

Pronóstico de rayos mediante el modelo no hidrostático HARMONIE

José A. Sosa Cardo⁽¹⁾, Javier Calvo Sánchez, Francisco Martín León.
Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), ⁽¹⁾jsosac@aemet.es

Resumen.

Para que se desarrolle actividad eléctrica en la troposfera es necesario un mecanismo que sea capaz de separar las cargas eléctricas, de forma que se consiga generar un campo eléctrico suficiente. Uno de los mecanismos, quizá el dominante, es el mecanismo denominado “graupel-ice”, que está estrechamente relacionado con la presencia de fase sólida en nubes convectivas, en concreto con el granizo blando o nieve granulada (graupel) y pequeños cristales de hielo.

Los nuevos modelos no hidrostáticos, como HARMONIE de AEMET, son capaces de resolver la convección profunda. Una de las variables que presenta una mayor correlación con la actividad eléctrica es el graupel integrado en la vertical. En este estudio se pretende encontrar una relación entre las distintas variables relacionadas con el graupel pronosticadas por HARMONIE y la intensidad de la actividad eléctrica observada con la red de detección de rayos de AEMET, que pueda servir como herramienta de pronóstico, utilizando los campos ofrecidos por el modelo.

Introducción.

Debido al peligro potencial que puede suponer la actividad eléctrica en la atmósfera para los bienes y las personas, la posibilidad de pronosticar dicho fenómeno y su intensidad pueden ser de interés.

Con el desarrollo de los nuevos modelos mesoescalares no hidrostáticos, que son capaces de permitir explícitamente la convección profunda y que cuentan con una microfísica compleja¹, se abre una nueva vía para el pronóstico de la actividad eléctrica².

En el Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), Roos de Wit, Sander Tijm y Aaron van Delden (IMAU) han desarrollado un modelo estadístico que relaciona la cantidad de graupel pronosticada mediante el modelo HARMONIE, con la actividad eléctrica observada por la red de detección del KNMI³. También Meteo-France ha llegado a la conclusión de que una de las variables que mejor correlaciona con la actividad eléctrica es el graupel integrado en la vertical.

Debido a las peculiaridades de la red de detección de descargas de AEMET, calibrada para detectar sólo descargas nube-tierra y las características de la convección en nuestra zona de interés, se hace necesario desarrollar un nuevo modelo para diagnosticar la actividad eléctrica.

Para encontrar una relación entre campos del modelo y observaciones, se han comparado los valores de densidad de la actividad eléctrica nube-tierra en una hora en zonas donde se ha registrado localmente más actividad y se ha comparado con los valores de los campos de graupel ofrecidos por HARMONIE en las zonas más activas, y se han emparejado si coincidían en una determinada ventana espacio-temporal. El objetivo es encontrar la relación estadística que mejor represente la actividad eléctrica teniendo en cuenta que puede haber errores espaciales y temporales en la predicción de los procesos convectivos.

Se ha encontrado una mejor relación funcional utilizando los máximos en un área alrededor del punto de grid de las variables relacionadas con el graupel, en vez de utilizar el promedio de las variables en esa área.

Se han analizado también los pronósticos realizados con el modelo estadístico desarrollado, en un periodo de tiempo independiente al usado para la calibración, y se comparan sus correspondientes scores.

1

«The Meso-NH Atmospheric Simulation System: Scientific Documentation Part III: Physics».

2

McCaul et al., «Forecasting Lightning Threat Using Cloud-Resolving Model Simulations».

3

Roos de Wit, Sander Tijm, y Aarnout van Delden, «Lightning intensity prediction using the HARMONIE model».

Metodología.

Los campos del modelo relacionados con el graupel analizados son:

- graupel instantáneo integrado en la vertical (ngiv) (kg/m^3).
- graupel instantáneo integrado en la vertical a partir de -5°C (ngiv-5) (kg/m^2).
- graupel instantáneo integrado en la vertical a partir de -10°C (ngiv-10) (kg/m^2).
- graupel integrado en la vertical máximo en una hora (ngivmax) (kg/m^2).

Estos campos, por cada pasada del modelo se disponen para intervalos de una hora. Es decir para una pasada del modelo correspondiente a las 00 UTC se disponen de campos correspondientes a las 00 UTC, 01 UTC, 02 UTC, etc, hasta el rango de pronóstico disponible.

Por otra parte, el sistema de detección de descargas eléctricas de AEMET está compuesto por 14 detectores sobre territorio peninsular español, 1 en Baleares y 5 en Canarias. Adicionalmente, Météo-France aporta los datos de 10 de sus detectores y el Instituto Meteorológico de Portugal de 4.

El sistema es capaz de detectar los rayos con:

- una precisión en la localización del rayo del orden del hectómetro.
- una eficacia de detección del orden del 90% del total de rayos.

Debido a que se ingestan datos provenientes de otras redes, para los cálculos sólo se han tenido en cuenta los del tipo nube-tierra, que los son los que la red de AEMET puede discriminar.

Con idea de no tener en cuenta para el ajuste las zonas donde la red de detección observa peor, sólo se han manejado las descargas localizadas dentro de la zona del interior de la España peninsular que se aprecia en la figura 1.

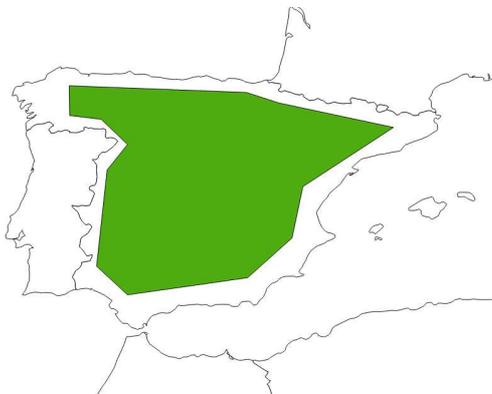


Fig. 1.- Zona geográfica utilizada para seleccionar las descargas utilizadas en los distintos ajustes.

Como la resolución temporal disponible de los campos del modelo es de una hora, se obtienen integraciones temporales de una hora centradas en cada hora correspondiente al campo pronosticado por el modelo. Es decir para las 01 UTC, se integran temporalmente las observaciones desde las 00:30 UTC hasta las 01:30 UTC.

Debido a las características de la convección, los errores espaciales y temporales en la predicción de las estructuras convectivas pueden ser grandes, o se puede no simular alguna estructura observada o simular una que no se observa, por lo que la tarea de identificar qué estructuras simuladas se corresponderían con qué estructuras observadas no es trivial.

Roos de Wit et al. afrontan el problema utilizando un número pequeño de situaciones seleccionadas e identificando 'manualmente' observaciones y valores pronosticados y corrigiendo subjetivamente los desfases espacio-temporales, lo que obliga a que el número de situaciones empleadas para el ajuste del modelo estadístico tenga que ser pequeño.

Para este trabajo en cambio se han utilizado todas las situaciones disponibles durante el periodo comprendido entre el 1 de junio de 2013 y el 30 de septiembre de 2013. Asignándose los pares observación-variable de pronóstico de forma automatizada.

Para generar los pares de datos, se han localizado los valores más intensos de los máximos locales de densidad de rayos observados y por otra parte los máximos locales más intensos de densidad de graupel integrado en la vertical de las distintas variables. Se supondrá una correspondencia entre evento observado y simulado si ambos coinciden en una ventana espacio-temporal determinada.

Para cada momento se han identificado las posiciones de los máximos locales de densidad de rayos (rayos/km^2), que se han calculado sobre una base de una cuadrícula de 13×13 puntos de rejilla ($32.5 \times 32.5 \text{ km}$), centrada en cada punto de la rejilla utilizada por el modelo.

Paralelamente se han identificado también los máximos locales de las variables locales para cada pasada y cada momento. Se calculan para cada uno de los máximos locales obtenidos los valores máximos de dicha variable y el promedio espacial de dicha variable dentro de una cuadrícula de 13×13 puntos de rejilla.

Para cada momento, se toman los 10 valores más intensos de densidad de rayos observados. Se empareja por un lado el valor más intenso con el valor más intenso del máximo local de la variable de graupel (kg/m^2) modelizada, que está a una distancia

menor a una determinada al punto donde está localizado el máximo observado, y dentro de un intervalo de tiempo determinado. Paralelamente se hace la operación similar emparejando el valor del máximo de densidad local observada con el valor promedio espacial en una cuadrícula de 13x13 puntos de rejilla centrada en el máximo local modelizado.

Se toma el siguiente máximo local observado y se comprueba si está del máximo observado anterior a una distancia mayor al umbral espacial seleccionado. Si es así se repite la operación anterior. Se procede de la misma forma hasta agotar los 10 máximos locales observados más intensos.

Una vez establecidas las conexiones entre observaciones y simulaciones, y representadas gráficamente, se puede observar una más clara dependencia en el caso de observaciones frente a máximos que en el caso de observaciones frente a promedios. En las figuras 2 a 9 se pueden observar las distintas relaciones con pares de puntos asignados según una ventana espacial de 500 km y una ventana temporal de 7 horas entorno a cada punto.

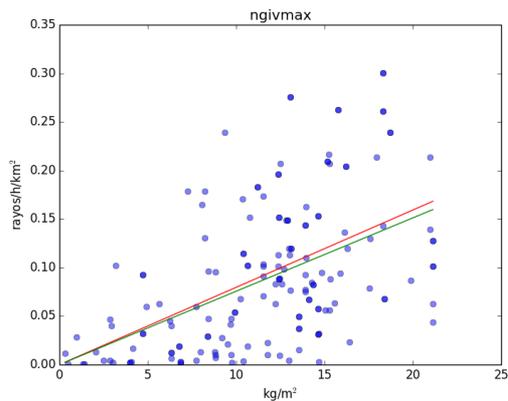


Fig. 2.- Relación entre el ngivmax promedio espacial sobre una cuadrícula de 13x13 puntos de rejilla y la densidad de rayos por hora.

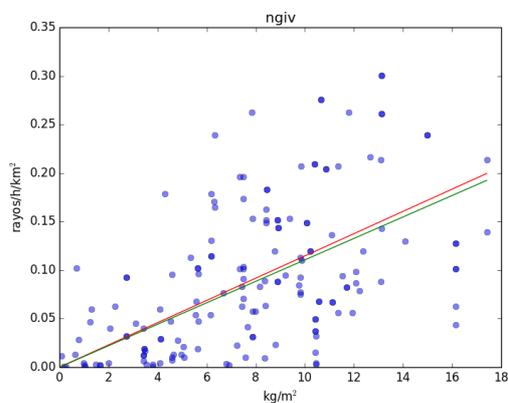


Fig. 3.- Relación entre el ngiv promedio espacial sobre una cuadrícula de 13x13 puntos de rejilla y la densidad de rayos por hora.

una cuadrícula de 13x13 puntos de rejilla y la densidad de rayos por hora.

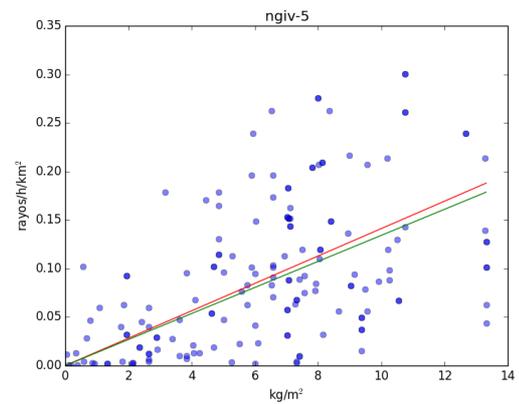


Fig. 4.- Relación entre el ngiv-5 promedio espacial sobre una cuadrícula de 13x13 puntos de rejilla y la densidad de rayos por hora.

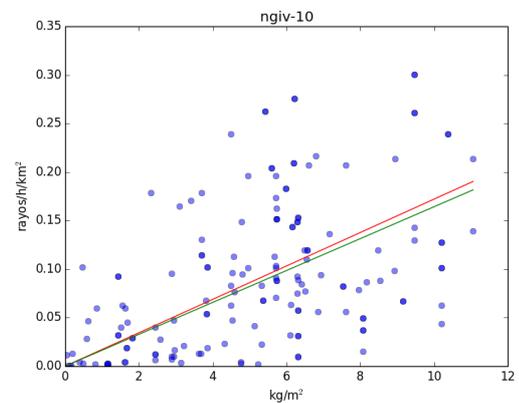


Fig. 5.- Relación entre el ngiv-10 promedio espacial sobre una cuadrícula de 13x13 puntos de rejilla y la densidad de rayos por hora.

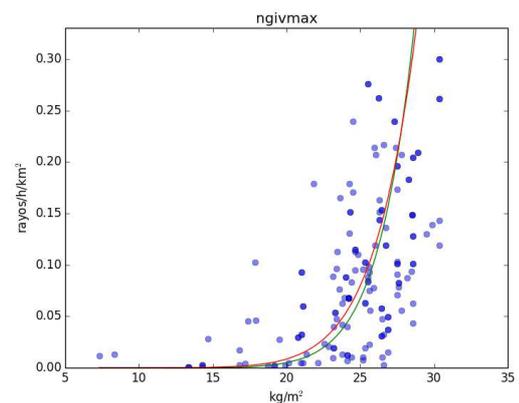


Fig. 6.- Relación entre el ngivmax máximo local y densidad de rayos por hora.

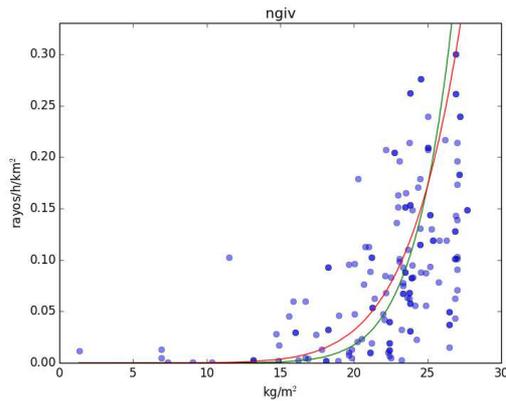


Fig. 7.- Relación entre el ngiv máximo local y densidad de rayos por hora.

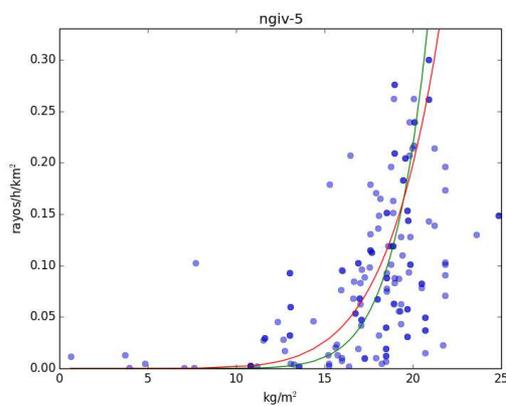


Fig. 8.- Relación entre el ngiv-5 máximo local y densidad de rayos por hora.

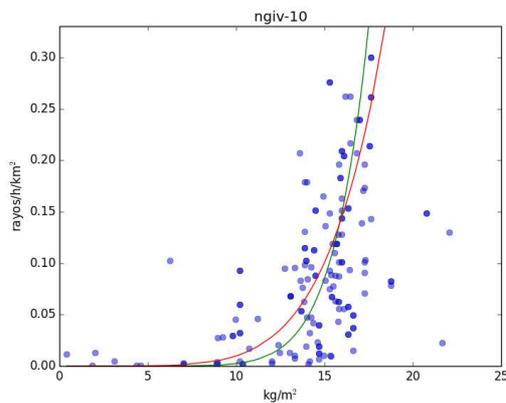


Fig. 9.- Relación entre el ngiv-10 máximo local y densidad de rayos por hora.

Ajuste.

Se ha intentado buscar una relación, entre la densidad observada y el valor de graupel máximo local, del tipo:

$$X=aY^b \tag{1}$$

Donde Y representaría la densidad de la intensidad de rayos (rayos/km²/hora) y X representaría el valor de densidad espacial del graupel integrado en la vertical correspondiente (kg/m²).

Para ello se ha ajustado una recta en el dominio logarítmico mediante regresión lineal (Figura 10).

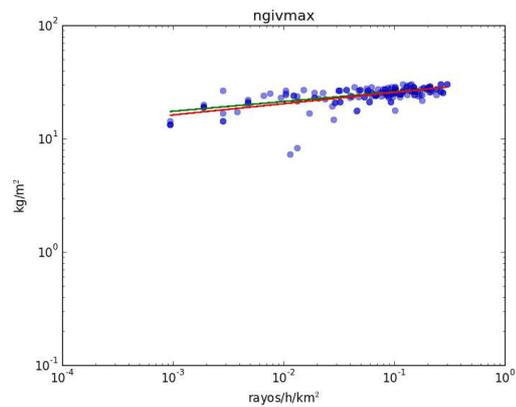


Fig. 10.- Relación entre ngivmax y densidad de rayos por hora, para una ventana espacial de radio 500km y una ventana temporal de ±7 horas.

Obteniéndose un mayor coeficiente de regresión para la variable ngivmax, utilizando varias ventanas espacio-temporales (Tablas 1 y 2).

$\Delta d=300\text{km} \Delta t=5\text{h}$

Variable	log(a)	b	r ²
ngiv	1.6233	0.2801	0.214
ngiv-5	1.4998	0.2692	0.208
ngiv-10	1.4588	0.3079	0.256
ngivmax	1.6151	0.2207	0.297

Tabla 1.- Parámetros de ajuste para una ventana espacial de radio 300km y una ventana temporal de ±5 horas (d300t5)

$\Delta d=500\text{km} \Delta t=7\text{h}$

Variable	log(a)	b	r ²
ngiv	1.4987	0.1319	0.304
ngiv-5	1.4003	0.1412	0.260
ngiv-10	1.3503	0.1747	0.295
ngivmax	1.5072	0.0994	0.417

Tabla 2.- Parámetros de ajuste para una ventana espacial de radio 500km y una ventana temporal de ±7 horas (d500t7)

Evaluación del modelo.

Para comprobar los distintos ajustes se ha seleccionado un conjunto de datos independiente: el

periodo comprendido entre el 1 de octubre de 2013 y el 31 de diciembre de 2013.

Utilizando ese conjunto de datos de observaciones y los pronósticos, utilizando la variable *ngivmax* y el ajuste *d300t5*, e integrando en entornos de ± 1 horas, en el área de la TMA de Barcelona, se ha obtenido el scatterplot de la Figura 11.

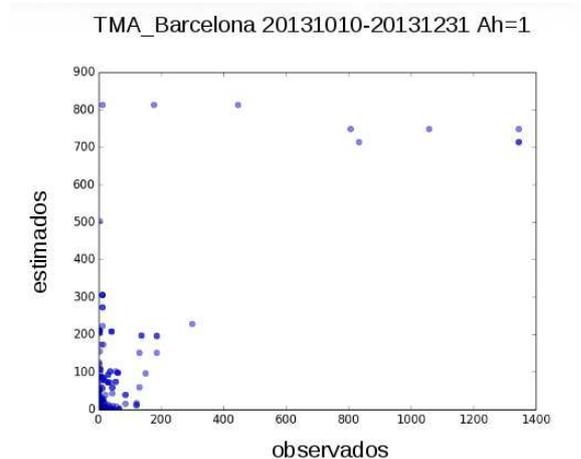


Fig 11.- Scatterplot de pronósticos frente a observaciones en la “Terminal Maneuvering Area” (TMA) de Barcelona para el periodo octubre, noviembre y diciembre de 2013.

Puede observarse una relativa falta de puntos por debajo de la diagonal, indicando que cuando se observa actividad, en general se pronostica ésta. Se observa también cierta dispersión por encima de la diagonal, indicando que cuando ésta se pronostica no siempre se observa, al menos con la intensidad pronosticada.

Para esa misma área, ajuste y ventana temporal se ha construido una tabla de contingencia dicotómica, en la que se considera que se pronostica el evento si el valor pronosticado supera un cierto umbral, en el caso siguiente 0.05 (Tabla 3).

		Observado	
		si	no
Pronosticado	si	184	162
	no	53	1786

Tabla 3.- Tabla de contingencia para la TMA de Barcelona, una ventana horaria de ± 1 horas y un ajuste *d300t5*.

Con los datos de la tabla 3 se pueden calcular los siguientes scores, de acuerdo al Apéndice 1:

- PC=0.90
- H=0.78
- FAR=0.47
- F=0.08

Con idea de comparar como se comportan los ajustes calculados con cada una de las variables

relacionadas con el graupel, y el ajuste según el método propuesto por Roos de Wit et al. (*e_knmi*), se presenta la tabla 4, donde el umbral usado para la determinación de si se pronostica o no el evento es de 0.05 y en el caso de *e_knmi* de 0.5, la ventana de integración es de ± 3 horas, y el área espacial utilizada, la TMA de Barcelona.

	PC	H	F	FAR	TSS	HSS	FBI
<i>ngivmax</i>	0,89	0,8	0,10	0,39	0,7	0,62	1,32
<i>ngiv</i>	0,87	0,84	0,12	0,43	0,73	0,61	1,47
<i>ngiv-5</i>	0,9	0,74	0,07	0,34	0,68	0,64	1,13
<i>ngiv-10</i>	0,9	0,76	0,08	0,36	0,69	0,63	1,19
<i>e_knmi</i>	0,86	0,86	0,18	0,52	0,69	0,51	1,80

Tabla 4.- Scores de las distintas variables para la TMA de Barcelona, con una ventana horaria de ± 3 horas.

Como se observa en la tabla 4, para un PC y H similar los scores, relacionados con las falsas alarmas, obtenidos con los ajustes utilizando *ngivmax*, *ngiv*, *ngiv-5* y *ngiv-10* son mejores que los obtenidos utilizando el ajuste *e_knmi*, lo mismo ocurre con HSS y FBI, siendo TSS mejor en todos los casos menos en *ngiv-5*. Puede observarse también una menor predisposición de *ngiv-5* y *ngiv-10* a las falsas alarmas, pero a costa de un peor H (hit rate)

Con idea de verificar si es posible determinar el orden de magnitud del número de rayos ocurridos en un área determinada y en un intervalo de tiempo determinado, se ha construido también una tabla multicategórica (Tabla 6).

Las distintas categorías se han determinado según los intervalos propuestos en la Tabla 5.

Categoría	Número de rayos
0	0
1	1 a 10
2	10 a 100
3	100 a 1000
4	1000 a 10000
...	...

Tabla 5.- Categorías de intensidad de actividad eléctrica.

		Observado				
		0	1	2	3	4
Pronosticado	0	557	23	0	0	0
	1	56	25	11	0	0
	2	4	12	18	2	0

	3	0	5	11	6	2
	4	0	0	0	0	0

Tabla 6.- Tabla multicatagórica para la TMA de Barcelona y una ventana horaria de ± 3 horas y un ajuste d300t5.

En la tabla 6 puede observarse como los valores más altos tienden a colocarse en la diagonal, con lo que la posibilidad de pronosticar el orden de magnitud del numero de rayos para una determinada zona y ventana temporal parecen razonables.

Conclusiones.

Se propone una relación entre el graupel integrado en la vertical y la actividad eléctrica que mejora las predicciones de la actividad eléctrica, con respecto a las obtenidas en un trabajo previo (Roos de Wit et al, 2009). Además los ajustes propuestos permiten estimar el orden de magnitud de la actividad eléctrica nube-tierra que se observa según la red de detección de descargas de AEMET, lo que no es posible con el ajuste propuesto por Roos de Wit et al. que está calibrado para la red de detección de descargas del KNMI, con distintas características que la red de AEMET.

Tanto la posibilidad de pronosticar la ocurrencia del evento como la de estimar el orden de magnitud del mismo, podrían ser de utilidad tanto en la labor diaria de los predictores operativos, como para otros usuarios (aeronáuticos, militares, energía, ocio, eventos al aire libre, etc).

Referencias.

- Dieter R. Poelman. «On the Science of Lightning: An Overview». Royal Meteorological Institute of Belgium, 2010. http://www.meteo.be/meteo/download/en/4549355/pdf/rmi_scpub-1389-2.pdf.
- JWGFVR. *Recommendation on verification of precipitation forecasts*. WMO/TD report, no.1485 WWRP 2009-1, 2009.
- McCaul, Eugene W., Steven J. Goodman, Katherine M. LaCasse, y Daniel J. Cecil. «Forecasting Lightning Threat Using Cloud-Resolving Model Simulations». *Weather and Forecasting* 24, n.º 3 (junio de 2009): 709-29. doi:10.1175/2008WAF2222152.1.
- Nurmi. *Recommendations on the verification of local weather forecasts*. ECMWF Technical Memorandum, no. 430, 2003.
- Roos de Wit, Sander Tijm, y Aarnout van Delden. «Lightning intensity prediction using the HARMONIE model», 2009.
- Saunders, Clive. «Charge Separation Mechanisms in Clouds». *Space Science Reviews* 137, n.º 1-4 (junio de 2008): 335-53. doi:10.1007/s11214-008-9345-0.
- «The Meso-NH Atmospheric Simulation System: Scientific Documentation Part III: Physics», 19 de enero de 2009. <http://mesonh.aero.obs-mip.fr/mesonh/>.
- Wilks. *Statistical methods in the atmospheric sciences*, ch. 7. Academic Press, 2005.

Apéndice 1. Verificación de predictandos categóricos.

Tabla de contingencia:

		Observado	
		si	no
Pronosticado	si	a	b
	no	c	d

Siendo 'a' el número de ocurrencias del evento en cuestión observado y pronosticado, 'b' el número de no observados y pronosticados, 'c' el número de observados y no pronosticados y 'd' el número de no observados y no pronosticados.

Proportion Correct

$$PC = (a+d)/(a+b+c+d)$$

Mejor cuanto más cercano a uno.

Hit Rate, Probability Of Detection, Prefigurance

$$H = a/(a+c)$$

Mejor cuanto más cercano a uno.

False Alarm Ratio

$$FAR = b/(a+b)$$

Mejor cuanto más cercano a cero.

False Alarm Rate, Probability of False Detection

$$F = b/(b+d)$$

Mejor cuanto más cercano a cero.

Frequency Bias Index (Bias)

$$FBI = B = (a + b)/(a + c)$$

Si $FBI > 1$ sobrepredicción.

Si $FBI < 1$ infrapredicción.

Hanssen & Kuipper's Skill Score, True Skill Statistic (TSS), Pierce's Skill Score

$$KSS = TSS = H - F = (ad - bc) / [(a + c)(b + d)]$$

Mejor cuanto más cercano a 1.

Heidke Skill Score

$$HSS = 2(ad - bc) / [(a + c)(c + d) + (a + b)(b + d)]$$

Mejor cuanto más cercano a 1.