingresar en ellas el primer efecto en la aeronave es ascensional, ya que encuentra un fuerte viento de frente: al llegar al centro de la corriente descendente el avión es empujado hacia el suelo. El piloto intenta subir la nariz de la aeronave, tratando de mantener la altitud, pero esto sólo produciría un desplome al tener un fuerte viento de cola.

## VIENTOS DE LAS ALTURAS

Arriba de 30 000 pies sobre el nivel del mar, unos 10 000 m, cerca a la tropopausa, la poca densidad del aire no ofrece resistencia y un avión Jet se desliza fácil y veloz. El cielo es azul intenso carente de nubes, sin embargo, a estos niveles la atmósfera se comporta diferente y encontramos fenómenos peculiares.

A estas alturas circulan vientos muy intensos impulsados por el giro de la Tierra, que arrastran a los cirros extendiéndolos por el cielo. Aquí habita la jet stream o corriente de chorro, que es un flujo de vientos máximos del oeste hacia el este, por definición mayores a 50 nudos, la cual como un ancho río de aire, circunda la Tierra serpenteando en la altura en varias latitudes.

La corriente de chorro no es pequeña, puede tener unos miles de pies de altura por cientos de millas de ancho, con sus vientos máximos en el centro. Un avión que vuele dentro de la jet stream reduce o aumenta bastante su velocidad respecto al suelo.

Durante la Segunda Guerra Mundial los bombarderos sobre el Pacífico podían estar quietos apuntando sobre el blanco, volando contra esta corriente, y escapar de la zona rápidamente aprovechando estos flujos máximos.

Actualmente se cuenta con cartas y pronósticos exactos de la posición e intensidades de esta corriente. Cuando se vuela a esa altitud se debe consultar la carta de vientos de altura o winds aloft chart.

Como la disminución de altitud de la tropopausa desde el ecuador a los polos no es una pendiente continua, sino que forma escalones, es en estas terrazas, por donde viaja la corriente de chorro. Esta corriente le da la vuelta al mundo en lo alto del cielo de cada hemisferio pero no es continua sino que se divide en segmentos y la velocidad de sus vientos varía de trecho en trecho, además no es uniforme, sino que gira dando vueltas helicoidales sobre su eje, levantando el aire húmedo de la troposfera hasta la estratosfera, formando nubes muy altas y remolinos de turbulencia y cizallamiento. Cerca de las curvaturas de la jet stream es probable encontrar Clear Air Turbulence (CAT) (ver Reportes y Pronósticos: Mapas de tiempo significativo y vientos a gran altura).

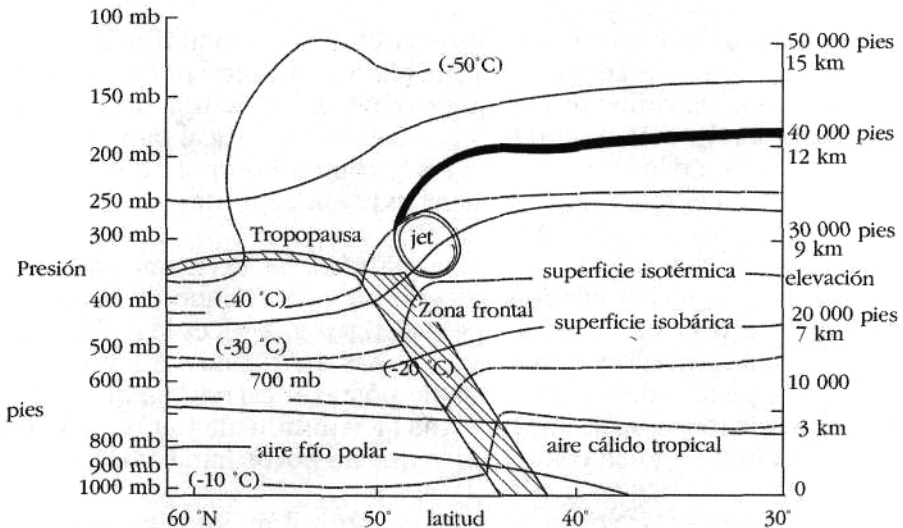


Figura 32. Corriente de chorro.

Podemos observar en la figura 32 un corte esquemático a la altitud de la tropopausa, muestra que la corriente de chorro, graneada por las isotacas (líneas de velocidad de viento), aparece entre la tropopausa tropical y la polar. Este río de viento muy intenso puede causar remolinos que afectan a los aviones que vuelan cerca, a gran altura.

## VISIBILIDAD Y NIEBLAS

Volando en condiciones IFR, es decir sólo utilizando los instrumentos, aun en la noche más oscura o completamente entre las nubes, si utilizamos las cartas y procedimientos correctos, podemos aproximarnos sin peligro hasta cierta altura del aeropuerto, digamos unos 400 pies. Pero para aterrizar el avión, las últimas decenas de pies deben descenderse de modo visual, con visibilidad suficiente para tener referencias precisas y ver la pista para calcular el momento preciso de tocar tierra. La visibilidad es pues fundamental.

Se define a la visibilidad como: *la distancia a la que pueden ser reconocidos objetos prominentes no iluminados durante el día e iluminados durante la noche*. La atmósfera se enturbia por múltiples factores: niebla, bruma, polvo, contaminación, lluvia; entre otros, y la visibilidad varía si es horizontal, oblicua o vertical.

Todo aeropuerto tiene bien definidos los mínimos de visibilidad requeridos para despegues o aterrizajes en sus pistas, variando por la velocidad y tipo del avión. Típicamente se requiere como mínimo una milla de visibilidad horizontal y más de 400 pies de visibilidad vertical para permitirse los aterrizajes. En los reportes del aeródromo se proporciona la visibilidad reinante en el momento, y ésta se expresa en millas estatuto.

Pero las cosas no son tan simples en la realidad, las decisiones deben tomarse rápido y la niebla puede ser insidiosa, apareciendo de pronto, en capas sobrepuestas o en parches espesos y ligeros. A veces la niebla cubre las luces de aproximación, dándoles extrañas apariencias o a veces tapa totalmente la pista y deja libres filas de postes o carreteras que bajo el tenue manto brumoso, se asemejan a una bien iluminada y atrayente pista de aterrizaje, una perfecta trampa en la que no pocos han caído.

Por eso se deben seguir correctamente los procedimientos de aproximación, descender a las altitudes publicadas en las cartas, localizar e identificar las luces del umbral de la pista. Aparte de la niebla o nubes bajas, se suman otros fenómenos de oscurecimiento que disminuyen la visibilidad, como concentraciones de polvo o humo en el aire, comunes en las grandes ciudades.

## CONDICIÓN DEL CIELO

El término condición del cielo, describe las diferentes capas y tipos de nubes que cubren el cielo de un lugar, la altura de las capas se reportan respecto al nivel del suelo. Se define dividiendo la bóveda celeste en octas u octavas partes de cielo cubierto:

1. Si el cielo está despejado se designa como SKC.
2. Cuando la cubierta de nubes es de 1/8 a 2/8 se usa el término FEW.
3. Con nubes cubriendo 3/8 a 4/8 se dice que el cielo está medio nublado o SCT.
4. Cuando cubren de 5/8 a 7/8 se denomina cielo nublado o BRK.
5. Cuando la cobertura es total se llama cielo cerrado u ove.

Como dijimos, cobertura del cielo incluye a todas las capas de nubes, las cuales se van sumando de abajo hacia arriba, es decir un cielo puede estar medio nublado a 1 000 pies, nublado a 3 000 pies y cerrado a 8 000 ya que las coberturas de las capas de nubes se van sumando (ver Reportes y pronósticos del tiempo, capítulo XIII).

En la frecuencia Aerodrome Terminal Information Service (ATIS), de aeropuertos se pueden escuchar reportes de la condición del cielo del lugar.

## VOLANDO VISUAL O POR INSTRUMENTOS

Se dice que un vuelo se efectúa con reglas visuales Visual Flight Rules (VFR), cuando el piloto utiliza referencias visuales como el horizonte o rasgos de la superficie para dirigir el avión, navegar y para aterrizar, siguiendo un rumbo con la brújula y verificando los detalles de una carta visual como vías férreas, carreteras o ríos, seguirá su ruta prefijada. Para despegar y aproximarse a aterrizar con reglas VFR se efectúan procedimientos específicos de alturas y velocidades, para acomodarse y enfilarse a la pista.

En cambio cuando se vuela de noche o dentro de las nubes, afuera de la cabina sólo se ve oscuridad total o un manto blanco y el piloto se encuentra bajo Reglas de Vuelo por Instrumentos (IFR), donde los procedimientos son muy específicos y estrictos. El vuelo IFR requiere planeación, revisión de los procedimientos, precisión y coordinación.

Así, para la visibilidad y condiciones del cielo en que se vuela, existen dos clasificaciones:

1. Condiciones de vuelo visuales o Visual Meteorological Conditions (VMC): donde el piloto dirige su avión utilizando referencias visuales (VFR).
2. Instrument Meteorological Conditions (IMC): cuando las condiciones de visibilidad y de la condición del cielo obligan a volar utilizando como referencia a los instrumentos y siguiendo procedimientos establecidos de despegue, salidas, aproximación y aterrizaje, es decir, Instrument Flight Rules (IFR).

Las reglas VFR requieren más de 3 000 pies sobre el terreno del techo de nubes y más de 5 millas de visibilidad, hasta un mínimo marginal de 1 000 pies de techo de nubes y de 3 millas de visibilidad horizontal en la pista.

Las reglas IFR, utilizando instrumentos de navegación (VOR, ILS, ADF) permiten la aproximación a la pista con techos de nubes de unos 500 pies y una visibilidad de 1 a 3 millas.

Así, para aterrizar en la pista 05 del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México se requiere, en una aproximación de no precisión, un techo mínimo de 7 900 pies (584 pies sobre el terreno) y una visibilidad de la millas de visibilidad horizontal.

Mientras que para un aterrizaje de precisión, utilizando equipo Instrument Landing System (ILS), se requiere un techo mínimo de 7 600 pies sobre el nivel del mar (284 pies sobre el terreno) y una visibilidad horizontal de media milla.

Los procedimientos indican que un piloto se aproximará descendiendo hasta esas altitudes o distancias y en caso de no tener en ese momento la pista a la vista, realizará una ida al aire para volverlo a intentar o dirigirse a un aeropuerto alternativo con mejores condiciones de visibilidad.

Volar en IFR requiere la habilidad de coordinar los seis instrumentos básicos: el velocímetro, el horizonte artificial, el altímetro, el coordinador de virajes, el giro direccional y el indicador de velocidad vertical al mismo tiempo y tener una imagen mental correcta de la posición y actitud del avión.

De la misma manera, debe mantenerse un rumbo determinado, efectuar los ascensos o descensos que indique el controlador de tránsito aéreo o

las cartas de vuelo por instrumentos. En la actualidad 98% del tiempo de un vuelo comercial puede realizarse exclusivamente por instrumentos aunque el despegue y aterrizaje generalmente son visuales.

En el aterrizaje al menos debe haber un margen de 400 pies de visibilidad vertical desde las nubes a la pista. Las cartas de aproximación para aterrizar en un aeródromo, indican los rumbos a tomar: cómo, cuándo y cuánto descender conforme el piloto se va acercando a la pista y estos procedimientos deben ser seguidos con la mayor precisión.

Las radioayudas electrónicas, al actuar como brújulas direccionales, guían al piloto mientras desciende, observando constantemente el altímetro para mantenerse sobre las altitudes mínimas, mientras se acerca al umbral de la pista. Si en determinado momento no se tiene la pista a la vista, se efectúa la aproximación fallida o sea 'el piloto se va al aire', elevándose otra vez con un rumbo establecido y buscando una altitud determinada, para intentarlo nuevamente o si bien se dirige a un aeropuerto alternativo con mejor visibilidad reportada.

Todos los aviones que viajan durante la noche en la República Mexicana lo hacen por instrumentos y están controlados por radar desde cada uno de los cuatro Centros de Control de Área (llamados las 'cuatro emes' por México, Monterrey, Mérida y Mazatlan), ellos coordinan los aviones en sus rutas y vigilan la adecuada separación entre aeronaves y sus altitudes para prevenir posibles colisiones y regular el tráfico.

El panel de todos los aviones se compone de seis instrumentos básicos. En la figura 33, podemos observar de izquierda a derecha y de arriba abajo:

1. El velocímetro: es fundamental pues el avión vuela por la velocidad con que pasa el aire por sus alas y deben mantenerse determinadas velocidades para cada maniobra.
2. El horizonte artificial: es un giroscopio que permite conocer la actitud o posición del avión respecto al horizonte en todo momento, aunque no se tengan puntos de referencia exteriores.
3. El altímetro: siempre regulado por la presión atmosférica del área, indica la altitud en pies respecto al nivel del mar.
4. El coordinador de virajes: también es un giroscopio con una carátula y facilita efectuar giros coordinados con una inclinación precisa de las alas y movimientos del timón de cola que es controlado con los pedales.

5. El giro direccional: es una brújula con su rosa náutica marcada en grados para volar a rumbos determinados.
6. El cimb o indicador de la velocidad vertical: permite saber a qué régimen se está descendiendo o ascendiendo, indica en pies por minuto.

El instrumento de la derecha es el HSI: que señala a las estaciones transmisoras de VHF localizadas generalmente en los aeropuertos, sirve para volar rumbos definidos al alejarse o al acercarse para aterrizar y para seguir las aerovías.



Velocímetro



Horizonte artificial



Altimetro



HSI (indicador de posición horizontal)



Coordinador de viajes



Giro direccional



Cimb (indicador de velocidad vertical)

Figura 33. Los instrumentos de vuelo.

## NIEBLAS Y NEBLINAS

El vapor del agua en el aire es casi siempre invisible, pero cuando la temperatura disminuye hasta el punto de rocío, el vapor se condensa y aparecen miríadas de gotitas suspendidas en forma de una nube grisácea.

La niebla es peligrosa porque oculta referencias visuales, es igual a una nube, pero con su base en el suelo y aparece por dos causas: 1. Cuando se enfría el aire hasta su punto de rocío, 2. Cuando se aumenta el vapor de agua del aire.

Como puede aparecer de pronto, es necesario conocer las circunstancias en que se origina la niebla para estar prevenidos, y se divide en los siguientes tipos:

1. Niebla inducida por la lluvia: se produce cuando una precipitación intensa añade humedad al aire. La abundante evaporación satura el aire frío y forma niebla, la cual puede ser muy densa y persistente; con vientos ligeros invade carreteras y aeropuertos, aparece ocasionalmente después de heladas y tormentas.
2. Niebla por radiación (radiation fog): ocurre generalmente en invierno cuando el suelo pierde calor por radiación, durante noches calmas y despejadas y enfría al aire sobre él, haciendo que al bajar de temperatura se sature y condense su humedad. Usualmente se forma en capas antes del amanecer al disminuir la temperatura hasta o por debajo del punto de rocío. Como la capa de nubes no es profunda, este tipo de niebla se disipa rápido con el sol de la mañana y se dice que éste 'la quema'. Es común en el altiplano de México.
3. Niebla de advección (Advection fog): sucede cuando una capa de aire húmedo se mueve sobre una superficie fría, la cual lo enfría haciéndolo alcanzar su punto de rocío. Las típicas nieblas de Inglaterra, protagonistas de las historias de misterio, se forman por el aire húmedo y tibio de la costa que penetra sobre el suelo frío de ese país. En la costa de California esta niebla se produce por la razón inversa; el aire cálido y húmedo del suelo se mueve sobre el mar, con corrientes frías que pasan frente a la costa.

La niebla de advección se hace más densa con algo de viento y puede elevarse un poco formando una capa nubosa de tipo estratos o estratocúmulos. Un fenómeno curioso relacionado con las neblinas, ocurre en las costas frente a océanos con corrientes frías. En las desérticas costas de Perú y el norte de Chile donde rara vez llueve, la corriente fría de Humboldt produce constantes nieblas de este tipo. Estas regiones son las más áridas del mundo, sin embargo, sobre los cerros y lomas próximos al mar se forman densos jardines, como oasis, regados sólo por la condensación de estas nieblas sobre rocas y hojas de las cuales gotea la única agua posible. Un fenómeno similar ocurre en el desierto de Namibia, en África donde algunos reptiles beben del agua que se condensa sobre sus propias escamas.

4. Niebla Orográfica (Upslope fog): en la sierra es común ver este tipo de nieblas muy de mañana, suspendidas en las barrancas, valles altos y cubriendo las cumbres. El aire húmedo y estable es empujado montaña arriba por la brisa de valle y al ascender por las laderas se enfría de manera adiabática hasta su punto de rocío.

Una vez que cesa el viento ascendente, la niebla se disipa con el sol a media mañana. A diferencia de la niebla de radiación, la orográfica puede formarse bajo del cielo nublado, es bastante densa y se extiende hasta muy arriba.

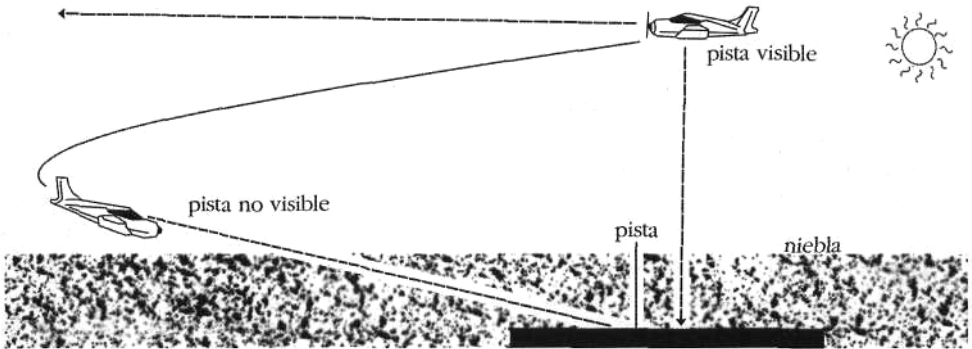


Figura 34. La visibilidad. Varía si es horizontal, oblicua o vertical, pero la que importa es la relacionada con la pista de aterrizaje. Aparte de niebla y nubes, existen otros fenómenos de oscurecimiento que afectan la visibilidad como concentraciones de polvo o humo en el aire.

## HIELO EN LAS ALAS

En días muy fríos y ventosos, esquiadores y alpinistas experimentan englamamiento, cuando al ser cubiertos por una nube de este tipo, en sus equipos, ropa e incluso en la barba, se les adhiere hielo. Cuando un avión atraviesa una nube con temperatura cercana a la de congelación, estas mismas costras de hielo pueden formarse en las alas, el timón o hasta en la hélice, en lo que se llama *engelamiento estructural*. Esta acumulación de hielo rompe el perfil aerodinámico del ala afectando la sustentación y aumentando la resistencia, también puede obstruir los tubos pitot, tomas de presión estática y otros sensores exteriores.

Los billones de gotitas que conforman una nube, pueden encontrarse líquidas a pesar de estar a una temperatura bajo  $0^{\circ}\text{C}$ , sin embargo cuando un objeto las toca, se le adhieren y solidifican, acumulándose una sobre otra, como costras de hielo.

En la práctica se considera que existen condiciones de englamamiento cuando se detectan bajas temperaturas y existe humedad visible. Entonces de-

ben tomarse medidas precautorias encendiendo los sistemas antihielo (anti-ice). Los parámetros exactos varían con el tipo de avión, por lo que debe consultarse el manual de operación y los procedimientos para llevarlos a cabo de manera oportuna. Bordes de alas pueden calentarse con aire caliente de los motores o encender resistencias y sistemas de calefacción eléctrica en los parabrisas, hélices, tubos pitot y otros sensores.

En los motores a reacción, el aire en la entrada del ducto se enfría adiabáticamente por formarse hielo en el cowling o labios del reactor, por lo que normalmente requieren de aplicarse aire caliente del compresor aun a los 10 °C o menor.

En el monomotor a pistón de igual manera es posible que se forme hielo dentro del carburador, pues al vaporizarse el combustible enfría más sus ductos. Un sistema antihielo, asociado al escape, calienta el aire que entra al carburador, para prevenir el hielo, este sistema de aire caliente al carburador debe encenderse cuando la temperatura exterior es apenas menor a 7 °C. Un estudio sobre accidentes por engelamiento y consecuentes paros de motor arrojó que en 1996 el 51% fueron causados por hielo en el carburador.

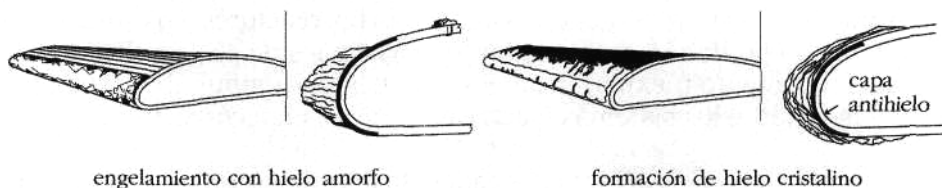


Figura 35. Formación de hielo.

El hielo estructural que se forma en los bordes de alas, antenas, tren de aterrizaje, parabrisas y demás estructuras, se divide en tres tipos:

1. Hielo cristalino: es transparente y se produce cuando la porción líquida de la gota sobre enfriada resbala, congelándose en una capa lisa. Las gotas grandes como las presentes en nubes cumuliformes favorecen este tipo de engelamiento, que se presenta con temperaturas

entre 0 y  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; este hielo es pesado y difícil de retirar una vez que se ha formado.

2. Hielo amorfo: este tipo de hielo es el más común, se adhiere cuando las gotas son pequeñas y atrapan burbujas, usualmente se forma en temperaturas menores a  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , como las existentes en nubes estratiformes, formando una estructura irregular en el ala, destruyendo la aerodinámica del perfil.
3. Hielo mixto: es una mezcla de ambos, con forma globular. Aparece rápidamente en nubes con gotas de agua, mezcladas con nieve o hielo.
4. Hielo en tierra: la escarcha, se pensaría un tipo de formación de hielo inofensiva, pero es sumamente traicionera. En una mañana de invierno, después de una madrugada muy fría, es posible encontrar la formación de una ligera capa de cristales de escarcha sobre las alas. Estas pequeñas cristalizaciones pueden alterar la capa límite del aire sobre las alas, restarle sustentación y alargar la carrera de despegue. Es más, si el sol naciente derrite solamente la escarcha de un ala y de la otra no, la sustentación puede ser asimétrica y hacer al avión incontrolable en el despegue.

## VOLCANES Y CENIZAS

Una noche de 1982 un Jumbo Boeing 747, en ruta sobre Indonesia sufrió repentinamente el paro total de sus cuatro turborreactores. Los sorprendidos pilotos no podían imaginarse qué ocurría, pues no se parecía en nada a su adiestramiento o experiencia: los tanques de combustible estaban a más de la mitad y los sistemas eléctricos funcionaban correctamente.

No obstante, con sus reactores apagados, la aeronave comenzó a descender lenta pero inexorablemente, planeando en un silencio terrorífico. La tripulación efectuó sus procedimientos de emergencia y tras angustiosos 13 minutos, lograron reencender dos de los motores, aterrizando a salvo en el aeropuerto de Yakarta.

Después en las investigaciones, se supo que habían atravesado la estela del volcán Galunggung, el cual se encontraba esa noche en erupción. Los gases expelidos por la montaña (dióxido de carbono, dióxido de azufre, etcétera) habían desplazado al oxígeno del aire, sin el cual no podía haber combustión en los motores. Al intentar un reencendido, la fina y áspera ceniza volcánica había taponado los aspersores y dañado los alabes de dos de ellos.

La estela de una erupción volcánica se compone de gases, polvo y ceniza arrojados a la atmósfera; ésta última está formada por minúsculos cristales de roca y tiene propiedades abrasivas que pueden erosionar los parabrisas, luces y otros sistemas de las aeronaves.

Ahora existe una constante vigilancia mundial de fumarolas o exhalaciones de volcanes y al detectarse actividad volcánica, las aerovías o rutas aéreas son modificadas para evitar acercarse a las variables estelas. Cualquier fumarola es monitoreada por científicos o reportada constantemente por los pilotos y aparece en las Cartas Tiempo Significativo. En nuestro país, cada exhalación del volcán Popocatepetl es vigilada y el tránsito aéreo puede desviarse para evitarla.



# IX

## CALENTAMIENTO GLOBAL Y EFECTOS DE LA ACTIVIDAD HUMANA



El clima de la Tierra siempre ha estado cambiando. Desde que se formó la atmósfera por los efluvios de volcanes hace 4 500 de años, se han sucedido glaciaciones, lluvias y sequías en selvas, bosques y desertificaciones, con la vida siempre tratando de adaptarse como ha quedado registrado en los fósiles. Tales fluctuaciones del clima han ocurrido naturalmente en el pasado y definitivamente ocurrirán en el futuro. Pero la cuestión es si los rápidos cambios percibidos en los últimos años, con sus posibles magno efectos, son consecuencia de las acciones humanas.

Definir si el aumento de la temperatura global, la desaparición de la capa de ozono, inversiones térmicas o variaciones en la circulación oceánica con sus graves consecuencias, son producto de actividad humana y tener evidencias concluyentes no basta. Muchas medidas requerirían un cambio en los modelos económicos y modos de producción, la interrogante es ¿cómo diferenciar los cambios naturales de los inducidos por el hombre?

Aunque el tema sale de los alcances de este libro, mencionaremos algo al respecto. La actividad humana puede influir en los procesos de la atmósfera, básicamente de las siguientes formas:

- Introduciendo cambios artificiales en las concentraciones de los componentes naturales de la atmósfera; tales como el aumento de anhídrido carbónico en la troposfera por el uso de combustibles, lo que podría causar un incremento en la absorción de calor.
- Alteración de la superficie y la ecología, con acciones de deforestación y desertificación, afectando las interacciones naturales de suelo y atmósfera, lo cual podría perturbar la concentración de vapor y regímenes de lluvias.

- Inyección de gases o sustancias ajenas a la atmósfera, como son gases industriales y compuestos fluoro carbonados, que afectarían la capa de ozono.

El clima y la condición de la atmósfera de un lugar, son sistemas complejos y dependen de un concierto de factores interrelacionados. Los congresos y reuniones internacionales sobre el tema han resultado en discrepancias entre los científicos y gobernantes, lo cual sólo ha conducido a la duda y al debate intelectual, se sigue prolongando sin que se tomen medidas más allá de anuncios en los medios.

## NIVELES DE ANHÍDRIDO CARBÓNICO Y EL CALENTAMIENTO DE LA ATMÓSFERA

El aire que respiramos es una mezcla de varios gases, esta composición es relativamente homogénea y se mantiene siempre constante hasta la alta atmósfera.

Nitrógeno.....	78.080%
Oxígeno .....	20.940%
Argón .....	0.940%
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ).....	0.034%
Hidrógeno.....	0.030%
Neón .....	0.0012%
Helio .....	0.0004%
H <sub>2</sub> O (V), vapor de agua, varía en proporciones de....	0 a 5%

De estos gases el CO<sub>2</sub> y el vapor de agua, son compuestos que proporcionan al aire la capacidad de absorber y liberar energía de la radiación solar. Aunque el contenido de agua en el aire es variable, se considera que el aumento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera en el último siglo ha acelerado el paulatino calentamiento global, es decir, al incremento de la temperatura media de la Tierra año con año que se venía observando desde el fin de la era glacial hasta hace unos 15 000 años. Este aumento de gas en el aire se debería a la quema de combustibles fósiles como carbón y petróleo.

Desde la industrialización que se inicia en el siglo xix, se han inyectado al aire cantidades anormalmente abundantes de CO<sub>2</sub>. Y desde un estimado

de 0.029 ó sea 295 ppm (Partes Por Millón) de concentración antes de la era industrial, hasta las actuales y preocupantes 376 ppm. La cantidad de este gas en el aire no es fija, pues conforma un ciclo de absorción y liberación ya que el CO<sub>2</sub> contantemente es absorbido por el océano, donde se disuelve, y por las plantas que lo utilizan en la fotosíntesis, al mismo tiempo que es producido por animales, quema de bosques y de combustibles. Aún si su aumento causara directamente la elevación de temperatura, los efectos en los continentes serían difíciles de prever, pues sobrevendrían cambios en la circulación oceánica o atmosférica, sin embargo todos coinciden: que a mayor calentamiento, el clima será cada vez más violento y extremo.

## LA CIUDAD COMO ISLA DE CALOR

En las ciudades, el concreto de edificios y banquetas, así como el asfalto de las calles absorben y reflejan tanto el calor como las rocas en el desierto. Este calor es transmitido al aire, que reverbera sobre el pavimento. Las actividades en la ciudad, sus miles de coches, máquinas industriales y personas generan por su parte su propio calor.

Los gases contaminantes producen también un efecto invernadero y sin árboles que absorban la energía de la luz solar y evaporen agua refrescando el aire, la urbe eleva su temperatura de unos 3 a 6 °C más que la existente en el campo aledaño.

Una ciudad se vuelve en sí, una isla de calor. Y produce sus propios fenómenos meteorológicos. Crea corrientes de aire ascendente que forman un viento llamado *brisa de campo*, que llega desde las orillas de la ciudad. Estas corrientes térmicas condensan la humedad formando nubes. Volando durante la noche se observan las urbes coronadas por nubes estratiformes, muy iluminadas desde abajo por la luz amarilla de las miles de lámparas de sodio, mientras que el campo alrededor se encuentra despejado.

## HACER LLOVER: SEMBRANDO LAS NUBES

Conocer como se realiza el proceso natural de condensación, formación de hielo y precipitación de las nubes fue una necesidad científica desde que ocurrieron las grandes sequías en la región central de los Estados

Unidos de América, en la década de 1930. En esos años, sobre las llanuras no se formaba ninguna nube y cuando aparecía, pasaba de largo sin precipitarse. Las cosechas se arruinaban, el ganado moría de sed y el viento de llevaba el suelo reseco. Si se hubiera sabido exactamente por qué se produce la lluvia, tal vez se hubiera podido hacer algo.

El proceso de la lluvia, estudiado a detalle por Langmvin y V. Schaefer, encontraron que la condensación del invisible vapor del aire en nubes requería de los núcleos de condensación. El vapor se condensa alrededor de estas micro partículas, formando minúsculas gotitas que se unen y coalescen hasta que su tamaño hace que se precipiten. En los cumulonimbos, los cristales de hielo que se forman y caen de sus altas cúspides sirven de núcleos de condensación para la abundante lluvia que se origina en los niveles de partes medias y bajas de estas nubes.

En un experimento, B. Vonnegult utilizó polvo de yoduro de plata, muy higroscópico, o sea con gran capacidad para atraer y condensar vapor de agua. Y efectivamente, rociando esta sustancia se aumentaba la formación de gotas en las nubes cumuliformes. En el laboratorio experimental del Nacional Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA), lanzaron cohetes apuntando hacia las cúspides de cúmulos y registraron un aumento de siete veces la precipitación.

En muchos países, incluido México, se depende en gran medida de la lluvia para la agricultura de temporal. Desde hace varios años en nuestro país se realizan vuelos sobre las nubes para rociar hielo seco o yoduro de plata como núcleos de condensación y propiciar la lluvia. En los años setenta apareció una floreciente flotilla de aeronaves que rociaban o 'sembraban' a las nubes y aún hoy en día algunos siguen operando. Sin embargo siempre quedó la duda de si la lluvia ocurría realmente por la aspersión de núcleos de condensación.

## LLUVIA, EROSIÓN Y CONSECUENCIAS

A las cuatro de la tarde de un día de septiembre en la Ciudad de México, los cúmulos que aparecieron en la mañana como algodón brillante han crecido como oscuras columnas llenas de grumos grises en sus bases, con alturas de un volcán. Durante todo el verano los vientos alisios traen aire húmedo del golfo de México y la temperatura y altitud del Altiplano vuelven inestable a la atmósfera. Cualquier masa de aire que contenga su-

ficiente humedad, empezará a elevarse e iniciará una reacción en cadena de condensación, corrientes convectivas y mucha precipitación.

A las cuatro de la tarde las nubes cubren totalmente el cielo con sus bases muy oscuras, pues su gran espesor no deja pasar la luz del sol. Estos gigantescos cumulonimbos sobre la ciudad son tan altos que deben llegar hasta la tropopausa y fácilmente podrían descargar 50 mm de agua en pocas horas. Recordemos que la cantidad de lluvia que cae se mide en milímetros y cada milímetro equivale a un litro de agua por metro cuadrado. Esto significa que en cada  $\text{km}^2$  de superficie bajo lluvia (un área como de  $10 \times 10$  cuadras) cae un millón de litros por cada milímetro registrado. Así, una tormenta fuerte puede descargar en unas horas unos 50 millones de litros de lluvia por  $\text{km}^2$ , y ésta es mucha agua.

En las calles de la ciudad, todos saben que va a llover y se apresuran para llegar a sus destinos. Pronto se siente descender las corrientes frías precursoras de lluvia. Las ráfagas levantan polvo y basura al tiempo que se escuchan los primeros truenos. Las cargas estáticas de la nube se han polarizado y se libera esta electricidad estática en forma de relámpagos. En segundos, la lluvia cae y chorros de agua escurren desde techos, banquetas y avenidas. Un cumulonimbo (Cb) se ha formado justamente en la trayectoria de aproximación sobre el aeropuerto, la turbulencia de estas nubes podría inestabilizar la trayectoria de los aviones que descienden para aterrizar, o el agua sobre la pista podría dificultar el frenado de los aviones.

Esta eventualidad está prevista y las aeronaves que se aproximan esperan, volando en patrones circulares sobre determinadas estaciones de radioayudas, a que pase lo más intenso de la lluvia sobre el campo de aterrizaje. Si esto tarda demasiado, pueden desviarse a los aeropuertos alternos como el de Acapulco o Morelia; mientras tanto en las saturadas vialidades de la ciudad, la basura y azolve han tapado las coladeras y miles de coches circulan a vuelta de rueda entre los charcos. La teoría del caos parece hacerse una realidad.

Las tormentas no cesan mas bien parecen aumentar en intensidad y por precaución el aeropuerto debe cerrar: 120 operaciones y 10 000 pasajeros son desviados a los aeropuertos alternos, mientras en la ciudad las rachas de 35 nudos de las tormentas han ocasionado que varios árboles y anuncios caigan derribados, algunos coches fueron atrapados en los pasos a desnivel inundados y sus ocupantes tuvieron que escapar con el agua hasta la cintura. Esta tarde de lluvia milagrosamente no ha causado muer-

tes en la Ciudad de México, todos regresaron a sus hogares tarde y mojadados pero a salvo. Sin embargo, a la mañana siguiente uno se entera de la tragedia: ocurrió en las afueras, en las precarias casas de los cerros, donde se produjeron deslaves y derrumbes. Repentinamente avalanchas de lodo y piedras sepultaron hogares, sorprendiendo a las familias dormidas, en su mayoría las víctimas son niños.

El Valle de México es endorreico, o sea, está rodeado de sierras volcánicas, donde los ríos no se dirigen al mar sino que desaguan en el interior formando un gran lago. Este habitat era estable, con un sistema natural para el drenaje de la lluvia, que se infiltraba al subsuelo o escurría por ríos hasta un gran lago central.

Naturalmente, los bosques y su espeso suelo vegetal retienen el agua de lluvia como si fueran enormes esponjas, liberándola lentamente en arroyos, barrancas y ríos que fluyen, o fluían buena parte del año. Además el agua que se filtra al subsuelo alimenta los mantos acuíferos y manantiales o proveen agua en los pozos. Con la urbanización todo este sistema se altera: el suelo natural se desnuda de vegetación y es cubierto de concreto, asfalto y casas, esta capa impermeable no permite la infiltración de agua al subsuelo, por tanto, durante las lluvias el volumen de agua a drenar es demasiado, y a minutos de iniciada la lluvia, tubos y colectores de drenaje conducen avalanchas de líquido, que no puede infiltrarse, ni retenerse, ni absorberse por ningún bosque. Los cauces de los ríos se desbordan y las paredes de las barrancas se erosionan con los torrentes, y sus empinadas orillas se desploman.

## DERRUMBES Y DESLAVES

Las laderas de los cerros, con sus capas del suelo naturalmente afirmadas por la vegetación natural, mantienen una inclinación estabilizada de la pendiente llamada *pendiente de reposo o de equilibrio*. Desafortunadamente este equilibrio se altera con facilidad, si se le quita la capa de vegetación o si se rompe la pendiente natural socavando terrazas para edificar o trazar caminos, el suelo empieza a vencerse, a moverse para formar una nueva pendiente de equilibrio.

La lluvia es el principal factor de esta alteración, ya que la humedad aumenta peso al suelo y le da una consistencia plástica que lo hace fluir como una masa. Cuando se humedece suficiente un suelo de arena y arcilla,

desprovisto de vegetación que lo retenga, empieza a deslizarse pendiente abajo, de manera casi imperceptible, quizás unos pocos centímetros cada temporada, formando grietas en la parte superior de la ladera y acumulación de tierra y rocas en las barreras o cunetas pendiente abajo.

Pero también puede suceder un deslizamiento violento, mejor conocido como deslave; en este caso toneladas de suelo saturado de humedad cae pendiente abajo. Oleadas de lodo y piedras arrasan viviendas y caminos, hasta extenderse al pie del cerro formando una lengua llamada *pie del deslave*, donde se acumula lo arrastrado por el deslave. Arriba, la ladera se colapsa en escalones o escarpas, cavando un barranco característico llamado *zona de desgajamiento* (ver figuras 36, 37, 38 y 39). Una tragedia por estos deslaves ocurrió en Teziutlan, Puebla, en octubre de 1999, causando 39 muertos, donde los cerros se desgajaron y arrastraron hogares de desprevenidos habitantes.

Existe otro peligro aún por la erosión de la lluvia. Ésta puede desnudar un suelo desprovisto de vegetación, dejando grades rocas sueltas con sus bases inestables; tarde o temprano alguna termina por caer pendiente abajo empujando a las demás en un derrumbe. La fuerza de miles de toneladas de rocas del despeñadero es muy destructiva.

Estos llamados desastres naturales, habría que denominarlos desastres artificiales o inducidos, ya que claramente se deben a la deforestación, al rompimiento de la pendiente natural, que aunadas a la inadecuada ubicación de las viviendas o infraestructura, crean escenarios para desgracias. Actualmente existen demasiadas rocas y pendientes inestables alrededor de muchas ciudades de crecimiento desordenado, sin una planificación que tome en cuenta efectivamente a la naturaleza y sus fenómenos.

Tal vez una solución sería estabilizar los taludes, por atenuación de las pendientes y mantenimiento de una cubierta vegetal en las laderas con plantas originales o adaptadas a las condiciones del lugar. Así mismo inyectar el agua de lluvia en pozos o drenes a los mantos freáticos, evitando la canalización y saturación de ésta en drenes superficiales. Las áreas a urbanizar deben estudiarse en su mecánica de suelos, geología y geomorfología, que señalaría su comportamiento futuro y posibles peligros.

En la Comisión de Áreas Naturales Protegidas, existe un programa para restauración y conservación de la capa vegetal, denominado *fábrica de agua*. Éste consiste en disminuir la velocidad de escurrimiento del agua de lluvia con reforestación y conservación de suelos, pretendiendo un en-

foque de desarrollo sustentable de las cuencas hidrológicas. Para información sobre los proyectos de recuperación de áreas naturales para recarga de acuíferos puede consultarse en: <http://www.conafor.gob.mx>

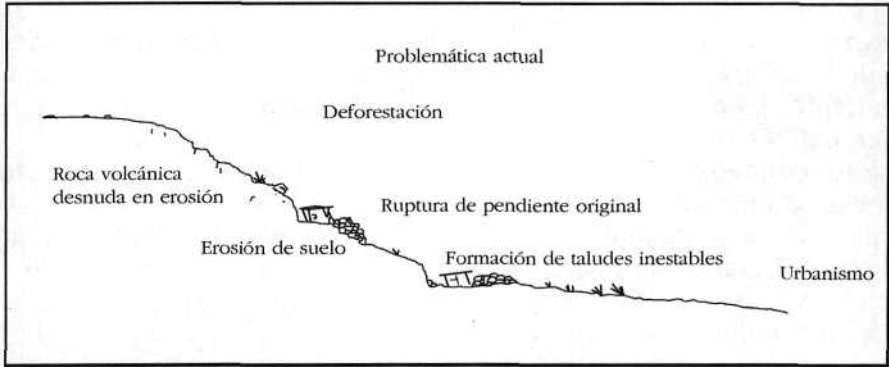


Figura 36. Problemática actual de la erosión de taludes. Pendiente interrumpida e inestable.

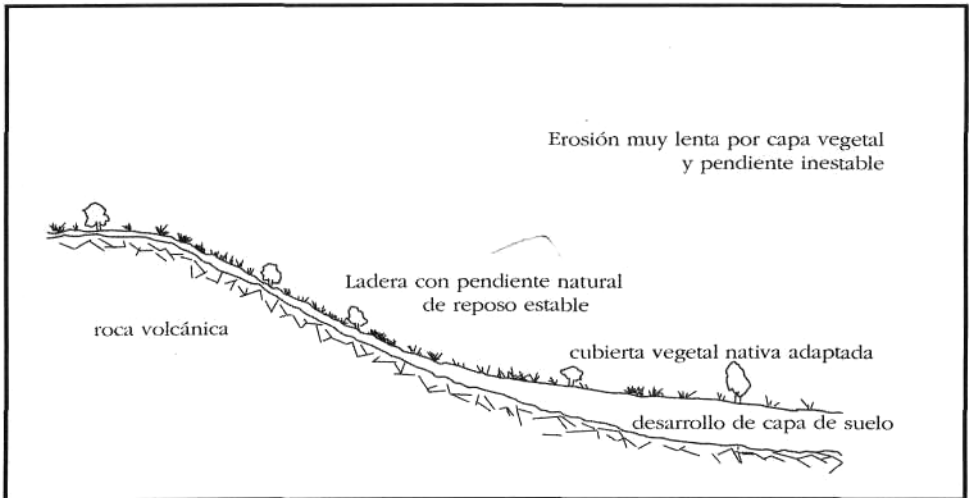


Figura 37. Situación inicial de erosión de taludes. Pendiente estable.

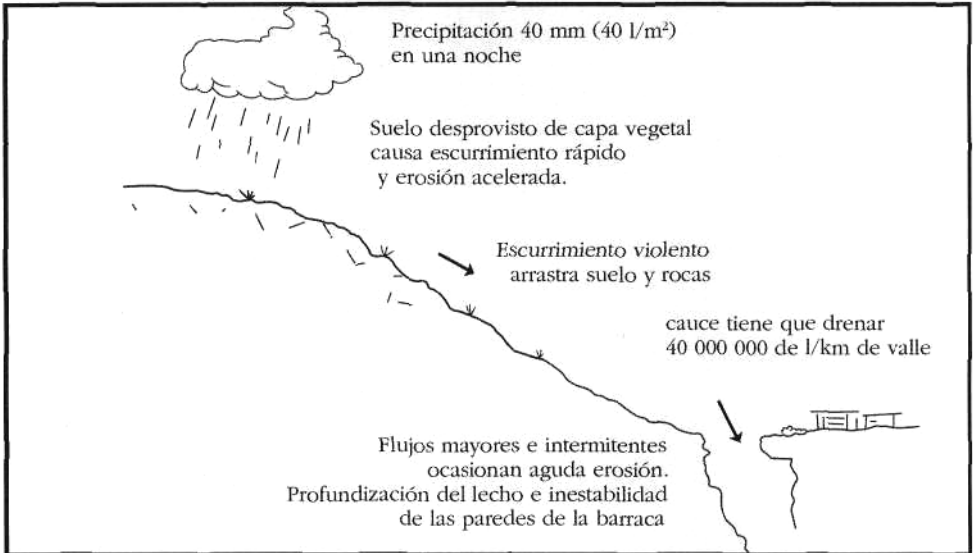


Figura 38. Erosión de causas y barrancas por flujos repentinos.

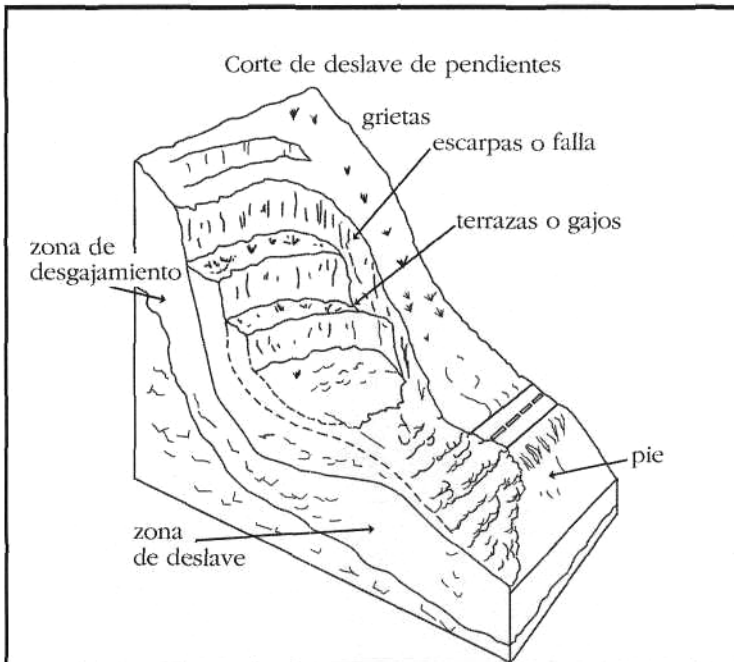


Figura 39. Deslave.



**X**

**MASAS DE AIRE, CICLONES Y FRENTE  
DEL NORTE**



## LATITUDES, TRÓPICOS Y ZONAS TEMPLADAS

Geográficamente la Tierra se divide por la línea del ecuador en dos mitades iguales o hemisferios: el norte y el sur. Para la localización precisa en los mapas, existen líneas paralelas que marcan la distancia en grados desde la línea ecuatorial latitud 0 hasta cada polo a los  $90^\circ$ , por eso el término bajas latitudes se refiere a latitudes cercanas al ecuador, mientras que las medias latitudes y altas latitudes son las cercanas a los polos.

En cada hemisferio también existe una línea a una latitud determinada, llamada trópico de Capricornio para el hemisferio sur y trópico de Cáncer para el hemisferio norte, estas líneas se localizan justamente a los  $23.54^\circ$  grados de latitud. Recordemos que este ángulo es también la inclinación del eje de rotación de la Tierra con respecto al Sol, de modo que las líneas de los trópicos señalan hasta donde llega el Sol en el cenit o parte más alta del cielo, durante el verano en cada hemisferio.

La línea del trópico de Cáncer, que en el caso de México cruza el territorio cerca de Los Cabos, Mazatlán y Tamaulipas separa al hemisferio norte en una zona templada al norte de la línea y la zona tropical al sur. La dinámica y comportamiento de la atmósfera hacia el sur o norte de la línea del trópico difieren bastante. El ángulo del sol, el calentamiento diferencial y la fuerza de coriolis, producen diferentes efectos en la dinámica de la atmósfera y sus fenómenos de acuerdo a la latitud en que ocurren.

El régimen climático de la zona tropical diferente al de la zona templada, al norte, es la causa de que las condiciones atmosféricas en el trópico no

puedan definirse según las clásicas cuatro estaciones. En la parte central de México hay días en invierno donde la temperatura es mayor que en algunos días en el verano y viceversa. En el uso cotidiano se utilizan términos más acordes a la realidad como 'tiempo de secas' y 'tiempo de lluvias', con algunos fríos en diciembre y enero.

La diversidad de las condiciones meteorológicas en el territorio mexicano se debe a que éste se encuentra parte en la región templada del norte y parte en la región tropical del sur, además a ambos lados de la región se encuentran océanos que proporcionan humedad a las masas de aire.

## AL NORTE DEL TRÓPICO

Las grandes masas de aire que se encuentran sobre diferentes regiones del planeta adquieren las características de temperatura o humedad de su región. Como la atmósfera siempre está en movimiento, tarde o temprano estas masas de aire abandonan su región de origen, desplazándose y chocando unas contra otras, con diferentes temperaturas y humedades, cuando colisionan estos enormes bloques de aire, no se mezclan, sino que se empujan o enciman, luchando como gigantes de gas, levantando el aire y condensando vapor en diferentes tipos de nubes, ocasionando lluvias y vientos sobre los mares y continentes sobre los que colisionan.

Es justo en la frontera o frente entre estas masas de aire con diferentes características donde ocurren los fenómenos meteorológicos más intensos. Gran parte de la meteorología de las regiones templadas se explica con el concepto de *frentes*. Este término se escogió, por la similitud a los frentes de batalla de la Primera Guerra Mundial, las masas de aire de diferentes características chocan y combaten a lo largo de estas líneas. Cuando se vuela atravesando un frente, es impresionante (ver figura 40).

Se observan nubes escalonadas de diferentes tipos a lo largo de la zona de choque y es característico el repentino cambio de Temperatura Exterior del Aire (OAT) al atravesar el frente de una masa de aire a otra. En tierra, cuando se aproxima un frente la presión atmosférica decrece y la dirección del viento cambia abruptamente y se observan una secuencia característica de diferentes tipos de nubes.

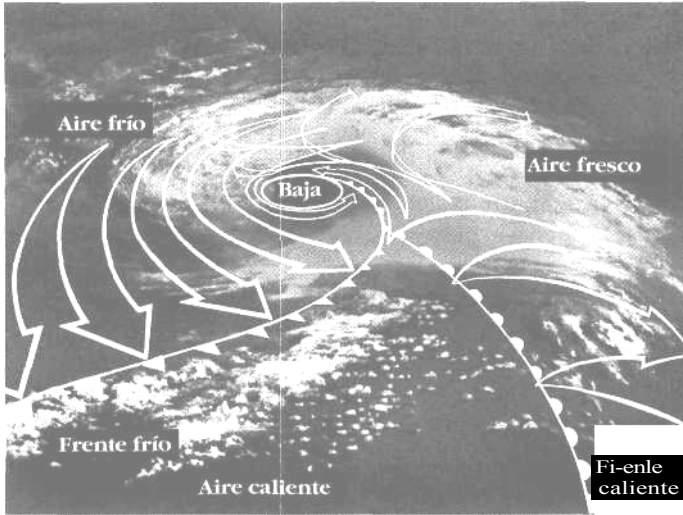


Figura 40. Frentes.

Cuando una masa de aire sale de su región de origen y colisiona con otra, a esta zona de contacto se le llama frente. Es aquí donde ocurren los cambios meteorológicos. Ambas masas giran alrededor de una zona de baja presión:

- Masa de aire polar: se abrevia en los mapas con  $P$ , y si es continental se coloca una  $c$ , o una  $m$ , a la izquierda:  $(cP)$   $(mP)$ .
- Masa de aire tropical: se abrevia con una  $T$ , y si es continental se coloca una  $c$ , o una  $m$ , a la izquierda:  $(cT)$   $(mT)$ ; si es estable  $w$ , y si es inestable  $k$ .

Gráficamente la simbología para un frente frío es una línea de picos y para un frente caliente es una línea de semicírculos. Ambos frentes parecen perseguirse girando alrededor de un centro de baja presión.

## FRENTE FRÍO VS FRENTE CALIENTE

### *Frente frío*

Una masa de aire frío es relativamente estable debido a su mayor densidad. Al desplazarse lo hace cerca del suelo y cuando choca con una masa

de aire cálido, actúa como una cuña elevándolo bruscamente. Esta rápida elevación favorece la formación de nubes de desarrollo vertical como cúmulos y cumulonimbos, que devienen en tormentas de intensas lluvias. Los frentes fríos generalmente llegan desde regiones septentrionales.

Por delante del arco del frente frío, las tormentas se forman en filas llamadas *líneas de turbonada*. En los radares meteorológicos o en las imágenes de satélite se detectan estas amenazantes filas de cumulonimbos que deben evitarse. Las líneas de turbonada pueden ocurrir en oleadas, en regiones montañosas forman corredores laberínticos y un avión pequeño puede encontrarse atrapado entre ellas sin poder pasar sobre sus altas cúspides, ni tampoco poder atravesarlas por la terrible turbulencia dentro de ellas.

Cuando un frente frío pasa, lógicamente hay una disminución de la temperatura. Como el aire frío contiene menos humedad, el tiempo tiende a mejorar, la presión barométrica sube rápidamente y la temperatura empieza a aumentar ligeramente por el sol. La visibilidad mejora en cielos intensamente azules.

En el hemisferio norte, estos frentes se orientan a lo largo de una línea noreste a suroeste, con una longitud de cientos de millas, y su movimiento es generalmente hacia el este. Son rápidos, pudiendo avanzar más de 800 km por día, porque son empujados por sistemas de alta presión situados detrás del frente. Muchas veces la fricción con el suelo los frena ocasionando que la parte delantera se amontone, intensificando los fenómenos atmosféricos.

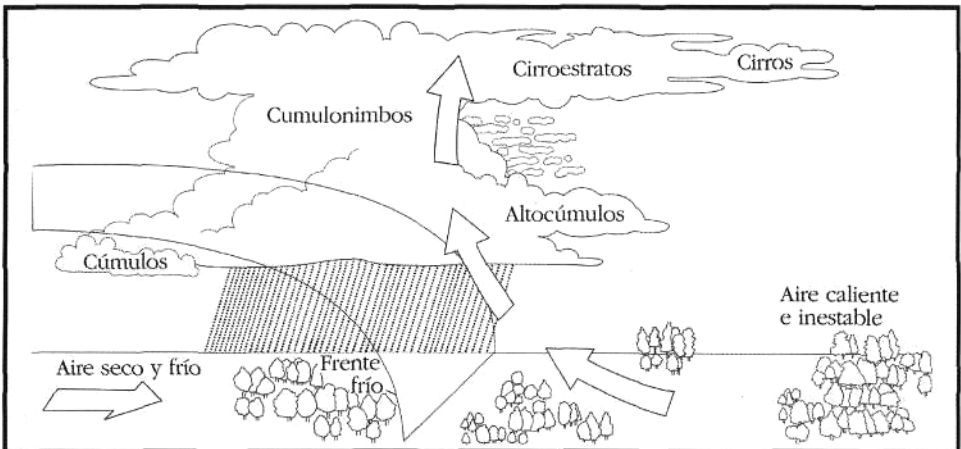


Figura 41 A.

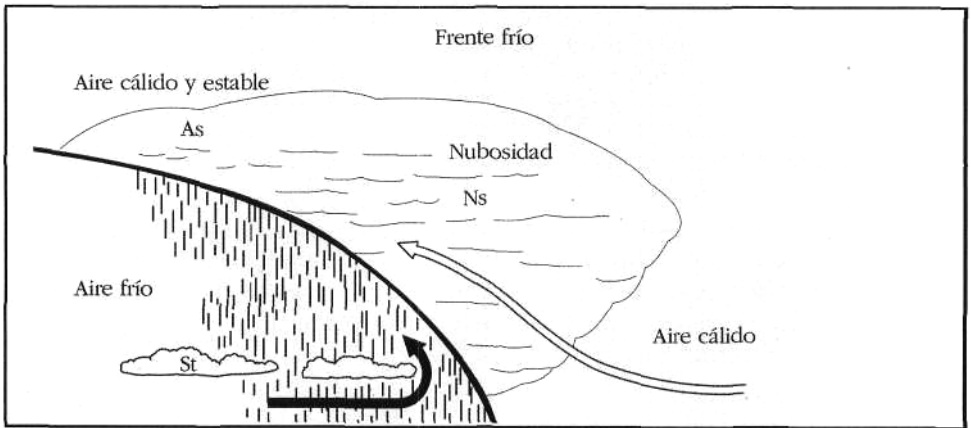


Figura 41 B.

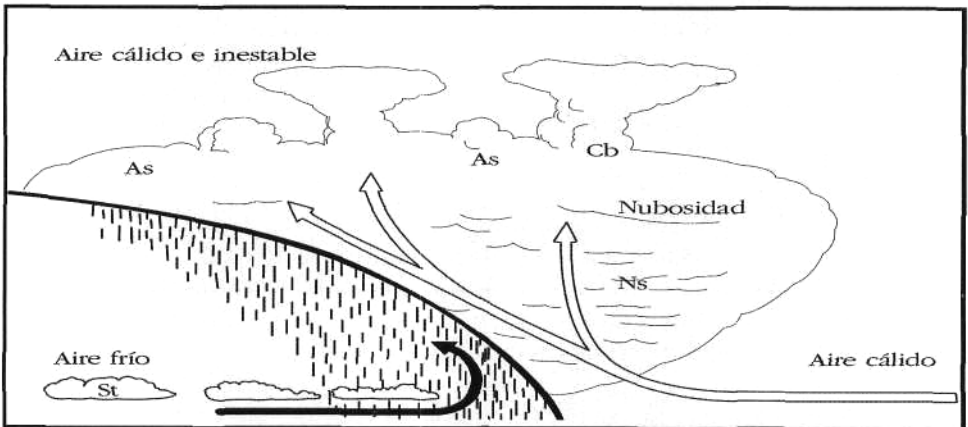


Figura 41 C.

Figuras 41 A, 41 B y 41 C. Frente frío. La masa de aire frío avanza rápidamente introduciéndose por debajo y elevando al aire caliente, levantándolo como si fuera una cuña. La humedad del aire cálido se condensa en nubes de desarrollo vertical como cúmulos y cumulonimbos.

La presión atmosférica tiende a subir después del paso del frente y la visibilidad mejora por la inestabilidad del aire que limpia la bruma, contaminación y neblina.

## *Frentes ocluidos*

Como los frentes fríos se mueven sobre la superficie más rápido que los calientes, terminan alcanzando a los frentes calientes levantándolos encima de ellos totalmente. Estas masas de aire encimadas se llaman frente ocluido.

Las características de un frente ocluido son una mezcla de las características de ambos frentes. Durante las primeras etapas de la oclusión pueden resultar condiciones de tiempo muy severas, aparecen nubes cumuliformes dentro de capas de nubes estratiformes, pues el aire caliente inestable se eleva violentamente.

## *Frente caliente*

Este frente de aire cálido, al chocar con una masa de aire frío denso y pesado, se encima lentamente sobre él y si el aire es estable, se forman generalmente nubes estratiformes. La llegada y el paso de un frente caliente son espectaculares y predecibles. En principio en su extremo superior, muy arriba, aparecen nubes tipo cirrus, seguidas por una lenta secuencia de cirroestratos, altoestratos y nimboestratos, conforme avanza la suave pendiente del frente.

De los altoestratos pueden precipitarse ligeras lluvias aunque no siempre llegan a tierra. Posteriormente la precipitación de los nimboestratos se vuelve continua y no se detiene hasta que el frente ha pasado. Como el aire caliente añade humedad al aire frío debajo, es posible que se forme niebla y la visibilidad disminuya significativamente.

Al paso de un frente caliente la presión barométrica baja y siempre hay un cambio de la dirección del viento, pero en este caso gira en dirección a las manecillas del reloj. Desde el aire la visión del paso del frente no es menos impresionante, se puede apreciar claramente la pendiente del frente cálido, iniciándose en los altos cirros, descendiendo y terminando en las bases de las nubes hasta casi llegar al nivel del suelo.

## *Frentes estacionarios*

Cuando la fuerza de ambas masas de aire se encuentran balanceadas, el frente que las separa permanece estacionario afectando las condiciones locales con características tanto de frente frío como de frente caliente.

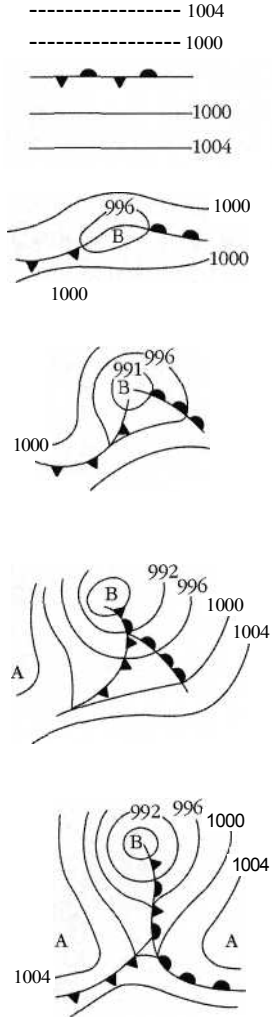
## *Ciclones extratropicales*

En las latitudes medias, cerca de los 30° norte, esto es a la altura de los Estados Unidos de América del Norte, Europa y Japón en el hemisferio norte, las masas de aire polar y tropical se desplazan girando alrededor de centros de baja presión. Cuando una masa polar viaja y empuja hacia el sur, en dirección opuesta una masa de aire tropical termina dirigiéndose hacia el norte, y justamente en los límites se empieza a formar una ligera depresión llamada *onda tropical*.

Entonces el aire frío toma una franca dirección hacia el sur y el aire caliente vira hacia el norte, girando ambos, uno penetrando al dominio del otro. La masa de aire frío que es más densa, permanece en contacto con el suelo, forzando al aire caliente a elevarse. Las ondas ciclónicas llamadas *ciclones extra tropicales* se forman en familias, rozan e interaccionan con las masas de aire polar y tropical girando en sentido anti horario alrededor de centros de baja presión.

En un principio el aire caliente presenta una ligera ondulación u ola, con cada frente moviéndose en dirección opuesta. La masa de aire frío es desviada hacia el sur mientras que el aire caliente lo hace hacia el norte: los frentes interactúan penetrándose y produciendo la nubosidad asociada al choque donde el aire frío obliga al caliente a elevarse creando cúmulos y tormentas.

Sinibología de los mapas meteorológicos



Vista tridimensional de las masas de aire

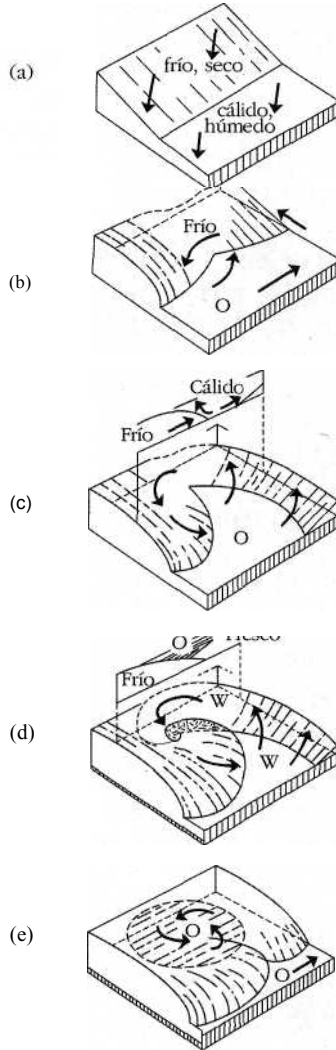


Figura 42. Ciclón exirratropical y ciclón frontal.

# XI

## EI TRÓPICO Y SUS ALISIOS



El trópico es la región arriba y abajo de la línea del ecuador, comprendida entre los trópicos de Cáncer y trópico de Capricornio, esto es, entre los paralelos de latitudes  $23.5^{\circ}$  norte y  $23.5^{\circ}$  sur. En América la región tropical abarca parte de México, el Caribe, Centro y parte de Sudamérica.

Climáticamente el trópico es una zona de extremos, contiene las regiones más húmedas y más secas del planeta. Los desiertos del Sahara, las selvas del Amazonas y junglas africanas, se encuentran en la región tropical. Desde el punto de vista meteorológico esta zona se recorre hacia el norte o sur según sea verano o invierno en cada hemisferio, y sus estaciones no son tan diferenciadas como en las más altas latitudes.

Algo particular de la circulación del aire en esta región cercana a la línea del ecuador, son los vientos alisios. Este movimiento constante del aire, de este a oeste, corresponde a la parte tropical de los anticiclones o centros de alta presión en los océanos. Los vientos alisios parecen soplar siempre del Noreste en el hemisferio norte y del Sureste en el hemisferio sur; formando un cinturón casi continuo alrededor del mundo, del que se han servido los navegantes.

## LOS ALISIOS

Estos históricos vientos son muy persistentes, de temperatura y humedad homogénea, se asocian generalmente con buen tiempo; como soplan casi siempre desde el Noroeste, permitieron a Cristóbal Colón atravesar el Atlántico en corto tiempo desde España a las Antillas. Del mismo modo

conquistadores y comerciantes utilizaron estos vientos para sus viajes trasatlánticos, por lo que se les llamó *trade winds*.

Cuando los alisios llegan a un continente traen la humedad del océano y la descargan como lluvia. Precisamente en la costa del golfo de México provocan precipitaciones constantes sobre la Sierra Madre Oriental. En cambio, cuando salen del continente hacia el mar, son vientos secos, por eso en la península e islas de Baja California, la precipitación es mínima ya que los alisios llegan después de pasar por el árido norte mexicano.

Así mismo paralelas a las costas mexicanas, existen cadenas de montañas y serranías que elevan las masas de aire, condensando la humedad proveniente del océano. Simplificando al máximo, se puede aseverar, que tenemos un clima árido y semiárido en el norte y un clima húmedo y semihúmedo asociado a los alisios en el sur.

## LA ZONA DE CONVERGENCIA INTERTROPICAL (ZCIT)

Los vientos alisios de ambos hemisferios, soplando del noreste y del suroeste respectivamente, convergen y chocan cerca de la línea ecuatorial, en una franja de unas 200 millas de ancho llamada Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT).

Al chocar los alisios del norte y del sur cerca de la ZCIT, empujan al aire húmedo hacia arriba generando altísimas nubes de desarrollo vertical y Cb s de más de 45 000 pies, con extremas precipitaciones debajo de ellas.

La ZCIT es débil en sus efectos sobre los continentes y se desplaza desde el hemisferio norte hacia el sur del ecuador durante el verano. No obstante, los gradientes de presión en esta área son leves y cerca de los continentes la dirección de los vientos obedece más a fenómenos de brisa de mar o monzones.

## FRENTE FRÍOS

La constancia de los vientos alisios haría pensar en una permanente banda de viento tropical disponible todo el año, no obstante la dinámica de la atmósfera es más compleja y existen diversos fenómenos que perturban

este flujo, como lo descubrieron las desafortunadas tripulaciones de tantos galeones cargados del oro de Indias que desaparecieron.

Ocurre que durante el invierno, masas de aire frío con vientos del oeste pueden desplazarse hacia el sur e invadir el flujo de los alisios. Cuando ocurre este choque cerca del ecuador, las características de humedad y temperatura de ambas masas son casi similares, sin embargo, a lo largo de este frente o *shear Une*, se producen cambios repentinos de la dirección del viento y una convergencia que ocasiona levantamiento del aire con la consiguiente formación de nubes de desarrollo vertical, como cúmulos y cumulonimbos que desprenden repentinos chubascos y tormentas.

## ONDA TROPICAL U ONDA DEL ESTE

Otra perturbación de los alisios a veces llega desde el Noreste, es la llamada *onda del Este*. Usualmente los alisios parecen provenir del Noreste, pero una onda con un eje norte-sur que viaja de este a oeste, desde los anticiclones subtropicales hasta el ecuador, hace a los alisios cambiar de rumbo y de origen para provenir del rumbo sureste, al pasar ésta, cambia súbitamente la dirección del viento, produciéndose abundante nubosidad y lluvias. Esta onda puede ser un área propicia para el origen de huracanes.



# XII

ONDAS, HURACANES Y TIFONES



Un huracán es el tipo de tormenta más destructiva, nace siendo apenas un centro de baja presión (I) sobre un océano tibio, de fácil evaporación, por lo que acumula una enorme cantidad de vapor en el aire, que al ascender se condensa; es entonces que la energía latente de estos billones de litros de agua evaporada se libera, formando tormentas, mientras que más vientos húmedos son atraídos hacia el centro de baja presión, la fuerza de coriolis los desvía hacia la derecha, ocasionando que se aproximen al centro, en cierto ángulo empuja la masa de aire central en sentido contrario a las agujas del reloj (hemisferio norte).

Todo el fenómeno, a su vez se desplaza, girando como un trompo gigante, también influido por la inevitable fuerza de coriolis, desviándose en una trayectoria curva hacia la derecha, la energía latente continúa liberándose en forma de viento, nubes, lluvia y relámpagos. Al aproximarse al continente los vientos sostenidos de más de 65 nudos (125 km/h) amontonan agua del mar contra la costa, que resulta en la acumulación de masas de agua y una elevación del nivel del mar. Cuando las olas chocan y sobrepasan las barreras, avanzan tierra adentro inundan los deltas de los ríos y valles bajos, arrasando las viviendas y poblaciones en las riberas. Las lluvias, que duran días, hacen que los ríos rebasen sus cauces e inunden los valles; las laderas de los cerros humedecidos se desprenden provocando derrumbes y deslaves.

Las estadísticas de un huracán respecto a las víctimas humanas son mayores que las de cualquier otro fenómeno atmosférico, debido a esta marea de tormenta o marejada ciclónica. En 1637 en la bahía de Bengala, un *tifón*, como se les llama a los huracanes en Asia, formó una marea de tormenta que elevó el nivel del mar sobre 12 m e inundó el valle del río Hooghly, matando a casi 300 000 personas que confiadas habitaban en sus orillas.

En 1970 ocurrió el peor desastre natural del siglo xx en Pakistán Oriental una marea de tormenta de 10 m de alto cubrió las pequeñas islas del río donde se asentaba una gran población y en el lapso de algunas horas, más de 300 000 personas se ahogaron. La hambruna, la anarquía social y las epidemias por los innumerables cadáveres aumentaron el número de víctimas. Como este fenómeno compromete regiones y hasta países enteros es difícil tomar medidas a tan gran escala, excepto la evacuación.

Cuando llegan a la costa, los ciclones tropicales arrasan con todo: árboles, casas precarias, playas de arena y cultivos, pudiendo cambiar la geografía del área eliminando costas e islas, rompiendo arrecifes. Uno de los más intensos para este hemisferio ha sido el huracán Gilberto, con ráfagas de viento de hasta 350 km/h que devastó Jamaica y partes de la costa de México en 1988. También el huracán Hugo causó 50 muertes y 5 000 millones de dólares en pérdidas en 1989; sin olvidar a Andrew, que en 1992 mató a más de 50 personas y ocasionó 15 000 millones de dólares en daños. En 1998 Mitch destruyó la infraestructura y economía rural en los países de Centroamérica, estimándose el daño en un retraso de 20 años, esta catástrofe ocasionó migraciones en masa de las poblaciones afectadas.

El Katrina fue el más mortífero y costoso que azotó Estados Unidos de América del Norte, en 2005, causando la muerte de 1 422 personas y daños por 75 mil millones de dólares. En Cancún el huracán Wilma con sus fortísimos vientos destruyó muchas propiedades y edificios por el 'efecto resonancia', que es cuando el viento soplando durante muchas horas hace balancear rítmicamente los edificios hasta que la estructura cede y se desmorona, al igual como un elefante derriba un árbol balanceándolo hasta que las raíces se doblegan.

## CICLO DE VIDA DEL HURACÁN

### *Origen*

Un huracán, como dijimos, empieza como una simple depresión o punto de baja presión atmosférica sobre el océano, lejos de la costa. Al inicio, simplemente parecen ondas del Este que se intensifican, pero pronto se define una baja (L), profunda y circular llamada *depresión tropical*. Intensos movimientos convectivos elevan el aire que gira en espiral a la vez que se dirige al centro de baja presión.

Por definición, todo centro de baja presión en el trópico se llama *ciclón tropical*. Los huracanes nunca se originan en la línea ecuatorial, pues ahí la fuerza de coriolis, organizadora del giro de sus vientos, es nula, mas bien prefieren latitudes entre los 8° y los 15° al norte y sur del ecuador.

Un ciclón tropical joven se alimenta de calor latente, al evaporar del mar agua tibia por arriba de 27 °C, creando condiciones de inestabilidad, propicias para ascender y condensar vapor de agua liberando el calor latente de evaporación. Nutrido de este modo el fenómeno se carga de humedad y de energía para crear fuertes vientos, enormes nubes y empezar a moverse.

Se forman nubes Cb y cúmulos con intenso desarrollo vertical que llegan hasta la tropopausa, también se inician movimientos convergentes a baja altura que parecen concurrir hacia su centro, desviándose hacia la derecha por la fuerza de coriolis, girando en una gigantesca espiral que se ve desde el espacio.

El gradiente de presión en las inmediaciones se hace cada vez mayor y el centro del remolino se angosta, intensificándose los vientos en toda la zona. Una vez formada, toda masa tormentosa empieza a desplazarse de 10 a 20 km/h en una trayectoria parabólica hacia el norte que obedece a su vez a la fuerza de coriolis. En su paso puede atravesar el cinturón de los vientos alisios desviándolos o engulléndolos.

## *Desarrollo*

Desde que aparecen como áreas de baja presión en algún punto sobre el mar, a los ciclones y huracanes se les da un seguimiento constante por parte del Servicio Meteorológico Nacional. Los reportes se canalizan y procesan a fin de evaluar el fenómeno mediante modelos y determinar potencial y lugares de riesgo, en coordinación con la Secretaría del Medio Ambiente, Protección Civil, Recursos Naturales y Pesca (Semarnap), se determinan y designan albergues y demás medidas de alerta.

Al aproximarse un huracán primero aparecen nubes altas *Ci* y *Cs*, como si se acercara un frente caliente, probablemente se observe el Sol o la Luna con un halo multicolor, luego llegan las nubes intermedias de *As* con algunas *Cu* de gran desarrollo vertical, inmersas en las capas de nubes medias; finalmente, en el horizonte, se ve una impresionante barrera de nubes *Cb*, cuyas cúspides son tan altas que llegan a la tropopausa a unos 50 000 pies.

En movimiento, el ciclón tiene partes más violentas que otras. Hacia su flanco delantero izquierdo los vientos son muy intensos y la nubosidad es abrupta y rápida, formando *Cu* y cumulonimbos; alrededor del centro de baja presión (I) el huracán es una gigantesca y continua tormenta circular que genera alrededor inestabilidad y humedad del aire y produce grandes hileras de nubes tipo cúmulos y cumulonimbos que se desplazan con el viento en un enorme remolino.

Constantemente esta baja presión central sigue atrayendo a más vientos de superficie, cargados de la humedad evaporada del mar, aunque éstos nunca terminan de llenar el vacío del centro de baja presión, sino que permanecen girando alrededor, entre tanto su calor latente de humedad condensada en nubes y lluvia continúa liberando y alimentando de energía al huracán mientras viaja sobre mares cálidos. Así, puede subir de categoría si absorbe energía del aire húmedo o crecer en diámetro pudiendo abarcar extensiones como todo el golfo de México, como ocurrió con el Ike.

En el centro del fenómeno existe el llamado *ojo del huracán*, un lugar vacío de nubes. Aquí es donde el aire se hunde y es calentado adiabáticamente, creando una temperatura anormalmente alta sin vientos ni lluvias. Cuando el ojo del huracán pasa por un punto, el cielo se aclara y los vientos se calman, pero en pocos minutos se reinician la precipitación y los enérgicos vientos que ahora soplan en dirección contraria.

Los huracanes se trasladan primero con una dirección Noroeste para en mayores latitudes virar al Noreste y aumentar la velocidad de desplazamiento hasta a 80 km/h. Su camino es monitoreado por satélites y estaciones en tierra, su ruta es estimada con anticipación y anunciada por diferentes medios. En México se obtiene información en el sitio: [www.smn.cna.gob.mx](http://www.smn.cna.gob.mx).

## *Muerte*

Conforme el huracán avanza hacia el Norte o el Oeste, pierde sus características tropicales, el aire más frío lo debilita y si toca tierra perderá su único alimento que es el calor latente del vapor de agua. Sus vientos empiezan a ser frenados por la fricción con el suelo y montañas.

Pero aún es muy peligroso, no por el viento, sino porque al detenerse el huracán puede continuar descargando toda la humedad que contiene con lluvias persistentes sobre tierra que causan inundaciones, desbordan ríos y presas. El centro de baja presión comienza a estabilizarse con el exte-

rior, aumenta de superficie y al mermar el gradiente de presión, la fuerza de los vientos disminuye.

Los ciclones tropicales se inician, y muchas veces también mueren, sólo como depresiones tropicales, con vientos menores a 34 nudos. La distribución global de los ciclones tropicales se limita a seis regiones: Las Antillas, el golfo de México, el Pacífico noroeste, el mar Árabe y la costa del Pacífico de México y Centroamérica.

Ante un huracán, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua, emite boletines y avisos de alerta cada tres, seis y doce horas, según la proximidad y peligrosidad del fenómeno. En coordinación con el Sistema Nacional de Protección Civil y los brigadistas comunitarios, se organizan las medidas de atenuación, evacuación y distribución de equipos y víveres, de ser necesario.

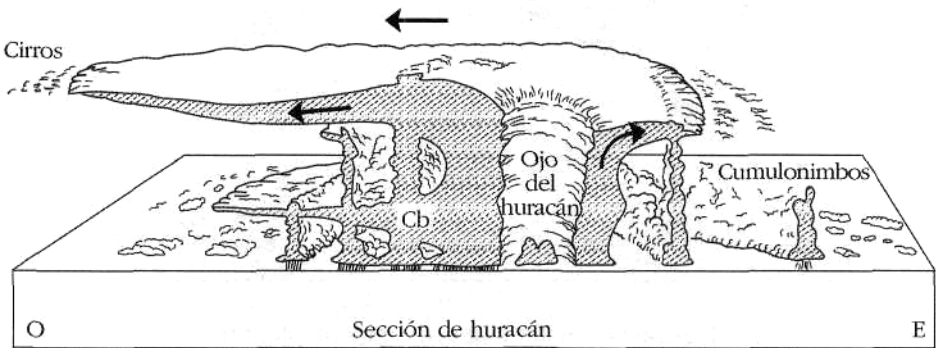


Figura 43. Huracán.

Un rastreo constante por radar y satélites proporciona datos al Centro Nacional de Huracanes en Florida, que realiza un seguimiento de cada uno, desde su inicio. En México, la temporada de actividad ciclónica inicia oficialmente el 15 de mayo en el Pacífico y el 1º de junio en el lado del Atlántico. Se cuenta con 12 estaciones de radar y 15 de sondeo con 2 750 puntos de medición.

Este corte tridimensional en la figura 43, de un huracán, muestra las hileras de nubes cumulonimbos que conforman un enorme remolino. En medio se encuentra el ojo del huracán, las flechas muestran el despla-

miento del mismo sobre el océano. En este ejemplo el fenómeno tiene un diámetro de aproximadamente 800 km y las nubes más altas se encontrarían a 45 000 pies (12 km) extendiéndose por la tropopausa.

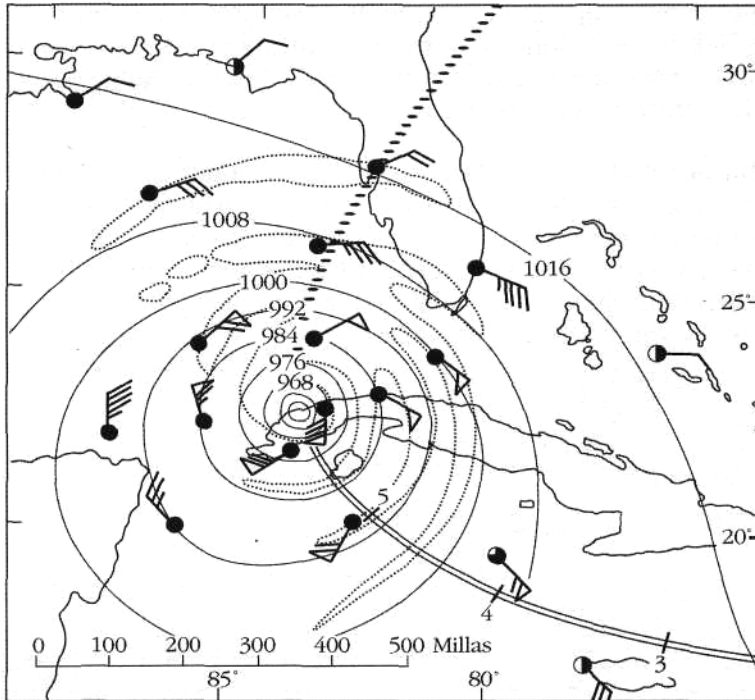


Figura 44. Ciclón tropical (vista de planta).

Visto desde arriba, un huracán es una enorme espiral de nubes arremolinadas por los vientos girando en sentido opuesto a las manecillas de un reloj, alrededor de un centro de muy baja presión (I).

Aunque el huracán es circular, no todos sus lados son iguales, la mayor cantidad de precipitación cae adelante y a la derecha de su trayectoria. En la figura 44, los símbolos indican dirección y velocidad del viento, cada línea diagonal de la flecha equivale a 10 nudos y cada triángulo en la misma equivale a 50. La línea punteada marca la trayectoria parabólica del huracán.

El Comité de Huracanes de la Organización Mundial de Meteorología designa cada año los nombres para una mejor coordinación de las instituciones

internacionales encargadas de prevenir y ayudar a los afectados en cada región del mundo. Recuérdese a Gilberto, Katrina, Ike. México pertenece a la cuarta región, que comprende América del Norte, Central y el Caribe.

## CICLONES TROPICALES: CLASIFICACIÓN INTERNACIONAL

Los ciclones tropicales se clasifican en categorías, de acuerdo a la velocidad de sus vientos constantes por más de un minuto, aunque siempre ocurren repentinas ráfagas aún de mayor velocidad en cada tipo. Se denomina *depresión tropical*, si el ciclón presenta vientos sostenidos de hasta 34 nudos (64 km/h). Es una tormenta tropical si tiene vientos de 35 a 64 nudos (de 66 a 120 km/h), y si el viento sostenido alcanza más de 65 nudos (125 km/h) puede clasificarse como un huracán. Los huracanes tienen a su vez una escala por su intensidad y efectos.

## INTENSIDAD DE HURACANES: ESCALA SAFFIR-SIMPSON

Existe una escala, desarrollada en 1970 por H. Saffir y R. Simpson, en la que se relaciona la intensidad del fenómeno con su potencial destructivo. La escala es sólo un estimado, pues los efectos pueden empeorar en mucho, según la región y las medidas precautorias que se tomen.

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN	VELOCIDAD DEL VIENTO	PRESIÓN BAROMÉTRICA	ALTURA DE MAREA DE TORMENTA	DAÑOS
1	débil	120 a 153 km/h	mayor a 980 mb	1.2 a 1.7 m	Sólo a la vegetación
2	moderado	154 a 178 km/h	979 a 965 mb	1.8 a 2.6 m	Moderados a casas
3	fuerte	179 a 210 km/h	945 a 964 mb	2.7 a 3.9 m	Estructural extenso

4	muy fuerte	111 a 249 km/h	944 a 920 mb	4.0 a 5.5 m	Estructural extremo
5	devastador	mayor a 250 km/h	menor a 920 mb	más de 5.5 m	Estructural catastrófico

## AVIONES CAZA-HURACANES

Para anticipar y prevenir el poder destructivo de estos fenómenos, se intenta conocerlos a fondo estudiando a detalle sus temperaturas, humedad del aire, velocidades del viento, etcétera. Para predecir su comportamiento se utilizan diversos modelos matemáticos y alguno de estos datos deben obtenerse directamente desde adentro.

A partir de la década de los cincuenta se ha intentado medir directamente los parámetros y síntomas de los huracanes en varios puntos y altitudes, inclusive en el mismo centro. Actualmente existen aviones caza-huracanes bimotores adaptados especialmente, con estructura reforzada para poder soportar la severa turbulencia del tifón.

Estos aviones, además de múltiples instrumentos para medir los parámetros usuales (temperatura, presión, humedad) en cada zona del fenómeno, están equipados al menos con tres radares meteorológicos, los cuales registran cortes seccionales a lo largo de los ejes de la gran espiral; mientras el avión circunnavega o atraviesa el fenómeno obtiene una imagen de su forma y estructura (figura 42).

El monitoreo constante de los huracanes cuyos datos son incorporados en diversos modelos matemáticos, permite predecir mejor su comportamiento. La categoría que alcanzan, depende en mucho de cuánta energía obtienen del calor latente de evaporación.

Los satélites, radar y el pronto procesamiento de los datos permiten pronosticar el nacimiento, trayectoria y potencia de los huracanes. La mejor defensa es la prevención y las recomendaciones emitidas por las autoridades. El Hurricane Center en Florida y el SMN son excelentes fuentes de información. Pueden consultarse los siguientes sitios en Internet:

1. <http://www.feraa.gov/storm/trop.shtm> Información de precauciones referidas a huracanes y tormentas tropicales.
2. <http://www.hurricanehunters.com> Información sobre huracanes y pronósticos. Operaciones de vuelo dentro de un huracán para obtener datos.
3. <http://www.nhc.noaa.gov/> Página del Centro de Predicción de Tormentas Tropicales del Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos de América del Norte.
4. <http://www.nws.noaa.gov/om/hurricane> Observaciones sobre tormentas tropicales desde su desarrollo.
5. <http://www.smn.cna.gob.mx> En México informa sobre los huracanes y las medidas de seguridad.



# XIII

INFORMACIÓN DISPONIBLE:  
REPORTES Y PRONÓSTICOS DEL TIEMPO



En Internet y canales de televisión especializados existe abundante información sobre el estado del tiempo y con lo aprendido en este libro el lector podrá seleccionar y entender fácilmente la diversidad de datos disponibles. Cada quien debe seleccionar las fuentes adecuadas acordes a sus actividades, es aconsejable practicar constantemente, comparando la información obtenida con observaciones del cielo, hasta conseguir un criterio meteorológico acertado. Generalmente al cabo de unas semanas se adquiere suficiente práctica para entender rápidamente y darles sentido a datos, mapas e imágenes de satélite.

En aviación, antes de cada vuelo el piloto debe conocer la situación del tiempo en su ruta y destino así como saber qué tendencia tiene el estado del clima en su aeropuerto de origen por si necesitara regresar. Para esto requiere conjuntar diversos datos e información a fin de crear una imagen mental sobre las condiciones del clima que se pudieren esperar, para considerar cómo afectan a su vuelo y tomar las decisiones al respecto: si debe despegar según lo planeado, cargar más combustible, retrasar su vuelo, cambiar de ruta o incluso cancelar el vuelo.

La información de meteorología aeronáutica básica puede encontrarse en los Reportes y Pronósticos en formato fijo, elaborado para prácticamente todos los aeropuertos del mundo llamados Aviation Routine Weather Report (METAR) y Terminal Aeródromo Forecast (TAF). En los despachos de los aeropuertos, amablemente el personal comentará las características principales de la ruta y destino a volar:

- ATIS: en la mayoría de los aeropuertos existe una frecuencia que transmite la información grabada similar al metar, la cual es actualizada cada hora. En la grabación también se indican situaciones propias del

aeropuerto y pistas en uso en ese momento. Los pilotos sintonizan esta frecuencia antes de llegar para estar al tanto, o antes de salir para saber datos del viento y la pista en uso.

- El Reporte METAR: consiste en unas líneas de datos meteorológicos codificados, que constantemente son enviadas a los demás aeropuertos; se genera cada hora en prácticamente cada aeropuerto de la República y el mundo. El reporte o los reportes requeridos se pueden solicitar en las oficinas de despacho del aeropuerto u obtener vía Internet en la página de Servicios para la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano.
- El Pronóstico TAF: describe las condiciones del tiempo que se espera ocurran en un radio de 5 nm del aeropuerto, durante un periodo de 24 horas, es emitido cada seis horas según la hora de GMT o universal coordinada, a las 0000Z, 0006Z, 1200Z y 1800Z.

Los datos meteorológicos de los reportes están codificados en una simbología internacional que permite al personal aeronáutico de todo el mundo homogeneizar conceptos y términos, evitando confusiones. Es necesario practicar bastante y estar familiarizado con los códigos y símbolos para interpretar rápida y correctamente los reportes. Para más claridad, se presentan ejemplos interpretados y analizados de METAR y TAF a continuación:

1. Reporte METAR para la Ciudad de México				
METAR MMMX 020545Z 01006KT 12SM SKC 13 / 06 A3028 RMK SLP 137 52007 956.				
Tipo de reporte	Designador de la estación	Tiempo del reporte en hora UTC	Viento	Visibilidad
↓	↓	↓	↓	↓
METAR	MMMX	020545Z	01006KT	12SM
↑	↑	↑	↑	↑
SKC	13 / 06	A3028	RMK SLP137 52007 956	
Condición del cielo	Temperatura/ Punto de rocío	Altímetro	Notas	

Este reporte debe leerse así:

Reporte METAR de la estación de México del día 02 del mes emitido a las 0545Z, viento de los 010° con 06 nudos; visibilidad 12 millas estatúas; condición del

'cielo: cielo despejado, temperatura ambiente 13 °C y punto de rocío 06 °C.  
 Notas: Presión reducida al NMM de 1013.7 hPa (hectopascales). Nubes bajas del 5 (stratus no cumulogenitus), medias del 2 (nimbostratus), altas 0 (no hay nubes altas), dirección de las nubes medias y altas del 0 (sin movimiento) dirección de las nubes bajas del 7 (NW), cambio de la presión, la presión disminuye 0.6 hPa.

## 2. El Pronóstico TAF para el aeropuerto de México

MMMX O2O527Z 020606 10005KT P6SM SKC BECMG  
 0910 5SM HZ SCT020 FM10 06005KT 3SM HZ  
 SCT020 TEMPO1115 1SM HZFU BECMG 1617  
 3SM HZFU FM20 12010KT 5SM HZFU SCT020  
 SCT080 TEMPO 2202 BKN020 FM05 06005KT  
 P6SM SKC TN08/12Z TX24/22Z

Este pronóstico debe leerse así:

Pronóstico TAF para el área de México emitido el día 02 de del mes en curso a las 05:27Z válido de las 06:00 h. a las 06: 00 h del día siguiente, viento de los 100 grados con 05 nudos de intensidad, visibilidad más de 6 millas estatuto, skyclear o despejado. Llegando a ser de la 09 a 10.5 millas de visibilidad, brumoso HZ, SCT medio nublado a 2000 pies.

## 3. NOTAMS

A5799/04 - RWY 05R/23L CLSD 02 DEC 05:00 UNTIL 15 DEC 12:30 0500/1230 DLY

A4177/04 - FLASHING LIGHTS RWY 28 U/S 13 SEP 22:59 UNTIL 13 MAR 23:59 2005

Son anuncios sobre condiciones del aeropuerto. Si una pista o calle de rodaje está cerrada o si un equipo de navegación está en reparación etcétera.

## 4. Descripción y explicación de los Reportes y Pronósticos en códigos

METAR

MMMY 120640Z 06006KT 4SM BKN015 OVC025 25/24 A2981 RMK  
 SLP045 T01820159

*Continúa*

TAF MMY 030517Z 030606 11012KT 6SM HZ SCT045 BKN080  
 OVC200 FMIOOO 10006KT 5SM HZ SCT030 BKN080 TEMPO 1115  
 BKN020 BECMG 1517 26008KT 6SM SCT2500 FM 1700 14012KT  
 P6SM BKN030 BKN080 OVC200 TEMPO 2101 5SM RA VC CB FM0200  
 12006KT P6SM SCT030 BKN080

Este reporte y pronóstico deben leerse así:

	Tipo de reporte	
Reporte METAR	AMD- Enmiendas	Pronóstico TAF
	SPECI- Especial	
MMY	Designador del aeropuerto	MMY
120640Z	Hora de elaboración	030517Z
	Periodo de validez, día del mes (2 dígitos)	030606
	Hora de inicio (2 dig) y finalización (2dig)	
06006KT	Viento, 3 (dig) dirección o VRB variable	11012KT
	Velocidad 3 (dig) en KT; 0000 Calma	
4SM	Visibilidad prevaleciente en Millas estatuto o fracciones	6SM
	Condiciones significativas presentes	HZ
BKN015	Condición del cielo:	SCT045
	SKC, despejado 0/8	
OVC025	FEW algunos 2/8	BKN080
	SCT, medio nublado de 3/8 a 4/8	
	BKN, nublado de 5/8 a 7/8	

*Continúa*

	OVC, cerrado 8/8	
25/24	Temperatura en °C; (2 dig) / Punto de rocío °C (2 dig)	
	M temperatura bajo 0	
A2981	Reglaje altimétrico en Pulgadas de mercurio	
RMK	Notas SLP (Sea Level Pressure) en Hectopascales	
SLP045	(últimos dos enteros y decimal) 1004.5hPa	
T01820159	T temperatura y punto de rocío con decimales 18.2°C y 15°C	
Hora y minutos de inicio del cambio de condiciones		FM1000
Cambios temporales esperados desde hora de inicio (2 dig) (11) y hora de finalización (2 dig) (15)		TEMPO 1115
Cambio esperado durante hora de inicio (2 dig) (15) y de finalización (2 dig) (17)		BECMG 1517
Porcentaje de probabilidad de que ocurra un cambio de las 18Z a las 20Z		PROB40 1820

### SÍMBOLOS PARA INTERPRETAR EL METAR

Los reportes tienen datos condensados de todo el mundo, presentando las características y fenómenos atmosféricos, codificados en abreviaturas o símbolos. A continuación se presentan tablas de estas abreviaturas, las cuales deben conocerse para interpretar y visualizar las condiciones del cielo en cada reporte. Los símbolos o abreviaturas, escritos en mayúscula se pueden agrupar para su estudio en las categorías siguientes:

Tabla 1. Calificador

Símbolo o clave	Significado	Traducción
El signo (+ ó -)	Asociados a un símbolo o abreviatura se refieren a su intensidad o proximidad.	
El signo (-)	indica Light	Ligero
ningún signo ()	indica Modérate	Moderado
El signo (+)	indica Heavy	Fuerte
VC	indica Vicinity	En la vecindad del aeropuerto (entre 5 y 10 NM o millas)

Tabla 2. Descriptor

Símbolo o clave	Significado	Traducción
MI	Shallow	Poco profundo
BL	Blowing	Soplando
BC	Patches	En partes
SH	Showers	Chubascos
PR	Partial	Parcial
DR	Drifting	Moviéndose lentamente
TS	Thunderstorm	Tormenta
FZ	Freezing	Helado

### *Fenómenos atmosféricos*

Tabla 3. De Precipitación

Símbolo o clave	Significado	Traducción
DZ	Drizzle	Llovizna
SG	Snow Grains	Granos de nieve
GR	Hail	Granizo
SN	Snow	Nieve
GS	Small Hail/ Snow Pellets	Bolitas de nieve

UP	Unknowvn	Precipitación desconocida en observatorios automáticos
IC	Ice crystals	Cristales de hielo
PE	Ice Pellets	Bolitas de hielo
RA	Rain	Lluvia

Tabla 4. De Oscurecimiento

Símbolo o clave	Significado	Traducción
PY	Spray	
NOSIG	No sig chance	Sin cambio significativo
SQ	Squall	Línea de turbonada
SA	Sand	Arena
NSC	No sig clouds	Sin nubosidad significativa
SS	Sandstorm	Tormenta de arena
VA	Volcanic Ash	Ceniza volcánica
DS	Duststorm	Tormenta de polvo
NSW	No sig weather	Estado del tiempo no significativo
FC	Funnel cloud	Embudo de tornado que no toca el suelo. Tromba
+FC	Tornado	Waterspout
PO	Well Developer dust/sand whirls	Remolino de polvo o arena
BR	Mist	Neblina (Visibilidad mayor de 5/8 SM)*
DU	Widespread Dust	Polvo extendido
FG	Fog	Niebla (Visibilidad menor a 5/8 SM)*
FU	Smoke	Humo
HZ	Haze	Bruma

\* Indica diferente uso internacional. Ceiling and Visibility Okay (cavok) para Sudamérica y Europa significa una visibilidad mayor a 10 km y sin nubes debajo de 5 000 pies.

Tabla 5. Algunos ejemplos de Codificación

Codificación	Significado
CU FRMG 030	Cumulus formándose a 300 ft
MDT CU ALQDS	Cumulus moderados en todos los cuadrantes
DSNT CB SE AND SW MOVG NE	CB distantes al SE y SW moviéndose al NE
LWRSC	Stratocumulus más bajos
VSBY LWR SE	Visibilidad más baja al SE
CIG RGD DRK	Cielo rasgado y obscurecido
SFC VSBY 3 +RA	Visibilidad en superficie 3 millas por lluvia fuerte
RADAT	Datos de radiosondeo
TS OVHD MOVG W	Tronada sobre la estación moviéndose al W
LTGIC	Relámpagos en las nubes
FQ.TLTGICCG	Relámpagos frecuentes dentro de nubes y de nube a tierra
OCNL LTGICCG N	Relámpagos ocasionales de nube a nube y de nube a tierra al Norte
ST 099 HND	Stratus a 900 ft
TSE48 DSIPTG	Tormenta terminó a los 48 disipándose
TCUNE	Cumulus de torre al NE
INTMNT DZ	Llovizna intermitente
TSB17E32	Tormenta empezó a los 17 y terminó a los 32
FU OVR RWY	Humo sobre pista
FG DSIPTG	Niebla disipándose
FGINCRG	Niebla incrementándose
HIR CLDS VSB	Nubes más altas visibles
BINOVC	Claros en el cerrado
HLSTO	Piedras de granizo
HZLYR	Capa de bruma
FULYR	Capa de humo
OCNL DROPS	Gotas ocasionales

## LISTA DE ABREVIATURAS PARA EL CÓDIGO METAR

Símbolo	Significado	Traducción
AC	Alto cumulus	
ACC	Alto cumulus Castellanos	
ACSL	Alto cumulus Lenticularis	
ACFT	Aircraft	Aeronave
ALQDS	All Quadrant	Todos los cuadrantes
AS	Alto stratus	
B	Begin/Began	Empezó
BC	Patches	Bancos
BKN	Broken	Nublado
BL	Blowing	Arrastrado por viento
BR	Mist	Neblina
BINOVC	Breaks in the Overcast	Claros en el cerrado
CB	Cumulonimbus	
CC	Cirrocumulus	
CCSL	Cirrocumulus Lenticularis	
CI	Cirrus	
CLD	Cloud	Nube
COR	Correction	Corregido
CS	Cirrustratus	
CU	Cumulus	
DR	Low Drifting	Arrastre en superficie
DROPS	Drops	Gotas
DS	Dust storm	tormenta de polvo
DSIPTG	Dissipating	Disipándose
DSNT	Distant	Distante
DU	Dust	Polvo
DZ	Drizzle	Llovizna
E	Ended/estimated	Terminó/estimado a
FG	Fog	Niebla

FGDSPTG	Fog Disipainting	Niebla disipándose
FGINCRG	Fog Incrementing	Niebla incrementándose
FQT	Frequent	Frecuente
FT	Feet	Pies
FU	Smoke	Humo
FZ	Freezing	Super enfriado
G	Gust	Rachas
GR	Hail	Granizo
GS	Small hail or snow pellets	Granizo pequeño o Pelotitas de nieve
hPa	Hectopascal	
HZ	Haze	Bruma
HZY	Misty, foggy	Brumoso

## DESIGNADORES IATA Y OACI PARA LOS AEROPUERTOS NACIONALES

Cada aeropuerto en todo el mundo es identificado por un designador, estas siglas internacionalmente estandarizadas para evitar confusiones, aparecen en planes de vuelo, boletos, equipaje, mapas, estaciones de navegación y en los reportes meteorológicos asociados. Los designadores se dividen en Internacional Air Transport Association (IATA) y Organización de Aviación Civil Internacional (OACI).

MMAA	ACÁ	ACAPULCO
MMAS	AGS	AGUASCALIENTES
MMBT	HUX	B. DE HUATULCO
MMCB	CVA	CUERNAVACA
MMCE	CME	CD. CARMEN
MMCL	CUL	CULIACÁN
MMCM	CTM	CHEMUMAL
MMCN	CEN	CD. OBREGÓN

MMCP	CPE	CAMPECHE
MMCS	CJS	CD. JUÁREZ
MMCU	<b>cuu</b>	CHIHUAHUA
MMCV	CVM	CD. VICTORIA
MMCZ	CZM	COZUMEL
MMDO	DGO	DURANGO
MMGL	GDL	GUADALAJARA
MMLO	BJX	BAJÍO LEÓN
MMGM	GYM	GUAYMAS
MMHO	HMO	HERMOSILLO
MMIA	COL	COLIMA
MMIO	SLW	SALTILLO
MMLM	LMM	LOS MOCHIS
MMLP	LAP	LA PAZ
MMLT	LTO	LORETO
MMMA	MAM	MATAMOROS
MMMD	MID	MERIDA
MMML	MXL	MEXICALI
MMMM	MLM	MORELIA
MMMT	MTT	MINATITLÁN
MMMXX	MEX	MÉXICO
MMMY	MTY	MONTERREY
MMMZ	MZT	MAZATLÁN
MMNL	NLD	NUEVO LAREDO
MMOX	OAX	OAXACA
MMPA	PAZ	POZA RICA
MMPB	PBC	PUEBLA
MMEP	TPQ	TEPIC
MMPN	UPN	URUAPAN
MMPR	PVR	PTO. VALLARTA
MMPS	PXM	PTO. ESCONDIDO
MMRX	REX	REYNOSA

MMSD	SJD	S. JOSÉ DEL CABO
MMSP	SLP	SAN LUIS POTOSÍ
MMTC	TRC	TORREÓN
MMTG	TGZ	TUXTLAGTZ.
MMTJ	TIJ	TIJUANA
MMTL	TCG	TULANCINGO
MMTM	TAM	TAMPICO
MMTO	TLC	TOLUCA
MMTP	TAP	TAPACHULA
MMUN	CUN	CANCÚN
MMVA	VSA	VILLAHERMOSA
MMVR	VER	VERACRUZ
MMZC	ZCL	ZACATECAS
MMZH	ZIH	ZIHUATANEJO
MMZO	ZLO	MANZANILLO

La televisión comercial proporciona información muy generalizada y los pronósticos de lluvias o nubosidad son para las amplias regiones de cobertura del canal, sin embargo puede ocurrir un estado del tiempo diferente en cada localidad. En este tipo de reportes también se proporcionan las mínimas o máximas temperaturas; las primeras ocurren antes de la salida del sol y las últimas después del medio día debido a la inercia térmica del aire y del suelo, pero la temperatura puede fluctuar bastante durante el día por lo que no son buenas referencias.

Reportes y pronósticos más prácticos se encuentran en otras fuentes especializadas, nacionales e internacionales. En los Estados Unidos de América del Norte, es común la consulta del Weather Channel y sus sitios de Internet. Una excelente fuente es el Nacional Weather Service de EE.UU., varios sitios relacionados con éste pueden ser localizados por la palabra clave *Weather*, los cuales proporcionan imágenes de satélite en tiempo real de la localidad que se desee.

Se sugieren las siguientes páginas de Internet, por ser las más populares para consulta meteorológica:

<a href="http://www.intellicast.com">http://www.intellicast.com</a>	Muestra imágenes que cubren todo el planeta y rinde pronósticos para las ciudades más importantes.
<a href="http://weather.noaa.gov/weather/metar.shtml">http://weather.noaa.gov/weather/metar.shtml</a>	Proporcionan el reporte y pronóstico en tiempo presente para los aeropuertos. Se requiere ingresar el designador oaci.
<a href="http://weather.noaa.gov/weather/taf.shtml">http://weather.noaa.gov/weather/taf.shtml</a>	
<a href="http://www.nws.noaa.gov">http://www.nws.noaa.gov</a>	Sitio del Servicio Meteorológico Nacional de los Estados Unidos de América del Norte (National Weather Service).
<a href="http://www.snm.cna.gob.mx">http://www.snm.cna.gob.mx</a>	Sitio del Servicio Meteorológico Nacional.
<a href="http://www.ucar.edu">http://www.ucar.edu</a>	University Corporation for Atmospheric Research (ucar).

## MAPAS DE TIEMPO SIGNIFICATIVO Y VIENTOS A GRAN ALTURA

En la aviación comercial, además de los reportes se debe conocer a detalle la meteorología de toda la ruta, así como de los vientos, no sólo por seguridad sino para eficientar la operación volando a niveles propios para encontrar vientos favorables y evitar turbulencias. Esta altitud óptima es llamada *altitud de crucero*. Un ejemplo de cartas sigmet o de tiempo significativo, se presentan a continuación:

- La carta superior (figura 45 A), nos muestra la información del *Tiempo significativo para niveles de vuelo superiores sobre el área México*. Observando de arriba abajo tenemos la cuadrícula de coordenadas, latitud Norte y longitud Oeste (figura 45 A). Ejemplo, día 12 de septiembre de 2008 a las OOOOZ hora gmt o sea las 07:00 p.m. del día 11 en México. Las corrientes de chorro o jet stream son las flechas en líneas gruesas, la velocidad de sus vientos se representa con las flechas pequeñas donde cada raya transversal indica 10 nudos y cada banderín o triángulo 50 nudos, para el ejemplo serían 90 nudos a FL390 es decir a 39 000 pies. Una línea punteada rodea un área de turbulencia entre 400 y 300 o sea entre 40 000 y 30 000 pies. Junto a ella tenemos un frente frío representado por una curva dentada con triángulos. La nubosidad de forma alargada cubriendo el sur de Estados Unidos de América del Norte. Presenta cumulonimbos (Cb's), aislados con cúspides a 420. El huracán IKE resalta sobre el golfo de México, rodeado de nubosidad

convectiva, Cb's con sus cúspides muy altas, hasta el nivel 500 (50 000 pies). Aparecen Cb's aislados (isol), frecuentes (FROJ) U ocasionales (OCNL) a veces ocultos incrustados entre las capas nubosas. Razón por la cual el radar meteorológico debe estar encendido al volar en esas condiciones. Se debe estar también atento a las condiciones de engelamiento. Los niveles de vuelo encerrados en los cuadros señalan la altitud de la troposfera. Algunos aeropuertos son señalados por sus designadores para una mejor ubicación en la carta.

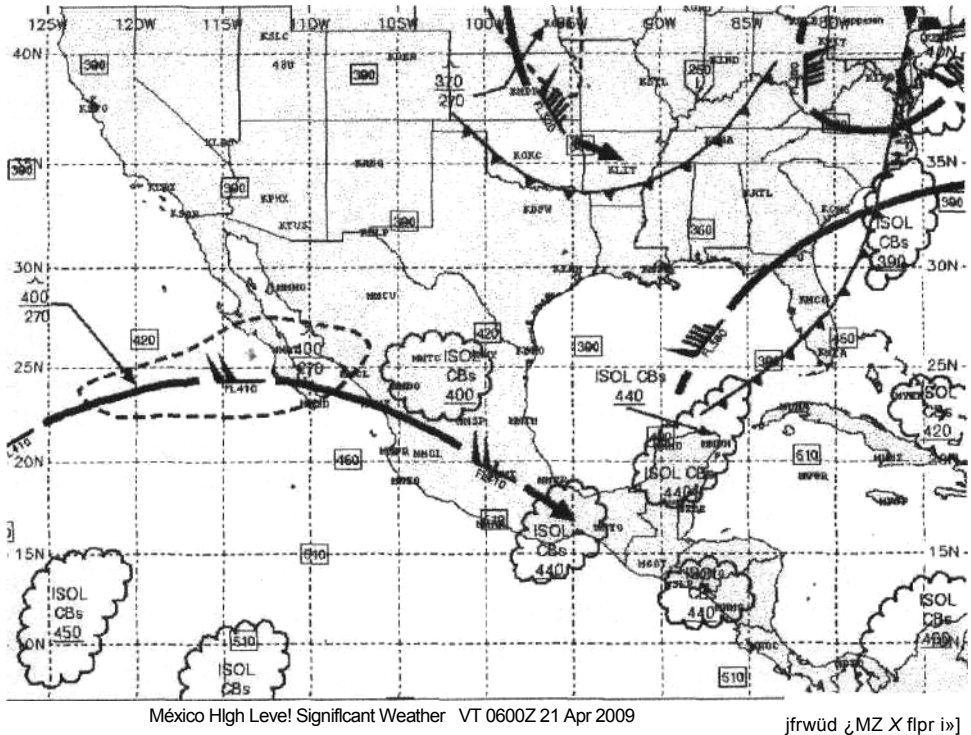


Figura 45 A. Cartas sigmet: tiempo significativo para niveles de vuelo superiores sobre el área de México.

### *Vientos a gran altura*

La carta inferior (figura 45 B), señala los vientos al nivel de vuelo 340 (34 000 pies) cuya dirección se indica con las flecha y su velocidad con rayas. Cada una equivale a 10 nudos y la mitad de una a 5. Cada triángulo o banderín equivale a 50 nudos. Según el rumbo del vuelo,

un viento contrario o a favor significa retraso y mayor consumo de combustible. En ocasiones es mejor buscar niveles de vuelo con vientos favorables.

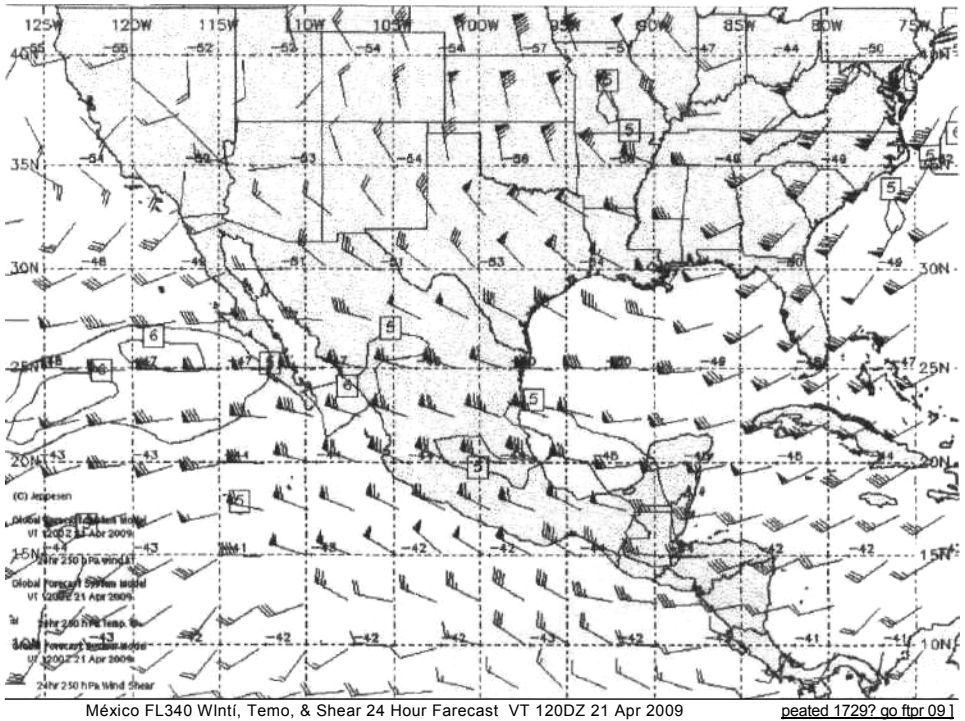


Figura 45 B. Cartas sigmet: señala los vientos al nivel de vuelo 34 000 pies.

## SINOPSIS

CORCHORRO FL410 EJE ALRG DE 22N120W 24N110W 23N95W MOV E A 10 NDS  
 VTO MAX 110 NDS. PARA 21/06Z ALRG DE 24N120W 26N110W  
 23N90W..FNTE FRO EJE ALRG DE 25N88W 20N92W 18N95W 19N99W MOV ENE  
 A 12 NDS. PARA 21/06Z ALRG DE 25N86W 20N89W 17N93W 18N97W..CUNIA  
 FL050 EJE ALRG DE 25N100W 20N97W 17N94W MOV SE LNT..

TMPO SIG

EN 200MN AL N EJE CORCHORRO NUB CICS FL300..EN 180MN ADLT Y 120  
 MN DTRS EJE FNTL NUB CUSC FLO20/FLO35 A FL070/FL100 CDO NS FLIOO  
 A FL140 Y CB/TSRA AISL CSPDS FL420 TD PRD..EN 120 MN AL W Y 200  
 MN AL E EJE DE CUNIA NUB STSC FLO15/FLO25 A FL040/FL060 NUB ASNS  
 FL070 A FLIOO ZNS DE LUV/LVZ Y BCOSAISL DE NIB SBR TRRNS ALTOS  
 TD PRD ..EN 100MN AMBLDS LN 25N106W 22N103W 17N98W CB/TSRA AISL  
 CSPDS FL400 ENTRE 20Z/06Z..

TURB

MOD EN 60 MN AL N Y 200 MN AL S EJE CORCHORRO FL360/FL250. MOD  
 CCA Y EN CB TDS NVLS..

NVL CGN

FL120/FL135 N DE 18N ENTRE 90W-100W SBND FL140/FL160 SBR  
 RST DE ÁREA..  
 TXLNXGAMA

Inclusive aparece resumen o sinopsis de estas cartas SIGMET O  
 Tiempo significativo.

# XIV

## MISTERIOSOS METEOROS EN LA ATMÓSFERA



A veces se observan extraños fenómenos que llaman la atención y sus causas no son fáciles de determinar. Desde la antigüedad el avistamiento de estos inusuales prodigios ha causado asombro y temor, así como la especulación sobre su origen, que intrigaba a la gente. En el año 340 a. de C. Aristóteles escribió un libro llamado *Meteoros*, donde trataba de explicar las cosas extrañas que se observaban en el cielo (incluyendo los cometas, estrellas fugaces y bólidos que a partir de ahí se llamaron *meteoros*), igualmente el famoso nombre de dicho libro persistió en la palabra meteorología para referirse al estudio del cielo.

Teofrasto, un físico suizo del siglo xvi, en su libro *Signos*, intentó asociar ciertas características y fenómenos del cielo con el estado del tiempo. Muchos de estos meteoros y fenómenos han sido ya explicados por la física y algunos son tan interesantes y vistosos que merecen atención especial.

## ARCO IRIS

Este arco de colores que aparece durante o después de la lluvia es causado por la luz del sol refractándose y dispersándose en colores, como en pequeños prismas de cristal al pasar por cada gota de agua suspendida en el aire. Ocurre porque cada color de la luz tiene una longitud de onda específica y cada uno se refracta de diferente forma, por ejemplo, el azul con una longitud de onda menor se refracta más que el rojo. Así cada color queda ligeramente separado angularmente, aparece como una banda paralela. Como este efecto sólo depende del ángulo, cada persona ve su propio arco iris y más estrictamente hablando, cada ojo ve el suyo propio.

Un arco iris siempre se ve paralelo por lo que sus bases realmente no existen ni tocan el suelo. Buscar el final del arco iris y encontrar una olla de oro es una bella, pero imposible quimera. Existe un arco iris de la noche, con la luz de luna, por las mismas causas que las de luz del sol; éstos son mucho más tenues y es difícil diferenciar los colores, además, son espectaculares por estar acompañados de estrellas.

## HALOS

Se llaman halos a los amplios anillos coloreados que aparecen alrededor del Sol y de la Luna, que como el arco iris, es producto de luz refractada; en este caso, en los cristales de hielo que forman las tenues y altas capas de nubes del tipo cirroestratos, de colores más sutiles, los halos vistos con detenimiento tienen el color rojo en el interior y el azul en el exterior.

El radio del Sol o de la Luna al halo es de  $22^\circ$ . Si extendemos el brazo y colocamos el pulgar sobre el astro y abrimos la mano, el extremo del dedo medio (una cuarta) debe tocar el aro; este método es una buena unidad de referencia para medir grados de arco en el cielo. El halo indica la existencia de una capa difusa de nubes altas y podría pronosticar un frente caliente aproximándose que pronto traerá lluvia.

Otro tipo de halos son las aureolas de los santos y efectivamente existen, tal como aparecen en las pinturas. El mito parece ser un hecho si se conjuntan las circunstancias correctas, por ejemplo, al caminar muy temprano en un campo de hierba en determinados días húmedos y de rocío, uno puede observar la propia sombra rodeada por un halo brillante de intensa luz.

El fenómeno se denomina *retrorreflexión* o *helligenschein*, no es un término místico o metafísico, sino se denomina así al efecto de la luz que cae sobre las gotas del rocío y rebota directamente hacia atrás; de igual modo como la luz rebota en la retina de los ojos de los gatos y en los paneles reflejantes de las calaveras de los coches. En este efecto, la luz regresa en línea recta iluminando intensamente los bordes de las sombras o siluetas. Imaginen entonces a un individuo diligente, meditando muy temprano, mientras camina por un prado en compañía de sus aprendices y de repente aparecen estas aureolas de retrorreflexión, conmoviendo profundamente a todos sobre lo divino de sus intensas reflexiones. Reflexiones sí, pero de la luz. Así también, resulta que volando sobre una capa de nubes es emocionante ver la sombra del avión rodeada de un intenso halo coloreado.

## FUEGOS DE SAN TELMO

Cuando se vuela de noche, entre nubes lluviosas, ocasionalmente aparece un fulgor violeta brillante que bordea la nariz o punta del avión, sobre los bordes de las alas o más frecuentemente sobre el parabrisas destellan diminutos relámpagos de color rosa o morado neón intenso que serpentean y brillan repetidamente sobre el cristal de la cabina.

Este fenómeno se observó por primera vez entre los mástiles y cuerdas de los barcos que atravesaban bancos de niebla, atemorizando a los marineros, quienes lo bautizaron con el nombre de fuegos de San Telmo.

Técnicamente, este efecto se llama *descarga de corona* y es producido por un campo eléctrico formado alrededor de un objeto que se desplaza dentro de una nube cargada de electricidad estática, la cual produce pequeñas descargas o diminutos rayos suaves y continuos debido a la humedad del ambiente.

## ESTELAS DE CONDENSACIÓN (CONTRAILS)

En cielos despejados, es común observar una larga estela blanca saliendo de un avión que vuela a gran altitud, llamadas *contrails*; éstas son estelas de condensación (condensation trails) y se forman por el escape de los motores. La combustión de los hidrocarburos con el oxígeno de la atmósfera produce vapor de agua, que al ser expulsado junto con otros gases por el escape, satura el aire frío a esa altitud, condensándose en una larga estela. Algo parecido origina el vapor que sale del escape del coche en una mañana fría, las partículas de cenizas de la combustión también sirven como núcleos de condensación para el vapor de agua.

Dichas estelas formadas por cristales de hielo, permanecen por un rato hasta ser deformadas lentamente por los vientos en la altura, o extenderse horizontalmente como capas de nubes altas. Debido a la temperatura o sequedad del aire, algunas se disipan rápidamente detrás del avión mientras se van formando y no en pocas ocasiones han sido confundidas a lo lejos, con colas de cometas o meteoritos ingresando a la atmósfera. Este tipo de estelas son espectacularmente luminosas durante la puesta de sol; a gran altura el avión y su estela aún reciben los rayos del sol poniente y brilla con colores amarillos o naranja.

## ESTELAS DE DISIPACIÓN

Estas estelas de disipación se ven como surcos o grietas alargadas en las capas de nubes de poco espesor. Los surcos son causados por el calor del escape de los motores del avión que pasa por la nube y la evapora en su camino.

También las nubes o las mismas estelas de condensación, a veces forman sombras alargadas en las capas de nubes debajo de ellas. Del mismo modo los potentes faros de aterrizaje de los aviones pueden proyectar caprichosas luces entre las capas nubosas, mientras descienden buscando la pista.

## ESTELAS AERODINÁMICAS

Después de una lluvia intensa, con el aire muy húmedo, es común observar estelas de vapor que salen entre las ranuras de las alas de un avión que se aproxima para aterrizar. Sucede que el aire está saturado de humedad y al producirse una reducción de su presión al pasar sobre las alas, su vapor se condensa en una visible estela blanca.

Este tipo de condensación ha sido observada también en automóviles con líneas aerodinámicas viajando a gran velocidad; el aire saturado, al pasar sobre el delineado automóvil se expande y enfría, condensando su vapor.

De hecho, el que un auto convertible sea muy fresco, no sólo es causado por el viento, sino también por la dilatación del aire y disminución de la temperatura al pasar sobre el parabrisas y sobre todo el auto. Colocando un termómetro en el asiento y otro en el exterior, se comprobará que la temperatura es de uno o dos grados menor a la exterior.

## PARHELIO

En ocasiones es posible ver imágenes brillantes junto al Sol cuando éste se encuentra cerca del horizonte, como reflejos en el halo que lo rodea. Esto es un fenómeno de refracción de la luz, al igual que el halo; aunque los cristales refractan la luz en varios ángulos, la luz que emerge más brillante se encuentra en un ángulo al cual la desviación de la

luz solar es mínima este ángulo es exactamente de  $22^\circ$ . Así, a veces el débil sol de invierno en las altas latitudes parece tener dos compañeros a los lados.

## CENTELLAS

Muchos pilotos han reportado haber avistado bolas de luz flotando en el aire, el eco de la leyenda es tal, que inclusive en un libro de lecturas de primaria se mencionan algunos casos. Según los relatos estas esferas de varios tamaños parecen desprenderse de las montañas y se mueven en una trayectoria errática durante segundos o minutos hasta finalmente desvanecerse. Parecerían ser claros ejemplos de ovnis, por su forma y movimientos, pero aunque la naturaleza de las centellas no ha sido determinada científicamente, una teoría propone que son bolas de plasma que se recarga por energía electrostática del exterior.

El hecho de que muchas veces hayan sido vistas en las montañas y en zonas con actividad volcánica o de compresión tectónica o sísmica sobre las rocas, las asociaría con un fenómeno de piezoelectricidad. Recordemos que el cuarzo, componente principal de las rocas, genera electricidad estática bajo intensas fuerzas de compresión. Otra definición de centellas se refiere a los ramales de un rayo o los abultamientos del mismo.

## AZUL CIELO

La luz con la longitud de onda más corta del espectro visible (azul) se desvía más que la luz de longitud de onda mayor (amarillo, rojo). El azul celeste del cielo se debe a la dispersión de la luz por las moléculas de los gases del aire, especialmente del nitrógeno. Cada gas dispersa una longitud de onda de luz característica, por ejemplo, el cielo de Marte es de color rosa al estar compuesto principalmente de dióxido de carbono, que refracta o dispersa los tonos rojos.

Durante el ocaso, con el sol cercano al horizonte, prácticamente toda la luz azul ya ha sido dispersada, quedando solamente la amarilla, naranja y roja que llega a nuestros ojos. Paralelamente las partículas de polvo dispersan menos los colores rojos y amarillos.

Igualmente según el modelo de dispersión de luz de Raleigh, el campo eléctrico de la luz excita los electrones de los átomos, los cuales a su vez emiten luz azul. Los dorados matices de una puesta de sol se deben tanto a la combinación de la dispersión por excitación de los átomos como a la producida por el polvo atmosférico. Independientemente de las causas físicas de los colores del ocaso, es mejor disfrutarlos.

## LUCES EN EL CIELO

En una noche clara, con amplia visión del cielo, pueden verse diversas luces desplazándose por el firmamento. Sugestivas y aparentemente misteriosas, estas luces tienen diferentes orígenes; los pilotos deben estar muy atentos a ellas, ya que pueden significar *tráficos*, como se les llama a otras aeronaves que vuelan en la proximidad.

Existe un reglamento y código de luces para la navegación nocturna y el tráfico aéreo. Todo aeroplano debe tener instaladas sus luces de navegación en un orden establecido:

- Una luz roja en la punta del ala izquierda.
- Una luz verde en la punta del ala en la derecha.
- Una luz blanca al extremo del empenaje o cola.

De esta manera, con sólo ver los colores de las luces es fácil determinar la dirección y rumbo del avión. Las aeronaves también portan en la parte inferior o superior del fuselaje luces rojas estroboscópicas o giratorias, llamadas de *anticolisión*, permiten ver sus destellos desde muy lejos; éstas tienen que encenderse antes de arrancar los motores o cuando el avión empieza a moverse.

Al ascender y al descender para aterrizar, las aeronaves encienden sus faros normalmente debajo de 10 000 pies de altura sobre el terreno, aún a varias millas del aeródromo. Cerca de un gran aeropuerto es común ver las luces de varios tráfico o aeroplanos aproximándose en una secuencia ordenada, controlados desde tierra por radar, enfilándose a la pista.

Un curioso efecto luminoso es producido por los potentes destellos de los faros de aterrizaje: a la distancia, en la línea de la pista vistas de frente, por la perspectiva, estas luces se verán a gran distancia, ascendiendo y descendiendo verticalmente aparentemente sin ruido. Muchos

reportes de luces misteriosas subiendo y bajando en la noche se deben a este efecto.

Más sorprendentes aún, pueden parecer los haces de luz circulares de los faros, iluminando un descenso sobre una capa delgada de nubes, proyectando aparentes discos luminosos viajando a gran velocidad. Otro tipo de luces pueden verse moviéndose lentamente entre las estrellas al anochecer o poco antes de la salida del sol. Muy probablemente se traten de satélites artificiales en su órbita, que debido a su altitud reciben aún la luz del sol detrás del horizonte, reflejándola intensamente.

Un satélite artificial mantendrá siempre la misma dirección hasta desaparecer tras la sombra de la Tierra. Avistamientos espectaculares de satélites orbitando, son los brillantes satélites Iridium, así como la Estación Espacial Internacional, la cual por su gran tamaño refleja mucha luz y se observa muy luminosa. La fecha y hora exacta de su paso sobre cada ciudad puede consultarse en la página de Internet: [www.heavens-above.com](http://www.heavens-above.com).

Un cielo nocturno sin nubes, igualmente puede mostrarnos bólidos y estrellas fugaces, que son meteoritos o fragmentos residuales de cometas antiguos que arden al rozar con la tenue alta atmósfera, antes de caer a tierra. Unas buenas efemérides astronómicas proporcionan las fechas cuando estas 'lluvias' de estrellas fugaces serán más abundantes y vistosas. No hay que olvidar tampoco a los planetas Mercurio y Venus que a veces resplandecen como luceros cerca del horizonte al amanecer o al atardecer, y al contrastarlos con las nubes pareciera que se mueven, también Júpiter y Saturno son muy brillantes toda la noche.

Igualmente es creencia popular la existencia de zonas con anomalías magnéticas que pueden alterar las brújulas u otros instrumentos. En tierra, podría ocurrir tal vez por concentraciones geológicas de metales. Pero este fenómeno no ocurre normalmente en vuelo, algunas ligeras desviaciones en las brújulas están bien estudiadas y se deben a variaciones magnéticas o las producidas por el metal del avión, lo cual es corregido con datos en mapas y tablas.



# ANEXO DE INFORMACIÓN AERONÁUTICA

## CONVERSIÓN DE TEMPERATURAS

Tabla 1. Conversión de temperaturas

°C	°F	°C	°F	°C	°F
-20	-4.0	0	32.0	20	68.0
-19	-2.2	1	33.8	21	69.8
-18	-0.4	2	35.6	22	71.6
-17	1.4	3	37.4	23	73.4
-16	3.2	4	39.2	24	75.2
-15	5.0	5	41.0	25	77.0
-14	6.8	6	42.8	26	78.8
-13	8.6	7	44.6	27	80.6
-12	10.4	8	46.4	28	82.4
-11	12.2	9	48.2	29	84.2
-10	14.0	10	50.0	30	86.0
-9	15.8	11	51.8	31	87.8
-8	17.6	12	53.6	32	89.6
-7	19.4	13	55.4	33	91.4
-6	21.2	14	57.2	34	93.2
-5	23.0	15	59.0	35	95.0
-4	24.8	16	60.8	36	96.8
-3	26.6	17	62.6	37	98.6
-2	28.4	18	64.4	38	100.4

## CHILL FACTOR (FACTOR DE VIENTO)

Cuando se combina la baja temperatura con un viento intenso, se produce una mayor pérdida de calor en el cuerpo, que el producido solamente por la baja temperatura, este efecto puede llevar a riesgos de congelamiento e hipotermia severa. A continuación se presenta una tabla de equivalencias del factor de viento a una temperatura ambiente dada.

Tabla 2. Chill factor (Factor de viento)

Temperaturas ambiente reales					
Viento	4°C	-1°C	-7°C	-12°C	-18°C
24 km/h	-5°C	-13°C	-21°C	-28°C	-35°C
32 km/h	-7°C	-16°C	-23°C	-31°C	-39°C
40 km/h	-9°C	-17°C	-26°C	-34°C	-42°C
48 km/h	-11°C	-19°C	-28°C	-36°C	-45°C
Temperaturas equivalentes de pérdida de calor corporal					

## RESPIRACIÓN E HIPOXIA

La función de la respiración es llevar oxígeno a la sangre para que ésta la transporte a las neuronas del cerebro y demás células del organismo, al mismo tiempo que es retirado el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).

No obstante, de acuerdo a la ley de Dalton, se necesita de una presión parcial suficiente del oxígeno del aire para que este ingrese efectivamente a la sangre. Como la presión disminuye con la altitud, a determinada altura la presión del aire y por consiguiente del oxígeno, no será suficiente para incorporar el volumen necesario a la sangre y ocurrirá la hipoxia.

La hipoxia o falta de oxígeno sucede en los tejidos del organismo que no reciben suficiente oxígeno para funcionar y sus síntomas varían:

- Dolor de cabeza.
- Aumento de tiempo de reacción.
- Euforia, razonamientos incorrectos.
- Deficiencia visual.

- Obscurecimiento de uñas y labios (cianosis).
- Adormecimiento de dedos y visión de túnel.

De acuerdo a sus causas, existen cuatro clases de hipoxia:

1. Hipoxia hipóxica: según la Ley de Henry (ver leyes de gases), la presión parcial del oxígeno disminuye al descender la presión atmosférica. A gran altura no se encuentra suficiente presión parcial de oxígeno para que penetre a la sangre. Esta situación ocurrió con los primeros aeronautas, en aeronaves actuales las cabinas mantienen una presión artificial pero una súbita despresurización puede causar pérdida de conciencia a la tripulación, según la altitud o tiempo de baja presión atmosférica. El término *tiempo útil de conciencia* se refiere al tiempo máximo en la que uno puede hacer una decisión racional, en la ausencia de presurización a determinada altura (ver Tabla 3. Tiempo útil de conciencia).
2. Hipoxia hipémica: es cuando las células de la sangre no pueden llevar suficiente cantidad de oxígeno al cerebro:
  - a. Por anemia o pérdida de sangre.
  - b. En caso de envenenamiento por monóxido de carbono (CO), el gas al adherirse a la hemoglobina evita que ésta transporte oxígeno. El 2.5% del humo de un cigarrillo se compone de monóxido de carbono y al inhalar el humo de 3 cigarrillos puede causar una saturación del 4% de monóxido en la sangre, reduciendo la agudeza visual y la adaptación de la pupila a la oscuridad.
3. Hipoxia histotóxica: es cuando las células mismas pierden la capacidad de utilizar el oxígeno:
  - a. En el caso de saturar la sangre por la ingesta de alcohol.
4. Hipoxia isquémica: se refiere a cuando la circulación es entorpecida por causas externas:
  - a. Utilizar cinturones demasiado ajustados.
  - b. Permanecer en la misma posición durante largo tiempo, o inclusive durante maniobras de vuelo que incrementen a la gravedad.

## TIEMPO ÚTIL DE CONCIENCIA

Si un avión volando a gran altura perdiera súbitamente la presurización, los tripulantes tendrían poco tiempo para reaccionar antes de empezar a perder la conciencia por hipoxia.

En pruebas para pilotos en la cámara hipobárica en Medicina de Aviación, se reduce artificialmente la presurización, mientras se observa a los individuos quienes pierden rápidamente sus facultades de coordinación motora por la falta de oxígeno.

La tabla, basada en experimentos similares, relaciona la presión parcial de oxígeno a determinada altitud y el tiempo útil de conciencia para reaccionar.

Tabla 3. Tiempo útil de conciencia

Altitud	Tiempo útil de conciencia
45 000 pies s/nivel del mar	de 9 a 10 segundos
40 000 pies s/nivel del mar	de 15 a 20 segundos
35 000 pies s/nivel del mar	de 30 a 60 segundos
30 000 pies s/nivel del mar	de 1 a 2 minutos
28 000 pies s/nivel del mar	de 2 a 3 minutos
25 000 pies s/nivel del mar	de 3 a 5 minutos
22 000 pies s/nivel del mar	de 5 a 10 minutos
20 000 pies s/nivel del mar	de 30 a más minutos

Los procedimientos de emergencia por despresurización en vuelo contemplan, y una alarma automática sonará cuando la presión de la cabina alcance los 10 000 pies (la presurización normal dentro de la cabina es de aproximadamente 8 000 pies).

Inmediatamente y como primera medida, la tripulación y pasajeros deberán colocarse la mascarilla de oxígeno, para posteriormente tratar de corregir la presurización o descender rápidamente a niveles de vuelo con suficiente presión de aire (10 000 pies o menor).

## ALFABETO FONÉTICO Y MORSE

En aeronáutica para evitar confusión en la pronunciación de las letras se les nombra asociadas a sustantivos diferentes. Las radio-ayudas o estaciones de navegación se identifican generalmente con códigos de tres

letras en alfabeto Morse, generalmente iguales el designador IATA de los aeropuertos, y transmiten constantemente estas letras en código Morse. Por la frecuencia y uno debe sintonizar y escucharlas para confirmar su identificación.

Tabla 4. Alfabeto fonético y Morse

letra	nombre	código morse
A	alfa	. _
B	bravo	... _
C	cbarlie-coca	.. _ .
D	delta	.. _
E	eco	_
F	foxtrot	.. _ .
G	golfo	.. _
H	hotel	.. _ .
I	india	..
J	juliet-julieta	.. _ .
K	kilo	.. _
L	lima	.. _ .
M	mike- metro	.. _ .
N	november-néctar	.. _
O	osear	.. _
P	papa	.. _ .
Q	Québec	.. _ .
R	romeo	.. _ .
S	sierra	.. _ .
T	tango	..
U	uniform-unión	..
V	víctor	.. _ .
<b>W</b>	wisky	.. _ .
X	x-ray-extra	.. _ .
Y	yanqui	.. _ .
Z	zulú	..



## MIRANDO POR LA VENTANILLA

Al viajar en un Jet comercial, a más de 30 000 pies de altitud, se contempla la atmósfera con una perspectiva diferente. Por la ventanilla se presenta un gran espectáculo y hay que disfrutarlo, a nuestros pies, al otro lado del piso del avión se encuentra la mayor parte del aire del planeta: la troposfera. Si se tiene temor a las alturas, puede escoger un asiento sobre el ala, pero es mejor atreverse y tener una visión clara hacia abajo, al fin que uno va asegurado con el cinturón ajustado y junto a muchos pasajeros.

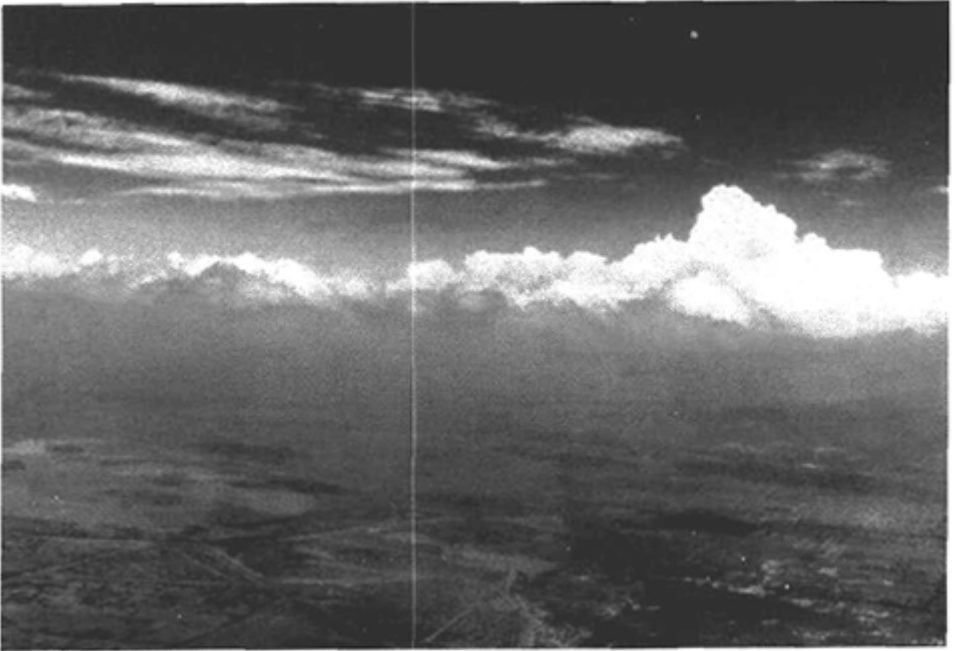
El mareo se evita mirando hacia el horizonte, ya que de esta manera, nuestros confundidos sentidos tienen un punto de referencia fijo para estabilizarse, o si lo necesita, puede solicitar la atención de la sobrecarga, pero no deje de contemplar el panorama.

Los aviones comerciales no vuelan por cualquier parte, sino que siguen rutas bien definidas llamadas *aerovías*, que son como verdaderas autopistas aéreas, cuyo tráfico es controlado por radar desde tierra. La aerovía pasa sobre varias radio-ayudas que marcan la ruta. Las radio-ayudas son faros electrónicos, colocados muchas veces en los aeropuertos para señalar los rumbos magnéticos que el piloto, o el piloto automático debe seguir en sus instrumentos.

Se pueden sentir los suaves cambios de dirección del avión siguiendo estos caminos aéreos hasta su destino. Si aparecen enfrente nubes tipo cumulonimbos, altas como torres, será necesario que el avión se desvíe un poco para regresar a la aerovía después de rodearlas.

La turbulencia, mal llamada "bolsas de aire", ocurre al atravesar las corrientes ascendentes o descendentes del aire. Una muy severa podría hacer descender al avión unos cientos de pies y un pasajero sin el cinturón ajustado podría saltar de su asiento.

# LAS NUBES DESDE EL AIRE



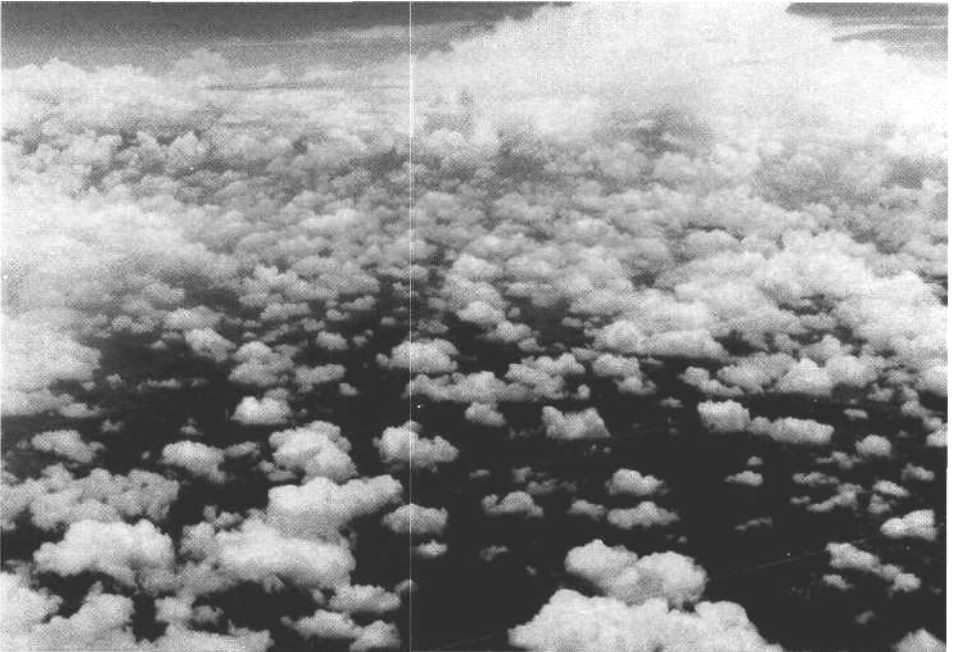
Fotografía 1. Se observa una capa de estratocúmulos (Se) en el nivel inferior, y encima de ellos, nubes tipo cirrocúmulos (Ce).

Una capa café-gris de bruma y humo cubre la Ciudad de México. La abundancia de partículas de polvo y cenizas opaca la visibilidad y favorece la condensación de neblina. El aire húmedo es empujado por los vientos del este hacia el valle de México, donde se condensa en nubes. Despegando del aeropuerto Benito Juárez se atraviesa esta capa de contaminación y arriba el aire es claro y transparente.



Fotografía 2. Nubes de gran tamaño.

Masas de aire húmedo proveniente de la costa ascienden sobre la sierra enfriándose hasta alcanzar su punto de rocío y condensándose en cúmulos. Conforme el terreno se hace más alto, la condensación es mayor tornándose nubes de gran tamaño que cubren montañas



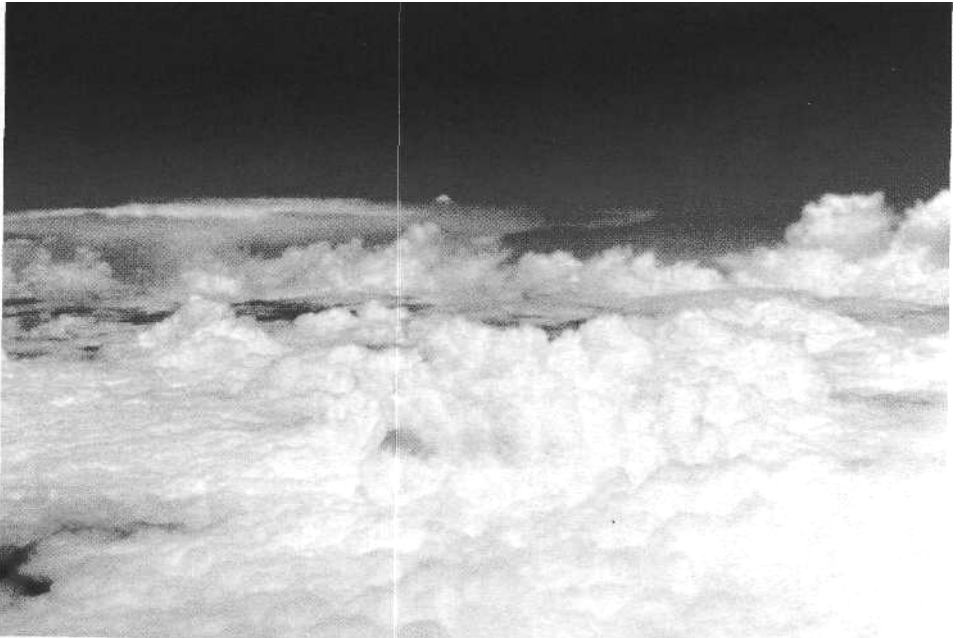
Fotografía 3. Formación de nubes de desarrollo vertical.

El aire inestable y húmedo favorece la formación de nubes de desarrollo vertical que semejan copos de algodón; el vapor de éstas se condensará en gotas que caerán a tierra para regresar por los ríos o subsuelo lentamente al océano, conformando el ciclo del agua. Los cúmulos (Cu) aparecen cuando el aire húmedo se alza desde el suelo, al ser calentado por el sol, como humo de chimeneas invisibles; cada nube señala la cúspide de una corriente ascendente.



Fotografía 4. Nubes tipo cúmulos.

A media mañana, desde la altura se observan nubes tipo cúmulos, desarrollándose verticalmente con rapidez y conteniendo intensas corrientes ascendentes.



Fotografía 5. Cumulonimbos y estratocúmulos.

Potentes o espesas nubes se elevan rápidamente y se convierten en turbulentos cumulonimbos (Cb), que se ven incrustados en una capa nubosa tipo estratocúmulos. Desde arriba se aprecian claramente los muchos 'grumos' o celdas de convección. En esta zona se encuentran corrientes ascendentes que crean turbulencia severa. Se pueden apreciar las muchas Celdas de Convección (CC) que forman la nube y le dan apariencia de algodón. Los estratocúmulos pueden formar extensas capas que cubren regiones enteras.



Fotografía 6. Cumulonimbos a nivel tropopausa.

En el fondo se observan las cúspides que identifican inequívocamente a los cumulonimbos, las cuales llegan a la tropopausa, a unos 45 000 pies y se extienden horizontalmente en su típica forma de yunque estas cúspides están compuestas de cristales de hielo. Es en esta etapa de su desarrollo, cuando intensas lluvias se precipitan desde estas nubes. Los cumulonimbos en la parte central sobrepasan la capa de estratocúmulos, parecen incrustadas en los estratos y un avión puede penetrar en ellas sin darse cuenta.



Fotografía 7. Cristales de hielo llamados *pileus*.

Volando a gran altura cerca de las cúspides, se aprecian delicados filamentos que cubren sus cúspides a manera de tenue velo, hechos de cristales de hielo, son llamados *pileus*.

Los cristales de hielo en la alta troposfera se encuentran más separados entre sí, que las gotitas de agua que forman las nubes bajas, por lo que son más tenues.



Fotografía 8. Jet vuela a 30 000 pies.

En la troposfera las nubes aparecen generalmente en capas. Abajo se observan cúmulos, mientras que en lo alto una capa de cirroestratos se distingue claramente.

En la imagen mostrada, el Jet vuela a 30 000 pies sobre una capa de cúmulos, cumulonimbos y debajo de tenues capas de cirroestratos, las cuales se ven densas de costado, mientras que desde tierra éstas se observan tenues, casi transparentes.



Fotografía 9. Potente cumulonimbo.

Frente a las bahías de Huatulco, en Oaxaca, el aire húmedo de la costa forma un potente cumulonimbo. En el radar del avión es captada como un círculo verde que indica lluvia. Un círculo concéntrico o área amarilla o aún roja indicaría intensa precipitación y granizo.



Fotografía 10. Próxima lluvia.

Nubes de tormenta se forman en la tarde, oscureciendo la superficie, lo que es señal de una próxima lluvia.



Fotografía 1. Los cúmulos a media mañana o en las primeras horas de la tarde.

Los cúmulos normalmente aparecen a media mañana o en las primeras horas de la tarde; el aire húmedo se eleva desde el suelo calentado por el sol. Cada nube señala la parte superior de una corriente de aire ascendente, grandes ámpulas de aire caliente se elevan buscando el equilibrio térmico. Al enfriarse el aire, se satura condensando el vapor contenido originalmente; con esta condensación también se libera el calor latente del vapor de agua, continuando la convección en una secuencia de celdas por lo que adquieren la forma grumosa.



Fotografía 2. Los cúmulos en diversas formas.

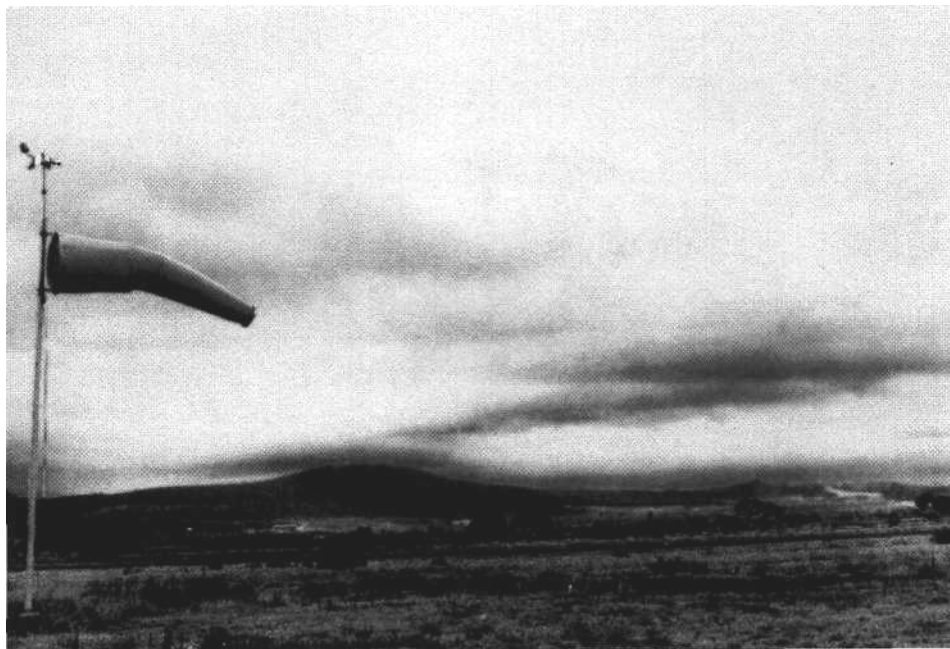
Los cúmulos, pueden extenderse y formar una capa de estratocúmulos; si tiene abertura se forma una condición del cielo llamada *nublado o BK*, o si es una capa continua se denomina *cerrado u OVC* en el código de los reportes.



Fotografía 3. Nubes de desarrollo vertical.

Las nubes de desarrollo vertical indican que la atmósfera se encuentra muy inestable y presenta turbulencia; éstas tienen un crecimiento rápido y vigoroso debido a la humedad e inestabilidad del aire. La forma de coliflor se debe a las muchas pequeñas células de convección. Los cúmulos, con sus bases aplanadas, señalan el nivel donde se empieza a condensar el vapor de agua en minúsculas gotitas que forman la nube; esta altura es a la cual el aire húmedo se enfría hasta alcanzar el punto del rocío.

Un cúmulo puede devenir en un cumulonimbo que presenta todos los peligros para el vuelo, particularmente gran turbulencia, engelamiento, granizo y corrientes descendentes.



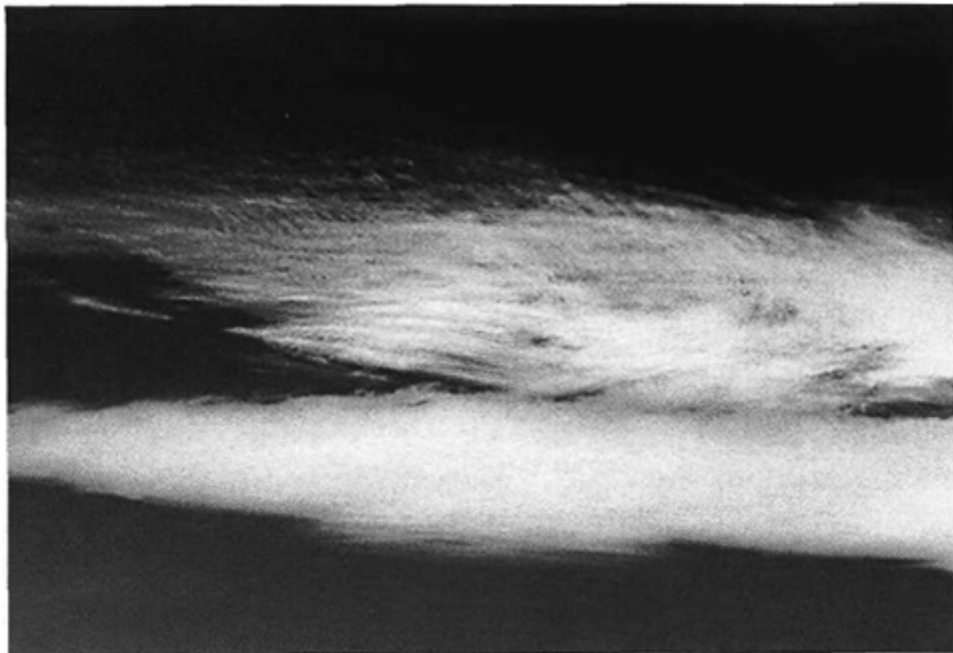
Fotografía 4. Estratos.

Estratos, estas nubes bajas cubren grandes regiones y se forman en condiciones de aire estable. Al fondo, la condensación nubosa que normalmente corona las cimas de las montañas, se puede observar mientras se produce por el viento que corre de izquierda a derecha. En la imagen también se observa un 'cono de viento', que sirve para saber la dirección e intensidad del viento en la pista.



Fotografía 5. Los cirros.

Los cirros son nubes altas, cuyas bases se forman a una altura mayor de 20 000 pies; aparecen con los frentes fríos o sobre las nubes de tormenta y al estar compuestos de cristales de hielo, brillan intensamente con los colores diversos refractados por dichos cristales



Fotografía 6. Altocúmulo lenticular estático (ACSL).

Estas nubes se forman de las crestas de las llamadas ondas de montaña, las cuales son producidas por la obstrucción que causa un monte en el flujo del viento, al igual que una piedra en un río.



Fotografía 7. Arco iris.

Los colores del arco iris que se separan por los diferentes ángulos con que se refractan al atravesar las gotas de agua según la longitud de onda, al igual que los halos, el color violeta se encuentra en el interior, mientras que el rojo, más refractado, está al exterior. No obstante, la secuencia de colores en el arco secundario (arriba a la derecha) se invierte, ya que los rayos se han reflejado dos veces dentro de la gota, razón por la cual también es menos brillante.



Fotografía 8. Nubosidad.

Las montañas y cerros tienden a formar nubosidad que corona sus cumbres, esto se debe a que el viento húmedo asciende por sus laderas enfriándose y condensando la humedad. Este fenómeno es muy peligroso si para el plan de vuelo no se consideran las alturas y montañas altas en la ruta. El vuelo en una aerovía requiere de una Altitud Mínima en Ruta (MEA) que considera 2 000 pies arriba del obstáculo más alto en zonas montañosas.



Fotografía 9. Torre de control de un aeropuerto.

La torre de control de un aeropuerto, además de autorizar la aproximación y el aterrizaje, debe informar a los pilotos la dirección y velocidad del viento, para esto, cuenta con equipos e instrumentos como el anemómetro, que se aprecia en la parte inferior izquierda, éste mide la velocidad del viento al giro de sus aspas. En la fotografía se observan también las antenas de comunicación VHF y los pararrayos.



Fotografía 10. Nubes iluminadas.

Al atardecer, con el sol en el horizonte, las partículas de polvo de la atmósfera absorben la luz azul y dejan pasar los tonos naranjas y rojos que iluminan las nubes desde abajo.

ACSI (AltoCumulus Standing Lenticular): nube lenticular.

ACTITUD: posición de la aeronave en el aire con respecto a sus ejes.

AovECCión: movimiento horizontal del aire.

ALBEDO: cantidad de radiación electromagnética reflejada por un cuerpo (el albedo 1.00 equivale a 100% de reflexión, como un espejo perfecto).

ALTÍMETRO: instrumento que relaciona la presión barométrica con la altitud en que se encuentra.

ALTOCÚMULO O ALTOCUMULUS: nubes que se forman a altitudes medias y tienen forma de filas de bandas, generalmente compuestas de gotas de agua y en ocasiones de cristales de hielo o agua sobre enfriada.

ANEMÓMETRO: instrumento en tierra para medir la velocidad del viento.

ANEROIDE: cápsula de vacío que al dilatarse o contraerse de acuerdo con la presión atmosférica, mueve una serie de engranajes que giran agujas indicadoras de un altímetro.

ANTICICLÓN: área de presión barométrica alta, de la cual surgen vientos que al desviarse por la fuerza de coriolis giran en espiral, en sentido de las manecillas del reloj en el hemisferio norte.

ATIS (Automatic Terminal Information Service): transmisión continua gravada en determinada frecuencia de un área terminal.

**ATMÓSFERA:** capa de gases que rodea la Tierra.

**BARÓMETRO:** instrumento que mide la presión de la atmósfera por una columna de mercurio.

**BORA:** viento frío que desciende de los Alpes Dináricos de Croacia y Bosnia.

**BUYS BALLOT:** ley que afirma que si un observador en el hemisferio norte da la espalda al viento, el centro de baja presión quedará a su izquierda.

**CALMA:** ausencia de viento; en los reportes meteorológicos se simboliza como: 0000.

**CAMBIO DE FASE:** es la transformación de una sustancia en líquido, sólido o gas. En el agua, este cambio va asociado a una gran liberación o absorción de calor latente.

**CAPA:** es un conjunto de nubes o concentración de partículas en el aire cuyas bases están aproximadamente a la misma altura.

**CAT (TURBULENCIA DE AIRE CLARO):** se encuentra a altos niveles de vuelo y no está asociada a nubosidad.

**CATABÁTICO:** viento que desciende de una montaña, generalmente más intenso que el viento de montaña.

**CAVOK:** término que significa condiciones de cielo y visibilidad óptima.

**CIELO:** altura desde la superficie hasta la base de la capa más baja de nubes que ocupa más de la mitad del cielo (BKN, ove).

**CIELOMETRO:** aparato que reflejando luz en las nubes determina su altura por triangulación y una célula fotoeléctrica.

**CHILL FACTOR (FACTOR DE VIENTO):** efecto combinado producido por la baja temperatura y el viento lo cual genera mucha mayor pérdida de calor en las personas.

**CHINOOK:** viento seco y cálido que sopla descendiendo al este de las Rocallas.

**CIRRO:** nube alta en forma de rizo o hilos fibrosos compuesta de cristales de hielo.

**CIZALLAMIENTO:** cambio repentino de velocidad o dirección del viento.

**CLIMA:** promedio estadístico de las condiciones del tiempo en una región determinada durante un periodo específico de tiempo.

**CONDENSACIÓN:** cambio de vapor a líquido, generalmente a pequeñas gotas suspendidas o rocío, acompañado con una liberación de calor latente.

**CONDUCCIÓN:** transferencia de calor por acción molecular de una sustancia en contacto con otra.

**CONTRAIL:** estela de condensación.

**CONVECCIÓN:** movimiento vertical causado por diferencias de densidad, debido a diferencias de temperatura.

**CORIOLIS:** efecto o fuerza debida a la rotación de la Tierra; que desvía los objetos en movimiento en el aire hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur. Es causada por la diferencia rotacional entre el ecuador y los polos.

**DENSIDAD:** cociente de masa entre el volumen de un cuerpo.

**DENSIDAD DEL AIRE:** es la masa del aire en términos de peso por unidad de volumen.

**DOLDRUMS:** término inglés que se refiere al cinturón de calmas o vientos variables en la línea ecuatorial debido a la convergencia de los alisios.

**Eco:** reflejo de un objeto en la pantalla radar, debido al rebote de las ondas electromagnéticas y su regreso a la antena.

**ESTRATOSFERA:** capa atmosférica sobre la tropopausa que se extiende hasta unos 160 000 pies, de composición similar a la troposfera.

**EVAPORACIÓN:** cambio de estado de un líquido a gas con absorción de calor.

**FAHRENHEIT (°F):** escala de medidas de temperatura que considera 32 °F para la fusión del hielo y 210 °F para la ebullición del agua al nivel del mar.

**FENÓMENOS DE OSCURECIMIENTO:** en los informes del tiempo, cualquier acumulación de partículas de aerosol, con bases en la altura o en superficies que sean lo suficientemente densas para ser discernidas por un observador.

**FOEHM:** un viento adiabáticamente cálido y seco que baja de las partes altas de las montañas y cuyas características se deben a la compresión al descender.

**FRENTES:** límite entre dos masas de aire de diferente temperatura.

**GRADIENTE ADIABÁTICO:** relación de enfriamiento o calentamiento de una masa de aire, debido a su expansión o compresión, de acuerdo a si se eleva o desciende en la atmósfera.

**HUMEDAD:** el vapor de agua contenido en el aire.

**IMC (INSTRUMENT METEOROLOGICAL CONDITIONS):** condiciones meteorológicas que requieren vuelo por instrumentos.

**IFR (INSTUMENT FLIGHT RULES):** reglas y procedimientos de vuelo por medio de instrumentos.

**INVERSIÓN TÉRMICA:** capa de la troposfera donde la temperatura se incrementa con la altitud. Es una condición atmosférica en la cual una capa fría en la superficie es cubierta por una capa de aire tibio, la cual inhibe los movimientos de aire y propicia el smog.

**ISÓBARA:** línea que conecta los puntos de igual presión barométrica.

**MASA DE AIRE:** cuerpo de aire con temperatura y humedad uniforme.

**MESOSFERA:** Capa de la atmósfera que se halla sobre la estratosfera.

**MICROBURST:** es una breve y muy intensa corriente descendente proveniente de un cumulonimbo.

**NIVEL DE CONGELAMIENTO:** altitud en la troposfera donde la temperatura es de 0 °C.

**TECHO:** distancia vertical entre el suelo y la capa más baja de nubes.

**TERMOSFERA:** capa de la atmósfera que se encuentra sobre la mesosfera.

TIFÓN: nombre dado al huracán en las costas de Asia.

TURBONADA: línea continua de tormentas de origen no frontal.

VECTORES: rumbos proporcionados por el CTA para dirigir un avión por medio del radar, hacia un punto dado.

VIENTO CATABÁTICO: viento intenso de montaña que desciende colina abajo; contrario al anabático el cual asciende.

VIRGA: lluvia que cae de una nube y se evapora antes de alcanzar el suelo.

VISIBILIDAD: distancia medida horizontalmente cerca de la superficie, en la que un objeto puede ser visto durante el día, o iluminado durante la noche, se mide y se reporta en millas estatuto ó 1 609 pies.

VFR (Visual Flight Rules): reglas y procedimientos que rigen el vuelo en condiciones visuales.

VMC (Visual Meteorological Conditions): condiciones meteorológicas que permiten el vuelo visual.

VOR (Very High Frequency Ommidirectional Range): radio ayuda o radiofaro que permite la navegación de acuerdo a radiales emitidas desde el mismo.

WIND SHEAR: cizallamiento o diferencia brusca en la velocidad o dirección del viento.

Z HORA ZULÚ O UTC (TIEMPO UNIVERSAL COORDINADO): referido al meridiano de Greenwich. En la zona central de México, para obtenerla se suman 5 horas en verano y 6 en invierno.



## BIBLIOGRAFÍA

- nia, 1981.  
Bachem, A., *Forschung aun dem Phis*, Editorial F. Dessauer, Bonn, Alemania, 1977.
- Buck, Robert N., *Weather Flying*, Macmillan Publishing Co. Inc., New York, Colegio de Pilotos Aviadores de México, *Evitando condiciones meteorológicas peligrosas*, Boletín técnico Clasificación B65, México, 2003.
- Day, John & Schaefer, Vincent, *A field guide to the Atmosphere. Clouds, rain, snow, storms*, Houghton Mifflin Company, EE.UU., 1981.
- Dep. of Transportation, Dep. of Commerce, *Aviation Weather Services, a supplement to aviation weather COO-6A*, EE.UU., 1975.
- Deventer C.N., *An introduction to General Aeronautics*, American Technical Society, EE.UU., 1992.
- Espinosa H., *Meteorología para piloto privado*, SCT, Dirección General de Aeronáutica Civil, Centro Int. de Adiestramiento de Aviación Civil, México, 1978.
- Fuentes Aguilar L., *Climatología Médica*, Edamex, México, 1990.  
2003.
- Garduño, Rene, *El veleidoso clima*, Fondo de Cultura Económica, México, 1982.
- Griffiths, John & Driscoll, Dennis, *Survey of Climatology*, Merrill, EE.UU., hers, 1964.
- Guerny, Gene, *Pilot Handbook of weather*, Fallbrook, California: Aero Publis-

Lester Peter, Jeppesen, *Aviation weather*, 1997.

O'Leary, Beatty, *The new Solar System*, Cambridge University Press, EE.UU., 1981.

Rzedowski, J., *Vegetación de México*, Limusa, México, 1983.

Sanderson Training Products, *Instrument, Commercial Manual*, Jeppesen Sanderson, Inc., EE.UU., 2001.

Sergeev, B. F., *Physiology for Everyone*, Mir Publishers, Moscú, 1978.

Strahler A. N., *Introduction to Environmental Science*, Hamilton Publishing Company, California, EE.UU., 1974.

Walter, Jearl, *Física Recreativa*, Limusa, México, 1988.

### ***Páginas de internet sobre información de meteorología:***

1. <http://www.aviationweather.gov>  
Un sitio muy utilizado en aeronáutica. Con reportes y pronósticos para todos los aeropuertos del mundo.
2. <http://www.awc-kc.noaa.gov>  
Información meteorológica mundial.

Links para otros sitios relacionados:

<http://www.aopa.org>  
<http://www.fema.gov/storm/trop.shtm>  
<http://www.hurricanehunters.com>  
<http://www.intellicast.com>  
<http://www.nhc.noaa.gov/>  
<http://www.nws.noaa.gov>  
<http://www.nws.noaa.gov/om/hurricane>  
<http://www.orbit-net.nesdis.noaa.gov>  
<http://www.rap.ucar.edu/weather/satellite/>  
<http://smn.cna.gob.mx>  
<http://www.ucar.edu>  
<http://www.ucar.edu/org/index.shtml>



*Navegando en la atmósfera. Meteorología Aeronáutica*  
del autor Christian González del Carpio

Impreso en los Talleres Gráficos de la Dirección de  
Publicaciones del Instituto Politécnico Nacional  
Tresguerras 27, Centro Histórico, México, DF  
Septiembre de 2009.

Cuidado editorial: Ma. Isabel Román Castañeda  
Formación: Aide Olivares Chávez  
Portada: Cintia V. Covarrubias Carreón  
Producción editorial: Vania B. Castellanos Contreras  
Acabados editoriales: Roberto López Moreno  
Producción: Sergio Mújica Ramos  
Procesos editoriales: Manuel Toral Azuela  
División editorial: Héctor Bello Ríos  
Director: Arturo Salcido Beltrán



A través de varias épocas, la exploración y el descubrimiento de los misterios de la atmósfera han constituido emocionantes y peligrosas aventuras. Viajando en globo, en un avión entre las nubes, en un velero en el mar o inclusive enfrentando un desastre climático, se obtiene una perspectiva diferente del poder y significado de los fenómenos del aire.

La atmósfera de nuestro planeta es bella e interesante y, vista de modo empírico por quienes navegamos en ella, se convierte en algo vivo y fascinante.

Este libro, en un principio, fue planteado para apoyo en los cursos de meteorología para pilotos aviadores, pero al diseñarse con un enfoque directo y práctico, queda al alcance de cualquier persona. Puede llevarse como guía de campo a viajes y paseos, especialmente cuando se viaja en avión.

Empecemos pues a conocer este agitado océano de aire en el que vivimos inmersos.

ISBN: 970-36-0117-0



9 789703 601172

337