

**UTILIDAD SOCIAL
DE LAS
PREDICCIONES
PROBABILÍSTICAS
Y SU EMPLEO EN
LA HISTORIA DE LA
METEOROLOGÍA**

**SOCIAL USEFULNESS
OF PROBABILISTIC
FORECASTS AND THEIR
USE IN THE HISTORY
OF METEOROLOGY**

**Alessio
Raimondi**

Centro di Ricerca e
Sperimentazione
dell'Educazione della
Matematica-Cagliari,
Cerdeña, Italia



RESUMEN

El artículo "Deterministic noperiodic flow" publicado en el año 1963 por el matemático Edward Lorenz es considerado como el punto de partida de las investigaciones sobre el caos determinístico y también como uno de los cambios más radicales del enfoque epistemológico en el estudio de las ciencias de la naturaleza. Desde 1963 parece claro que el mundo es intrínsecamente probabilístico y la utilidad social de las predicciones aumenta si son emitidas también de forma probabilística. En este trabajo después de analizar la utilidad científica y social de estas predicciones examinaremos la historia de las mismas en el campo de la meteorología, un método que se viene utilizando desde finales del siglo XIX. Además se presentarán algunos resultados de investigaciones paralelas realizadas por el autor en Italia donde se recogen datos que reflejan la comprensión de los usuarios italianos y españoles sobre la emisión de las mismas y los problemas que los meteorólogos han encontrado en el empleo probabilístico para su difusión. El uso y disseminación de las predicciones probabilísticas está aún poco explorado en las ciencias naturales pero que puede llegar a convertirse en un método bastante apropiado.

ABSTRACT

The article "Deterministic noperiodic flow" published in 1963 by the mathematician Edward Lorenz is considered the starting point of the research on the deterministic chaos and also as one of the most sweeping changes of the epistemological approach to the study of nature. Since 1963 it seems clear that the natural world is inherently probabilistic and social utility increases if the predictions are also issued in a probabilistic sense. In this paper after analyzing the scientific and social usefulness of these predictions will examine their history in the field of meteorology, a method that has been used since the late nineteenth century. Also some results of parallel investigations by the author in Italy where data that reflects the understanding of the Italian and Spanish users on the same issue. Also the problems found by the meteorologists when probabilistic dissemination is used, are presented in this paper. The use and dissemination of probabilistic prediction are still not much explored in natural sciences although it may become a very appropriate method.

Palabras clave

Predicciones; enfoque epistemológico; meteorología; probabilidad; caos determinístico; naturaleza.

Key words

Forecast; epistemological approach; weather; probability; deterministic chaos; nature.

1. Introducción

El artículo "Deterministic noperiodic flow" (Lorenz, 1963) publicado por el matemático y meteorólogo estadounidense Edward Norton Lorenz, donde se defiende el caos determinístico no sólo borró de manera definitiva el sueño determinístico de Laplace, sino que también constituyó un cambio radical desde el punto de vista del género humano sobre la naturaleza, y fue la raíz de una revolución científica que todavía está desarrollándose (Prigogine, 1999; Gleick, 2000; Smith, 2008). Las ideas de Lorenz indicaron un camino para unas ciencias en las que tratar irregularidades era la norma y no una excepción como en la física clásica (Lorenz, 1993). No sabemos el alcance y difusión que alcanzó el artículo porque fue publicado en una revista para especialistas o si la contribución de Lorenz llegó con demasiada antelación. Pero lo que sí parece cierto es que el planteamiento de Lorenz ha cambiado el enfoque epistemológico hacia el estudio de los fenómenos de la naturaleza, superando el reduccionismo determinista que había reinado hasta entonces. Después de su estudio se ha empezado sistemáticamente a considerar a la naturaleza de manera holística y no como suma de partes separadas como siempre se había especulado, ya que, como afirmó Maxwell a finales del siglo XVIII, las imperceptibles desviaciones en las condiciones iniciales cambiarían la evolución de los distintos procesos naturales, y dado que no existen dos circunstancias iguales no tendría sentido hablar de causas (Campbell y otros, 1882).

En este cambio de enfoque podemos percibir reflejos del debate que tuvo lugar al principio del siglo XIX entre Lavoisier y Lamarck, donde el segundo defendía una investigación de la naturaleza no encerrada en los límites de un laboratorio en oposición a la idea de un investigador inexplicablemente ajeno al mundo, objeto de su

investigación. A partir del examen de este debate Prigogine afirma que el cambio epistemológico se remonta al año 1811, en el que se asignó el premio de la Académie a Fourier por su teoría sobre la propagación del calor. Opinamos que en su artículo Lorenz observando los resultados conseguidos por otros científicos indicó el corte epistémico entre física de la complejidad y la física clásica. Además Lorenz introdujo la ciencia de la complejidad en el sentido común, por lo menos como efecto del aleteo de alas de una mariposa (Lorenz, 1992).

Ya el filósofo y matemático francés Henry Poincaré intentó solucionar el problema de los tres cuerpos destacando las propiedades y características de los sistemas sensibles a las condiciones iniciales (Poincaré, 1908). Sin embargo, la ciencia siguió, con el mismo enfoque ya que no se podía encontrar una solución aproximada y fiable de las ecuaciones diferenciales no lineales que describían el sistema (Bertuglia, 2011), hasta que las ideas de Lorenz obligaron a la ciencia a una revisión del concepto de realidad. Desde entonces los modelos dejan de ser una representación conceptual (a menudo más sencilla) del mundo o de una parte del mismo para intentar explicar su funcionamiento o realizar predicciones y se transforman en una heurística poderosa que permite aumentar nuestra capacidad de predicción. Sin embargo los modelos no nos pueden permitir una visión determinística del mundo ya que Lorenz nos ha enseñado que podemos conocer el mundo conocido sólo probabilísticamente como por ejemplo, las consecuencias impredecibles del aleteo de una gaviota (Lorenz, 1963). Este nuevo enfoque epistemológico nos ha obligado a pensar en una nueva definición de probabilidad. Si la mecánica cuántica fue la causa del abandono de la definición clásica de origen determinística de la probabilidad, la investigación del caos determinístico permite la afirmación de la definición subjetivista (De Finetti, 1931; De Finetti, 1937; Gigerenzer y otros, 1997) de la probabilidad soportada por una nueva

visión del teorema de Bayes. Si el mundo nos aparece probabilístico no es por causa de nuestra ignorancia sino porque es intrínsecamente probabilístico y la probabilidad adquiere un significado objetivo (Prigogine, 2003).

Por cierto estos cambios se han producido también gracias a la presión de una sociedad que a partir del final del siglo XIX debía confrontarse con un mundo que empezando a percibirse como sistema iniciaba a asumir riesgos y necesitaba informaciones precisas aunque acompañadas de incertidumbre sobre los fenómenos que podían producir dichos riesgos.

En este sentido la meteorología es paradigmática (no solo porque Lorenz fuera un meteorólogo) y por lo tanto en este artículo empezaremos analizando la larga historia del empleo de las predicciones probabilísticas en meteorología, empleo que nació de la necesidad de los usuarios de tener informaciones adecuadas para proteger sus bienes. En otras palabras es el probabilismo lo que permite a la meteorología desarrollar completamente su función social y de mediación entre la naturaleza y las exigencias humanas. Sin embargo aquí queremos subrayar, a través de una investigación desarrollada anteriormente por el mismo autor, diferentes aspectos de la comunicación de las predicciones meteorológicas. En esta investigación se señalaba algunos problemas que aún todavía no han sido solucionados y que conciernen al proceso comunicativo y que tienen un papel fundamental desde un punto de vista social. Finalmente vamos a presentar unas propuestas sobre como aportar mejoras al proceso comunicativo de la información incierta.

Lamarck fue el primer científico que entendió la importancia social de las predicciones meteorológicas y que entendió que se podían emitir sólo en forma

probabilística. Por lo que procuró realizar un proyecto para efectuarlas a escala sinóptica explicando así el problema de su comunicación a los usuarios.

Aquí analizaremos el recorrido que Lamarck lleva mediante los extraordinarios resultados conseguidos a la vista del artículo de Lorenz respecto al desarrollo histórico de las predicciones meteorológicas emitidas en forma probabilística y a los problemas derivados con la comunicación de la misma.

Podemos dividir los dos siglos que separan a la meteorología de Lamarck de la contemporánea en tres grandes períodos parcialmente sobrepuestos. El primer período, que coincide con el siglo XIX, empieza con los primeros estudios de Lamarck (1776) y concluye con el debate provocado por el denominado *Finley Affair* (1884); el segundo período empieza con la publicación de dos importantes memorias de Coriolis (1832-35) y concluye, en las primeras décadas del siglo XX, con los resultados de los estudios teóricos que llegaron a poner las bases de la Predicción Numérica del Tiempo. Finalmente, el último período empieza después de la segunda guerra mundial, para concluir con la publicación en 1963 del citado artículo de Edward N. Lorenz que marca definitivamente el cambio en el enfoque epistemológico de la meteorología.

2. Objetivos

El objetivo de esta investigación es intentar evaluar como los usuarios perciben la calidad de las predicciones meteorológicas y como las interpretan. Dependen de como se perciban y se interpreten, las predicciones tendrán uno u otro valor. De hecho la finalidad de los servicios meteo es proteger los riesgos en la población y

fomentar su uso en aspectos de la economía nacional¹. Es evidente que predicciones sin valor no pueden alcanzar este objetivo. Por lo tanto hace falta analizar los fallos que existen en el proceso comunicativo de la predicción con el objeto de proponer mejoras que permitan a los usuarios poder interpretar correctamente las predicciones y hacer un uso adecuado cualitativo y cuantitativo de las mismas.

En esta investigación que presentamos hemos intentado evaluar varios aspectos:

Primero establecer las preferencias de los usuarios entre predicciones probabilísticas y categóricas. Averiguar la percepción que los usuarios tienen sobre la incertidumbre asociada a las predicciones e intentar cambiar la dificultad que tienen los usuarios en el manejo y en la comprensión de la información probabilística. Así como asegurar la comprensión de una predicción de precipitación en forma probabilística. Y por último intentar expresar la probabilidad en formato textual más bien que en numérico.

3. Metodología

La investigación fue dirigida a meteorólogos italianos a usuarios expertos italianos y usuarios italianos y españoles. La metodología en la investigación fue mediante la técnica del cuestionario, distribuido en Italia a través del correo electrónico y en España a través de la página web www.encuestafacil.com. Una parte de esta muestra fue dirigida a estudiantes.

¹ Ver la Mission Statement del National Weather Service. Consulta del 28 de marzo de 2014. (<http://www.nws.noaa.gov/mission.php>).

El total de la muestra ha estado compuesta por 97 usuarios italianos y 113 españoles. De los cuales han participado 94 meteorólogos de 18 servicios públicos y 5 de servicios privados, 85 usuarios expertos - usuarios que emplean diariamente las predicciones meteorológicas en el desempeño de sus actividades-. Finalmente, para evaluar la significatividad de los resultados se ha empleado la prueba del χ^2 de Pearson ($p < 0,05$). Para contrastar las respuestas de los usuarios italianos y españoles, el cuestionario en castellano se elaboró mediante la *parallel blind technique*.

Hemos intentado averiguar en este estudio si, en las repuestas de la muestra de usuarios, se hubieran encontrado diferencias significativas por género, edad o estudios, sin embargo no hemos evidenciado ninguna diversidad apreciable.

4. Lamarck entiende la utilidad social de las predicciones probabilísticas

(Raimondi, 2010) La construcción del barómetro (1643) fue decisiva para el desarrollo de la meteorología que desde aquel momento se convirtió en un importante tema de investigación para muchos científicos. La obra de Lamarck destaca por su originalidad en identificar las cuestiones para construir esta nueva ciencia.

La teoría de Lamarck se sitúa por cierto en el ámbito de la Ilustración (Roger, 1985); Lamarck tenía una gran confianza en el poder de la razón y le gustaban las síntesis y las generalizaciones (Landrieu, 1909) que marcaron toda su actividad científica. Inicialmente determinista opinaba que las causas de cada fenómeno de la naturaleza se podían reconducir a otras causas de nivel superior hasta la individuación

de una causa primera que habría permitido la elaboración de una “teoría del todo” (Lamarck, 1794). Con el mismo enfoque se acercó a la meteorología (MWR, 1908), con la idea que el conocimiento de las causas de los fenómenos terrestres habría permitido la realización de predicciones a largo plazo que creía importantes social y económicamente. Lamarck era consciente de que sus teorías tendrían validez cuando fueran capaces de realizar predicciones del tiempo más correctas, por lo tanto rechazó cada método artesanal de observación y clasificó meticulosamente los instrumentos útiles para adquirir los datos necesarios en la realización de las predicciones (Lamarck, 1801)². Antes que sus contemporáneos entendió que las informaciones útiles podían llegar del tratamiento del conjunto de todos los datos adquiridos por los diferentes instrumentos. Comprendió también que las informaciones recogidas por un sólo observador no podían servir para efectuar predicciones ya que hace falta una visión sinóptica del estado de la atmósfera y por eso se esforzó en crear una red de observación (Lamarck, 1806). El Ministro del Interior, el químico Chaptal apoyó la creación de la red, anterior a la actual *Meteo France*, y a todos los observadores les fueron proporcionados los instrumentos, las indicaciones sobre los datos que se debían adquirir (distinguiendo entre datos indispensables y accesorios), las horas del día en las que se debían efectuar las observaciones y como hacía falta tomar nota de las mismas de forma definitiva. Sin embargo el proyecto de Lamarck duró sólo desde el 1800 hasta el año 1804³ y no en la forma institucionalizada y capilar deseada ya que, por diversos eventos políticos, el despacho central fue cerrado, la red disuelta y se impidió a Lamarck adquirir los datos recogidos (Lamarck, 1818).

² Los instrumentos que Lamarck proporcionó a los observadores son los mismos que hoy forman parte de las actuales estaciones meteorológicas .

³ A ciencia cierta el funcionamiento de la red no duró más que un año y, de todas formas, nunca operó de manera adecuada para alcanzar los objetivos mínimos propuestos por Lamarck.

El eventual éxito de las predicciones era importante ya que no sólo habría confirmado las teorías de Lamarck sino también porque le habría permitido realizar ganancias (Corsi, 2008). Hasta la época de Lamarck las observaciones meteorológicas habían sido efectuadas por terratenientes y médicos por encargo de las Sociedades Reales que les habían contratado para todo el siglo XVIII, tanto que el término meteorología se empleaba para indicar la ciencia que investigaba sobre los efectos de los fenómenos meteorológicos en los seres vivos. Lamarck lamentaba que estas Sociedades no investigaban las causas de los fenómenos y por lo tanto no conseguían realizar predicciones a más largo plazo.

Sus Anuarios tuvieron un discreto éxito en el público, ya que se dirigían explícitamente a agricultores, médicos y marineros por ser actividades desarrolladas por la sociedad y que podrían generar beneficios económicos realizando predicciones correctas (Lamarck, 1798). Por ejemplo en el *Annuaire pour l'an XIV* (Lamarck, 1804) Lamarck, que había servido en el ejército francés durante muchos años, enseñó, basando sus afirmaciones en una gran cantidad de informes militares, donde afirmaba por su experiencia, que el empleo correcto de las predicciones habría podido modificar el rumbo negativo de unas cuantas misiones de la armada francesa. En el *Annuaire pour l'an 1809* (Lamarck, 1808) intentó adelantar la ciencia que hoy en día conocemos como biometeorología, enseñando que el conocimiento de las causas permitiría poner en relación los fenómenos meteorológicos con determinadas magnitudes astronómicas. Y también intentó una operación similar tratando de poner en relación a la meteorología con la botánica.

Lamarck entendió incluso que los conocimientos entonces disponibles no permitían la realización de predicciones ciertas (Lamarck, 1803), por eso introdujo el término

probabilidad en lugar de predicción ya que nadie estaba capacitado para “predecir antes”⁴ de que el evento ocurra, como presumían los charlatanes a los cuales los adversarios asociaban con el mismo Lamarck (Lamarck, 1800).

Mientras que Laplace se ocupaba de una definición teórica, y de alguna manera abstracta, de probabilidad, Lamarck empujado por razones prácticas, en el *Annuaire pour l’an XIV* (Lamarck, 1805) propuso una escala cualitativa de probabilidad ordenada desde “A” hasta “F”, en la que asociaba “A” a la mayor probabilidad de acaecimiento del evento y “F” con la menor probabilidad. Antes sólo Dalton había asociado las predicciones del tiempo con la probabilidad, sin embargo Lamarck fue el primero en entender que el empleo de la probabilidad era imprescindible. Prestó finalmente atención a la fase de comunicación de las predicciones ya que estaba convencido que la utilidad social es tanto mayor en cuanto los usuarios están capacitados para comprenderlas. En toda su obra los términos se emplean cuidadosamente, clasifica nubes y vientos (Lamarck, 1801)⁵, distingue la *tempête* del *orage* o las diferentes tipologías de “buen” tiempo y de “mal” tiempo, siempre con la conciencia de que la idea de “buen” tiempo es subjetiva ya que depende de las eventuales ventajas o desventajas que un evento meteorológico puede provocar a los usuarios.

⁴ En la lengua italiana la palabra *predizione* significa “decir que un evento va a ocurrir antes que ocurra efectivamente”, o sea lo que hacen los magos o las brujas. De hecho en inglés las predicciones científicas se llaman *forecast* mientras que la palabra que se corresponde a *predizione* y a predicción es *prediction* (augurio en castellano). Un interesante análisis de la diferencia entre predicción y previsión ver (Silver, 2013).

⁵ Clasificó minuciosamente las nubes y propuso una escala para los vientos. La clasificación de las nubes fue sustituida por otra que propuso el inglés Howard (Howard, 1865; Fierro, 1991) mientras que la escala para los vientos fue sustituida por la propuesta por el almirante inglés Beaufort. Las clasificaciones de Howard y Beaufort son las que se emplean actualmente.

Al fin y al cabo, la meteorología de Lamarck presumía de predecir lo desconocido. En una época en la que prevalecía la posición determinista apoyada por la autoridad de Laplace que no podía aceptar la irreductibilidad de la meteorología al pensamiento determinista. Lamarck entendió que la meteorología no se podía reconducir a una sencilla suma de fenómenos físicos y que necesitaba una investigación amplia y articulada a la que toda la comunidad científica tendría que haber estado interesada en participar para encontrar una metodología epistemológica útil para describir los eventos meteorológicos y predecirlos. Su disentimiento hacia las posiciones científicas de Laplace se origina en su recorrido intelectual que se caracterizó por un progresivo alejamiento del pensamiento de Newton; si analizamos la elección de indicar como ciencias fundamentales como la meteorología, geología y biología (Lamarck, 1802), que hoy en día clasificamos en el ámbito de las ciencias de la complejidad, podemos notar aquella rebeldía intelectual desde la cual se originó la renuncia a la idea de un mundo predecible en el sentido de Laplace. El pensamiento de Lamarck contiene *in nuce* una nueva idea de predicción. Por lo tanto podemos explicar la razón por la que Lamarck deja la búsqueda newtoniana de las causas para la evolución de los fenómenos.

Después el enfoque sistémico y generalista de Lamarck, la meteorología progresa por un lado desde un punto de vista teórico, empezando con la contribución aportada por Coriolis y por otro lado desde un punto de vista más práctico, gracias a las ideas aportadas por el así dicho *Finley Affair*. Ya veremos que durante el desarrollo histórico de la meteorología los dos recorridos se cruzarán y alejarán continuamente pero los dos han contribuido de manera fundamental al nacimiento de la meteorología moderna.

Hay que esperar hasta el año 1884 para que entre los investigadores empiece un debate sobre el empleo de la probabilidad en las predicciones. El contexto social es diferente del contexto en el que trabajó Lamarck. En muchos Estados ya funcionaba un servicio meteorológico nacional, a menudo gestionado por los militares, y se habían recogido datos relativos a años de observaciones y con la exigencia de verificación, que no era ya sólo una necesidad científica sino también económica y administrativa, nacía la falta de una comunicación correcta y por lo tanto probabilística. En el 1884 un sargento del ejército de Estados Unidos, John Park Finley⁶, que por razones de protección civil intentaba hacer predicciones de tornados, publicó una verificación de su trabajo (Finley, 1884) abriendo el así dicho “*Finley Affair*” (Murphy, 1996). Finley se ocupó de investigar los tornados tanto por el gran interés hacia estos fenómenos como por mejorar su posición en el ejército. Recogió todos los datos concernientes a los tornados observados entre 1794 y 1881 pero no se preocupó por investigar a fondo la causa de la formación de los tornados (Finley, 1884a, Finley, 1885), tema de investigación de muchos meteorólogos de su época, sino que además definió reglas para hacer predicciones satisfactorias ya que estaba convencido que se habría reducido el miedo y ansiedad en la sociedad sabiendo que los tornados podían ser previstos (Finley, 1888). Sin embargo la importancia del trabajo de Finley ascendió cuando, en 1884 publicó un artículo donde por vez primera se intentaba evaluar cuantitativamente una predicción meteorológica. Según su método de cálculo, las predicciones fueron todo un éxito (más del 94% de predicciones correctas), pero en su trabajo se podían notar unos cuantos errores metodológicos. Sin duda el método de verificación de Finley estaba equivocado pero

⁶ John Park Finley (1854–1943), fue el primero que estudió sistemáticamente los tornados y creó la primera sociedad privada para las predicciones del tiempo.

desencadenó un debate intenso en los periódicos científicos de su época. Un debate en el que participaron incluso filósofos y lógicos como Charles Peirce (Peirce, 1884). La discusión duró muchos años y todavía constituye un punto de referencia por la comunidad de los investigadores cuando se tratan los problemas de verificación y de “metaverificación”⁷ de las predicciones y representa el primer caso en el que la estadística se ha vuelto un instrumento fundamental para la meteorología. Nos parece oportuno subrayar aquí las críticas extracientíficas concernientes al aspecto social de las predicciones (Hinrichs, 1888). Lo que se reprochaba a Finley era el empleo de las predicciones para amedrantar innecesariamente a los usuarios. Aunque estas críticas reflejaran no sólo la lucha entre militares y civiles para el control del servicio meteorológico sino también evidentes razones económicas relacionadas con las actividades de las zonas golpeadas por los tornados. Causa que provocó la eliminación del término *tornado* en las predicciones meteorológicas hasta el año 1938 y se obstaculizaron las investigaciones sobre estos fenómenos⁸.

Años más tarde de la muerte de Lamarck, el matemático francés Coriolis escribió dos memorias (Coriolis, 1832; Coriolis, 1835) que permitieron esclarecer que las masas de aire en movimiento experimentan una deflexión aparente para los que observan el movimiento desde la superficie terrestre. El trabajo de Coriolis fue el inicio de los estudios teóricos de los fenómenos atmosféricos.

A principios del siglo XX fue claro que los meteorólogos estaban lejos de la identificación de las causas buscadas por Lamarck en el inicio de sus estudios. No era

⁷ Con “metaverificación” entendemos una evaluación de los varios métodos de verificación de las predicciones que son muy diferentes entre si y que todavía no sabemos confrontar eficazmente o no estamos capacitados para decir cuál es la mejor metodología de verificación.

⁸ También en los países de Europa del este entre el 1948 y el 1989 se prohibió hablar de tornados y el término empleado era “vientos dañinos” (Setvák y otros, 2003).

posible encontrar formalizaciones matemáticas que pudieran describir por lo menos aproximadamente lo que ocurre en la atmósfera así que las predicciones tenían un carácter “esotérico” y los usuarios no podían entenderlas.

Un papel determinante en el desarrollo de la meteorología, incluso en relación con la comunicación de las predicciones, fue entre 1871 y 1915 por Cleveland Abbe, apodado “Mister Old Probability” por la fiabilidad de sus predicciones. Abbe que intentó solucionar, con un enfoque determinista, algunos problemas teóricos de la meteorología, subrayó la importancia social y económica de las predicciones y el carácter crucial del proceso comunicativo (Abbe, 1901; Abbe, 1909). Por ejemplo, prescribió que los boletines meteorológicos fueran claros y precisos, indicando incluso la utilización correcta de los tiempos verbales, las magnitudes físicas de comunicar y la prohibición de términos ambiguos como “*mostly*” y “*possibly*”.

Al trabajo de Abbe siguieron otras aportaciones como las de Bjerknes⁹, Richardson¹⁰ y uno de los discípulos de Boltzmann¹¹ que intentaron profundizar en las actividades de investigación para construir los principios teóricos de la meteorología (Bjerknes, 1904, Gall y otros, 2000; Lynch 2003). Al mismo tiempo otros científicos como Cooke, Besson, Von Myrback, Hallenbeck ed Åmströng empezaron a considerar la importancia de la emisión de las predicciones en forma probabilística.

⁹ Vilhelm Friman Koren Bjerknes (1862-1951), físico y meteorólogo noruego. Con un enfoque determinístico en el 1904 puso las bases de las Predicciones Numéricas del Tiempo. Creó la escuela de Bergen de meteorología dinámica y sinóptica que aportó una contribución muy importante al desarrollo teórico de la meteorología incluso después de su fallecimiento.

¹⁰ Lewis Fry Richardson, (1881-1953), inglés, matemático, físico, meteorólogo y psicólogo pacifista.

¹¹ Felix Exner (187 –1930), físico austriaco.

En el mismo período en el que se producen progresos teóricos se avanza también en las investigaciones relacionadas con la utilidad social y económica de las predicciones y el modo de su comunicación.

El médico francés Besson publica un artículo (Besson, 1904) donde por primera vez se efectúan predicciones probabilísticas de precipitación basadas en veinte años de datos procedentes de la estación de Montsouris en París¹². En estos años el astrónomo y meteorólogo australiano Cooke¹³ planteó la cuestión de la subjetividad de las predicciones y de las dificultades relacionadas con su comunicación en forma categórica. Cooke preocupado por los usuarios proclamaba que cuando estos estuvieran insatisfechos con las predicciones recurriesen a métodos alternativos, a veces artesanales, generalmente inadecuados y no científicos. Por lo tanto definió una escala de probabilidad dividida en 5 partes que habría tenido que actuar como referencia para una comunicación en forma no categórica de las predicciones (Cooke, 1906). Sin embargo la teoría de Cooke está afectada, porque era analizada desde el punto de vista de la teoría clásica de la probabilidad, de unas cuantas ingenuidades y por lo tanto Murphy la definió (Murphy, 1998) protoprobabilística. Quince años después de la contribución de Cooke, el estadounidense Hallenbeck¹⁴, en respuesta a una específica petición de los ganaderos de la Pecos Valley, realizó predicciones que se comunicaron en forma probabilística para aumentar su valor. Los ganaderos para cuidar sus intereses amenazados por los eventos meteorológicos ya no se

¹² En artículos siguientes intentó poner en relación la meteorología con el número de muertes provocadas por enfermedades pulmonares (Besson, 1920) y con el número de niños muertos por diarrea (Besson, 1821)

¹³ William Ernest Cooke, (1863-1947), meteorólogo australiano.

¹⁴ Cleve Hallenbeck (1883-1942), meteorólogo militar en Roswell (New Mexico) desde el 1914.

conformaban con boletines que empleaban expresiones como “**probably and possibly**” (Hallenbeck, 1920).

Una contribución determinante fue dada por el físico sueco Åmströng en dos artículos que publicó en 1919 y en 1922 en los que sentó las bases para definir la calidad de una predicción y ayudar al usuario a tomar una decisión en relación con la probabilidad de que ocurra un evento meteorológico que pueda ser dañino (Liljas y otros, 1994). El trabajo de Åmströng fue redescubierto después de 70 años.

En el primer artículo reconoció la necesidad (¿?) de una formulación probabilística de las predicciones a causa de la impredecibilidad de la evolución de la atmósfera y de la sensibilidad a las condiciones iniciales. Aunque fuera consciente de la necesidad de un empleo de una teoría de la probabilidad no clásica se limitó a dar un enfoque estadístico clásico. Sin embargo, desde el punto de vista de nuestro trabajo, su mayor aportación procede de la observación y de que el valor de una predicción está estrechamente vinculado a su utilidad económica ya que ofrece por lo menos la posibilidad de protegerse de eventuales perjuicios. En otras palabras entendió que las predicciones más útiles son las que se refieren a eventos con una baja probabilidad de aparición.

En el segundo artículo consideró antes de todo las necesidades de los usuarios, estimando el valor económico de los avisos de eventos adversos y poniéndolos en relación con la probabilidad del evento comunicada por el meteorólogo. Además

analizó el papel del meteorólogo subrayando las condiciones que debe emitir una alerta. Desde este análisis nació la definición del *cost-loss ratio*¹⁵.

Åmströng había probado sus ideas en numerosos estudios relacionados con la agricultura, recibiendo una retroalimentación directa de los usuarios. Por lo tanto quiso enfocar su atención en el proceso que llevaba al meteorólogo para definir la probabilidad de un evento concluyendo que esta definición procedía de un conjunto de experiencias, juicios, intuición, cálculo y conocimientos del meteorólogo y que resulta absolutamente extraña a los usuarios que sólo conocen costes y perjuicios relacionados con su actividad. Al fin y al cabo Åmströng fue el primero que dándose cuenta del elevado valor económico de una predicción entendió que dicho valor dependía de la relación sensible entre meteorólogo y usuarios o sea del proceso comunicativo más adecuado a la predicción y que permita a los usuarios el desarrollo correcto en la toma de decisiones.

Si la presión de los usuarios, por mantener sus bienes forzó la emisión de predicciones en forma probabilística, después de la segunda guerra mundial los ordenadores contribuyeron en las mismas permitiendo una reflexión sistemática sobre el tema, que tuvo como consecuencia una separación entre la figura de los que elaboran las bases teóricas de las predicciones realizando los modelos y los que materialmente realizan y emiten dichas predicciones.

En 1946 gracias a los estudios de Von Neumann¹⁶ nace el ENIAC (*Electronic Numerical Integrator And Computer*), el primer ordenador¹⁷; uno de sus objetivos era

¹⁵ El *cost-loss ratio* es la relación entre los costos que implica la protección de un determinado evento meteorológico y los perjuicios que se originarían si no se realizan medidas protectoras. Åmströng demostró que al usuario le conviene protegerse si la probabilidad de acaecimiento del evento supera el *cost-loss ratio*.

conseguir la máxima efectividad en las predicciones del tiempo. En el mismo año a propuesta de Von Neumann, nació el *Meteorology Project* en el *Institute for Advanced Studies* de Princeton, cuyo objetivo era estudiar el empleo del ordenador en el ámbito de la meteorología. El entusiasmo fue tal que en la comunidad científica se creía poder realizar el sueño determinista de Bjerknes ya que se había fortalecido la red de observación que fue extendida también a la atmósfera superior. Después de dos años se efectuaron las primeras predicciones para un plazo de 24 horas. Seis años después nació la *Joint Numerical Weather Prediction Unit* que en sólo un año fue capaz de emitir dos predicciones diarias¹⁸. Se tuvo que esperar seis años más para disponer de predicciones efectuadas con los modelos basados en los que se ha denominado la Predicción Numérica del Tiempo cualitativamente superiores a las realizadas sin emplear el ordenador. Sin embargo hasta el año 1973 no fue posible efectuar predicciones para todo el planeta.

Se abrió por lo tanto una época de importantes avances teóricos que fomentaban y eran complementados por otros avances prácticos.

El matemático Julius Charney¹⁹ escribió otra vez las ecuaciones primitivas²⁰ en la forma en las que las empleamos hoy en día sin solucionar las cuestiones relacionadas

¹⁶ John von Neumann, (1903–1957), matemático e informático estadounidense de origen húngaro; de sus trabajos nació la teoría de los juegos.

¹⁷ Para decir la verdad el primer ordenador fue el Z3, de fabricación alemana, que fue producido cuatro años antes del ENIAC, aunque con características muy diferentes.

¹⁸ Los suecos empezaron seis meses antes ya que Rossby, recientemente llegado de Suecia, en poco tiempo logró hacer operativo el servicio sueco, incluso gracias a los resultados conseguidos por Charney.

¹⁹ Julius Gregor Charney (1917-1981), matemático, empezó a estudiar meteorología en el 1941, convirtiéndose en uno de los meteorólogos más importantes después de la Segunda Guerra Mundial. Colaboró con Rossby, Von Neumann, Lorenz y los meteorólogos más activos en el siglo XX, dando un aporte fundamental al nacimiento de la meteorología moderna.

con los límites en la predecibilidad que atribuyó a las carencias del modelo y al conocimiento limitado de las condiciones iniciales (Kalnay, 2003). Fue Brier que tratando el tema de la verificación de las predicciones puso en relación la calidad de la predicción con su utilidad económica (Brier, 1950). El resultado más destacado de su trabajo fue redescubrir el *cost-loss ratio* formulado por Åmströng y proponer reflexiones como las ya realizadas de Åmströng del que, puede ser que Brier no conocía los estudios (Thomson y otros, 1955). Finalmente trató el problema del proceso comunicativo de las predicciones en forma probabilística cuya utilidad procedía del hecho que eran representativas de los reales conocimientos de los meteorólogos. Era consciente que hacía falta una mayor educación de los usuarios que si no entienden las predicciones en forma probabilística puedan dirigirse hacia las predicciones emitidas en forma categórica ya que son aparentemente más comprensibles, sin embargo perdiendo una parte importante de la información asociada.

Fue el meteorólogo Eady²¹ quien se enfrentó otra vez al tema de la impredecibilidad de la atmósfera. Eady se dio cuenta que la inestabilidad y la sensibilidad a las condiciones iniciales convertían a la atmósfera en un sistema intrínsecamente impredecible (Eady, 1951) chocando contra la opinión de la mayoría de los meteorólogos que soñaban otra vez con el éxito de la visión determinista (Lewis, 2005).

El cambio de actitud llegó gracias a los estudios de Lorenz que, trabajando sobre un modelo para las predicciones, se percató de que un pequeño error de cálculo originaba

²⁰ Las ecuaciones primitivas son las ecuaciones para la base de los modelos empleados para realizar las predicciones.

²¹ Eric Thomas Eady (1915–1966), meteorólogo estadounidense.

una predicción completamente diferente (Thompson, 1986) o sea que no se pueden realizar predicciones a largo plazo excepto si se conocen con exactitud las condiciones iniciales. Exactitud que no está siempre al alcance ya que no es posible una difusión amplia de la red de observación y siempre existe un error asociado al proceso de medida.

Finalmente después de la publicación de su artículo Lorez propuso, en el NWP Symposium de Tokyo, una ruta de trabajo que se concluyó con el *l'Ensemble Prediction System*, que se emplea en la actualidad. El sistema se basa en la elección de muchos estados iniciales muy parecidos al estado inicial²² observado por la red. Las ecuaciones dinámicas, adecuadamente empleadas, producen un conjunto de estados finales que con un correcto análisis estadístico permite la evaluación de la probabilidad de que ocurra un evento determinado. Lorenz entendió (Lorenz, 1972) que cualquier avance en la investigación no puede permitir la realización de predicciones exactas sino las mejores predicciones posibles.

En los últimos años lo *skill*²³ de predicción de la meteorología ha avanzado mucho si lo comparamos con hace cuarenta años donde nuestras predicciones actuales habrían sido evaluadas como perfectas incluso para la capacidad de localización espacio-temporal de la mayoría de los eventos previstos.

La importancia del resultado alcanzado por Lorenz fue subrayar el intrínseco probabilismo asociado a una clase de fenómenos naturales abriendo las puertas a una mirada diferente hacia todos los fenómenos de la naturaleza y un enfoque diferente

²² Llamamos "estado inicial" de la atmósfera el conjunto de datos "buenos" procedentes de la red de observación y que insertados en el modelo permiten la emisión de la predicción categórica

²³ Lo *skill* o *skill-score* de una predicción es un parametro que permite de evaluar la calidad de una predicción a partir del confronto con una predicción perfecta y con la climatología.

hacia ciencias que hasta entonces habían sido consideradas ciencias menores por ser analizadas sólo bajo la teoría de la probabilidad. Hoy se han recuperado los trabajos de científicos como Bayes y De Finetti ya que la misma teoría de la probabilidad se examinaba con métodos diferentes y pasaba de ser la cenicienta de las matemáticas a ser una ciencia fundamental para mirar con nuevos ojos y entender la naturaleza. Los mismos conceptos de predicción, modelo, probabilidad (Lorenz, 1993) cambiaban de significado (Raimondi, 2013). Sin embargo estos cambios, como siempre, no se difundieron con velocidad parecida entre los usuarios así que se siguió perdiendo parte de la información proporcionada sobre las predicciones, incluso cuando la información habría podido ser útil para proteger bienes y vidas y por lo tanto adquirió mayor importancia el análisis del proceso comunicativo. Hace falta destacar que sobre todo en las últimas dos décadas, sobre todo gracias al enorme interés del público por la meteorología, han crecido las investigaciones sobre el proceso de comunicación de la información incierta particularmente en EE.UU. y por lo que concierne a Europa particularmente en España (Sánchez Calero, 2005; Benito Agueda y otros, 2003).

5. Conclusiones

1) La mayoría de los usuarios prefiere las predicciones categóricas porque por un lado creen no estar capacitados para entender las predicciones emitidas en forma probabilística (Fig. 1), y por otro lado para poder tener, por lo menos así opinamos, bajo control los eventuales errores del meteorólogo (Fig. 2) y estar en situación de poder juzgar la fiabilidad sin excesiva dificultad. Esta posición de los usuarios es el espejo de la opinión de los meteorólogos (italianos) que creen que es inútil emplear predicciones en forma probabilística ya que los usuarios no las comprenden (Fig. 3).

2) A partir de las precedentes conclusiones hemos intentado averiguar si existe una conciencia del hecho que con las predicciones está intrínsecamente asociada una incertidumbre. Lo que emerge de la investigación es que esta conciencia existe (Fig. 4,5) aunque como ya observó Morss (Morss y otros, 2008) no es fácil entender a qué tipo de incertidumbre se pueda hacer referencia. De hecho las respuestas concernientes a la predicción de temperatura (Fig. 5) pueden proceder de una falta de confianza en la predicción y/o en los meteorólogos, de un conocimiento de la variabilidad de la temperatura en la zona afectada por la predicción, de la percepción de la incertidumbre del meteorólogo, de la conciencia que no se puede predecir con certidumbre la evolución atmosférica, etc. Por lo tanto hay que profundizar las investigaciones sobre este tema para aclararlo.

3) Para evaluar las capacidades del público para entender y manejar una información probabilística genérica en forma numérica hemos empleado dos preguntas de Murphy (Murphy y otros, 1980) aunque formuladas en forma un poco más sencilla para evitar que respuestas demasiado difíciles pudieran esconder una mínima capacidad de manejar probabilidades. Las respuestas evidencian dificultades de la mayoría de los usuarios cuyas respuestas son muy diferenciadas (Fig. 6).

4) Para averiguar la comprensión de la predicción meteorológica en forma probabilística hemos empleado preguntas empleadas por Scoggins (Scoggins y otros, 1971) y Gigerenzer (Gigerenzer y otros, 2005).

La pregunta de Scoggins aunque se remonte a hace cuarenta años mantiene su actualidad si es oportunamente contextualizada. En la mitad de los años '70 el empleo de Ensemble Prediction System y Limited Area Models se volvió sistemático y definitivo haciendo posible la realización de predicciones en "pequeña escala", definida

por la resolución espacial de los modelos en la zona sobre la que se efectúa la predicción. Por lo tanto la pregunta no se refiere ya a un punto del espacio sino a un cuadrado de la retícula. Una probabilidad de precipitación del Q% en el área y en el período de tiempo a los que la predicción se refiere significa que en Q días en 100, en las mismas condiciones del día que estamos considerando, ocurrirán precipitaciones medibles (NWS, 1998).

La mayoría de los usuarios italianos responden correctamente a la pregunta de Scoggins, aunque emergen malentendidos entre área y puntos afectados por el evento. Es necesario notar que un porcentaje importante de los usuarios españoles contesta que la probabilidad se refiere a la fiabilidad de la predicción, que según Joslyn (Joslyn y otros, 2008; Lorenz, 1993) tendría que ser la correcta interpretación de la predicción probabilísticas (Fig. 7).

Queremos finalmente destacar que los meteorólogos italianos contestan a la pregunta de Scoggins incorrectamente como si atribuyeran un particular significado a la predicción probabilística que los usuarios no pueden conocer por un proceso comunicativo inexacto.

Por lo que concierne a las respuestas a la pregunta de Gigerenzer destaca una mejora del porcentaje de usuarios italianos que contesta correctamente con respecto al porcentaje que contestó correctamente seis años antes. Es todavía más alto el porcentaje de usuarios españoles que contesta correctamente (Fig. 8).

5) Hemos finalmente intentado averiguar si es correcta la propuesta de la WMO (Tabla 1) (WMO, 2008) de reducir la incompreensión de la información probabilística expresándola en formato textual según la tabla empleada por IPCC en sus informes

sobre el cambio climático. Hemos utilizado preguntas de Patt y Schragg contextualizadas al clima mediterráneo en el intento de sacar a la luz la eventual relación entre la asociación “expresión verbal-intervalo de probabilidad” con la tipología del evento y más generalmente con el contexto. En otras palabras, según Patt las expresiones que se emplean conciernen más bien al riesgo que al evento meteorológico que lo genera. Patt cree que existe una asimetría en la evaluación de las informaciones probabilísticas entre meteorólogos y usuarios. Los primeros sobreestiman los eventos de alta probabilidad y subestiman los de baja probabilidad mientras que ocurre lo contrario entre los usuarios. De nuestra investigación emerge por cierto una falta de correspondencia entre evaluaciones de usuarios y meteorólogos con la tabla propuesta por la WMO mientras que los efectos enseñados por Patt aparecen en forma tan débil para poder o no confirmarlos. Se debería profundizar el tema con nuevas y más enfocadas investigaciones (Fig. 10, 11,12).

Haciendo una síntesis de los resultados de nuestro trabajo intentaremos sacar conclusiones y en el mismo tiempo indicar líneas de investigación para tratar las cuestiones que quedan abiertas aunque no sea una tarea sencilla ya que el escrito es algo estático que no puede conseguir representar una ciencia joven en evolución permanente. Por lo tanto es posible que en el mismo momento en el que se acaba de escribir se den a conocer prácticas, ideas, pensamientos que responden de manera nueva y eficaz a unas de las cuestiones que hemos planteado. Es bastante leer un cualquier periódico para entender que prescindir de la información probabilística, tan relacionada con las actividades humanas, tiene costos muy altos tanto para las personas que para la colectividad. Aquí nos hemos ocupados de meteorología ya que, como dicho antes, nos parece el principio de la conciencia, entre la comunidad de los científicos, de la necesidad de un nuevo enfoque epistemológico, pero lo que hemos

ilustrado vale igualmente para la medicina o la biología o las ciencias de la Terra (Hough, 2010) e incluso para, por ejemplo, sociología y economía (Bertuglia y otros, 2005; Silver, 2013; Taleb, 2007) o la climatología.

Creemos que haga falta un enfoque sistémico que tendría que ser basado en un reconocimiento de las nuevas pautas epistemológicas de todas las ciencias de la naturaleza que no se deben ya concebir como aisladas o separadas unas de otras ni siquiera reducidas a la física en el marco clásico. Por supuesto hay, en el interior de esta nueva comunidad de científicos, diferentes especializaciones que de vez en cuando se intersecan y producen avances en las predicciones.

Nos parece que la cuestión principal que queda sin solución concierne la comprensión de la información probabilística por parte de los receptores de un mensaje que es a menudo poco claro y preciso. Por supuesto hay que desarrollar una actividad de formación en estadística y teoría de la probabilidad en el sistema escolar, a partir de la escuela primaria. Además en las zonas sujetas a algún tipo de riesgo hay que efectuar una actividad de *outreach* permanente hacia el público relacionada con el riesgo específico que debe ser cuantificado. Una vez que los usuarios pueden entender la información estadística asociada al mensaje hay que cuidar los diferentes aspectos comunicativos para que el mensaje sea el más claro posible. Por eso los emisores tendrían que colaborar con otros profesionales, sociólogos, psicólogos, antropólogos y lingüistas, (NRC, 2006) para definir un mensaje adecuado al nuevo enfoque epistemológico que abandona el determinismo para abrazar una visión de la naturaleza en turbulenta evolución. Un enfoque que puede ser empleado con eficacia incluso en otras ciencias. En este contexto no se puede pensar en un mensaje estándar pero se puede estandarizar el enfoque del emisor, eligiendo por ejemplo si el

mensaje tiene que ser emitido sólo en forma gráfica, sólo en forma textual o en las dos formas para expresar de manera adecuadamente el riesgo asociado.

Puede ser útil además profundizar el estudio sobre los procesos de toma de decisión sobre todo en situaciones de riesgo específicas (Perrsson, 2007). De hecho esquemas clásicos de análisis no pueden ser eficaces en situaciones en las que los dos polos de la comunicación se encuentran bajo presión y sus decisiones pueden ser influidas por elementos que nada tienen que hacer con el objeto de la predicción y incluso la misma sobreabundancia de informaciones puede ser causa de confusión exactamente como una escasa información (Fischhoff, 1994; Nicholls, 1999; Millner, 2008; Kahnemann). Las decisiones se basan en un cálculo de costes y beneficios que a menudo debe ser efectuado con rapidez y con informaciones limitadas y por lo tanto es crucial el papel de las emociones (Rumiati, 2001; Marx, 2007). Finalmente hay que examinar como el riesgo es percibido socialmente y como la cultura local puede influir en la comprensión y en la interpretación del mensaje (Strauss y otros, 2003, Hu y otros, 2006, Pennesi, 2007) y en la función social de la predicción (Viallon y otros, 1997). Al fin y al cabo la información probabilística no garantiza de por sí un adecuado proceso de toma de decisión. Pueden ser necesarias recategorizaciones y recontextualizaciones de las informaciones, pero no se puede prescindir de predicciones probabilísticas porque son más informativas para el usuario.

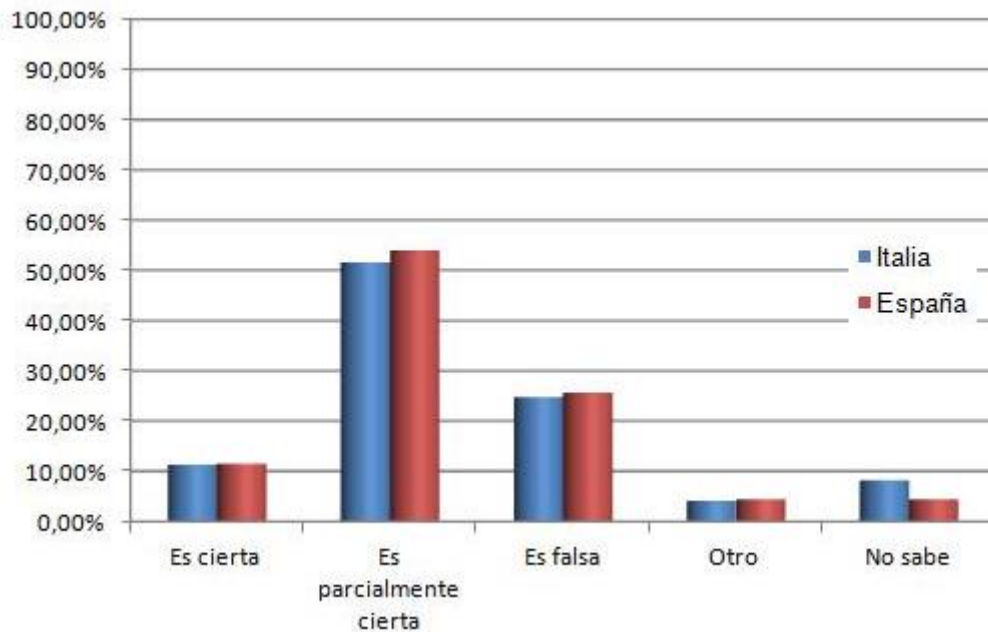
En otras palabras no podemos seguir razonando según esquemas en los que existen dos culturas diferentes y separadas entre sí: la de las ciencias duras y la de las ciencias humanas. Si, como afirma Prigogine, trabajamos en un marco en el que las dos culturas están estrechamente interconectadas se pueden establecer nuevos

canales de comunicación, nuevas ideas, nuevos conceptos y praxis. Las ciencias sociales son ciencias basadas en teorías rigurosas con enfoques, métodos, conocimientos y experiencias específicas que pueden indicar de manera clara y cierta las necesidades sociales y económicas relacionadas con el tiempo. Las ciencias de la naturaleza y, más en general, la ciencias de la complejidad tienen que relacionarse con las ciencias sociales no considerándolas como un instrumento en el interno de un sistema de ideas al que no pertenecen, sino considerándolas a la par, empleando, si hace falta, sus enfoques epistemológicos y sus métodos. La meteorología ofrece la oportunidad de construir el puente entre las dos culturas y las ciencias sociales pueden ser imprescindibles para identificar campos de investigación y objetivos.

Por cierto los investigadores de las dos ciencias deben estar a la altura de las circunstancias, tener una profesionalidad adecuada y una mente abierta hacia los cambios de ideas y métodos que conlleva el encuentro entre los dos campos del conocimiento.

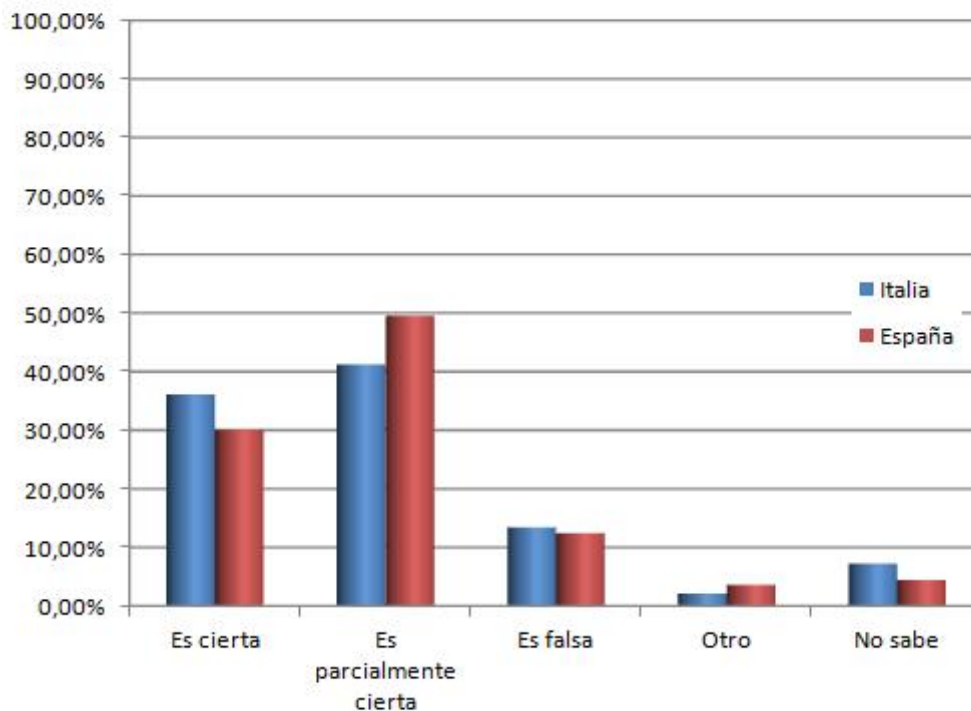
Es verdad que Lorenz ha llegado con antelación (Stewart, 2009) ya que el proceso de aceptación del cambio de enfoque tiene mucho retraso y sobre todo entre los usuarios no existe la capacidad de enfrentarse sin miedo a un mundo con incertidumbre. Sin embargo esperamos que crezca la conciencia de que un mundo basado en la certidumbre, aunque tal vez más tranquilizante, sería aburrido y no podríamos apreciar sus maravillas y aumentar nuestros conocimientos.

Figura 1: Opinión de los usuarios sobre la afirmación “Un problema de las predicciones probabilísticas es que a menudo están equivocadas”



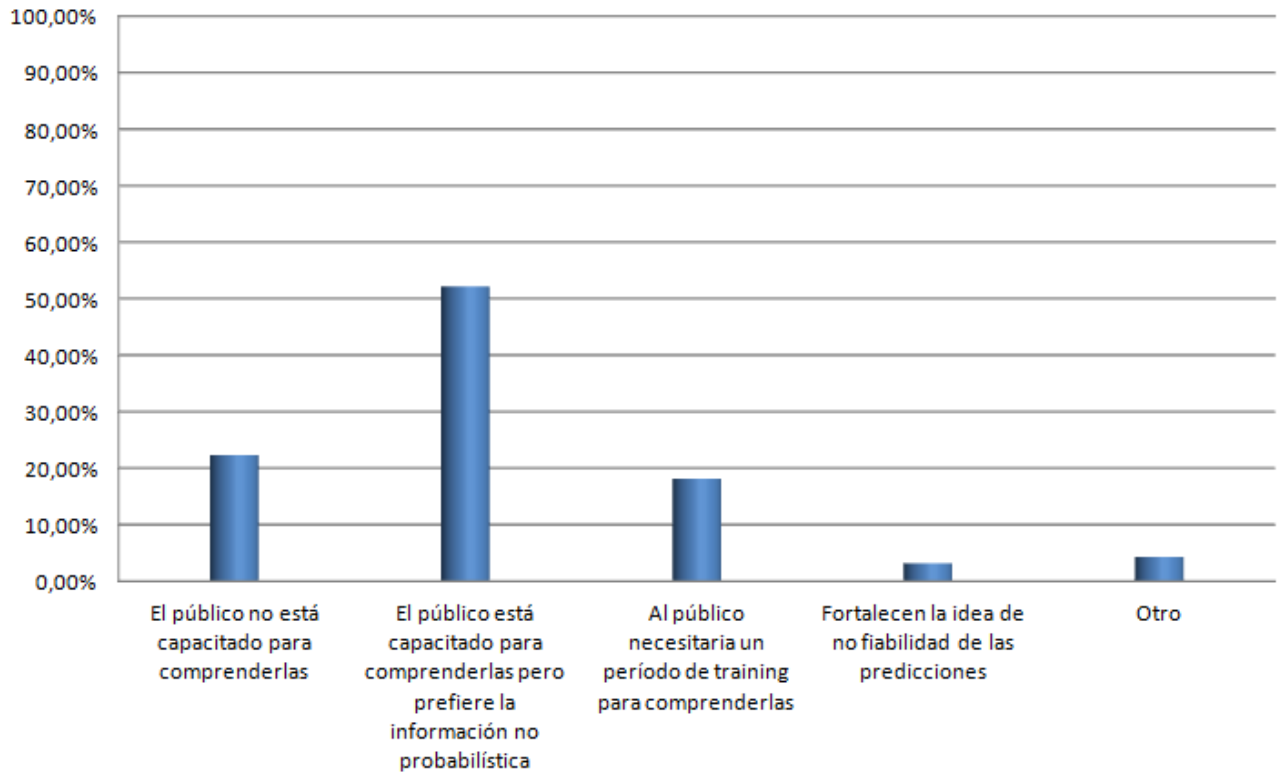
Fuente: elaboración propia

Figura 2: Opinión de los usuarios sobre la afirmación “Un problema de las predicciones probabilísticas es que los usuarios no entienden bien las probabilidades”



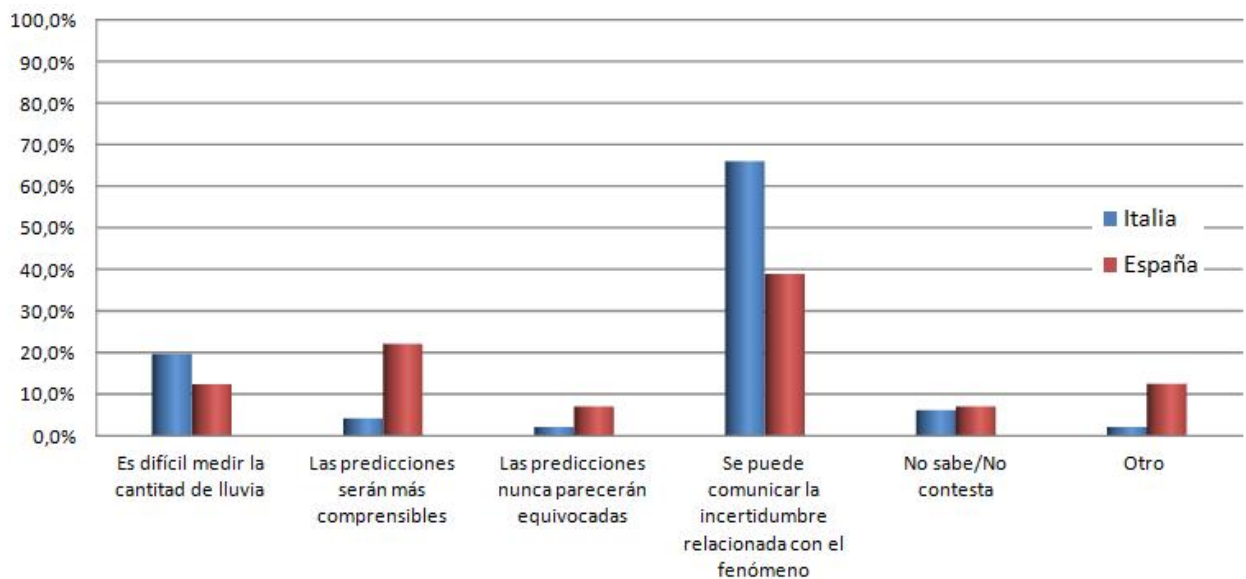
Fuente: elaboración propia

Figura 3: Opinión de los meteorólogos sobre la comprensión de las predicciones probabilísticas por parte del público



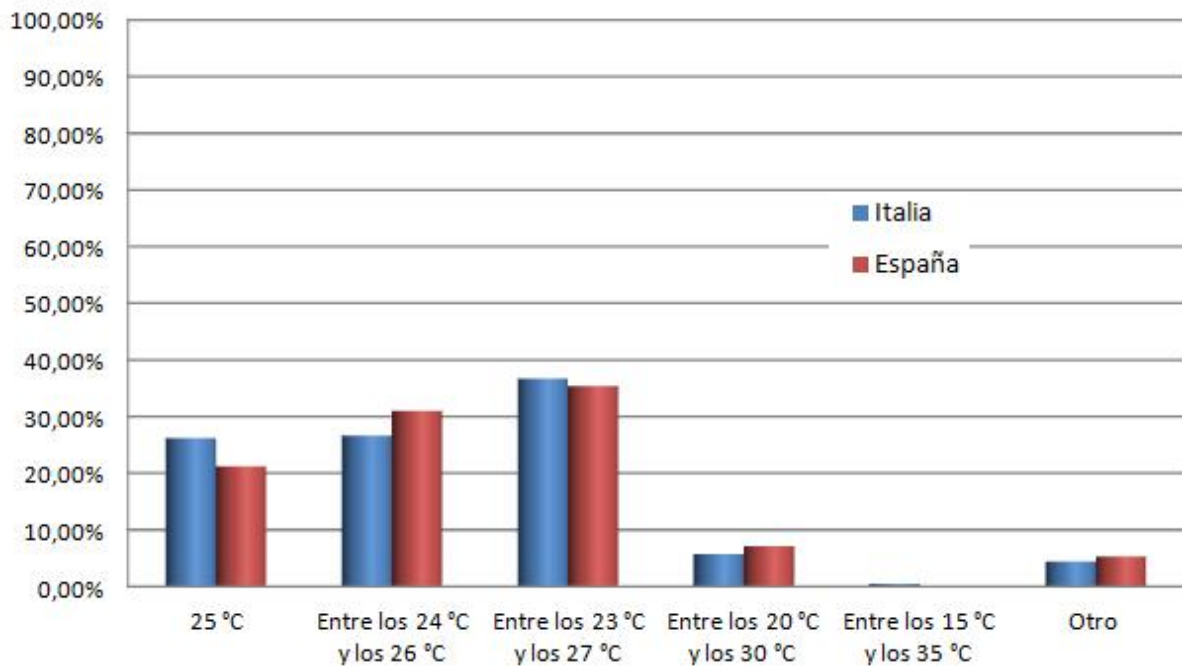
Fuente: elaboración propia

Figura 4: Opinión de los usuarios sobre la necesidad de utilizar predicciones probabilísticas de precipitaciones



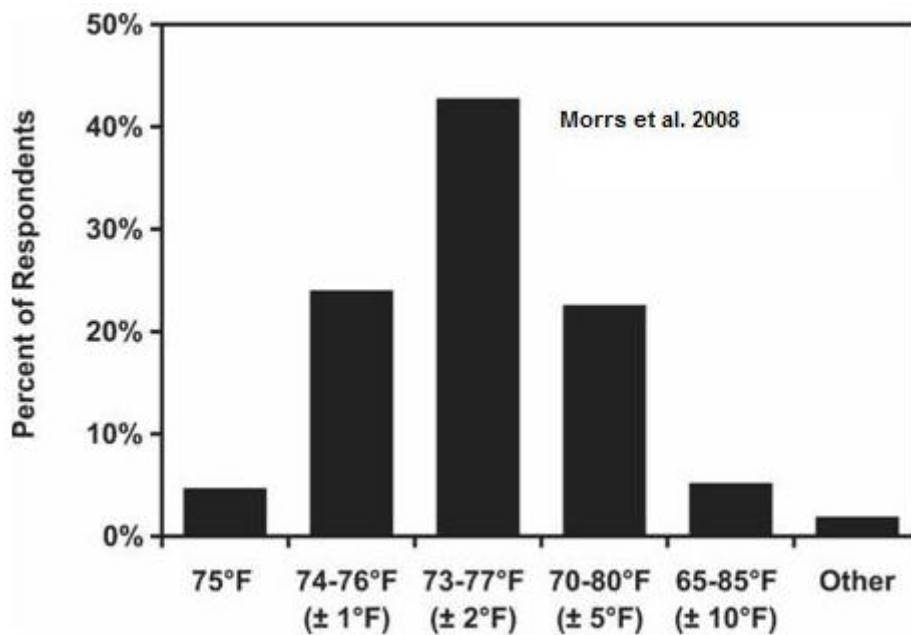
Fuente: elaboración propia

Figura 5: Evaluación de los usuarios de la conciencia de la incertidumbre asociada a una predicción de temperatura



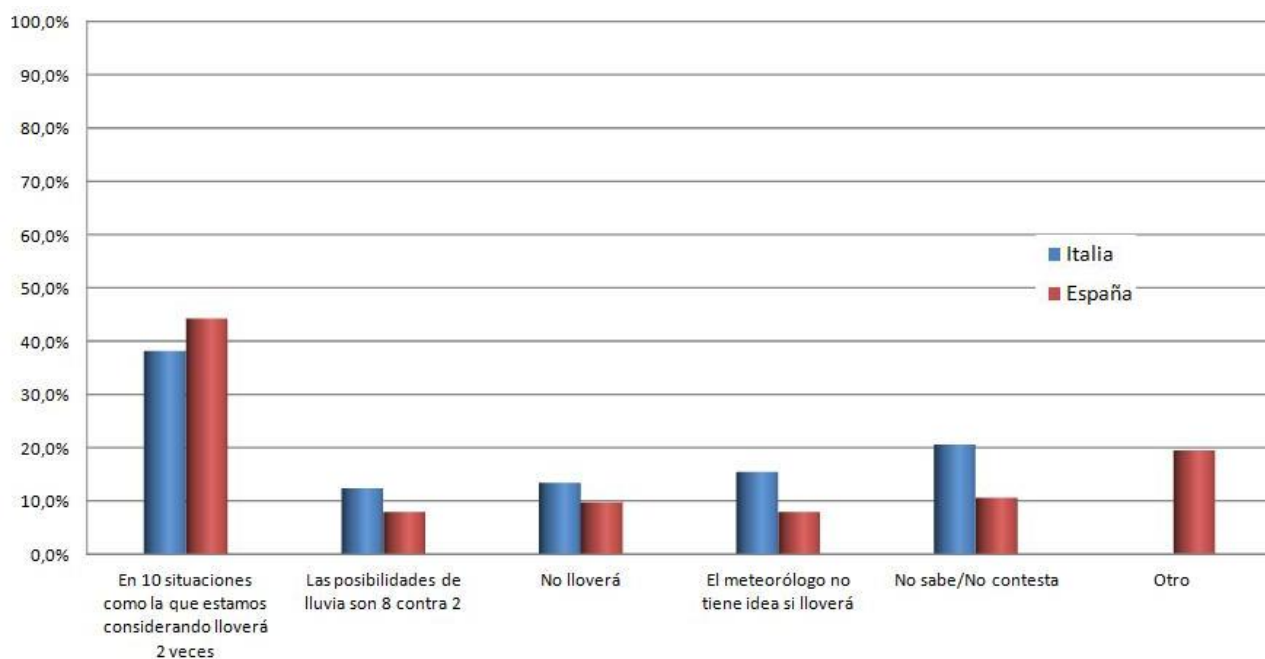
Fuente: elaboración propia

Figura 6: Evaluación de los usuarios de la conciencia de la incertidumbre asociada a una predicción de temperatura en (Morris y otros, 2008)



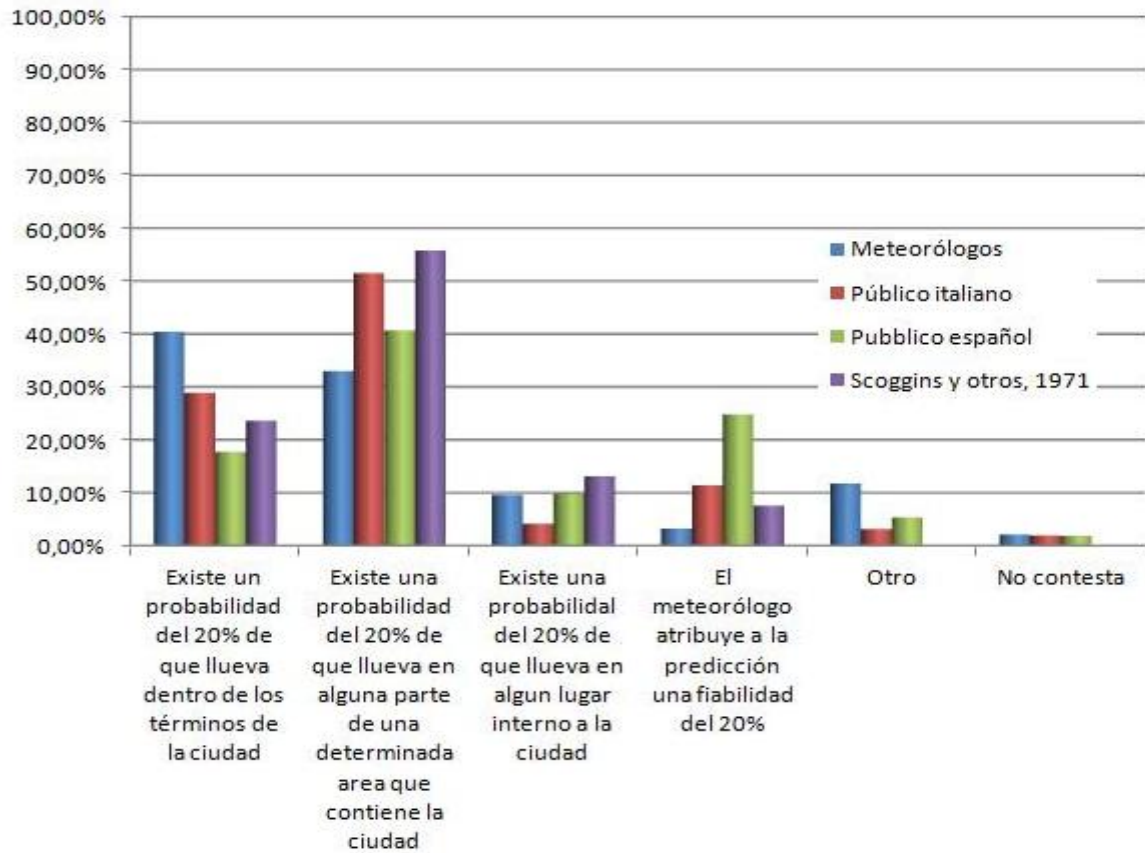
Fuente: elaboración propia

Figura 7: Interpretación de los usuarios de una predicción de lluvia con 20% de probabilidad



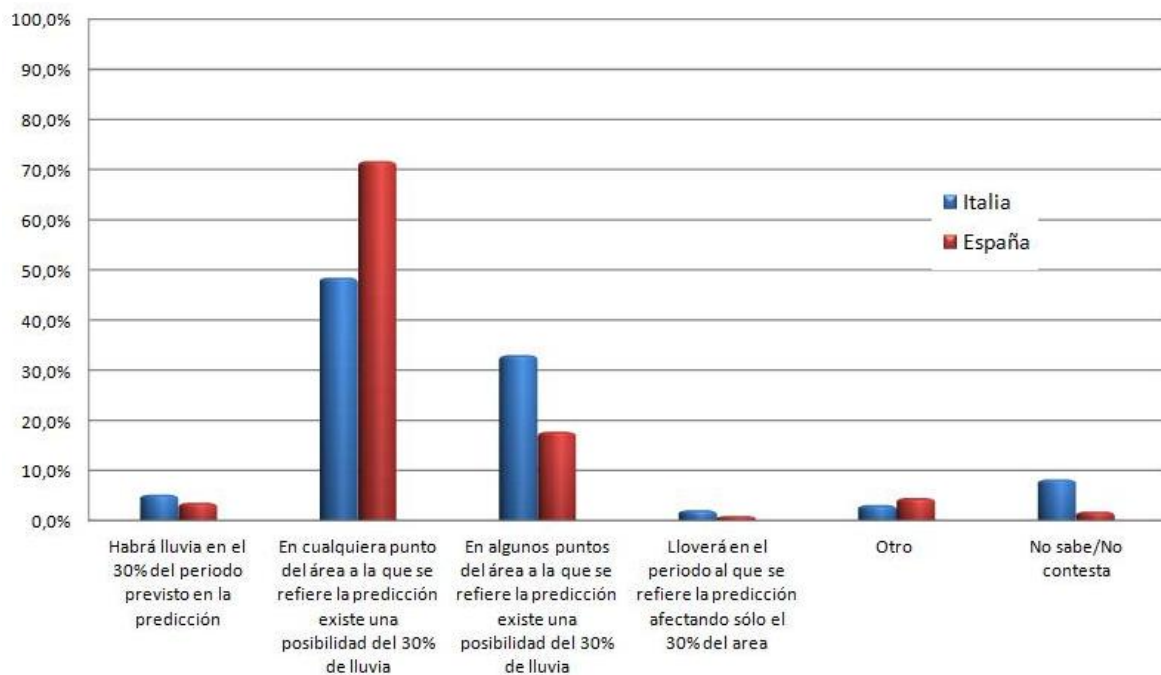
Fuente: elaboración propia

Figura 8: Significado de predicción de lluvia del 20% de (Scoggins y otros, 1971)



Fuente: elaboración propia

Figura 9: Significado de predicción de lluvia del 30% de (Gigerenzer y otros, 2005)



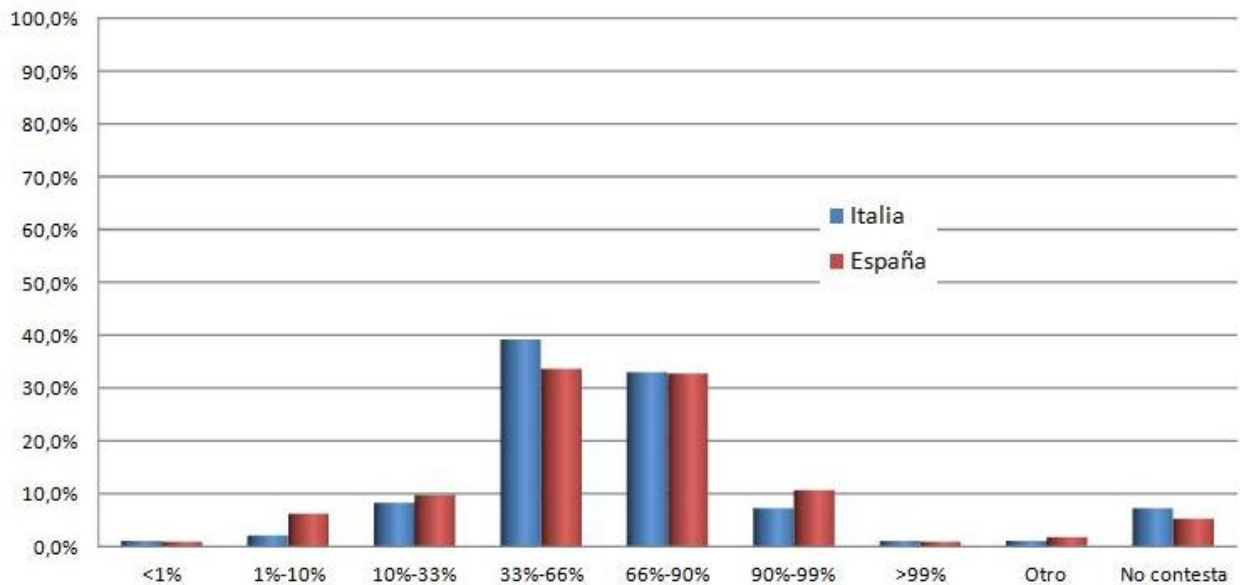
Fuente: elaboración propia

Tab. 1: Tabla de expresión textual de la probabilidad propuesta por la WMO (WMO, 2008)

Expresión verbal	Probabilidad de acontecimiento
Virtually certain	$p > 99\%$
Very likely	$90\% < p < 99\%$
Likely	$66\% < p < 90\%$
About as likely as not	$33\% < p < 66\%$
Unlikely	$10\% < p < 33\%$
Very unlikely	$1\% < p < 10\%$
Exceptionally unlikely	$p < 1\%$

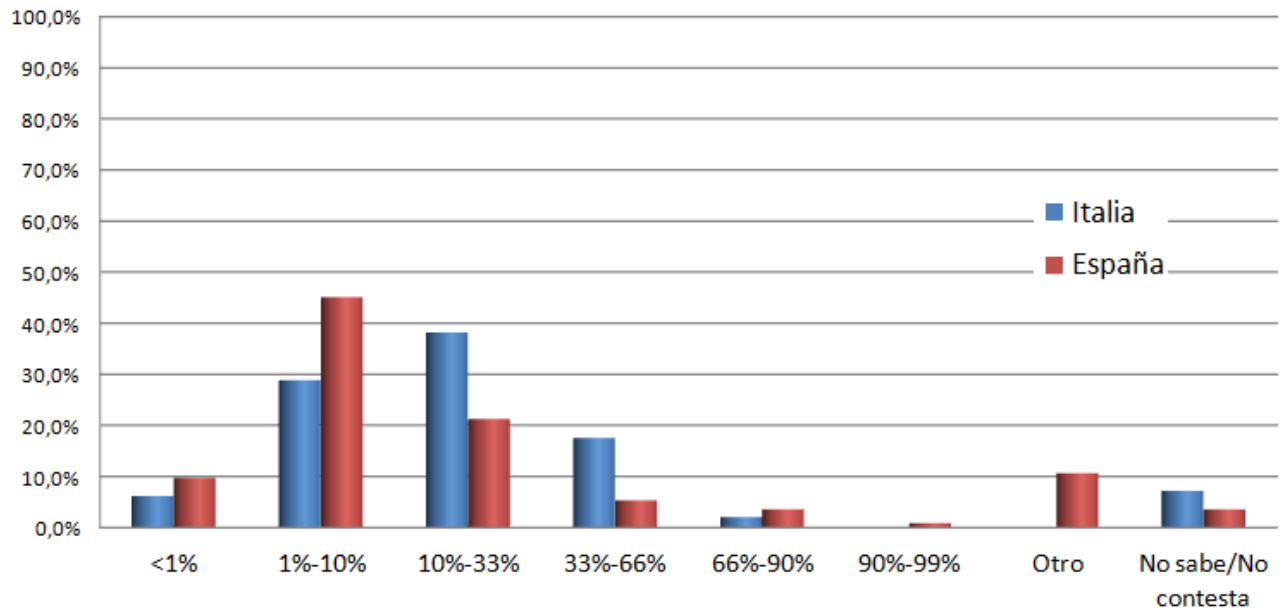
Fuente: elaboración propia

Figura 10: Intervalo de probabilidad correspondiente a la expresión "probable" según los usuarios



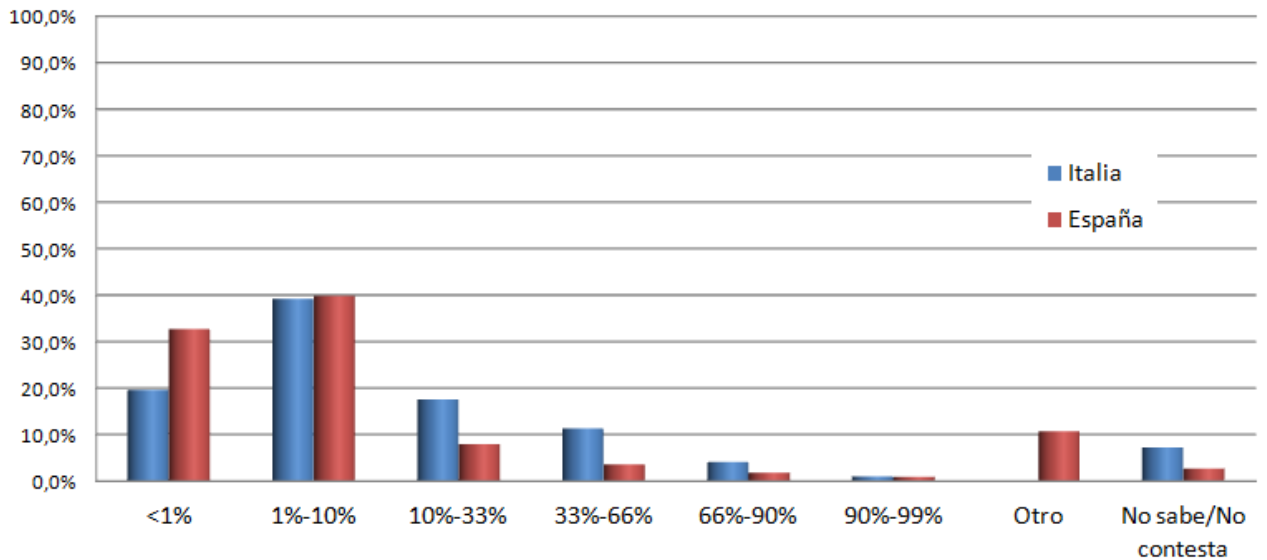
Fuente: elaboración propia

Figura 11: Intervalo de probabilidad correspondiente a la expresión "improbable" según los usuarios



Fuente: elaboración propia

Figura 12: Intervalo de probabilidad correspondiente a la expresión "muy improbable" según los usuarios.



Fuente: elaboración propia

6. Bibliografía

Abbe, C. (1899). "Unnecessary tornado alarms." *Monthly Weather Review* 27: 158.

Abbe, C. (1901). "The physical basis of long-range weather forecasts." *Monthly Weather Review* 29: 551-561.

Abbe, C. (1909). "Weather words in all languages." *Monthly Weather Review* 37: 62.

Benito, A. Ribalaygua, J. Rodríguez, R. Portela, A. Benito, L. (2003). "Cómo mejorar la comprensión de la información probabilística del tiempo." Ponencia presentada en la VI International Conference on school and popular meteorological and oceanographic education, 7-11 de Julio del 2003, Madrid, Spain.

Bertuglia, C.S. y Vaio, F. (2011). *Complessità e modelli*. Torino: Bollati Boringhieri

Besson, L. (1904). "Attempts at methodical forecasting of the weather." *Monthly Weather Review* 32: 311-313.

Besson, L. (1920). "Relations between the meteorological elements and the number of deaths from inflammatory diseases of the respiratory organs, at Paris." *Monthly Weather Review* 48: 156

Besson, L. (1921). "Influence of temperature on the number of deaths from infantile diarrhea at Paris." *Monthly Weather Review* 49: 507.

Bjerknes, W (1904). "The problem of weather prediction, as seen from the standpoints of mechanics and physics." *Meteorologische Zeitschrift*, 21, 1-7.

Brier, G. W. (1950). "Verification of forecasts expressed in terms of probability." *Monthly Weather Review* 78, 1: 1-3.

Lewis, L. Garnett, W. (1882). *The life of James Clerk Maxwell*. London: MacMillan and co.

Cooke, W.E. (1906). "Forecasts and verifications in Western Australia." *Monthly Weather Review* 34: 23-24.

Cooke, W. E. (1906a). "Weighting forecasts." *Monthly Weather Review* 34: 274-275.

Coriolis, G.G. (1832). "Mémoire sur le principe des forces vives dans les mouvements relatifs des machines." *Journal de l'école Polytechnique* 13: 268-302.

Coriolis, G.G. (1835). "Mémoire sur les équations du mouvement relatif des systèmes de corps." *Journal de l'école Polytechnique* 15: 142-154.

Corsi, P. D.Phil Professor, History of Science, University of Oxford (2008). Comunicación personal.

De Finetti, B. (1931). "Sul significato soggettivo della probabilità." *Fundamenta Mathematicae* 18: 298-329.

De Finetti, B. (1937). "La Prévision: Ses Lois Logiques, Ses Sources Subjectives." *Annales de l'Institute Henri Poincaré* 7, 1: 1-68.

Fierro, A. (1991). *Histoire de la meteorologie*. Paris: Denoëll Editions.

Finley, J.P. (1884). "Tornado predictions." *American meteorological journal* 1: 85.

Finley, J.P. (1884a). "Intelligence from American Scientific Stations." *Science* 3: 767.

Finley, J.P. (1885). "Tornado studies for 1884." Washington City Signal Office.

Fischhoff, B. (1994). "What forecasts (seem to) mean." *International Journal of Forecasting* 10: 387-403

Gall, R. Shapiro, M. (2000). "The influence of Carl-Gustaf Rossby on mesoscale weather prediction and an outlook for the future." *Bulletin of American Meteorological Society* 81, 7: 1507-1523.

Gigerenzer, G. Swijtink, Z. Porter, T. Daston, L. Beatty, J. Krüger, L (1997). *The empire of chance. How probability changed science and everyday life*. Cambridge: Cambridge University Press.

Gigerenzer, G. Hertwig, R. Van den Broek, E. Fasolo, B. Katsikopoulos, K.V. (2005). "A 30% chance of rain tomorrow: how does the public understand probabilistic weather forecast?." *Risk Analysis* 25, 3: 623-629.

Hallenbeck, C. (1920). "Forecasting precipitation in percentages of probability." *Monthly Weather Review* 48: 645-647

Hinrichs, G. (1888). "Tornadoes and derechos." *American Meteorological Journal* 5: 306

Hough, S. E. (2010). *Predicting the unpredictable. The tumultuous science of earthquake prediction*. Princeton: Princeton University Press.

Hu, Q. Pytlik Zillig, L.M. Lynne, G.D. Tomkins, A.J. Waltman, W.J. Hayes, M.J. Hubbard, K.G. Artikov, I. Hoffman, S.J., Wilhite, D.A. (2006). "Understanding Farmers' Forecast Use from Their Beliefs, Values, Social Norms, and Perceived Obstacles." *Journal of applied meteorology and climatology* 45, 9: 1190-1201.

Kalnay, E. (2003). *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*. Cambridge: Cambridge University Press.

Lamarck, J.B. (1794). *Recherches sur les causes des principaux faits physiques*. Paris : Maradan.

Lamarck, J.B. (1798). "De l'influence de la lune sur l'atmosphère terrestre." *Journal de Physique, de Chimie, d'Histoire Naturelle et des Arts* XLVI: 428-435.

Lamarck, J.B. (1800). *Annuaire météorologique pour l'an VIII*. Paris: Chez l'auteur.

Lamarck, J.B. (1801). *Annuaire météorologique pour l'an IX*. Paris : Chez l'auteur.

Lamarck, J.B. (1802). *Hydrogeologie*. Paris: Agasse et Maillard, Paris.

Lamarck, J.B. (1803). *Annuaire météorologique pour l'an XI*. Paris: Chez l'auteur.

Lamarck, J.B. (1804). *Annuaire météorologique pour l'an XII*. Paris: Chez l'auteur.

Lamarck, J.B. (1805). *Annuaire météorologique pour l'an XIII*. Paris: Chez l'auteur.

Lamarck, J.B. (1806). *Annuaire météorologique pour l'an XIV*. Paris: Chez l'auteur.

Lamarck, J.B. (1818): "Météorologie". Pp. 451-477 en *Nouveau Dictionnaire d'Histoire naturelle*, vol. 20. Paris: Deterville libraire.

Landrieu, M. (1909). *Lamarck, le fondateur del trasformisme*. Paris: Societé Zoologique de France.

Lazo, J.K. (2010). "The costs and losses of integrating social sciences and meteorology." *Weather, Climate and Society* 2, 3: 71-73

Lewis, J. M. (2005). "Roots of ensemble forecasting." *Monthly Weather Review* 133, 77: 1865-1885.

Liljas, E. Murphy, A.H. (1994). "Anders Ångström and his early papers on probability forecasting and the use/value of weather forecasts." *Bulletin of American Meteorological Society* 75: 1227-1236.

Lorenz, E. (1963). "Deterministic nonperiodic flow." *J. Atmos. Sci.* 20: 130-141.

Lorenz, E. (1992). pp. 181-184. "Predictability: does the flap of a butterfly's wings in Brazil set off a tornado in Texas?" en *The essence of chaos*. Seattle: University of Washington Press.

Lorenz, E. (1993). *The essence of chaos*. Seattle: University of Washington Press.

Lynch, P. (2003). "Margules' Tendency Equation and Richardson's Forecast." *Weather* 58, 5: 186-193

Marx, S.M. Weber, E.U. Orlove, B.S. Leiserowitz, A. Krantz, D.H. Roncoli, C. Phillips, J. (2007) "Communication and mental processes: Experiential and analytic processing of uncertain climate information." *Global Enviromental Change* 17: 47-58.

Morss, R.E. Demuth, J.L. Lazo, J.K. (2008). "Communicating uncertainty in weather forecasts: a survey of the U.S. public." *Bulletin of American Meteorological Society*, 89, 12: 974-991.

Murphy, A.H. Lichtenstein, S. Fischhoff, B. Winkler, R.L. (1980). "Misinterpretations of precipitations probability forecasts." *Bulletin of American Meteorological Society* 61, 7: 695-701.

Murphy, A.H. (1996). "The Finley affair: A signal event in the history of forecast verification." *Weather and Forecasting* 11: 3-20.

Murphy, A.H. (1998). "The Early History of Probability Forecasts: Some Extensions and Clarifications." *Weather and forecasting* 13: 5-15.

National Research Council (2006). *Completing the Forecast: Characterizing and Communicating Uncertainty for Better Decisions Using Weather and Climate Forecasts*. Washington D. C.: The National Academic Press.

National Weather Service, (1998). "General Forecast Terminology and Tables." La Crosse, Wisconsin. Consulta 26 de marzo del 2014. (<http://www.crh.noaa.gov/arx/?n=fcst1#pcpn>)

Patt, A.G. Schrag, D.P. (2003). "Using specific language to describe risk and probability." *Climatic change* 61: 17-30.

Peirce, C.S. (1884). "The numerical measure of the success of predictions." *Science* 4, 93: 454

Pennesi, K. (2007). "Improving forecast communication. Linguistic and Cultural Considerations." *Bullettin of American Meteorological Society* 88, 7: 1033-1044.

Persson, A. Grazzini, F. (2007). "User Guide to ECMWF forecast products". European Center for Medium range Weather Forecasts: Meteorological Bulletin M3.2, Version 4.0.

Poincaré, H. (1908). *Science et Méthode*. Paris: Flammarion.

Prigogine, I. Stengers, I. (1999). *La nuova alleanza. Metamorfosi della scienza*. Torino: Einaudi.

Prigogine, I. (2003). *Le leggi del caos*. Bari: Laterza.

Raimondi, A. (2009). "The communicative process of weather forecasts issued in the probabilistic form." *Journal of Science Communication*, 08(01) A03. Consulta 26 de marzo del 2014 ([http://jcom.sissa.it/archive/08/01/Jcom0801\(2009\)A03/](http://jcom.sissa.it/archive/08/01/Jcom0801(2009)A03/))

Raimondi, A. (2010). "Il contributo di Lamarck alla fondazione della meteorologia moderna." *Nuncius* 25, II: 299-316.

Raimondi, A. (2013). "La predicción, base cultural de la prevención." *Boletín de la Asociación Meteorológica Española*, 10, 1: 40-41.

Rumiati, R. Bonini, N. (2001). *Psicologia della decisione*. Bologna, Il Mulino.

Silver, N. (2012). *The Signal and the Noise : Why Most Predictions Fail – but Some Don't*. London: Penguin.

Sánchez Calero M.L., 2005 : La información meteorológica como servicio. Madrid : Instituto Nacional de Meteorología.

Scoggins, J.R. Vaughan, W.V. (1971). "How some nonmeteorological professionals view meteorology and weather forecasting." *Bullettin of American Meteorological Society* 52, 10: 974-979.

Setvák, M. Šálek, M. Munzar, J. (2003). "Tornadoes within the Czech Republic: from early medieval chronicles to the "internet society"." *Atmospheric Research* 67-68: 589-605

Silver, N. (2013). *Il segnale e il rumore. Arte e scienza della previsione*. Roma: Fandago Libri.

Smith, L. (2008). *Caos*. Torino: Codice Edizioni.

Stewart, I. (2009). *Dio gioca a dadi? La nuova matematica del caos*. Torino: Bollati Boringhieri.

Taleb, N.N. (2007). *The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable*. New York: Random House.

Thompson, J.C. Brier, G.W. (1955). "The economic utility of weather forecasts." *Monthly Weather Review* 83, 11: 249-254.

World Meteorological Organization, 2008: *Guidelines on communicating forecast uncertainty*. PWS-18, WMO/TD No. 1422.

Anexos

Participaron en la investigación los meteorólogos de las *Agenzia Regionale Protezione Ambientale* (ARPA) de Emilia Romagna, Liguria, Lombardia, Marche, Piemonte, Sardegna, Trentino, Alto Adige, Veneto, Calabria, Basilicata, Puglia; el *OSservatorio Meteorologico Regionale (OSMER)* del ARPA de Friuli Venezia Giulia; el *Laboratorio di Monitoraggio e Modellistica Ambientale della Toscana (LaMMA)*; el *Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano (SIAS)*, el *Servizio della Regione Valle d'Aosta*. Los servicios privados que han participado a la investigación son: *Centro di Ricerca, Sviluppo e Studi Superiori in Sardegna (CRS4)*, *3BMeteo* (Bergamo, www.3bmeteo.com), *MeteoRomagna* (Ravenna, competence center di Epsom Meteo, www.meteoromagna.com), *Centro Meteo* (Lazio, www.centrometeo.com) y *Umbria Meteo* (con sede in provincia di Perugia, www.umbriameteo.com).

Participaron usuarios expertos de *Protezione Civile* de Sardegna, Emilia Romagna, Liguria, el *Ufficio Valanghe* y el *Dipartimento difesa del suolo e risorse idriche* de Valle d'Aosta, la *Compagnia Valdostana delle Acque (CVA)* y usuarios expertos no meteorólogos de ARPA Sardegna, ARPA Veneto, ARPA Puglia, LaMMA Toscana, OSMER Friuli Venezia Giulia, ARPA Marche, ARPA Trentino, ARPA Lombardia, ARPA Calabria.