

CAPITULO 11. ANALISIS Y PRONOSTICO DEL TIEMPO.

11.1 INTRODUCCION.

Debe advertirse para comenzar, que las teorías y técnicas que constituyen el fundamento de la predicción del tiempo son muy variadas. Incluso una referencia breve tendría que incluir deducciones matemáticas bastante complicadas, junto con un resumen de un gran número de experiencias y práctica operativa. En conjunto, la predicción del tiempo es una aplicación de la Meteorología superior que no se puede describir en un capítulo corto. Todo lo que podemos hacer aquí es echar una ojeada de conjunto, destacando las directrices según las cuales se ha desarrollado el pronóstico del tiempo.

El avance de la meteorología se vio favorecida por la tecnología desarrollada con fines bélicos. Por ejemplo, el desembarco aliado del Día D en contra de los nazis, el 6 de junio de 1944, se efectuó aprovechando una mejora transitoria de las condiciones del tiempo prevista por los meteorólogos yanquis y británicos. La historia dice:

“El primero de junio de 1944, un grupo de oficiales mensajeros armados abordó las embarcaciones de los aliados, en los puertos de salida. Cada oficial recibió un sobre sellado marcado como ultrasecreto que contenía otro sobre sellado en su interior. El mensaje de la operación Neptuno revelaba la fecha del Día D: el 5 de junio, con posible cambio al día 6 ó 7. La nota terminaba diciendo: ‘Quémese este mensaje una vez leído y entendido’. ***Hacia mal tiempo el 5 de junio. Al siguiente día el mar estaba picado, pero la tormenta había cesado.*** Poco después del amanecer del día 6 de junio, una flota de buques de guerra de los Aliados apareció entre la niebla, de un gris como acero, frente a la costa de Normandía, preparada para bombardear los puestos alemanes señalados en el mapa del plan BIGOT (to gib). Detrás de la playa Utah, las baterías costeras alemanas abrieron fuego primero, con algunos de sus cañones apuntando a

los destructores estadounidenses *Fitch* y *Corry*. Los buques viraban a estribor para alinearse en sentido paralelo a la playa. Después echarían anclas para convertirse en plataformas estables para la artillería en el momento de bombardear la playa. A las 6:10 AM, según lo previsto, los aviones de los aliados empezaron a arrojar cortinas de humo para esconder a los destructores, pero uno de los aviones fue derribado antes de que pudiera ocultar al *Corry*. La artillería alemana apuntó de inmediato hacia el buque, que sin dejar de disparar, comenzó a esquivar cerradamente los embates. Mas tarde, apenas pasadas las 6:30, el buque chocó contra una mina; 8 minutos después, con la cubierta principal del *Corry* bajo el agua y el buque partido a la mitad, el capitán Hoffman ordenó a sus 18 oficiales y 265 tripulantes que abandonaran el barco. Una vez que todos los hombres aún con vida estaban en las aguas, a una temperatura de solo 12° C, Hoffman se les unió. El bombardeo siguió y muchos hombres murieron luchando por su vida en el frío mar. Para el momento en que los destructores llegaron a rescatarlos, dos horas mas tarde, disparando contra los alemanes desde un costado del barco mientras rescataban a los marineros por el otro, los 260 sobrevivientes del buque estaban a punto de morir. En total, el *Corry*, que había disparado 400 descargas durante los pocos minutos de su participación en el Día D, perdió 24 hombres. Su insignia, arrancada del buque a pique por el teniente Garray, aún perdura como un recuerdo”.

Pero dejando de lado la historia, la sociedad moderna exige cada día mayor precisión en los pronósticos del tiempo, desde las actividades turísticas para programar un fin de semana en playa o la montaña hasta los pronósticos altamente especializados de la NASA para evaluar las condiciones del tiempo en sus lanzamientos de las naves al espacio. Las líneas aéreas, marítimas, transporte terrestre, agricultura, pesca, actividades forestales, industria, deportes, turismo, etc., planifican sus actividades diarias de acuerdo al pronóstico del tiempo.

En la realización de un pronóstico del tiempo tradicional intervienen muchos actores. El observador meteorológico, es la persona encargada de realizar las observaciones de las variables meteorológicas de la estación

en las horas sinópticas, estas observaciones las puede hacer cualquier persona a la cual se le ha enseñado a leer los instrumentos, basta que sepa leer y escribir. El observador transmite, vía teléfono o similar, los datos al centro de análisis, donde el ploteador, que debe ser un técnico en meteorología, traspara los datos al mapa sinóptico. Luego interviene el analista, que debe ser meteorólogo, es el encargado de dibujar el mapa sinóptico, trazando las isobaras, identificando centros de altas y bajas presiones, y dibujando los frentes cuando existen, y destacando los fenómenos de tiempo significativo, como precipitación por ejemplo. Posteriormente actúa el pronosticador, un meteorólogo que es el que interpreta la carta sinóptica y realiza un pronóstico preliminar. Finalmente en los centros de análisis, una o dos veces al día se reúne un grupo de expertos para hacer la discusión del pronóstico, que es especialmente importante cuando la atmósfera presenta situaciones conflictivas, las cuales deben ser totalmente aclaradas antes de hacer el pronóstico definitivo, que se emite a todos los usuarios que lo requieren y al público en general.

11.2 ANÁLISIS DEL TIEMPO.

Realizar el análisis del tiempo es una tarea enorme que consiste en observar, medir, coleccionar, transmitir, procesar e interpretar millones de datos en todo el globo. Estos datos deben ser analizados cuidadosamente para tener una visión de las condiciones actuales de la atmósfera. Como la atmósfera cambia continuamente, este análisis debe ser realizado en el menor tiempo posible. Además de este enorme trabajo, el análisis debe ser mostrado en forma que sea fácilmente comprendido por el pronosticador. La información se plotea en varias cartas sinópticas, para diferentes variables y en distintos niveles de altura en la troposfera. Estos mapas son una representación simbólica del estado de la atmósfera en el momento de la observación. Para hacer un pronóstico del tiempo de corto plazo, se requiere una amplia red de estaciones meteorológicas, que proporcionen datos suficientes para dibujar las cartas sinópticas. En la actualidad las computadoras de alta velocidad facilitan el análisis del tiempo.

Los servicios meteorológicos nacionales que funcionan en casi todos los países del mundo, son los encargados de las actividades relacionadas con el tiempo, están diseñados para responder sobre el estado del clima específico de cada país, por lo que se centran en los aspectos que mas afectan el funcionamiento del mismo, por ejemplo, dar las alertas de temporales en Chile. Estos servicios financiados por el estado, se complementan con recursos de las universidades y de las empresas. En Chile, el organismo oficial de mantener las estaciones meteorológicas, recopilar la información, y hacer los análisis y pronósticos del tiempo es la Dirección Meteorológica de Chile, dependiente de la Fuerza Aérea.

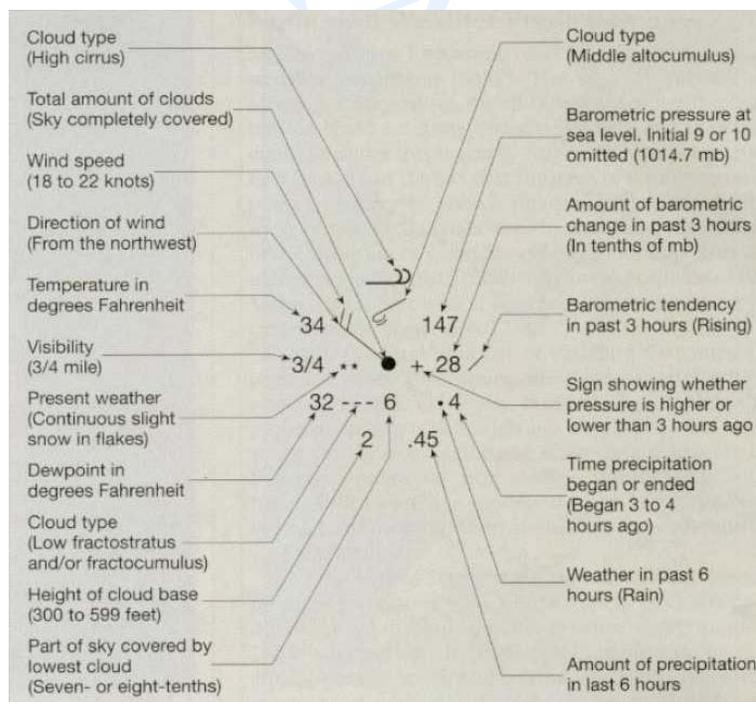
Puesto que el tiempo atmosférico es de naturaleza global, la cooperación internacional es esencial. La Organización Meteorológica Mundial, OMM, creada en 1951, con sede en Ginebra, Suiza, una agencia especializada de las Naciones Unidas, que tiene más de 170 países miembros, es la responsable de reunir los datos necesarios para construir las cartas sinópticas globales. Miles de estaciones en superficie, boyas a la deriva y barcos en el mar transmiten los datos cuatro veces al día, en las horas sinópticas 00, 06, 12 y 18 horas del meridiano de Greenwich. También se recogen las observaciones de radiosondeos y de satélites para analizar las condiciones de la atmósfera en la vertical. Pero hay grandes regiones del globo, como los océanos, grandes zonas continentales polares y regiones selváticas y desérticas donde no se realizan mediciones adecuadas. Desde la OMM los datos se transmiten a los Centros Regionales de Meteorología ubicados en Washington, Moscú y Melbourne. Desde aquí, los datos compilados son retransmitidos a los centros meteorológicos de cada país participante.

Entre los grandes servicios meteorológicos que participan en la previsión global están el Centro Meteorológico Nacional de EEUU, ubicado en Maryland, la Oficina Meteorológica Británica en Bracknell y el Centro Europeo de Pronóstico de Mediano y Largo Plazo (ECMWF) en Reading, Inglaterra. En Sudamérica y el Hemisferio Sur tiene una activa participación el Centro de Pronóstico del Tiempo y Estudios Climáticos (CPTEC) de Brasil. Estos centros colectan los datos para elaborar los

mapas sinópticos globales y los introducen en modelos informáticos a fin de realizar previsiones globales. Los mapas y los pronósticos se distribuyen al menos una vez al día a los servicios meteorológicos nacionales, muchos de estos, juntos con las imágenes de satélites, se encuentran disponibles para uso público en internet.

Para dibujar el mapa sinóptico, se plotean los datos de las estaciones existentes. Por acuerdo internacional, para el ploteo se usan símbolos estándar, que se muestran en la figura 11.1. Generalmente se plotean temperatura, temperatura de rocío, presión, velocidad y dirección del viento, tendencia de la presión, precipitación, nubes, y tiempo pasado y presente. Después se dibuja la carta sinóptica en superficie, con las isobaras y frentes, tan exactamente como sea posible, indicando centros de altas y bajas presiones, como se muestra en la figura 11.2, y otros rasgos sobresalientes, como áreas de precipitación.

Figura 11.1 Símbolos utilizados para plotear una carta sinóptica.



Para describir la atmósfera tan completamente como sea posible, se realizan también cartas para diferentes niveles estándar de presión, regularmente se hacen para 850, 700, 500, 300, 200 y 100 hPa, donde se dibujan la altura geopotencial en lugar de isobaras además, de isotermas, vientos y corriente en chorro. De esta forma se intenta describir la estructura tridimensional de la atmósfera.

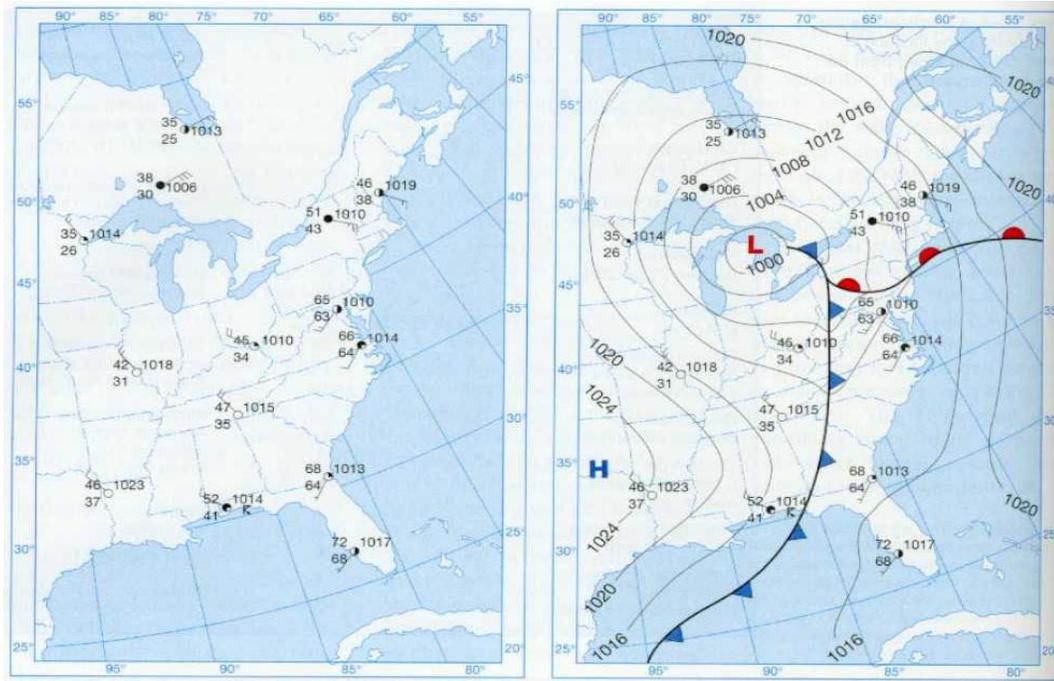
11.3 PRONÓSTICO DEL TIEMPO.

Para hacer un pronóstico del tiempo moderno, se consideran diferentes enfoques por su naturaleza cuantitativa y altamente compleja: pronósticos tradicionales, predicción numérica del tiempo, métodos estadísticos y diferentes técnicas de pronósticos de corto y largo plazo. A continuación se hace una breve descripción de los diferentes métodos de pronóstico.

11.3.1 Pronóstico de tiempo sinóptico.

Fue el primer método usado y continúa usándose, donde el pronóstico se hace sobre la base de las cartas sinópticas. Como resultado de un cuidadoso estudio de las cartas de muchos años, se establecieron reglas empíricas, que ayudan a estimar la dirección y rapidez del movimiento de los sistemas de tiempo. Cuando se conoció el tipo de tiempo asociado a los frentes y se pudo predecir su movimiento, mejor resultaba el pronóstico a corto plazo. Pero como los sistemas ciclónicos cambian rápidamente, esos pronósticos son buenos sólo por pocas horas a un día. Mejorando el conocimiento del movimiento y desarrollo de los sistemas ciclónicos y el análisis de los frentes en superficie, se puede mejorar la predicción del estado futuro de la atmósfera y extender los pronósticos a más de un día. Estas reglas empíricas aún se usan, aunque se aplican y complementan con otros métodos de pronóstico. En la figura 11.2 se muestra un ejemplo de cómo dibujar una carta de tiempo tradicional.

Figura 11.2 Carta sinóptica de superficie plotada (izquierda) y dibujada (derecha).



11.3.2 Pronóstico estadístico.

Se pueden distinguir dos métodos de pronóstico estadístico. Uno consiste en usar las series de datos del tiempo pasado analizados cuidadosamente, para establecer patrones de tiempo característicos, que se pueden usar para predecir las condiciones futuras, de acuerdo al comportamiento estadístico del tiempo pasado. Otro método estadístico llamado de analogías, consiste en comparar el estado actual de la atmósfera de un lugar con otro similar ocurrido anteriormente, y ver el comportamiento que tuvo la atmósfera en la situación anterior, entonces suponer que el estado futuro de la atmósfera se va a repetir como el anterior. Pero se sabe que ningún episodio de tiempo es idéntico a otro en todos sus aspectos, por lo que no necesariamente se va a repetir con las mismas características.

11.3.3 Pronóstico numérico del tiempo.

La palabra “numérico” se refiere a los tipos de pronósticos que consideran el análisis de datos. Se basa en el hecho que el comportamiento de los gases de la atmósfera obedece a un número conocido de leyes físicas, que se pueden usar para predecir el estado futuro de la atmósfera, conocidas las condiciones iniciales. Las leyes físicas usadas son la ecuación de conservación del momento lineal que se deduce de la segunda Ley de Newton, de donde se obtienen dos ecuaciones que describen el movimiento horizontal del aire y una que describe el movimiento vertical, la primera ley de la termodinámica, que describe la conservación de energía del sistema, la ecuación de continuidad que representa la conservación de la masa y la ecuación de estado de gas ideal, considerando que la atmósfera se comporta como tal. Se expresan matemáticamente por las ecuaciones:

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{v}}{dt} + 2\vec{\Omega} \times \vec{v} + \frac{1}{\rho} \nabla p - \vec{g} &= \vec{F}_R \\ \frac{dq}{dt} &= c_v \frac{dT}{dt} + p \frac{d(1/\rho)}{dt} \\ \frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \vec{v} &= 0 \\ p &= R\rho T \end{aligned}$$

Este se conoce como el conjunto de **ecuaciones primitivas**. Suponiendo conocida la fuerza de fricción F_R , y que se puede especificar la variación de calor dq/dt , entonces este sistema constituye un conjunto de seis ecuaciones para las seis variables dependientes u, v, w, p, ρ y T , y las cuatro variables independientes x, y, z, t . Aplicadas a la atmósfera, constituyen el conjunto de ecuaciones de pronóstico del tiempo, usadas en el problema de la predicción. Todas las ecuaciones son de primer orden en el tiempo, excepto la ecuación de estado que es directa.

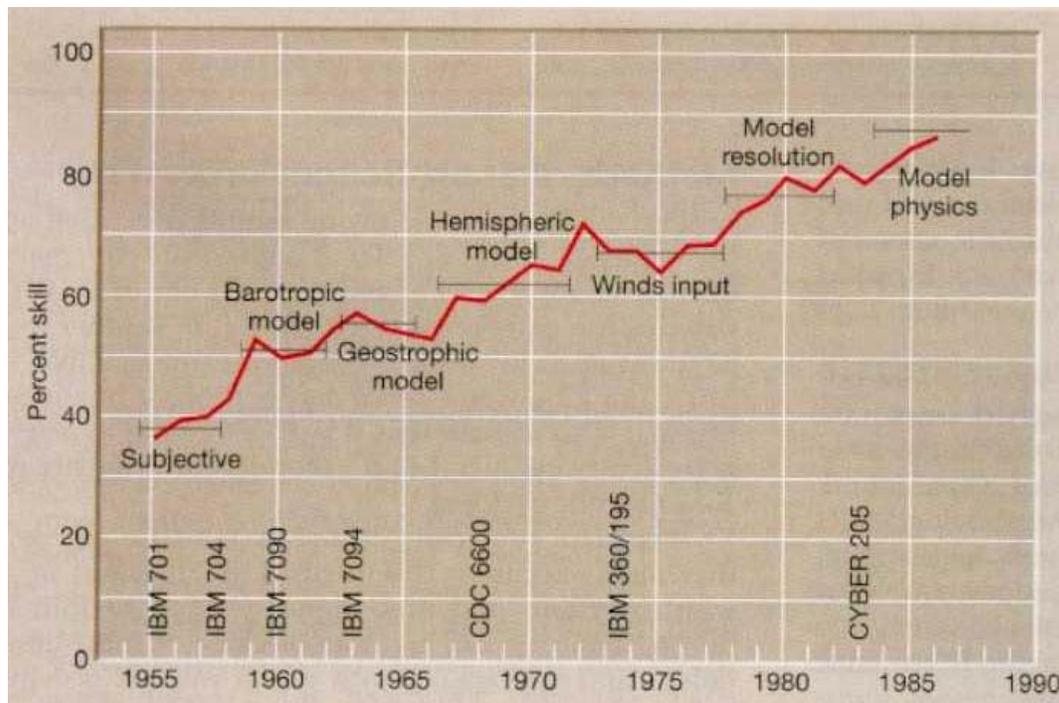
El sistema puede ser resuelto imponiendo condiciones iniciales y de contorno. Su solución analítica no es conocida, ya que las ecuaciones diferenciales parciales son no lineales. Se pueden obtener soluciones aproximadas por métodos numéricos o linealizando las ecuaciones, para lo que existen diferentes técnicas de ambos métodos, pero los resultados ya no describen el comportamiento de una atmósfera real, lo que a la larga conduce a errores en los pronósticos. Surge también otra dificultad fundamental: no se conocen las variables dependientes (u, v, w, p, ρ, T) como funciones continuas de (x, y, z, t) , ni aún en el instante inicial. Los análisis de los mapas de tiempo intentan proporcionar su conocimiento en forma geográfica. Para aplicar los métodos numéricos se debe imaginar que se tiene una red de observaciones suficientemente densa que cubra todo el fluido como un retículo tridimensional. El problema fundamental es: ¿cómo construimos una distribución continua de parámetros atmosféricos de los datos medidos en puntos ubicados al azar?

El gran número de variables que se debe incluir cuando se considera la dinámica de la atmósfera, hace que su descripción sea una tarea muy difícil. Para simplificar el análisis, los modelos numéricos omiten algunos parámetros que se supone no cambian significativamente en el tiempo, pero ya deja de ser una atmósfera real; aún así los pronósticos dan buenos resultados.

En la figura 11.3 se resume el porcentaje de acierto del pronóstico numérico a 36 horas para presión y viento en 500 hPa sobre América del Norte, desde 1950 hasta 1986. Se observa que a través de los años, a medida que han mejorado las supercomputadoras de alta velocidad, el pronóstico ha mejorado significativamente. Los modelos numéricos no tienen en cuenta todas las condiciones de superficie que consideran características topográficas menores. La cobertura vegetal o un cuerpo de agua puede alterar el tiempo local que no puede ser pronosticado por las cartas generadas por computadoras. El pronóstico numérico moderno ha mejorado enormemente nuestra capacidad para pronosticar el tiempo, pero los aspectos detallados de los fenómenos del tiempo, en particular en regiones

de mesoescala, deben ser aún determinados aplicando los métodos tradicionales a las cartas sinópticas obtenidas por métodos numéricos.

Figura 11.3 Porcentaje de acierto del pronóstico numérico del tiempo.



11.3.4 Métodos de pronóstico de corto plazo.

Una técnica muy simple de pronóstico de corto plazo está basada en la tendencia del tiempo de un lugar dado a permanecer con poca variación por varias horas, o aún por un día. Entonces para predecir el tiempo futuro se usa un **pronóstico de persistencia**, que supone será igual al de las condiciones presentes. Por ejemplo, si está a punto de llover o lloviendo ahora en Concepción, podemos predecir que lloverá o continuará lloviendo las próximas horas. Los pronósticos de persistencia no tienen en cuenta los cambios que podrían tener los sistemas de tiempo en su dirección e

intensidad, ni pueden predecir la formación o disipación de ciclones. Por esta limitación y por la rapidez con la cual pueden cambiar los sistemas de tiempo, este pronóstico se puede validar hasta 6 o 12 horas.

Otro tipo de pronóstico de corto plazo, llamado *nowcasting*, supone que el tiempo que se produce corriente arriba (esto es, desde donde se mueven los sistemas de tiempo) puede mantenerse y al moverse el sistema ir afectando de la misma forma el área de su trayectoria. Por ejemplo se puede extrapolar el movimiento de una banda de temporal para predecir que ese mismo temporal afectara de manera similar en los lugares por donde podría pasar. Este pronóstico es muy útil para sistemas de tiempos de mesoescala y de corta duración, que son demasiado pequeños para ser detectados en las cartas sinópticas generales como tormentas o tornados. En este caso es de mucha utilidad la información de radares y de satélites.

11.3.5 Pronósticos de largo plazo.

Son los pronósticos para meses, estaciones o año, basados en los datos del tiempo pasado, obtenidos en la actualidad por métodos de pronóstico numérico. No son pronósticos en el sentido usual, sino que son una estimación del comportamiento que se espera tengan las variables en esos períodos futuros. Por ejemplo, lo que se espera en cantidad de precipitación para el presente año respecto a los valores que se consideran como condición normal anual, o una estimación del régimen térmico del próximo invierno o verano, con conceptos generales tales como más frío o más cálido que lo normal, o la probabilidad que los próximos meses se desarrolle o no el fenómeno de el Niño.

11.3.6 Pronóstico de probabilidad de precipitación.

La probabilidad se refiere a la posibilidad de que un evento pueda o no ocurrir, y se representa por un número entre 0 y 1, o en porcentaje. En el pronóstico de *probabilidad de precipitación*, la probabilidad es el por-

centaje de posibilidad que al menos 0,25 mm de precipitación pueda ocurrir en algún punto del área durante el periodo cubierto por el pronóstico. Así un 70% de probabilidad indica que hay un 70% de posibilidad de precipitación mensurable (mayor que 0,25 mm) en algún punto del área del pronóstico y un 30% de posibilidad de precipitación no medible (menor que 0,25 mm) en alguna parte del área de pronóstico. Esto no significa que hay un 70% de posibilidad de precipitación en alguna parte del área de pronóstico, y un 30% de posibilidad de que no ocurra en ninguna parte del área.

Resumiendo, en la actualidad los servicios meteorológicos nacionales generan cartas sinópticas de gran escala con métodos de pronóstico numérico. Estas cartas son recibidas por los centros regionales y locales de pronóstico, que aplican las técnicas de pronósticos tradicionales, estadísticos o de corto plazo, para generar otros que se apliquen localmente.

11.4 ACIERTO DE LOS PRONÓSTICOS.

Analicemos la siguiente situación hipotética. Por ejemplo en La Serena en promedio llueve aproximadamente 18 días cada año. Por lo tanto, la posibilidad que allí llueva es de $18/365 \sim 5\%$ en el año. Por lo tanto, si el 1° de Enero de cada año se hace un pronóstico en que se afirme que en La Serena no lloverá en todo el año, tendrá un 95% de exactitud. En este caso la exactitud del pronóstico es alta, pero no es necesariamente un pronóstico acertado ni bueno. Aquí el meteorólogo serenense o santiaguino que hace el pronóstico para La Serena, debería ser capaz de pronosticar lluvia los días en que se producirá, para que el pronóstico sea acertado.

En general, los pronósticos son relativamente acertados en muy corto plazo, del orden de 12 horas, y son muy buenos para 1-2 días. Para más de 2 días, el acierto disminuye más mientras a más largo plazo sea el pronóstico. Hoy se hacen normalmente pronósticos hasta 7 días, y estos son frecuentemente revisados y actualizados. Lo normal es que un pro-

nóstico se actualice cada seis horas. El grado de acierto de los pronósticos se puede resumir de la siguiente forma:

- 0-12 horas: en este período las condiciones generales del tiempo y las tendencias tienen un alto porcentaje de acierto, sobre 85%.
- 12-48 horas: el porcentaje de acierto es bastante alto, del orden de 85%.
- 3-5 días: la circulación de gran escala tiene un buen o alto porcentaje de acierto. Los pronósticos de temperatura son buenos a 3 días hasta regular a 5 días. El pronóstico de precipitación es regular a 3 y marginal a 5 días.
- 6-10 días: poco acierto, siendo mejor en los primeros días, el acierto es mayor en temperatura que en precipitación.
- Mensual a estacional - anual: ligero acierto, mayor en temperatura que en precipitación.

Las razones por las cuales el pronóstico pueda fallar son varias. La red de estaciones meteorológicas es incompleta, no cubre adecuadamente grandes áreas continentales como desiertos, selvas, cadenas montañosas u otras regiones inhóspitas, y no hay estaciones sobre los océanos. Más escasos aún son los datos de altura en la troposfera. Los modelos de circulación son incompletos porque no consideran totalmente los factores que afectan al tiempo como topografía, cubierta vegetal, de nieve, de nubes, tipo de suelos, etc. Las leyes de la física aplicadas a la atmósfera no se pueden resolver completamente porque son no lineales. La atmósfera terrestre obedece las leyes de la mecánica, pero puede resultar extremadamente difícil determinar como operan estas leyes con respecto a cualquier fenómeno atmosférico. El hecho de que el pronóstico anuncie buen tiempo y soleado, pero sin embargo amanece lloviendo, no significa que las leyes de la mecánica son incorrectas, sino que este error significa simplemente que estas leyes son muy difíciles de aplicar en meteorología.

Esta situación se puede ilustrar con la siguiente cita, adaptada de Lorenz: “El aleteo de una mariposa hoy en Australia puede transformarse en temporales semanas después en Chile”. Esto quiere decir que una leve altera-

ción del aire en alguna región puede producir la aparición de un fenómeno meteorológico importante en otro lugar tiempo después, debido a la interconexión de la atmósfera. Esto se llama “*efecto mariposa*”, porque en teoría el débil aleteo de una mariposa y su casi inapreciable movimiento en un punto, puede desencadenar una tormenta en otro lugar, signo clásico del caos.

La teoría del caos tiene su origen en la meteorología, y en los trabajos de E. N. Lorenz (1917, meteorólogo estadounidense) a comienzos de la década del 60, quien contribuyó al conocimiento de los sistemas con propiedades no lineales. En dichos sistemas, cuando un parámetro cambia, los otros se pueden alterar en una forma que no guarda relación directa con ese cambio. Mediante las ecuaciones de la dinámica de la atmósfera, Lorenz demostró que su comportamiento es impredecible. El sistema nunca recupera su estado original, por lo que nunca puede repetirse, lo que tiene profundas consecuencias en la predicción del tiempo. Nunca podemos definir con precisión el estado actual de la atmósfera y el efecto mariposa significa que aun los errores más insignificantes de nuestros modelos pueden multiplicarse hasta invalidar los resultados finales. En la práctica esto implica que aunque se mejoren las mediciones de forma considerable y se aumente la potencia de las computadoras, la magnificación de los errores invalidará los pronósticos del tiempo.

11.5 SATÉLITES EN EL PRONÓSTICO.

Para mejorar los pronósticos se usan además de las estaciones meteorológicas tradicionales y de radiosondeos, sistemas de observación automáticas, perfiladores de viento que miden en la vertical cada 10 minutos, globos piloto, datos transmitidos desde los barcos, o boyas con instrumentos, fijas o a la deriva sobre los océanos. Para el procesamiento de los datos se usan supercomputadoras de gran capacidad y alta velocidad y las computadoras personales. Desde hace algunas décadas son también una importante fuente de información los datos entregados por los satélites meteorológicos.

El campo de la meteorología entró a la era espacial el 1° de abril de 1960, cuando se lanzó el primer satélite artificial, el TIROS 1 (Television and InfraRed Observation Satellite). Tuvo una vida corta de sólo 79 días, durante los cuales transmitió 23 mil imágenes de la Tierra, con lo cual los meteorólogos de todo el mundo quedaron más que maravillados. Desde esa fecha se han lanzado varios TIROS. Al poco tiempo se comenzó a apreciar el valor de los satélites, ya que en septiembre de 1961 las imágenes del huracán Carla permitió organizar la evacuación de más de 350 mil personas a lo largo de la costa del Golfo. En 1964 se lanzó la segunda generación de satélites, llamados los Nimbus, con sensores infrarrojos capaces de mirar la cubierta de nubes en las noches. Otra serie de satélites son conocidos con nombres como Cosmos, Meteor, Meteosat, que se observa en la figura 11.4.

Figura 11.4 Imagen del satélite Meteosat.



Los satélites han sido puestos en órbita polar o ubicados en un punto fijo sobre el ecuador. Los **satélites de órbita polar** circulan en torno a la tierra de norte a sur pasando en cada órbita por sobre los polos. Vuelan a baja altura, aproximadamente a 850 km y tardan sólo cerca de 100 minutos (1,7 horas) en completar una órbita, moviéndose con una rapidez de 7446 m/s. Como la Tierra ‘debajo’ gira hacia el este, estos satélites que no cambian su trayectoria, derivan hacia el oeste aproximadamente 25° en cada vuelta. Por lo tanto, pueden cubrir una gran región en sólo pocas horas y se pueden obtener imágenes de toda la Tierra, esto es, circulan toda la Tierra, aproximadamente dos veces cada día.

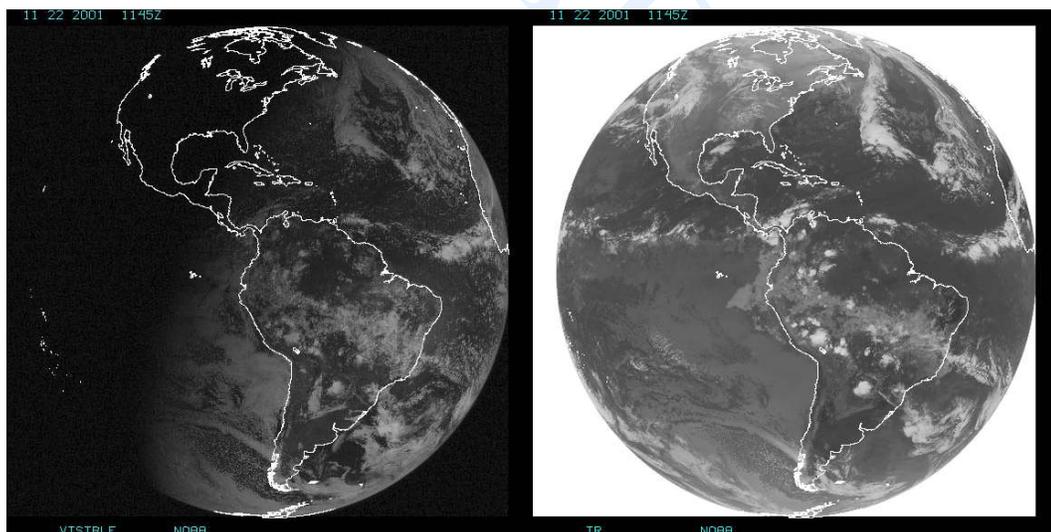
Los **satélites geoestacionarios** comenzaron a orbitar en 1966, tienen una órbita paralela y sobre el Ecuador. Estos orbitan en un punto fijo sobre la Tierra, de ahí su nombre de geoestacionario, por lo que tienen la misma rapidez angular de la Tierra, es decir completan una vuelta en torno a la Tierra en un día. La altura a la que orbitan es de 36000 km, con una rapidez del orden de 3075 m/s. Sin embargo desde esa gran altura se pierden algunos detalles en la imagen.

Los satélites geoestacionarios conocidos como GOES (Goestationary Operational Environmental Satellites) entregan imágenes cada 1/2 hora, se ubican en lugares estratégicos, por ejemplo, sobre Norteamérica, donde permiten seguir la trayectoria de los grandes sistemas de tiempo, como el movimiento y desarrollo de tormentas tropicales y huracanes, que no pueden ser adecuadamente seguidos por los satélites de órbita polar, que cambian continuamente de posición. Otros satélites, el GOES-8 se ubica sobre 75° W donde pueden monitorear el desarrollo de huracanes sobre el Atlántico, y el GOES-9 sobre 135° W. Estos satélites tienen la capacidad de observar las 24 horas una misma superficie sobre nuestro planeta.

Las imágenes de los satélites pueden ser tomadas con luz de longitud de onda infrarrojo (IR) y con luz visible, que es la que nosotros vemos; ejemplos de estas imágenes se muestran en la figura 11.5, de un mismo día a una misma hora, para poder comparar las diferencias entre ambas. La **imagen visible**, (figura 11.5, izquierda), es una fotografía que toman

las cámaras de televisión del satélite, es útil solamente durante el día, ya que donde la Tierra está de noche, se ve solo un área oscura. Permite ver todos los tipos de nubes del mismo tono de gris, por lo que no se puede distinguir un tipo de nubes de otro, y no se puede decidir cuales podrían producir lluvia, o nieve, llovizna o no producir precipitación. Para obtener imágenes nocturnas los satélites tienen equipos especiales con sensores infrarrojos, que toman una fotografía en *imagen infrarrojo* (figura 11.5, derecha). Con esta imagen los objetos más cálidos se ven de color más grises y los más fríos se ven muy blancos. Como el tope de las nubes más altas es más frío, estas se ven de colores muy blancos y como estos son nubes de gran extensión vertical son los que pueden producir precipitación; en cambio las nubes más bajas y más delgadas que sólo podrían producir llovizna o no dar precipitación, se ven mucho más oscuras. Los sensores infrarrojos miden también la radiación y calor recibido del Sol, como la radiación que la Tierra absorbe, emite o refleja al espacio, lo que ayuda a conocer el verdadero comportamiento de la atmósfera. Estas imágenes son recibidas por equipos receptores en tierra.

Figura 11.5 Imágenes visible, izquierda e infrarrojo, derecha.



Uno de los aspectos importantes de los satélites, es que permiten llenar los vacíos en los datos, especialmente sobre los océanos. Los satélites están equipados con instrumentos diseñados para medir temperaturas a distintas alturas. También pueden determinar directa o indirectamente la velocidad del viento a partir del movimiento de las nubes, y el vapor de agua en la atmósfera. Sin duda que las imágenes de satélites son un importante elemento de apoyo al pronóstico del tiempo, que han permitido mejorar la previsión del tiempo y el estudio y desarrollo de los grandes sistemas de tiempo, como huracanes y temporales.

11.6 CREENCIAS POPULARES DE PREDICCIÓN DEL TIEMPO.

Mucho antes de que empezara a tomar forma la ciencia, tal como nosotros la conocemos, los hombres observaron el cielo, notaron las características de las estaciones y procuraron de disponer sus actividades, hasta el punto que podían, de acuerdo con el tiempo cambiante. Sin duda, muchos observadores sagaces llegaron a alcanzar cierto conocimiento de las sucesiones de tiempo características, y a formular reglas que, en ocasiones, les fueron útiles. Por ejemplo, se sabe que los vikingos (hacia el año 1000 de nuestra Era) eran capaces de escoger el “tiempo a propósito” para su viaje primaveral a Islandia, que duraba varios días, y desde ahí viajaban a la costa este de Canadá, (esto significa que no fue Colón quien primero llegó a América, sino que fueron los vikingos, al menos 500 años antes que Colón). A la luz de los conocimientos modernos parece probable que buscaran las señales en el movimiento de las nubes cirrus. Normalmente estas nubes son arrastradas desde el oeste o noroeste y van asociadas con tempestades viajeras. Sin embargo, los cirrus que son arrastrados desde el sur o desde el este son indicio en Noruega de condiciones anticiclónicas persistentes que favorecen los vientos del sudeste hacia Islandia. Tales situaciones son particularmente frecuentes en primavera, y los meteorólogos las llaman *situaciones de bloqueo*, porque en ellas está impedido el paso hacia el este de las tempestades atlánticas.

11.6.1 Gente y animales.

Siempre ha sido muy fuerte la creencia en que las reacciones de las personas y de los animales predicen el tiempo. Por ejemplo:

- *Los callos punzantes presagian la venida de una tempestad, lo mismo que los latidos dolorosos de las muelas picadas.*
- *El zumbido de oídos por la noche es señal de un cambio de viento.*
- *Oigo los burros rebuznar; hoy tendremos lluvia.*
- *Cuando veas babosas negras en el camino, al día siguiente lloverá*
- *Cuando se ponen húmedos en sus cabelleras los rizos de los navajos, seguramente lloverá.*

Aunque es cierto que la gente y los animales reaccionan al tiempo existente, no hay nada que indique que pueden señalar el que va a venir, salvo en la medida que un cambio que se inicie esté relacionado con el tiempo que existe. Por ejemplo, la referencia a la humedad de los rizos de los navajos se puede explicar fácilmente, pues el cabello humano absorbe humedad, y la lluvia está frecuentemente precedida por aire húmedo.

11.6.2 Señales Ópticas.

Muchos proverbios se refieren al arco iris, y algunos tienen fácil explicación. Por ejemplo:

- *Un arco iris por la mañana es la alarma del pastor; un arco iris por la noche es el regocijo del pastor.*
- *Un arco iris a barlovento, mal se presenta el día; un arco iris a sotavento, se marchará la humedad.*

Estos dos refranes reflejan una experiencia cierta en regiones donde los vientos dominantes son del oeste. El arco iris se ve en la dirección opuesta al sol, de manera que por la mañana está al oeste (o a barlovento), y las

probabilidades son de que se esté aproximando lluvia. Por otra parte, un arco iris por la tarde indicaría que ha pasado la lluvia.

Otros refranes se refieren a esos anillos que rodean el sol o la luna y que se llaman *halos*. Por ejemplo:

- *Cuando el sol está en su casa (halo), lloverá pronto.*

Los halos ocurren como consecuencia de la refracción de la luz en los cristales de hielo, y se les ve cuando una capa de cirrustratos tapa el Sol o la Luna. Los cirrustratos son con frecuencia la primera señal de que se aproxima un frente cálido, a lo cual seguirá probablemente, lluvia o nieve. La presencia de cristales de hielo en los altos niveles es favorable para desencadenar la precipitación. El halo más frecuente (el pequeño) tiene un radio angular de 22° . A veces hay un halo más grande más débil, con un radio de 46° , pero rara vez está entero. Los refranes del tiempo se refieren al halo pequeño y es cosa notable que en los antiguos escritos de Babilonia se encuentre ya referencia a esta señal de lluvia.

11.6.3 Estados sucesivos de tiempo.

Hay un grupo amplio de refranes que se refieren a la sucesión de acontecimientos, y algunos de ellos tienen base científica. Por ejemplo:

- *Trueno en primavera, traerá frío.*
- *Una nube tan negra al oscurecer, no faltará un viento del Oeste.*
- *Si el cielo es de un azul claro profundo o de un verde mar cerca del horizonte, detrás vendrá lluvia.*

El primer refrán refleja la observación de que las tormentas de primavera están asociadas frecuentemente con frentes fríos, mientras que las de verano ocurren con frecuencia dentro de masas de aire caliente. El segundo refrán se refiere a una nube oscura en el cielo, por el oeste; en la zona de vientos del oeste, en la que las tempestades se mueven hacia oriente, este

puede muy bien indicar una tempestad que avanza. El significado del tercer refrán quizá no es tan evidente. El color del cielo sugiere aire polar limpio. Cuando una masa tal de aire llega a las latitudes medias, corrientemente es inestable y se presenta con frecuencia lluvia en chubascos.

El siguiente proverbio tuvo mucha circulación en los días de la navegación a vela:

- *Cielo aborregado y colas de yegua hacen que los altos barcos bajen las velas.*

Aquí, colas de yegua significan penachos y rayas de cirros que son arrastradas por los vientos en altura. En latitudes medias, tales nubes, arrastradas desde el Oeste o Noroeste, son a menudo un signo de que avanza un ciclón.

Bajo los encabezamientos *Señales ópticas y Estados sucesivos de tiempo* sólo hemos citado refranes que tienen base científica. En ambos grupos hay muchos que tienen poca o ninguna de esa base.

La mayor parte de los refranes son reflejo del deseo de producir una rima agradable o una frase de prosa ingeniosa, más que dar información cierta. La regla de que la mejor manera de navegar de Boston a Cuba es marchar hacia el Sur hasta que se funda la mantequilla y entonces cambiar en 90° el rumbo, no tiene valor práctico, y lo mismo es cierto para muchos proverbios. En conjunto, el contenido de los refranes del tiempo está muy por debajo de la considerable sabiduría que sobre el tiempo poseían los marinos, sobre todo en la época de la navegación a vela. Leyendo el barómetro del barco, observando el cielo cambiante, el viento, el oleaje, etc., estos hombres acumularon muchos conocimientos valiosos sobre los estados sucesivos del tiempo, conocimiento que usaron para evitar desastres. Desgraciadamente, el conocimiento que se alcanza sólo por la experiencia no puede ser fácilmente recogido y transmitido a otros.

11.7 PRONOSTICO EN CONCEPCIÓN.

La meteorología de la zona central de Chile, tal como fue descrito en el capítulo 8, se caracteriza por la interacción conjunta de los sistemas sinópticos que son el Anticiclón del Pacífico Sur, las Bajas Subpolares y la Baja Costera. Para el clima de la zona central de Chile, excluidos sus regiones extremas norte y sur, se pueden distinguir tres situaciones características: por el norte predominio de anticiclón neto, en el sector sur predominio de bajas subpolares neto y las respectivas etapas de transición. En condiciones de predominio anticiclónico se tiene buen tiempo y con la presencia de las bajas subpolares, que acompañan a los sistemas frontales extratropicales, se produce abundante precipitación. Sin embargo, en el clima de determinadas regiones se deben tomar en cuenta fenómenos locales que pueden alterar en forma importante el clima de gran escala y ser determinantes en el clima regional.

En la Octava Región de Chile, el clima (ver capítulo 15) está regulado por la variada topografía existente. En el sector este de la región, por la presencia de la Cordillera de Los Andes, el ascenso forzado del flujo del oeste favorece el proceso de precipitaciones en la ladera occidental de la cordillera. Al oeste de la región, la Cordillera de la Costa por un lado refuerza (debilita) las precipitaciones en su ladera occidental (oriental) y por otro, disminuye la influencia marítima. Este comportamiento hace que el valle central quede protegido de los excesos de precipitaciones y con rasgos continentales para el régimen de temperatura, con grandes amplitudes diarias y anuales.

Con el conocimiento de la anterior descripción climática, mas el análisis de las cartas sinópticas, junto con la ayuda de las imágenes de satélite y los datos meteorológicos, se puede hacer el pronóstico del tiempo para Chile y en particular para Concepción.

En la figura 11.6 se observan cartas sinópticas correspondientes a situaciones meteorológicas de un día particular de verano y otro de invierno en Chile, donde se puede apreciar la ubicación de los centros de presión mencionados, que representan eventos típicos que se producen con fre-

cuencia. En el caso del verano o época de buen tiempo (figura 11.6a), la influencia del anticiclón subtropical del Pacífico Sur produce cielos despejados, con vientos leves a moderados del suroeste y agradables temperaturas. En época invernal o de mal tiempo (figura 11.6b), por la actividad ciclónica y el pasaje de sistemas frontales por nuestra región, se producen precipitaciones con vientos intensos desde el norte, pero si se tienen altas presiones, puede haber cielos despejados con bajas temperaturas, que pueden producir heladas durante las noches, y mantener las bajas temperaturas durante el día si la situación sinóptica genera flujo de aire desde zonas subpolares (onda de frío polar).

Figura 11.6a Carta sinóptica e imagen de satélite típica de verano.

MODELO DE PRONOSTICO LAHM/CIMA Actualizado el 10/02/2003
Presion (hPa) Viento (m/s) Precipitacion (mm)

Valido para las 9 hs del 10FEB2003

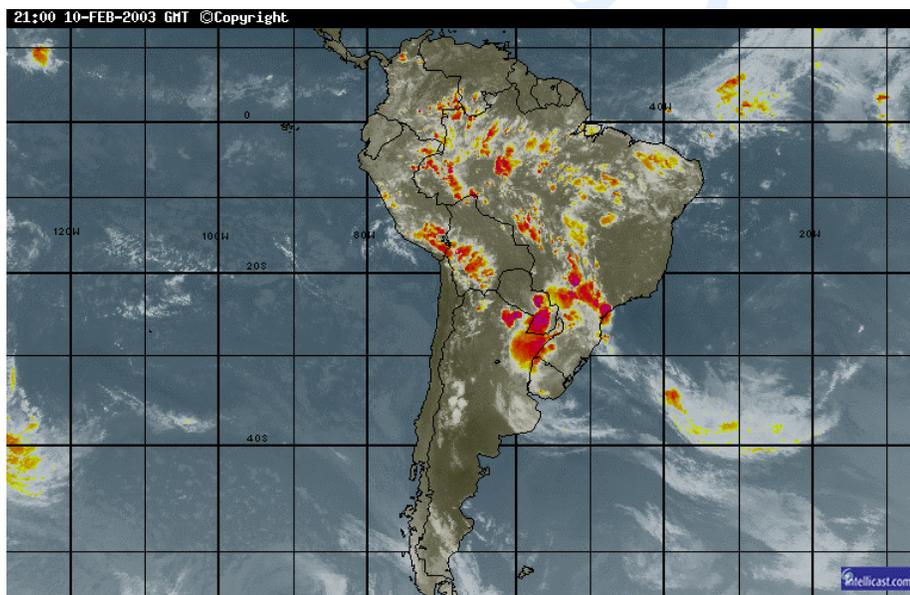
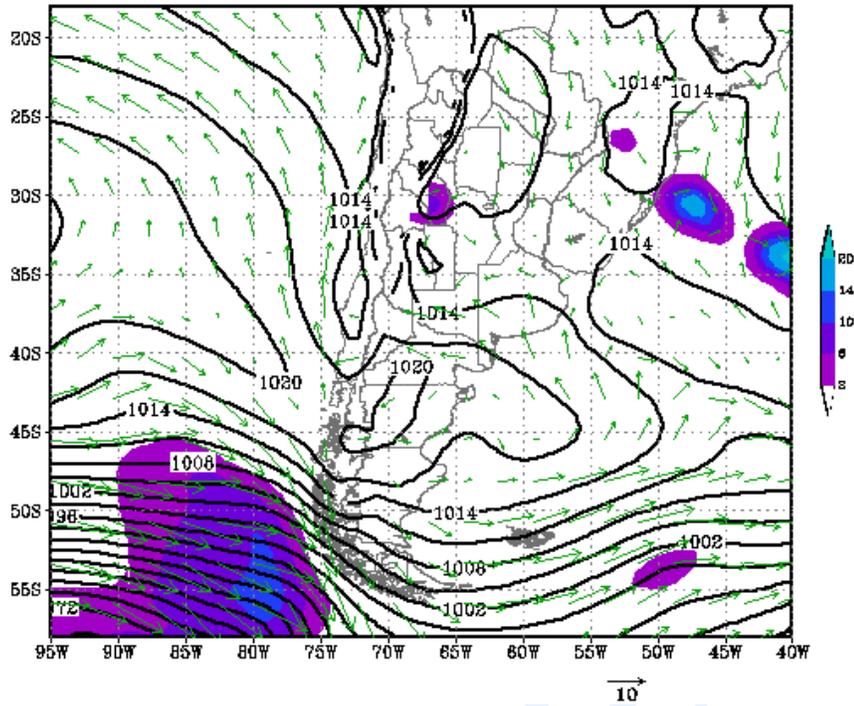
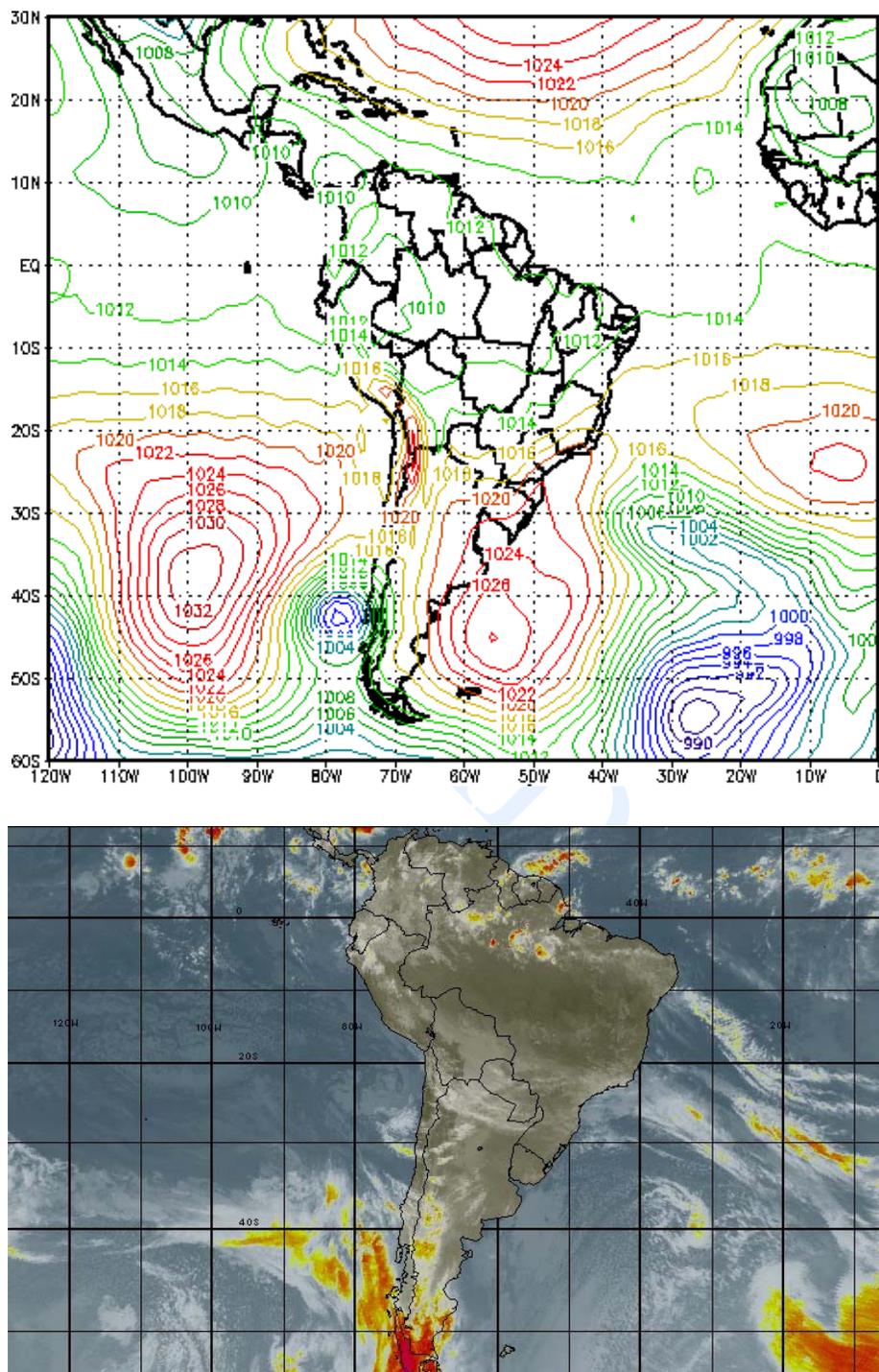


Figura 11.6b Situación de invierno.



PREGUNTAS.

1. Describir los aspectos que se deben considerar en el análisis y pronóstico del tiempo.
2. ¿Cuáles son los centros mundiales de meteorología y su función?
3. Explicar la utilidad de hacer cartas de tiempo en diferentes niveles en la vertical.
4. ¿Cuál es la base del pronóstico numérico del tiempo?
5. Comentar la calidad del acierto en los pronósticos para diferentes plazos.
6. ¿Cómo se puede reconocer un frente sobre una carta sinóptica?
7. Indicar las características de los satélites de órbita polar y geoestacionarios.
8. ¿Qué diferencia existe entre las imágenes de satélite en visible e infrarrojo?
9. Averiguar a que se refiere el concepto de ‘probabilidad de precipitación’.
10. ¿Cuales son las causas por las cuales un pronóstico puede no ser acertado?
11. ¿Qué comentarios puede hacer acerca de la calidad y/o acierto de los pronósticos del tiempo para nuestra zona? ¿Cuál pronóstico creen que es mejor: uno realizado en Santiago para Concepción o uno realizado aquí, explicar? ¿Cuál es el mejor pronóstico regional que conocen?

12. Hacer un esquema de la situación sinóptica para un día de verano y otro de invierno en Chile, donde aparezcan los principales sistemas meteorológicos que regulan el tiempo.
13. Mencionar algunas de las creencias populares del tiempo de nuestra región, con su significado. Darle una justificación meteorológica.

BORRADOR