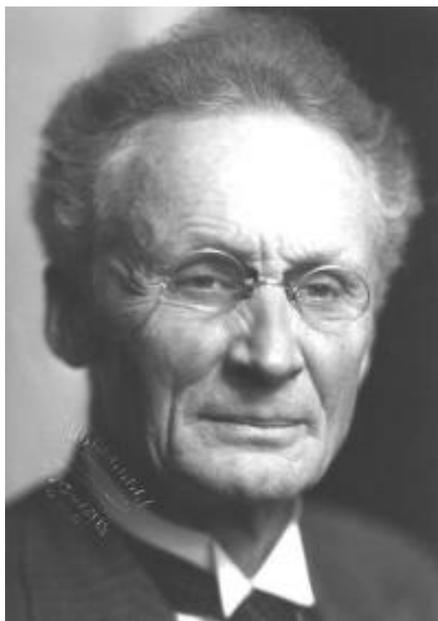


Semblanzas de Vilhelm Bjerknes y su legado.

Capítulo II: Reconciliando Física y Meteorología (1904–1917)

Manuel Palomares Calderón
m.palom@telefonica.net

Diciembre de 2012



Vilhelm Bjerknes (1862-1951)

El primer capítulo de esta serie¹ terminaba narrando cómo, en 1906, el notable físico teórico Vilhelm Bjerknes, que había sido en su juventud el principal colaborador de Rudolf Hertz, anunció su propósito de dedicarse enteramente a las ciencias geofísicas y especialmente a la Meteorología. Para entonces, Bjerknes tenía 44 años y, recordándolo más de un siglo después, realmente impresiona que todavía le diera tiempo a ser universalmente reconocido como el padre de la Meteorología moderna.

Cuando pocos años antes, Bjerknes comenzó a mostrar su nuevo interés en la Geofísica, no faltaron voces que le aconsejaron no hacerlo. Friedrich Kohlrausch, el director del Instituto Imperial de Técnicas Físicas de Berlín le manifestó bruscamente en 1902 que “*un físico que se dedique a la meteorología está perdido, es lo que le pasó a Mascart y Bezold*” (estos dos profesores de Física pasaron a final del siglo XIX a dirigir los servicios meteorológicos de Francia y Alemania)². No sorpresivamente, algo semejante es lo que expresó en sus memorias el ingeniero geógrafo Galbis, recordando su designación como director

¹ “Semblanzas de Vilhelm Bjerknes y su legado. Capítulo I: Una vocación tardía” Palomares, M. Abril de 2009. <http://www.divulgameteo.es/uploads/Semblanzas-Bjerknes-1.pdf>

² V. Bjerknes en carta a Hugo Hergesell de 1926. Cita recogida en *Appropriating the Weather*, R.M. Friedman, p. 48.

del Servicio español en 1910: *“asombrándose todos mis compañeros, que no se explicaban que dejase el Servicio sismológico, considerado como extraordinariamente científico, por el incipiente y vulgar meteorológico”*. Un físico teórico de la categoría de Vilhelm Bjerknes tuvo, por tanto, que vencer importantes prejuicios para consagrarse a su nueva tarea. En cambio, ésta le resultaba gratificante en varios aspectos, uno de ellos la mayor libertad de actuación en un campo donde apenas existía doctrina sólida.

Y en efecto, en los primeros años del siglo XX la Física atmosférica y sus aplicaciones prácticas se encontraban casi en su niñez en comparación con otras ramas de la Física teórica y experimental. Por ejemplo, para entonces se conocían ya la naturaleza electromagnética de la luz, la radioactividad o los fundamentos de la composición atómica y, en 1905, Einstein había dado a conocer la teoría de la relatividad, pero la Meteorología teórica estaba dando todavía sus primeros pasos, vacilantes a causa del escaso conocimiento experimental y las limitaciones de la observación atmosférica. En disculpa de los meteorólogos, podían desde luego aportarse algunas razones para ese desequilibrio: la Física podía permitirse aislar los campos de estudio pero en la atmósfera hay que integrar todas las influencias; por otra parte, la atmósfera se escapa del laboratorio y la tecnología de la época apenas había comenzado a desarrollar la observación en niveles altos de una atmósfera tridimensional.

Además, en aquella época existía una gran dispersión de intereses y conocimientos entre quienes se dedicaban a la Meteorología, donde se encontraban astrónomos, geógrafos, estadísticos y a menudo personas con escasa formación científica. Hasta entonces se había desarrollado como una ciencia principalmente empírica, basada en la observación de los fenómenos atmosféricos y la medición de variables meteorológicas en la superficie de la tierra. Se trazaban los mapas de presión y se seguía el movimiento de las depresiones y anticiclones. Si con una cierta situación la evolución había sido de tal modo, había que confiar en que con una disposición similar de las isobaras esa misma evolución se repetiría. Desde luego, se suponía que los movimientos y fenómenos atmosféricos dependían de leyes físicas, pero no se había profundizado demasiado en su interpretación. Los meteorólogos confiaban principalmente en la observación y la experiencia y, con las limitaciones existentes en sus medios de trabajo, fueron renunciando a buscar fundamentos teóricos. La falta de rigor científico era aceptable en vista de las circunstancias.

La predicción racional del tiempo. El programa de 1904

Bjerknes había empezado a interesarse por la Geofísica a partir de 1898, a resultas de las notables aplicaciones meteorológicas y oceanográficas que aportaba su famoso teorema de la circulación (ver la primera entrega de esta serie). En su trabajo anterior, sobre las ondas electromagnéticas en su juventud, y después sobre los fundamentos mecánicos de la Física, ya había demostrado más de una vez su interés por las aplicaciones reales y, aunque le costó cierto tiempo decidirse, fue crecientemente atraído por el seductor horizonte que la Meteorología y la Oceanografía ofrecían para la aplicación práctica de sus sólidos conocimientos en física teórica y particularmente en dinámica de fluidos.

La predicción del tiempo era el mayor logro que podía conseguir la aplicación práctica de la Física atmosférica y Bjerknæs lo concibió sin reservas con ese enfoque en su famoso artículo de 1904 “*El problema de la predicción del tiempo desde el punto de vista de la mecánica y la física*” publicado en el volumen 21 de *Meteorologische Zeitschrift*, la revista de Meteorología que dirigía en Viena Julius Hahn, director del Instituto austriaco de Meteorología y Geodinámica. Que sepamos, la única traducción directa al español es la realizada por Joaquín Pelkowski, un profesor colombiano de la universidad de Frankfurt, en el año 2000³. El artículo se iniciaba con el célebre enunciado de un programa determinista para la predicción científica del tiempo:

“De ser verdad, como cree cada hombre que piensa científicamente, que los estados atmosféricos posteriores se desarrollan de los anteriores según leyes físicas, entonces se puede entender que las condiciones necesarias y suficientes para una solución racional del problema de pronóstico en meteorología son estos requisitos:

Es preciso conocer con suficiente precisión el estado de la atmósfera en un instante dado.

Es preciso conocer con suficiente precisión las leyes que rigen la evolución de un estado atmosférico hacia otro.”

Como escribe Pelkowski en un comentario sobre el artículo de Bjerknæs publicado en la Revista de Meteorología Colombiana y reproducido también en la revista digital RAM y en Divulgameteo⁴, “con su teorema de circulación y el concepto de un fluido general para el cual la densidad cambiaría como resultado de un calentamiento (y acaso en virtud de un cambio en la composición), Bjerknæs se percató de que podría por vez primera formular un conjunto completo de ecuaciones termodinámicas que gobiernan los procesos atmosféricos. Por consiguiente, propuso abordar en 1904 el problema de la predicción del tiempo como un problema de condiciones iniciales de la física matemática, en el que el estado inicial se habría de determinar a partir de observaciones, y el cambio futuro, integrando dichas ecuaciones”. Pero dejemos hablar al propio Bjerknæs en estos extractos de su artículo:

“Nuestro conocimiento de las leyes, conforme a las cuales evolucionan los procesos atmosféricos, será suficiente si de dicha forma se pueden establecer tantas ecuaciones, mutuamente independientes, como incógnitas haya. El estado de la atmósfera en un instante arbitrario estará determinado, en un sentido meteorológico, si podemos calcular la velocidad, la densidad, la presión, la temperatura y la humedad del aire para ese instante y para cada punto. Por ser la velocidad un vector, cuya representación requiere tres componentes escalares, son siete las variables que habrá que calcular.

Para este cálculo de las variables podemos establecer las siguientes ecuaciones:

³ Revista de Meteorología Colombiana, 2; pp. 117-120. ISSN 0124 6984. Bogotá, D.C. Colombia. Artículo disponible en: <http://divulgameteo.es/uploads/Problema-predicción-Bjerknæs.pdf>

⁴ “Prólogo a los ensayos de un precursor y un alarife de la predicción moderna del tiempo”. Revista de Meteorología Colombiana, 2; pp. 111-115. ISSN 0124 6984. Bogotá, D.C. Colombia. Artículo disponible en : <http://www.divulgameteo.es/uploads/Prólogo-Pelkowski.pdf>

Las tres ecuaciones hidrodinámicas del movimiento. Son éstas relaciones diferenciales entre las tres componentes de la velocidad, la densidad y la presión.

La ecuación de continuidad, que representa el principio de la conservación de la masa a lo largo del movimiento. Esta ecuación también es una relación diferencial, pero ahora sólo entre las componentes de la velocidad y la densidad.

La ecuación de estado del aire atmosférico; es ésta una ecuación finita, es decir, algebraica, entre la densidad, la presión, la temperatura y la humedad de una masa arbitraria de aire.

Dos ecuaciones diferenciales, basadas en los dos principios de la teoría mecánica del calor (termodinámica), que describen cómo varía la energía y la entropía de una masa arbitraria de aire. Estas ecuaciones no introducen nuevas incógnitas, puesto que tanto la energía como la entropía son funciones de las mismas variables que las que intervienen en la ecuación de estado, asociando las variaciones de unas variables con otras, supuestamente conocidas: por un lado, el trabajo efectuado por una masa de aire, el cual se determina mediante las mismas variables que intervienen en las ecuaciones dinámicas, y por otro lado, las cantidades de calor recibidas desde afuera o entregadas hacia el exterior, calculables a partir de los datos físicos relacionados con la absorción, la emisión, y el calentamiento del aire por contacto con la superficie del suelo.

Es de resaltar que una simplificación esencial del problema se logra si no se tienen en cuenta ni la condensación ni la evaporación del agua, de modo que el vapor de agua contenido en la masa de aire puede considerarse como componente constante. El problema tiene entonces una variable menos, y podemos prescindir de una ecuación, a saber, la que resulta del segundo principio de la termodinámica. Por otro lado, si tuviésemos que trabajar con varios componentes variables de la atmósfera, el segundo principio daría una ecuación para cada constituyente.”

Con notación moderna el sistema de ecuaciones de Bjerknes venía a ser el siguiente:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} + f_v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} - f_u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}, \\ \frac{\partial w}{\partial t} &= -u \frac{\partial w}{\partial x} - v \frac{\partial w}{\partial y} - w \frac{\partial w}{\partial z} - g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} &= -u \frac{\partial \rho}{\partial x} - v \frac{\partial \rho}{\partial y} - w \frac{\partial \rho}{\partial z} - \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= -u \frac{\partial p}{\partial x} - v \frac{\partial p}{\partial y} - w \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{C_p p}{C_v} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} - w \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{RT}{C_v} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right). \end{aligned}$$

Bjerknes exponía con realismo la principal dificultad del problema: la enorme complicación de resolver un sistema no lineal de ecuaciones en derivadas parciales que carece de soluciones analíticas, pero esbozaba un camino para abordarlo basado en métodos “gráfico computacionales” que fueran deduciendo en sucesivos pasos temporales los cambios en las variables atmosféricas, una

aproximación precursora al método de trabajo que establecería después la predicción numérica:

“Sin embargo, no se podrá tratar de una integración analítica rigurosa del sistema de ecuaciones. Tan sólo el cálculo del movimiento de tres puntos, bajo la influencia mutua de una ley tan simple como la de Newton, supera, como es sabido, en mucho, los recursos contemporáneos del análisis matemático. Para los movimientos mucho más complicados de todos los puntos de la atmósfera no se puede esperar naturalmente nada. Pero aun si pudiésemos consignar la solución analítica exacta, de poco serviría. Porque para ser de utilidad práctica, la solución tendría que ser clara y por lo tanto, omitir un sinnúmero de detalles, presentes en cada solución exacta. La predicción sólo debe ocuparse de relaciones medias sobre espacios más extensos y tiempos más largos, digamos, por ejemplo, de grado por grado latitudinal, y de hora en hora, y no de milímetro por milímetro y segundo en segundo.

Por consiguiente, abandonaremos toda tentativa de buscar una solución por métodos analíticos, y el problema de la predicción meteorológica lo concebiremos de la siguiente forma práctica:

En base a las observaciones realizadas, se representa el estado inicial de la atmósfera por medio de cierto número de mapas, los cuales indican la distribución de las siete variables de capa en capa atmosférica. Con estos mapas como puntos de partida, se han de dibujar nuevos mapas similares, los cuales representarán el nuevo estado, y así de una hora a otra.

Para la solución del problema en esta forma se requieren métodos gráficos o gráfico computacionales, los cuales se han de deducir ya sea de las ecuaciones diferenciales parciales, ya sea de los principios físico-dinámicos sobre los que se basan aquéllas. No hay razón para dudar de antemano de la posibilidad de elaborar tales métodos. Todo dependerá del éxito con que se logre descomponer el complicadísimo problema en una serie de problemas parciales, tal que ninguno presente dificultades insuperables.

Para lograr esta descomposición en problemas parciales, hemos de acudir al principio general del cálculo infinitesimal de muchas variables. Con este objetivo en mente, es posible sustituir las variaciones simultáneas de varias variables por variaciones sucesivas de sendas variables o de sendos grupos de variables. Al pasar a intervalos infinitesimales, se obtienen los métodos exactos del cálculo infinitesimal. Pero si los intervalos se mantienen finitos, se obtienen los métodos aproximados del cálculo finito de las diferencias y de la integración mecánica, de los cuales hemos de servirnos en la solución de nuestro problema.

Sin embargo, no se debe aplicar este principio a ciegas, ya que la utilidad práctica del método dependerá del agrupamiento natural de las variables, conducente a problemas parciales físico matemáticos bien definidos y claros.”

El artículo continuaba exponiendo consideraciones sobre la división entre los procesos hidrodinámicos y los físicos. Para el primero de ellos apuntaba el uso gráfico de lo que en predicción numérica se conoce como representación en mallas o rejillas y citaba ya la conveniencia de tener en cuenta la topografía:

“Contemplemos primero el problema hidrodinámico, que constituye, propiamente hablando, el problema principal; pues las ecuaciones

dinámicas son las verdaderas ecuaciones de pronóstico. Sólo en virtud de ellas es que se introduce el tiempo como variable independiente, ya que las ecuaciones termodinámicas no la incluyen.

El problema hidrodinámico se presta ahora maravillosamente para la solución gráfica. En lugar de calcular a partir de las tres ecuaciones dinámicas, se introducen sencillas construcciones de paralelogramos, en un número apropiado de puntos selectos, mientras que para los puntos intermedios se completa la información mediante interpolación gráfica o a ojo. La dificultad principal radica en aquella limitación de la libertad de movimiento que resulta de la ecuación de continuidad y de las condiciones de frontera. Para comprobar si la ecuación de continuidad se cumple o no, es posible implementarla usando también métodos gráficos, con los que, además, se puede tener en cuenta la topografía de la superficie terrestre.”

En sus conclusiones, Bjerknes no afirmaba que el método propuesto fuera el que concretamente debería emplearse para la predicción sistemática del tiempo, sino que deberían usarse métodos de esa índole:

“Parece posible, pues, que algún día en el futuro se pueda aplicar un método de este género en el servicio meteorológico diario. Sea como sea, tarde o temprano se ha de iniciar un estudio científico más profundo de los procesos atmosféricos, de acuerdo con un método basado en las leyes de la mecánica y la física; lo cual llevará necesariamente a un método como el que hemos esbozado aquí.”

Como es sabido, el programa de Bjerknes fue abordado de forma práctica años más tarde por Lewis Richardson con una nueva técnica para integrar las ecuaciones. Su trabajo inspiró a su vez el de Charney y el grupo de Princeton⁵ que en 1950 usaron uno de los primeros ordenadores electrónicos para producir predicciones meteorológicas operativas. Desde entonces, los modelos numéricos de la atmósfera junto con los grandes avances en la observación y el cálculo electrónico son la base de la predicción del tiempo, en un marco general que sigue siendo el del programa de Vilhelm Bjerknes.

El genial noruego no profundizó de forma intrínseca en los métodos que él mismo había propuesto, pero inició entonces su dedicación plena a una serie de tareas que resultaron fundamentales para el progreso de la Meteorología en el primer tercio del siglo XX, entre ellas una también descrita en su famoso artículo de 1904: la necesidad de disponer de observaciones sistemáticas y tridimensionales de la atmósfera.

Racionalizando la Meteorología práctica: Bjerknes entra en campaña

El apoyo económico del instituto Carnegie de Washington, desde 1906, permitió a Bjerknes una dedicación más completa a su trabajo geofísico y retener con un salario a Johan Wilhelm Sandström, su brillante estudiante desde 1898. Sandström había trabajado en la aplicación del teorema de la circulación para resolver la vieja discusión de la comunidad meteorológica sobre el origen y

⁵ Entre quienes trabajaron con Charney en las primeras predicciones numéricas efectivas se encontraban dos discípulos directos de Vilhelm Bjerknes: Carl Gustav Rossby y Arnt Eliassen.

formación de los ciclones de latitudes medias. La aplicación de la teoría a datos del aire superior observados con cometas en 1899 y 1900 en el observatorio de Blue Hill (Massachusetts, EE.UU.) proporcionó resultados muy concluyentes sobre la interacción de masas de aire con diferente densidad y proyectó aún más la fama del trabajo que Bjerknes estaba desarrollando.

En 1906, el mismo año en que anunció su propósito de dedicarse enteramente a la Geofísica, Bjerknes recibió una oferta para trasladarse a Noruega. Varias personalidades académicas habían solicitado crear una cátedra para él en la Universidad Real Frederik de Christiania (Oslo). Noruega se había independizado de Suecia el año anterior y por detrás subyacía la cuestión patriótica de que un científico de tanto renombre trabajara en su país. En 1907 Bjerknes aceptó y se trasladó a Oslo, llevándose consigo a Sandström, pero éste regresó pronto a Suecia al ofrecérsele un puesto mejor remunerado. Su trabajo era muy necesario para Bjerknes, pero su ausencia fue pronto compensada con el reclutamiento de otros dos brillantes ayudantes, Olaf Martin Devik y Theodore Hesselberg. Durante toda su carrera, Bjerknes mostró un don especial para rodearse de colaboradores de enorme valía y resulta asombroso el gran número de ellos que inscribieron su nombre en la historia de la Meteorología científica. Hesselberg también lo hizo en el aspecto institucional; en 1915 se convirtió en director del Instituto Meteorológico noruego, puesto en el que permaneció hasta 1955 (probablemente un récord mundial) y tuvo una participación fundamental en el desarrollo de la cooperación internacional como impulsor principal de la transformación de la Organización Meteorológica Internacional (OMI) en un organismo intergubernamental, la actual Organización Meteorológica Mundial (OMM).

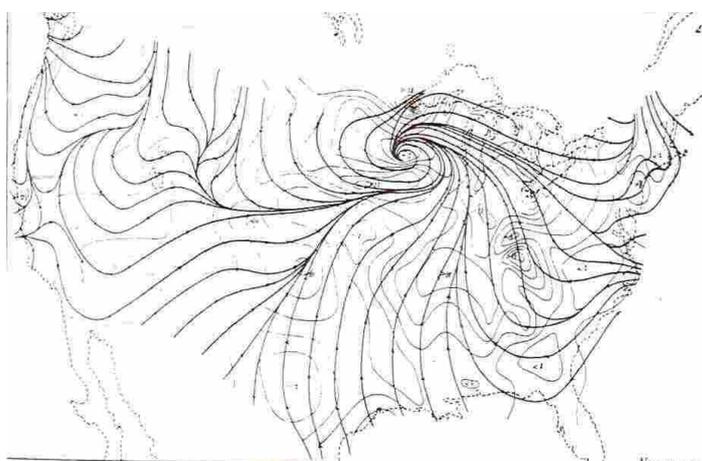


Theodore Hesselberg en la época en que trabajó con Bjerknes (izquierda) y en 1951 (derecha) durante el primer Congreso de la Organización Meteorológica Mundial (2° por la izquierda)

Desde Oslo, Bjerknes continuó con energía su propósito de transformar la Meteorología operativa en una aplicación rigurosa de la Física atmosférica. La primera prioridad era desarrollar métodos para llevar el conocimiento teórico a las aplicaciones prácticas. En 1906 denominó el proyecto a desarrollar, bajo el patrocinio del Instituto Carnegie, como “Preparación de un trabajo sobre la aplicación de los Métodos de la Hidrodinámica y la Termodinámica en Meteorología e Hidrografía prácticas”. A partir de entonces, desarrolló en detalle, con sus colaboradores, técnicas que se usan hoy cotidianamente por los meteorólogos, a menudo sin saber quien las introdujo.

Para estudiar los niveles superiores de la atmósfera, Bjerknes propuso el uso del geopotencial, que solucionaba el engorroso problema que supone la variación con la latitud de la gravedad a la hora de aplicar la ecuación hidrostática, suprimiendo el uso de la gravedad como variable y simplificando enormemente los cálculos. Otra propuesta práctica aún más sencilla, a pesar de la resistencia que encontró en la comunidad meteorológica, fue el uso de una unidad absoluta de presión, el milibar (mb) en lugar de las medidas arbitrarias del milímetro y la pulgada de mercurio. Después introdujo las superficies isobáricas para representar los campos de presión en altura, usando la altitud geopotencial como variable dependiente en lugar de la presión, facilitando así medidas tan importantes como el espesor en metros dinámicos⁶. La adopción de este tipo de representación acabó adoptándose con más naturalidad que la del milibar, en primer lugar porque cuando se propuso no existían apenas mapas de altura, y en segundo por su gran utilidad para la regulación homogénea de los altímetros cuando la navegación aérea empezó a desarrollarse.

Muchos otros procedimientos fueron desarrollados por Bjerknes y sus tres colaboradores en aquella época. Dedicaron un interés especial a los movimientos horizontales y verticales. Mediante diversas técnicas gráficas representaron los datos de viento observados como campos de movimiento bidimensional, prestando una atención especial a las líneas de flujo en los planos horizontales, que revelaban puntos y líneas de convergencia y divergencia. Para estimar el movimiento vertical, que no puede medirse directamente, propusieron métodos indirectos, basados en los movimientos horizontales y la ecuación de continuidad.



Líneas de flujo y curvas de intensidad sobre Estados Unidos el 28 de noviembre de 1905 (Bjerknes: “*Synoptical Representation of Atmospheric Motions*”, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 36, 1910)

Bjerknes propuso, de acuerdo a las costumbres de su formación académica, reunir todas esas aportaciones en un texto, “*Meteorología e Hidrografía dinámicas*”, cuya amplia difusión sirviese para que el desarrollo de las nuevas

⁶ El primer manual sobre la nueva técnica fue publicado por Sandström: “On the Construction of isobaric charts for high levels in the earth's atmosphere and their dynamic significance”; J.W. Sandström, *Transactions of the American Philosophical Society*, Vol. 21, n° 2, 1906.

técnicas pudiera dejarse a otros⁷. Pronto comprobó, sin embargo, que la utilización de nuevos métodos científicos para la Meteorología práctica no tendría éxito si no lograba convencer de la necesidad de usarlos a la comunidad operativa. Debido sobre todo a la necesidad del intercambio de datos entre todos los países interesados, la Oceanografía, y aún más la Meteorología, disponían desde el siglo XIX de una coordinación internacional bastante elaborada y superior, sin duda, a la de otras ciencias, lo que incluía la estandarización (aunque no general) de los métodos de observación. Esto era una ventaja, pero como interpretó Bjerknæs también podía ser algo contraproducente: *“Lo que hace todavía peor la situación actual es la dependencia de acuerdos internacionales de las observaciones meteorológicas e hidrográficas sistemáticas. Si es posible hacer tales acuerdos y se hacen en el estado de confusión actual, la confusión puede hacerse permanente y el resultado puede ser el estancamiento de esas disciplinas por muchos años.”*⁸

Además, para demostrar las ventajas de las nuevas técnicas se necesitaba contar con datos de observación sistemáticos para aplicarlas, y para ello era preciso desarrollar y adecuar la observación de la atmósfera en altura que era incipiente en aquellos primeros años del siglo XX. Si no lograba influenciar a quienes se ocupaban de ello, su propio programa científico sería irrealizable, y Bjerknæs comprendió que no tenía más remedio que implicarse personalmente.

El problema de la observación. La conferencia de Mónaco en 1909

La observación de la atmósfera superior se había desarrollado en varios países desde final del siglo XIX con una mezcla de intereses científicos y aeronáuticos, estos últimos asociados al desarrollo de los vuelos de globos y dirigibles. El propio Bjerknæs había estado implicado en su desarrollo durante su etapa en Estocolmo bajo el influjo de Nils Elkhölm y las expediciones árticas suecas. Las observaciones se iniciaron primeramente desde cometas y globos cautivos o tripulados, pero después se fue generalizando el uso de los globos sonda que ascendían a velocidad constante hasta altitudes superiores a los 10.000 metros, portando a bordo un meteorógrafo que registraba los valores de presión, temperatura y humedad, aunque la lectura de los datos dependía de la recuperación del aparato tras el descenso. El seguimiento de los globos con teodolito desde tierra permitía deducir la dirección y velocidad del viento.

Los servicios meteorológicos desarrollados, las instituciones aeronáuticas militares de varios países y dos personajes con recursos propios, el francés Teisserenc de Bort y el americano Rotch se implicaron significativamente en esa actividad, que dio en llamarse “Aerología”. Además, se creó un organismo para su coordinación, la Comisión Internacional para la Aerostación Científica, establecida en 1896 por el Comité Meteorológico Internacional, órgano ejecutivo de la OMI. Bajo la activa presidencia de Hugo Hergesell, director del observatorio de Estrasburgo, la CIAC celebró reuniones generales en 1898, 1900, 1902, 1904,

⁷ El primer volumen, *“Estática”*, con Sandström como co-autor, se completó en 1907, pero su publicación por la Institución Carnegie se retrasó hasta 1909. La segunda entrega, incluyendo *“Estática”* y *“Cinématica”*, se publicó en 1911, con Bjerknæs, Sandström, Devik y Hesselberg como autores.

⁸ Bjerknæs en un borrador de *“Meteorología e Hidrografía Dinámicas”*, citado en R.M. Friedman, *“Appropriating the weather”*.

1906, 1909 y 1912. Después de la 1ª Guerra Mundial pasó a denominarse “Comisión para el Estudio de la Atmósfera Superior” y dio lugar a la actual Comisión de Ciencias Atmosféricas de la OMM.

En la época en que Bjerknes, comenzó su campaña de adecuación científica de la Meteorología, el objetivo principal y casi único de las observaciones en altura era mejorar el escaso conocimiento que existía de la atmósfera superior. Las campañas de observación con globos y cometas habían conseguido logros importantes como el descubrimiento a principios de siglo (por Teisserenc de Bort) de la “capa isoterma”, que luego se denominaría estratosfera, o progresos en el conocimiento de la circulación atmosférica general (el interés de las observaciones en latitudes subtropicales suscitó una insistencia internacional a España para instalar un observatorio aerológico en las montañas de Tenerife). Sin embargo, no existía un propósito definido de utilizar las observaciones de manera práctica para la predicción del tiempo y el enfoque general era decididamente cualitativo antes que cuantitativo.

En esas condiciones, Bjerknes solicitó ser invitado a la reunión de la CIAC que iba a celebrarse en Mónaco en marzo de 1909. Fue una reunión capital para el progreso de la observación de la atmósfera superior y lo fue en particular para el desarrollo del Servicio Meteorológico en España. Bajo la dirección de Hugo Hergesell, los científicos alemanes habían comenzado a instalar por su cuenta un observatorio en un terreno alquilado en las montañas de Tenerife, con decidido apoyo institucional de su gobierno (Hergesell era asesor científico y amigo personal del Kaiser Guillermo II) lo que, al ser descubierto, provocó tensiones que llegaron al nivel diplomático. En la reunión de Mónaco el representante español, el coronel Pedro Vives, jefe del servicio aerostático del ejército, presentó una propuesta conciliadora por la que España se haría cargo de la creación de un observatorio atmosférico en Tenerife abierto a la cooperación internacional. Esta propuesta dio origen pocos años después al observatorio de Izaña, que fue fundamental para catalizar el desarrollo del servicio meteorológico español⁹.



Fig. 28. — Le Musée Océanographique de Monaco (façade).

⁹ Sobre toda la historia asociada a la observación atmosférica en Tenerife y la creación del observatorio de Izaña ver: De Ory, F., 1998: “Ciencia y Diplomacia Hispano-alemana en Canarias (1907–1916)”. Edirca (eds.), 239 pp.

Museo Oceanográfico de Mónaco, donde se celebró la Conferencia de la CIAC en 1909. El anfitrión era el Príncipe Alberto de Mónaco, un entusiasta del progreso científico. A principios del siglo XX puso su yate “Princesse Alice” a disposición de Hergesell y le acompañó en las primeras campañas de observación en aguas de Tenerife.

En el programa de la conferencia se incluyó una charla de Vilhelm Bjerknes sobre “*La aplicación teórica de las observaciones aerológicas*”¹⁰. A las tres y media de la tarde del viernes 2 de abril, Bjerknes tomó la palabra en el francés fluido que poseía desde sus tiempos de estudiante de posgrado en París. En menos de una hora describió a su audiencia las nuevas técnicas de análisis que los meteorólogos usarían en el futuro y durante más de cincuenta años:

“Es preciso conocer cuatro campos escalares que ofrezcan la distribución de la presión, la masa, la temperatura y la humedad y un campo vectorial que ofrezca la distribución del movimiento. El objetivo de la diagnosis es encontrar esos campos y representarlos de una manera sinóptica. Pero las observaciones en sí mismas no constituyen todavía la diagnosis. Es preciso servirse de métodos propiamente diagnósticos para llegar a las representaciones sinópticas, que constituyen la verdadera diagnosis. Es la idea que llevó a los meteorólogos a trazar sus mapas de isobaras o de isotermas para el nivel del mar o sobre la superficie de la Tierra. Pero no disponiendo más que de observaciones hechas al nivel más bajo de la atmósfera, solo se alcanzan diagnosis incompletas.”

Bjerknes presentó ejemplos de topografías absolutas y relativas de superficies isobáricas, usando el geopotencial como coordenada vertical y el milibar como unidad de presión, recomendando la adopción de ambos, y esbozó a continuación la utilidad de todo ello para la predicción meteorológica. En la última parte de su charla se refirió más concretamente a las observaciones aerológicas y sus verdaderos objetivos, propuso diversas recomendaciones sobre la cantidad de observaciones a realizar, tanto en el ámbito geográfico como en el temporal, aún a sabiendas de que eran excesivamente ambiciosas para los recursos disponibles, y abogó por el incremento al menos de las observaciones de viento con globos piloto sin meteorógrafo, de coste mucho más reducido. Muy especialmente, Bjerknes enfatizó la necesidad de simultaneidad en las observaciones:

“El objetivo de las observaciones es constituer la base de una diagnosis del estado actual de la atmósfera. La idea misma de “estado actual” alude a un instante determinado, aquel al cual se refiere dicho estado. De ello se sigue que con el fin de formar una base sólida de dicha diagnosis es preciso que las observaciones sean simultáneas. Este principio es evidente en sí mismo...”

Sin embargo, el principio no era nada evidente para muchos de los delegados, fieles al aspecto cualitativo de la observación aerológica. Cuatro días después de la charla de Bjerknes, el prestigioso meteorólogo W. H. Dines presentó una comunicación sobre “la hora óptima para lanzar globos registradores”, en la que, por diversos motivos prácticos y a fin de limitar los errores en las medidas, recomendaba efectuar los lanzamientos una hora antes de la puesta de sol. Varios

¹⁰ Procès – Verbaux des séances et mémoires, Sixième Réunion de la Commission International pour l’Aérostation Scientifique à Monaco du 31 Mars au 6 Avril 1909, Annexe VII, pp 73-85, Imprimerie M. Du Mont Schauberg, 1910.

participantes apoyaron la recomendación o bien discutieron los propios motivos prácticos mencionados por Dines, pero solamente Bjerknæs observó que “*la propuesta de Dines es totalmente contraria al principio de simultaneidad absoluta deseable para los estudios dinámicos*”.

Las tesis e invocaciones de Bjerknæs no causaron el efecto deseado, en buena parte debido a la falta de conocimiento de muchos de los delegados (alguno no entendía siquiera la diferencia entre magnitudes escalares o vectoriales, comentó Bjerknæs en privado). Mayor impresión provocó en la conferencia de Mónaco la comunicación de R. Assman, director del observatorio de Lindenberg, subrayando el interés del suministro permanente de observaciones en altura para la navegación aérea, remachado en las actas por una intervención del coronel Vives. Por supuesto, la observación permanente servía muy bien a los planes de Bjerknæs y el argumento de las necesidades crecientes de la aviación sería también utilizado por él con frecuencia.

En todo caso, Bjerknæs había hecho sentir su presencia y la de su causa entre la comunidad de observación en altura representada por la CIAC. Fue nombrado miembro de la Comisión (y cuando años después fue rebautizada como Comisión de Estudio de la Atmósfera Superior, sería designado presidente) y continuó insistiendo en sus propuestas. Además, para subrayar su compromiso con la comunidad aerológica, se ocupó personalmente del desarrollo de la observación en altura en Noruega.

En 1910, Bjerknæs ofreció presentaciones de su trabajo en Londres y Berlín, y en 1911 viajó de nuevo a Alemania para mantener largas conversaciones con los dos “gurús” principales de la aerología, Assman en el observatorio de Lindenberg y Hergesell en el de Estrasburgo. En ambos casos obtuvo mayor apoyo a sus propuestas que en Mónaco, así como la complicidad de Hergesell para influenciar la adopción del milibar y del geopotencial en la siguiente conferencia de la CIAC, que se celebraría en Viena en 1912. Ambas medidas se aceptaron durante la reunión, pero sujetas a la confirmación del Comité Meteorológico Internacional, que se reunió en 1913. A pesar del apoyo a Bjerknæs del Presidente, Sir William Napier-Shaw, el Comité puso más inconvenientes que la CIAC, por lo que las reticencias continuaron durante bastante tiempo. La adopción del milibar en los partes y los mapas meteorológicos, por ejemplo, fue combatida con argumentos como la dificultad de comparación con los datos en unidades de mercurio archivados durante muchos años y en la primera reunión de la OMI tras la Gran Guerra (París, 1919) continuaban todavía las discusiones. Es interesante recordar que el servicio meteorológico español fue uno de los primeros en adoptar el milibar en sus mapas diarios de superficie (1 de enero de 1919) y que en la reunión de la OMI, unos meses después, su director, José Galbis, manifestó que una vez implantada la nueva unidad resultaría muy complicado para el Servicio volver a utilizar el mm de mercurio.

Bjerknæs en Leipzig (1913–1917)

A pesar de las dificultades para implantar métodos racionales en la Meteorología operativa, Bjerknæs tenía ya el prestigio y reconocimiento suficientes como para recibir en 1912 la propuesta más importante que podía esperar para

continuar el trabajo emprendido: la dirección del recién creado Instituto Geofísico de Leipzig, proyectado con el doble propósito de crear una institución de excelencia científica y apoyar desde la vertiente meteorológica el desarrollo aeronáutico alemán. El principal impulsor era Otto Wiener, catedrático de Física experimental en la universidad de Leipzig y uno de los fundadores de la Sociedad Aeronáutica, que pretendía dar a Sajonia y Leipzig un papel preponderante en la aviación germana. Desde el mismo comienzo del proyecto, Wiener consideró, como parte inseparable del mismo, ofrecer la dirección a Vilhelm Bjerknes como el mayor especialista mundial en Meteorología dinámica.

Aunque dudó algún tiempo antes de aceptar, Bjerknes no podía rechazar una propuesta de esa categoría, que además le permitiría disponer de mucho mayor poder de influencia científica que desde Oslo. Con la posibilidad de dirigir la reforma de la Meteorología en un país tan avanzado como Alemania, la tendría también para extenderla a todos los demás. En enero de 1913 se trasladó a Leipzig con su familia y sus colaboradores, Hesselberg y Harald Sverdrup, que había sustituido a Devik. A fin de asegurar el contacto con la comunidad aerológica, Bjerknes solicitó un ayudante a Hergesell, quien le recomendó a Robert Wenger, un joven y brillante meteorólogo que llevaba cuatro años en Tenerife; había participado con Hergesell en las campañas de observación de 1908 en aguas de la isla y desde 1909 trabajaba en el observatorio provisional hispano-alemán de Las Cañadas del Teide.

Bjerknes pretendía crear en Leipzig una escuela de Meteorología dinámica que liderara la investigación mundial en ese campo, dando al mismo tiempo toda la importancia posible a las aplicaciones prácticas, de acuerdo a los métodos ya propuestos. Fruto de ello fueron, por ejemplo, los análisis de superficies isobáricas más detallados hasta entonces, usando los datos de los “días internacionales” de observación, en que se realizaban sondeos en todas las estaciones internacionales (hasta muchos años después no se generalizó la observación permanente de niveles altos).

También se abordaron nuevas líneas de estudio, entre ellas las relacionadas con la fricción y la capa límite. Otro campo de estudio práctico había sido reclamado por la comunidad internacional debido al peligro que representaba, en particular para la aviación, el fenómeno conocido como “líneas de turbonada” (*squall lines*). Esta denominación ha permanecido hasta hoy en el vocabulario meteorológico, pero entonces tenía una acepción mucho más amplia: aludía a las frecuentes bandas de chubascos y tormentas, estrechas pero de gran longitud, que avanzaban con apreciable velocidad en latitudes medias. La denominación incluía, por tanto, a lo que unos años más tarde el propio Bjerknes y sus colaboradores denominarían frentes fríos, un modelo conceptual entonces desconocido. Mientras tanto, al primer estudiante de doctorado de Bjerknes en Leipzig, Herbert Petzold, se le había asignado el estudio detallado de las líneas de convergencia y divergencia, algo por lo que ya se habían interesado Bjerknes y Sandström, encargándole investigarlas desde un punto de vista sobre todo dinámico. Sin embargo, Petzold se interesó profundamente por la presencia de líneas de convergencia en el campo de viento asociadas a las líneas de turbonada, acompañadas de surcos en el campo de presión y cambios bruscos de temperatura. Era el primer precedente de los descubrimientos que pocos años después iniciarían el análisis frontal.



Edificio donde se alojó el Instituto Geofísico de Leipzig cuando Bjerknæs era su director.

La terrible guerra que estalló en 1914 frustró los prometedores comienzos del Instituto Geofísico de Leipzig. Muchos de los estudiantes de Bjerknæs fueron llamados a filas, entre ellos Petzold, quien al poco tiempo fue muerto en el frente de Verdun (Jacob, el hijo -de 18 años- de Bjerknæs, continuaría sus investigaciones sobre las líneas de turbonada con un éxito insospechado). Otros estudiantes del Instituto siguieron el trágico destino de Petzold. Hesselberg había regresado a Noruega y en 1916 Wenger fue reclutado para el servicio meteorológico militar. Al mismo tiempo, los recursos para la actividad del Instituto disminuyeron mucho y el contacto científico internacional quedó interrumpido. También empezaron a escasear los recursos cotidianos. A partir de 1917 el empeoramiento de las relaciones de Alemania con Noruega, que había permanecido neutral, impidió que Bjerknæs y su familia siguieran recibiendo envíos de comestibles.

Todo ello fue desanimando progresivamente a Bjerknæs. En 1917 recibió una oferta firme del Museo de Bergen para ocupar una cátedra de Geofísica, dentro del propósito del Museo de expandirse hasta convertirse en una universidad para el oeste de Noruega. Bjerknæs había conseguido que Robert Wenger regresara del frente y tras conocer que se aceptaría nombrarle su sucesor, dimitió de su importante puesto en Leipzig y regresó a su país. Wenger, el meteorólogo de Tenerife, fue así nombrado director del Instituto Geofísico a los 31 años de edad y muy probablemente habría tenido un papel destacado en la Meteorología venidera, pero desgraciadamente falleció de pulmonía en 1922.

Epílogo

Dejando, por imperativos impuestos, su brillante puesto en Leipzig, Bjerknæs inició, sin embargo, en Bergen el período más famoso de su extraordinaria carrera, aunque ya con un protagonismo más acusado de su hijo Jacob y de sus nuevos colaboradores, tan brillantes o más que los anteriores. Durante su etapa en Leipzig había escrito que los ciclones han de ser en sus estados de formación débiles y, por tanto, su descripción debería poder abordarse mediante

ecuaciones lineales. Bjerknes decidió estudiar las ecuaciones de la evolución atmosférica linealizadas y comprobó que “*siempre parecen tener como soluciones estables o inestables, movimientos en forma de onda. Igualmente, las perturbaciones atmosféricas, los ciclones, tienen, por consiguiente, que nacer como ondas*”¹¹. Esta transición misteriosa entre la onda y el vórtice fue descubierta poco después en los mapas del tiempo por Jacob Bjerknes, proponiendo el modelo de ciclón frontal. Havel Solberg escudriñó muchos mapas del Atlántico Norte y logró demostrar la existencia del frente polar y la formación de perturbaciones onduladas en el mismo, que se convertían en ciclones frontales del tipo encontrado por J. Bjerknes.

Todo ello revolucionó la Meteorología práctica en los años veinte y dio fama imperecedera a la “escuela de Bergen” o “escuela noruega”, pero la verdadera revolución se había iniciado mucho antes, cuando un científico tan brillante y tan abierto a la aplicación práctica de la ciencia como Vilhelm Friman Koren Bjerknes, decidió, a principios del siglo XX, consagrarse a la Meteorología.



Fotografía de la reunión de la Comisión de Estudio de la Atmósfera Superior en Leipzig, 1927, donde coincidieron varios de los personajes citados en el artículo: n° 9 (sentado con bastón) H. Hergesell; n° 12 (a su lado) T. Hesselberg; n° 18 W. Napier-Shaw; n° 25 Vilhelm Bjerknes; y n° 19 (de pie hacia el centro) L. F. Richardson.

BIBLIOGRAFIA PRINCIPAL:

Bjerknes V., Sandström J.W., Devik O.M., Hesselberg T.: *Dynamic Meteorology and Hydrography*, Carnegie Institution, Washington, 1911.

Friedman, R.M.: *Appropriating the Weather: Vilhelm Bjerknes and the Construction of a Modern Meteorology*, Ithaca and London, Cornell University Press, 1989.

Hergesell H. et al. : *Procès – Verbaux des séances et mémoires, Sixième Réunion de la Commission Internationale pour l’Aérostation Scientifique à Monaco du 31 Mars au 6 Avril 1909*, Imprimerie M. Du Mont Schauberg, 1910.

¹¹ Citado por Joaquín Pelkowski en uno de sus artículos. Ver cita 3.

Nebeker, F.: *Calculating the Weather: Meteorology in the 20th century*. Academic Press, San Diego 1995.

Lynch P. 2006: *The emergence of Numerical Weather Prediction, Richardson's dream*, Cambridge University Press 2006.

Pelkowski, J.: *Prologo a los ensayos de un precursor y un alarife de la predicción moderna del tiempo*, Revista de Meteorología Colombiana, 2; pp. 111-115. ISSN 0124 6984. Bogotá, D.C. Colombia. Disponible también en la revista RAM (1ª etapa, nº 14) y en: <http://www.divulgameteo.es/uploads/Prólogo-Pelkowski.pdf>

Pelkowski, J.: *Traducción del artículo de Vilhelm Bjerknes en Meteorologische Zeitschrift, 1904*, Revista de Meteorología Colombiana, 2; pp. 117-120. ISSN 0124 6984. Bogotá, D.C. Colombia. Disponible también en la revista RAM (1ª etapa, nº 15) y en: <http://divulgameteo.es/uploads/Problema-predicción-Bjerknes.pdf>