

# Un modelo de verificación de pronósticos de precipitación.

Davydova-Belitskaya, V.<sup>1</sup>, Rosario de la Cruz, J. G., Rodríguez-López, O

*Fecha de recepción: 07 de agosto de 2016 – Fecha de aprobación: 31 de octubre de 2016*

## RESUMEN

La necesidad de conocer el proceso para determinar la calidad de previsiones de precipitación máxima emitidas por los servicios meteorológicos a través de boletines diarios de información, ha llevado a desarrollar un sistema de verificación con su respectiva aplicación sobre la variable de precipitación, basada en los pronósticos categóricos y probabilísticos que emite el Servicio Meteorológico Nacional de México, centrándose en aplicar varios índices de calidad de pronósticos utilizados comúnmente en el campo de la meteorología, y de acuerdo a las recomendaciones establecidas por la Organización Meteorológica Mundial siendo un proceso totalmente automatizado y objetivo.

Se construyó un modelo de prototipo como el paradigma que apoye en el proceso de desarrollo evolutivo del sistema de calidad en previsión del tiempo. A partir de este proceso objetivo y totalmente automatizado, se muestran resultados de calidad de pronósticos de lluvia máxima en 24 horas para México en general y el Distrito Federal, por medio de los índices de verificación cualitativa y cuantitativa en busca de vertientes para diagnosticar y mejorar la calidad de servicios de previsión. Los resultados obtenidos muestran una pobre calidad de predicción con tendencia de sobre estimar la intensidad de precipitación tipo *A*, *B*, *D* y *E*, así como subestimar precipitación tipo *C* y lluvias torrenciales (*F*).

**Palabras claves:** Intensidad de precipitación, pronóstico, verificación objetiva, México.

## A model of precipitation forecast verification.

### ABSTRACT

The need to know the process to determine the quality of the expected maximum precipitation distributed by the meteorological services through daily bulletins of information, has led to the development of a verification system with their respective implementation on the precipitation variable, based on the categorical and probabilistic forecasts that issue the National Meteorological Service of Mexico, focusing on quality indices apply various forecasts that are commonly used in the field of meteorology, and according to the recommendations established by the World Meteorological Organization being a fully automated process and objective.

A prototype model was built as the paradigm that support in the process of evolutionary development of the quality system in weather forecast. From this objective and fully automated process is shown results of quality of the maximum daily rain predictions for Mexico and the Federal District mainly by means of the qualitative and quantitative indexes of verification looking for aspects to diagnose and improve the quality of services of forecast. Results obtained show a poor quality of prediction with tendency to overestimate the intensity of the rain category *A*, *B*, *D*, and *E* in addition underestimate precipitation classified as *C* and heavy rains (*F*).

**Keywords:** Precipitation intensity, forecast, objective verification, Mexico.

---

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias Ambientales, CUCBA, Universidad de Guadalajara.

Autor de correspondencia: dabv620828@hotmail.com

Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Ing. R.A. Vol. 20, No. 1, 2016.

## INTRODUCCIÓN

¿Qué es un pronóstico del tiempo “bueno” o “malo”?  
¿Cuál es la relación entre la calidad y el valor de un pronóstico? Para contestar a estas preguntas, es esencial la evaluación de los pronósticos, a fin de mejorar su calidad y valor. También, es un tema de crucial importancia para cualquier previsor que nunca interactúa con sus usuarios, o si las relaciones con los clientes dependen de la capacidad de transmitir información útil sobre el pronóstico (Brooks 2013).

La verificación de pronósticos es el proceso y la práctica para determinar la calidad de las previsiones, y representa un componente esencial de cualquier sistema de predicción científica. De tal manera que, la verificación de pronósticos sirve para muchos propósitos importantes. Entre éstos se incluyen, la evaluación del estado de arte de pronósticos meteorológicos y climáticos, las tendencias más recientes en calidad de previsión, y por último, los propios pronósticos así como proporcionar a los usuarios la información necesaria para hacer un uso eficaz de la previsión (Murphy and Winkler 1987). Es decir, de acuerdo a la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés) (2009), las razones más importantes para verificar pronósticos son: monitorear la calidad de previsión, mejorar la calidad de previsión y comparar la calidad de diferentes sistemas o modelos de pronosticación.

Sin embargo, este tema había sido muy controversial durante la primera mitad del Siglo XX. Existen muchas razones por las cuales este problema había sido tan perplejo para meteorólogos, pero parece que una de las dificultades más importantes, fue llegar a un acuerdo con la especificación de escala de bondad en las previsiones meteorológicas, en donde debemos distinguir los siguientes tipos (Murphy 1993):

- consistencia, el grado en el que el pronóstico corresponde al mejor juicio del meteorólogo sobre la situación, basada sobre su conocimiento,
- calidad, el grado de correspondencia entre lo pronosticado y realmente observado,
- valor, el grado en el que el pronóstico le ayuda a tomar decisiones para lograr un aumento económico y otros beneficios.

Se han propuesto numerosos sistemas de evaluación objetiva, algunos de los cuales han sugerido la previsión probabilística de eventos meteorológicos, sin embargo, el previsor a menudo puede encontrarse en la posición de decidir no hacer caso al sistema de verificación o dejarle hacer el pronóstico evadiendo este sistema (Brier 1950; Doswell-III et al. 1990; Murphy 1991).

Un intenso desarrollo de pronósticos meteorológicos numéricos ha impulsado establecer su verificación como norma para definir la eficiencia de éstos, así como la veracidad de información que generan para el uso en oficinas de previsión. Por lo anterior, a finales de los años ochenta la Organización Meteorológica Mundial (OMM) inició el Programa de Investigación en Predicción Meteorológica a Corto y Mediano Plazo. Para facilitar los beneficios de la modelación numérica del tiempo, especialmente la interpretación de sus productos y su verificación, la OMM también promovió el curso denominado “Taller de entrenamiento sobre la interpretación de productos de Pronósticos Meteorológicos Numéricos en términos de fenómenos meteorológicos locales y su verificación” que se realizó en Wageningen, Holanda (Glahn et al. 1991).

México aceptó el reto de mejorar sus servicios de predicción mediante la participación del Servicio Meteorológico Nacional en este Taller. No obstante, hasta la fecha en la Institución no se ha promovido el desarrollo del sistema de interpretación estadística de salidas de pronósticos meteorológicos numéricos, ni tampoco el sistema de verificación de sus productos. La evaluación de pronósticos meteorológicos reside en la oportunidad de identificar sus fortalezas, debilidades para tener la capacidad de mejorarlos. Esta necesidad de conocer la confianza del pronóstico nos ha llevado a desarrollar un sistema de evaluación objetiva utilizando métodos y métricas de verificación para precipitación máxima de la Organización Mundial de Meteorología y con ello, conocer la habilidad de los pronosticadores meteorológicos que se encargan de la elaboración de los boletines utilizando información de diferentes modelos numéricos.

El presente trabajo se centra en describir, entender los beneficios y aplicar varios índices de *calidad* de pronósticos que se utilizan comúnmente en el campo de la meteorología y de acuerdo a las recomendaciones que establece la Organización Meteorológica Mundial (WMO 2010) mediante un proceso objetivo y totalmente automatizado sin intervenciones de meteorólogos-previadores. Este ejercicio se realiza basándose en los pronósticos categórico y probabilístico del parámetro de interés, los cuales fueron emitidos por el Servicio Meteorológico Nacional de México, y que están disponibles mediante el sitio web oficial de la Institución.

## METODOLOGÍA GENERAL.

### *Revisión de métodos de verificación*

Hay muchos tipos de pronósticos, para cada uno de

éstos aplican diferentes métodos de verificación. El Cuadro 1 incluye una forma de distinguir los pronósticos junto con los métodos de verificación que son apropiados para ese tipo de previsión (WMO 2009; UCAR 2011).

**Metodología para la verificación de pronósticos determinísticos**

A continuación se discuten seis índices de verificación que sugieren Jolliffe and Stephenson (2003) para analizar la *calidad* de los pronósticos determinísticos. Para calcular los índices de interés se requiere organizar la información pronosticada y observada mediante frecuencias absolutas agrupadas en forma de Tabla de contingencia como se muestra en el Cuadro 2.

**Cuadro 1.** Algunos tipos de pronósticos que se emiten y s métodos potenciales de verificación.

Tipo de pronóstico	Ejemplo	Métodos de verificación
Determinístico o de respuesta única	Pronóstico cuantitativo de precipitación, velocidad de viento, etc.	Visual, dicotómico, multicategoría, continuo, espacial
Probabilístico	Probabilidad de precipitación o de granizo, tornado, etc.	Visual, probabilístico, por conjuntos
Cualitativo	Perspectiva de génesis de un ciclón tropical	Visual, dicotómico, multicategoría

**Cuadro 2.** Estructura de la Tabla de contingencia sugerida para la verificación de pronósticos determinísticos.

		OBSERVADO		TOTAL
		SI	NO	
PRONOSTICADO	SI	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a + b</i>
	NO	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>c + d</i>
		<i>a + c</i>	<i>b + d</i>	<i>n = a + b + c + d</i>

En donde:

- *a* es un evento observado y pronosticado, también conocido como “aciertos”,
- *b* es un evento no observado pero pronosticado o un evento tipo “falsa alarma”,
- *c* es un evento observado pero no pronosticado, es decir un evento “perdido” o error,
- *d* es un evento no observado y no pronosticado o un evento “negativo correcto”.

A partir de estos valores (*a*, *b*, *c* y *d*) se pueden calcular los siguientes índices para evaluar la calidad de pronósticos categóricos.

**Índices de calidad**

El índice más común es el Porcentaje Correcto (*PC*), el cual es el porcentaje de pronósticos que fueron correctos, es decir, la suma de aciertos (*a*) y negativos correctos (*d*) con respecto a todos los pronósticos emitidos (Ecuación 1).

$$PC = \left(\frac{a+d}{n}\right) \dots(1)$$

Este indicador es muy general, su único uso es poco recomendable porque debe aplicarse en conjunto con los indicadores que muestran propiedades cualitativas y cuantitativas de pronósticos vs observaciones. Normalmente oscila entre 0 y 1. Cuando *PC* es igual a 1, el porcentaje de pronósticos correctos es igual al 100%; mientras que cero muestra nula cantidad de pronósticos correctos.

Uno de los índices muy importantes conocido como Tasa de Aciertos (*HR*, por sus siglas en inglés) es la probabilidad de Detección del Evento de Interés (*POD*, por sus siglas en inglés) (Ecuación 2).

$$HR = POD = \left(\frac{a}{a+c}\right) \dots(2)$$

La escala de variación del índice *HR* o *POD* fluctúa en el rango de 0 a 1. Cuando el índice es igual a 1, la probabilidad de detección de los eventos de interés es igual a 100%; mientras que un índice igual a cero, muestra nula probabilidad de detección. Es decir, mientras más se acerca el índice *HR* o *POD* a 1, mayor es la probabilidad de detección de eventos de interés.

Otro índice de importancia conocido como la Proporción de Falsa Alarma (*FAR*, por sus siglas en inglés) es la fracción de eventos pronosticados y no observados, se calcula mediante la Ecuación 3:

$$FAR = \frac{b}{a+b} \dots(3)$$

Éste oscila entre 0 y 1, en donde el valor igual a 0 muestra que no se dieron los pronósticos y realmente no se presentó ni un evento de interés, es decir una situación perfecta. Cuando el valor de *FAR* es igual a 1, se da un 100% de pronósticos erróneos, o cuando no se registra ni un evento observado. Mientras más pequeño es el índice *FAR*, es menor el número de pronósticos erróneos emitidos.

El índice denominado Sesgo o *BIAS* (*B*, por sus siglas en inglés) compara el número de veces o frecuencia de un evento que fue pronosticado con el número de veces o frecuencia del evento que realmente se observó. Es decir este indicador nos proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar la variable de interés. El cálculo de este índice de verificación se realiza mediante la Ecuación 4.

$$B = \frac{a+b}{a+c} \dots(4)$$

Aquí,

- *B* =1 el número de eventos pronosticados es igual al número de eventos observados,
- *B* > 1 el número de eventos pronosticados es por arriba del número de eventos observados (sobre pronosticación),
- *B* < 1 el número de eventos pronosticados es por debajo del número de eventos observados (sub pronosticación).
- *B*=0 no se observaron eventos de interés, mientras fueron pronosticados (sobre pronosticación)

El Total de Amenazas (*TS*, por sus siglas en inglés) o el Índice Crítico de Éxito (*CSI*, por sus siglas en

inglés) combinan la tasa de aciertos (*HR* o *POD*) con la fracción de falsa alarma (*FAR*) en un total para eventos de baja frecuencia (Ecuación 5).

$$TS = CSI = \frac{a}{a+b+c} \dots(5)$$

Este índice oscila entre 0 y 1. Cuando *TS* = 0 no se pronosticaron los eventos extremos o de baja frecuencia, mientras *TS* = 1 muestra una perfecta forma pronosticar eventos de baja frecuencia (eventos conocidos también como extremos o atípicos).

El índice de Heidke Skill Score (*HSS*) es la medida de referencia o la proporción correcta que se espera de un número de pronósticos, los cuales estadísticamente son independientes de las observaciones (Ecuación 6).

$$HSS = \frac{2(ad-bc)}{(a+c)(c+d)+(a+b)(b+d)} \dots(6)$$

En donde, cuando *HSS* es igual a

- 1 es habilidad de pronosticar perfecto,
- 0 significa que no se tiene la habilidad de pronosticar eventos de interés,
- < 0 la habilidad de los pronósticos es peor que pronósticos de referencia que se calcula de acuerdo a la ecuación 7:

$$A_{ref} = P_{YES} + P_{NO} \dots(7)$$

Aquí,

$$P_{YES} = \frac{(a+b)(a+c)}{n^2} \dots(8)$$

$$P_{NO} = \frac{(b+d)(c+d)}{n^2} \dots(9)$$

#### **Metodología para la verificación de pronósticos probabilísticos**

Para evaluar la calidad de previsión probabilística existen varios métodos, uno de los cuales es conocido como el índice de acierto de Brier (Brier Skill Score o *BSS*, por sus siglas en inglés) que está definido con la Ecuación 10 (Brier 1950):

$$BSS = 1 - \frac{BR}{BR_{climatología}} \dots(10)$$

En donde *BR* (puntuación de Brier) del pronóstico se compara con la de referencia, en este caso la de climatología, que se calcula de acuerdo a la Ecuación 11:

$$BR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2 \dots(11)$$

Aquí,  $p_i$  es la probabilidad pronosticada, mientras  $o_i$  es la probabilidad del evento observado: cuando el evento se da es igual a 1 y cuando no se observa es igual a 0. El  $BR$  climatológico se calcula reemplazando la probabilidad pronosticada con la probabilidad climatológica (Murphy 1973; Matsudo et al. 2013). A partir de la Ecuación 11 se deduce que el valor óptimo de  $BR$  es igual a 0, por lo anterior el valor perfecto de  $BSS$  es 1. Cuando el valor de  $BSS$  es positivo, indica que la calidad del pronóstico es mejor que la climatología.

Desarrollo del sistema de verificación automatizado y objetivo.

Para automatizar un proceso de verificación objetiva de pronósticos se llevaron a cabo entrevistas con el personal del SMN mediante un marco de investigación basado en el campo experimental exploratorio, tratando de identificar aspectos, técnicas y herramientas que se utilizan dentro del proceso de verificación (Rosario De La Cruz 2016). Además, se ha seleccionado el modelo de prototipo (Sommerville 2005) como el paradigma que auxilie en el proceso de desarrollo evolutivo. Esto con el fin de tener una participación más directa del cliente en la construcción del software requerido, para encontrar los requisitos que el cliente necesita y que sean implementados dentro del sistema, concibiendo finalmente un diseño rápido de un prototipo que es evaluado por el cliente y mejorado tras recibir una retroalimentación que se integra en la versión final.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la actualidad es indiscutible la utilidad de los pronósticos de precipitación cuantitativa o la intensidad de lluvia, y otros parámetros tales como la precipitación máxima a escala regional a pesar de que es uno de los parámetros meteorológicos más complejos para modelar (Murphy 1991). En un principio, los pronósticos de lluvia fueron acotados siendo variable binomial, es decir si habrá evento de

“lluvia” o “no lluvia”, además, el pronóstico de precipitación normalmente se ofrecía en términos de probabilidad. Sin embargo, ante los impactos devastadores de lluvias torrenciales y como consecuencia, desbordamientos de ríos e inundaciones, particularmente en regiones con alta densidad poblacional, se descubrió la necesidad de contar con la información que proyectara la posible intensidad o cantidad de lluvia que se espera en un período de tiempo determinado.

Buscando brindar la información de acuerdo a la demanda de los usuarios, en 1992 el Servicio Meteorológico Nacional de México (SMNM) inició la elaboración del pronóstico de intensidad de precipitación en 24 horas clasificando los posibles eventos en siete categorías (Cuadro 3), también generó el reporte de discusión técnica en donde se publican los pronósticos probabilísticos (SPM-SMN 2015).

Este tipo de pronóstico se clasifica como determinístico o de respuesta única, es decir Categoría  $A$ , o clase  $B$ , etc. Entonces, se pueden aplicar varios métodos de verificación incluyendo los análisis visual y multicategorico.

Para facilitar la construcción de índices y su interpretación, se seleccionó el período del 06 al 11 de octubre de 2013 y se descargaron los archivos de los boletines meteorológico general y de discusión técnica del sitio web oficial del SMN, CONAGUA.

### *Caso de estudio 1: Estimación de calidad de previsión a escala nacional*

A partir de la información resumida de los boletines meteorológicos se construyeron las tablas de contingencia multicategoricas para cada Estado y a escala nacional (Cuadro 4).

**Cuadro 3.** Categorización de rangos de precipitación propuesta en el Servicio Meteorológico Nacional del 1992 al 2014.

Clase	Rango	Categoría
1	< 0.1 mm	$SL$ (Sin Lluvia)
2	0.1 - 4.9 mm	$A$ (Lluvia ligera)
3	5.0 - 19.9 mm	$B$ (Lluvia moderada)
4	20.0 - 49.9 mm	$C$ (Lluvia fuerte)
5	50.0 - 69.9 mm	$D$ (Lluvia muy fuerte)
6	70.0 - 149.9 mm	$E$ (Lluvia intensa)

7	≥ 150.0 mm	F (Lluvia torrencial)
---	------------	-----------------------

**Cuadro 4.** Tabla de contingencia multicategórica para la precipitación máxima en 24 horas a escala nacional: del 06 al 11 de octubre de 2013.

Nacional		Observado							
		A	B	C	D	E	F	SL	Tot_P
Pronóstico	A	14	7	1	0	0	0	20	42
	B	6	10	14	2	1	0	11	44
	C	4	8	15	4	0	0	3	34
	D	2	4	10	1	2	1	2	22
	E	0	6	5	2	4	3	2	22
	F	0	0	0	0	0	0	0	0
	SL	1	1	1	0	0	0	25	28
	Tot_O	27	36	46	9	7	4	63	192

Aquí, *Tot\_P* es el total de pronósticos elaborados para cada categoría, mientras *Tot\_O* es el total de observaciones para cada rango de precipitación máxima en 24 horas.

Basándose en la Ecuación 1, se puede calcular el porcentaje correcto (*PC*) de todos los pronósticos realizados para la precipitación máxima en 24 horas más eventos sin lluvias a lo largo del período de evaluación. Para este fin, se suman los valores que se encuentran a lo largo de la diagonal de la Tabla de contingencia multicategórica, y este valor se divide

sobre el total de los pronósticos realizados (Ecuación 12).

$$PC = \frac{14+10+15+1+4+0+25}{192} = 0.36 \dots(12)$$

Para calcular los demás indicadores de calidad de los pronósticos a escala nacional, para el periodo del 06 al 11 de octubre del 2013, la información del Cuadro 4 se desglosó en tablas de contingencia para cada rango de precipitación (Cuadro 5).

**Cuadro 5.** Tablas de contingencia construidas para las siete categorías de lluvia máxima observada vs pronosticada para el período del 06 al 11 de octubre de 2013. Fuente: Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, CONAGUA.

CATEGORÍA A	O	NO	TOT_P
P	14	28	42
NP	13	137	150
TOT_O	27	165	192

CATEGORÍA B	O	NO	TOT_P
P	10	36	46
NP	26	120	146
TOT_O	36	156	192

CATEGORÍA C	O	NO	TOT_P
P	15	19	34
NP	31	127	158
TOT_O	46	146	192

CATEGORÍA D	O	NO	TOT_P
P	1	21	22
NP	8	162	170
TOT_O	9	183	192

CATEGORÍA E	O	NO	TOT_P
P	4	18	22
NP	3	167	170
TOT_O	7	185	192

CATEGORÍA F	O	NO	TOT_P
P	0	0	0
NP	4	188	192
TOT_O	4	188	192

CATEGORÍA SL	O	NO	TOT_P
--------------	---	----	-------

<i>P</i>	25	3	28
<i>NP</i>	38	126	164
<i>TOT_O</i>	63	129	192

Aquí, *O* es el número de veces de precipitación máxima observada y *NO* es el número de veces de lluvia no observada de acuerdo a la categoría de interés. *P* es el número de veces de precipitación máxima pronosticada y *NP* es el número de veces de precipitación máxima no pronosticada de acuerdo a su categoría de interés. Así como *TOT\_O* es el número de veces de precipitación máxima observada y no

observada, y *TOT\_P* es el número de veces de precipitación pronosticada y no pronosticada de acuerdo a la categoría de interés.

En el Cuadro 6 se muestran los índices de calidad de pronósticos elaborados del 06 al 11 de octubre de 2013, basándose en las Ecuaciones 1 – 9.

**Cuadro 6.** Resultados de evaluación de los pronósticos de precipitación máxima a 24 horas emitidos del 06 al 11 de octubre de 2013.

Categoría	Rango	<i>PC</i>	<i>POD</i>	<i>FAR</i>	<i>BIAS</i>	<i>TS o CSI</i>	<i>HSS</i>
<i>A</i>	0.1 - 5 mm	0.786	0.519	0.667	1.556	0.255	0.283
<i>B</i>	5 – 19.9 mm	0.740	0.278	0.783	1.278	0.139	0.042
<i>C</i>	20 - 49.9 mm	0.740	0.326	0.559	0.739	0.231	0.215
<i>D</i>	50 – 69.9 mm	0.849	0.111	0.955	2.444	0.033	-0.002
<i>E</i>	70 – 149.9 mm	0.891	0.571	0.818	3.143	0.160	0.233
<i>F</i>	≥ 150 mm	0.979	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
<i>SL</i>	< 0.1 mm	0.786	0.397	0.107	0.444	0.379	0.435

A pesar que el porcentaje correcto de eventos de lluvia más eventos “sin lluvia” pronosticados osciló entre 74 y 85%, el análisis de resultados de pronóstico de precipitación vs observada por categoría fue bastante pobre, y tiende a mostrar una sobre pronosticación de número de lluvias así como sus intensidades:  $BIAS(A)=1.556$ ,  $BIAS(B)=1.278$ ,  $BIAS(D)=2.444$  y  $BIAS(E)=3.143$ ; mientras los eventos de categoría *C*, más frecuentemente observados a escala nacional se subestiman en los pronósticos de la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional (CGSMN) CONAGUA, dentro del período de evaluación.

El porcentaje de *Falsa Alarma* para la Categoría *A* es de 67%, para *B* es de 78%, para *C* es de 56%, para la categoría *D* es de 96%. Solo para eventos extremos de lluvia con una intensidad de 150.0 mm a mayor no existe un sobre pronóstico; sin embargo, hay 4

eventos “perdidos” (100%) o no pronosticados, es decir los eventos extremos de precipitación tienden ser subestimados. El coeficiente *B* o *BIAS* es igual a 0, igual el índice de *HSS*, es decir no se tiene habilidad de pronosticar este tipo de eventos extremos de baja frecuencia.

**Caso de estudio 2: Evaluación de previsión para el Distrito Federal**

Pronósticos determinísticos

Para evaluar la calidad de pronósticos a escala estatal se seleccionó Distrito Federal debido a la muy alta densidad de población en esta entidad. Se recopiló la información de boletines meteorológicos con previsión de lluvia máxima a 24 horas del 01 al 31 de octubre de 2013. Aplicando la metodología ya descrita se calcularon los índices de calidad que se muestran en el Cuadro 7.

**Cuadro 7.** Resultados de evaluación de los pronósticos de precipitación máxima a 24 horas emitidos del 01 al 31 de octubre de 2013 emitidos para el Distrito Federal, México.

Categoría	Rango	<i>PC</i>	<i>POD</i>	<i>FAR</i>	<i>BIAS</i>	<i>TS o</i>	<i>HSS</i>
<i>SL</i>	< 0.1 mm	0.759	0	NA	0	0	0
<i>A</i>	0.1 - 5 mm	0.586	0.125	0.833	0.75	0.077	-0.123
<i>B</i>	5 – 19.9 mm	0.448	0.5	0.875	4	0.111	-0.027
<i>C</i>	20 - 49.9 mm	0.448	0	1	0.778	0	-0.373
<i>D</i>	50 – 69.9 mm	0.966	0	NA	0	0	0

<i>E</i>	70 – 149.9 mm	1	NA	NA	NA	NA	NA
<i>F</i>	≥ 150 mm	1	NA	NA	NA	NA	NA

Se puede observar, que el porcentaje correcto de eventos de lluvia máxima más eventos “sin lluvia” pronosticados para el mes de octubre del 2013 osciló entre 45 y 100%, en donde un 100% se registró para las categorías *E* y *F* las cuales no fueron pronosticadas, tampoco observadas. No obstante, el análisis de resultados de pronóstico de precipitación contra la observada tiende a mostrar un sobre pronóstico para precipitación de Categoría *B*: *BIAS* (*B*)=4.0, mientras los eventos de Categorías *A* y *C*, se subestiman en los pronósticos de la CGSMN dentro del período de evaluación.

A pesar de la subestimación de eventos tipo *A*, el porcentaje de Falsa Alarma es de 83%, para *B* es de 87%, para *C* es de 100%. El índice de *HSS* es

negativo, es decir los pronósticos emitidos fueron peores que los de referencia, calculados con las Ecuaciones 7 - 9.

**Pronósticos probabilísticos**

Para evaluar la calidad de los pronósticos probabilísticos que emite el Servicio Meteorológico Nacional se seleccionó la previsión de precipitación en rango [5.0 – 19.9] mm o tipo *B* realizada del 13 al 19 de mayo de 2013 para el Distrito Federal. En el Cuadro 8 se muestran las probabilidades pronosticadas (*P<sub>i</sub>*) y probabilidad de precipitación observada (*O<sub>i</sub>*). Cabe mencionar, que *O<sub>i</sub>* = 1 cuando el evento ocurrió, y 0 cuando el evento no ocurrió.

**Cuadro 8.** Pronóstico probabilístico de precipitación para el área del Distrito Federal y datos observados durante el período 13-19/mayo/2013.

Fecha	<i>P<sub>i</sub></i>	<i>O<sub>i</sub></i>	<i>P<sub>clima i</sub></i>	$(P_i - O_i)^2$	$(P_{clima i} - O_i)^2$
13-may	0	1	0.00	1	1
14-may	0.8	0	0.71	0.64	0.50
15-may	0	0	0.00	0	0
16-may	0.6	1	0.71	0.16	0.08
17-may	0.4	1	0.71	0.36	0.08
18-may	0.6	1	0.71	0.16	0.08
19-may	0	1	0.00	1	1

Aplicando la Ecuación 13 se calculó el índice de Brier (*BR*) resultando un valor igual a 0.47. El resultado del índice de Brier de referencia (*BR<sub>clima</sub>*) fue igual a 0.39, mientras la media de probabilidad de precipitación registrada en el período de interés (*P<sub>clima i</sub>*) fue igual a 0.71

El valor ideal del índice de Brier es igual a 0, por lo anterior el índice que tiende a 0 o el más pequeño muestra mejor pronóstico probabilístico. Es decir si el predictor hubiera aplicado la probabilidad media del evento (0.71), en lugar de valores 0.4, 0.6 y 0.8 (Cuadro 8), la calidad de su pronóstico crecería a un 8%. Así, el pronosticador recibiría un crédito por reconocer o pronosticar una desviación de las condiciones normales durante todo el período de evaluación. No obstante, *BR* de pronóstico fue mayor de climatológico por lo que *BSS* resultó ser negativo:

$$BSS = 1 - \frac{0.47}{0.39} = -0.21$$

Desarrollando el ejercicio de verificación, también se estimó el tiempo necesario para evaluar los pronósticos de 24 horas de precipitación máxima

diaria a escala del país. Como resultado, se estimó que para construir las tablas de contingencia, se requiere para cada Estado un tiempo de 35 minutos, por lo anterior para construir la tabla a escala nacional se requiere un promedio de 19 horas. Además, para calcular los indicadores y graficarlos es necesario un tiempo de 30 minutos a escala estatal o 16 horas para todos los Estados. De ahí la importancia de ofrecer un proceso de verificación objetivo y totalmente automatizado, liberando a los previsores del Servicio Meteorológico Nacional de esta tarea.

**CONCLUSIONES**

El primer caso de estudio mostró que el porcentaje de pronósticos correctos a escala nacional fue igual a 36%. De acuerdo a las recomendaciones de la OMM, si *PC* es menor a 60%, éste se considera pobre o insuficiente. Mientras los pronósticos para el Distrito Federal brindaron mejores resultados, en donde *PC* osciló de 45 a 96%. Sin embargo, el análisis de detalle de los pronósticos a escala nacional registraron una fuerte sobre pronosticación de eventos de precipitación de categorías *A*, *B*, *D* y *E*, mientras que los eventos tipo *C* fueron subestimados, igual que los eventos extremos de baja frecuencia. El mismo

problema se reconoce en el Distrito Federal, es decir, sobre pronosticación para eventos tipo *B*, mientras se tiende a subestimar los eventos tipo *A* y *C*. Por lo anterior, es muy importante implementar el sistema automatizado para obtener la evaluación de un producto sin que haya conflicto de intereses, asegurar la verificación objetiva y, como consecuencia, la calidad de servicios del SMN. Además, este sistema

facilita un acceso rápido a la información ya que se encuentra operativo las 24 horas, los 7 días de la semana, los 365 días del año. También, permite una reducción significativa de tiempo en la elaboración de las tablas de contingencia, en el cálculo de los indicadores y en su graficado para generar los informes e indicadores objetivos, es decir sin intervención de previsores meteorólogos.

## **REFERENCIAS**

- Brier G. W. (1950). Verification of forecast expressed in terms of probability. "Monthly Weather Review", 78(1), 1-3.
- Brooks H. E. (2013). Forecast Evaluation and Decision Analysis. Recuperado 31 mayo 2015 de "Advanced Forecasting Techniques METR 5803": [http://www.nssl.noaa.gov/users/brooks/public\\_html/feda/](http://www.nssl.noaa.gov/users/brooks/public_html/feda/)
- Doswell-III C. A., Davies-Jones R., Keller D. L. (1990). On summary Measures of skill in rare event forecasting based on contingency tables. "Weather and Forecasting", 5, 576 - 585.
- Glahn H. R., Murphy A. H., Wilson L. J., Jensenius Jr. J. S. (1991). "Lectures presented at the WMO training workshops on the interpretation of NWP products in terms of local weather phenomena and their verification". World Meteorological Organization, Programme on Short- and Medium-Range Weather Prediction Research (PSMP). Wageningen, The Netherlands: WMO.
- Jolliffe I. T., Stephenson D. B. (2003). Introduction. Chapter 1. En "Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science" Jolliffe I. T., Stephenson D. B. (eds.), 1-12. 1st ed.. John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England
- Matsudo C., García Skabar Y., Ferreira L., Ruíz J., Salio P., Vidal L., Nicolini M. (2013). Sistema de pronóstico experimental en alta resolución con el modelo Brams. "Meteorológica", 38(1), 53-68.
- Murphy A. H. (1973). A new vector partition of the probability score. "J. Appl. Meteor.", 12, 595-600.
- Murphy A. H. (1991). Forecast Verification: Its Complexity and Dimensionality. "Monthly Weather Review", 119(7), 1590-1601.
- Murphy A. H. (1993). What is a good forecast? An essay on the nature of goodness in weather forecasting. "Weather and Forecasting", 8(2), 281 - 293.
- Murphy A. H., Winkler R. L. (1987). A General Framework for Forecast Verification. "Monthly Weather Review", 115, 1330-1338. doi:[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<1330:AGFFV>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<1330:AGFFV>2.0.CO;2)
- Rosario De La Cruz J. G. (2016). "Propuesta de una herramienta computacional aplicable a pronósticos de lluvia máxima para realizar procesos de verificación a través de la aplicación de índices propuestos por la Organización Meteorológica Mundial". Tesis de Maestría, Universidad Politécnica del Estado de Morelos, Morelos, México.
- Sommerville I. (2005). "Ingeniería de software", 7th ed., Pearson Educación S.A., Madrid, España.
- SPM-SMN (2015). Servicio Meteorológico Nacional, CONAGUA. Recuperado de Discusión técnica 96 horas: [http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=55&Itemid=49](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=55&Itemid=49)
- UCAR, University Corporation for Atmospheric Research. (2011). The COMET® Program. Recuperado de "Introducción a la meteorología tropical 2ª edición: Capítulo 9: Observación, análisis y predicción": [http://www.meted.ucar.edu/tropical/textbook\\_2nd\\_edition\\_es/navmenu.php?tab=10&page=6.0.0](http://www.meted.ucar.edu/tropical/textbook_2nd_edition_es/navmenu.php?tab=10&page=6.0.0)

WMO, World Meteorological Organization (2010). “Manual on the Global Data Processing and Forecasting System” Vol. I, WMO , Geneva, Switzerland.

WMO, World Meteorological Organization WWRP/WGNE Joint Working Group on Forecast Verification Research (2009). “Forecast verification - issues, methods and FAQ”. Recuperado de <http://www.cawcr.gov.au/projects/verification/>

---

Este documento debe citarse como: Davydova-Belitskaya, V., Rosario de la Cruz, J. G., Rodríguez-López, O (2016). **Un modelo de verificación de pronósticos de precipitación.** Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 20-1, pp. 24-33.