

Diagnóstico de probabilidades de lluvias asociados a eventos del ciclo ENOS en la costa de Ecuador

JONATHAN CEDEÑO¹, TELMO DE LA CUADRA², KARINA ABATA¹,
MA. AUXILIADORA MERIZALDE¹ & M. PILAR CORNEJO-GRUNAUER¹

¹Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Campus "Gustavo Galindo V.", Km 30.5 Vía Perimetral, CP 09-01-4382 Guayaquil, Ecuador
jcedeno@espol.edu.ec

²Laboratorio de Oceanografía, División de Investigación de Recursos Bioacuáticos y su Ambiente, Instituto Nacional de Pesca, Letamendi 102 y La Ría. CP 09-01-15131 Guayaquil, Ecuador

Resumen Datos mensuales de precipitación de cuatro estaciones meteorológicas de la costa ecuatoriana fueron analizados usando el software WFCC y WTC, para diagnosticar probabilidades de lluvia en eventos del ciclo ENOS. En la fase cálida, las probabilidades de lluvia obtenidas fueron consistentes con la realidad, y mostraron altos valores en la FCC y el estadístico G^2 ; por lo que se deduce que el software trabajaría muy bien en esta fase. En el otro caso, las probabilidades de lluvia en la fase fría no fueron del todo acertadas y estuvieron limitadas a ciertas condiciones como la tendencia de lluvias, que fue cercana al promedio o mayor que este, a pesar de ser años Niña. Esto se debería a que en las series de tiempo de precipitación el menor valor es el cero, existiendo por lo tanto un sesgo hacia valores positivos.

Palabras clave tabla de contingencia; ENOS; probabilidad de lluvias; terciles, Ecuador

Assessing rainfall probabilities using ENSO cycle events on the coast of Ecuador

Abstract Monthly precipitation data from four meteorological stations located on the Ecuadorian coast were analysed, using the WFCC and WTC software, to assess rainfall probabilities during ENSO cycle events. During the warm phase, the rainfall probabilities obtained correlated with the observed data, showing high values on FCC and the statistic G^2 . Therefore it is deduced that the software would work very well in this phase. However, rainfall probabilities during the cold phase did not correlate with the observed data and correlations were limited to certain conditions like the rainfall trends, that was close to the average or bigger than this, although the years in the study were Niña. This is probably a response to the fact that the smallest value is the zero, therefore introducing a bias towards positive values.

Key words contingency table; ENSO; rain probability; terciles; Ecuador

INTRODUCCIÓN

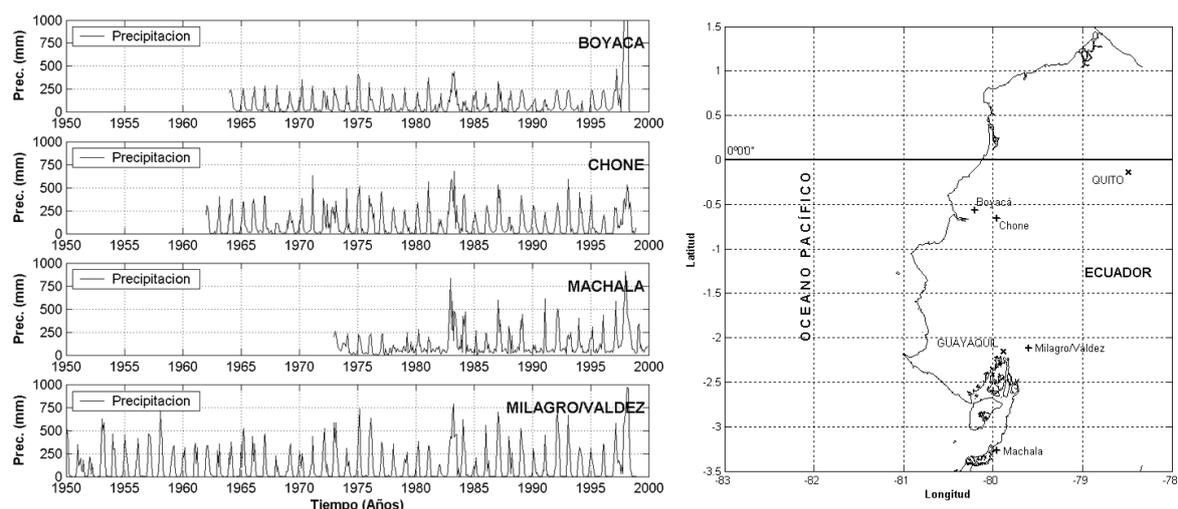
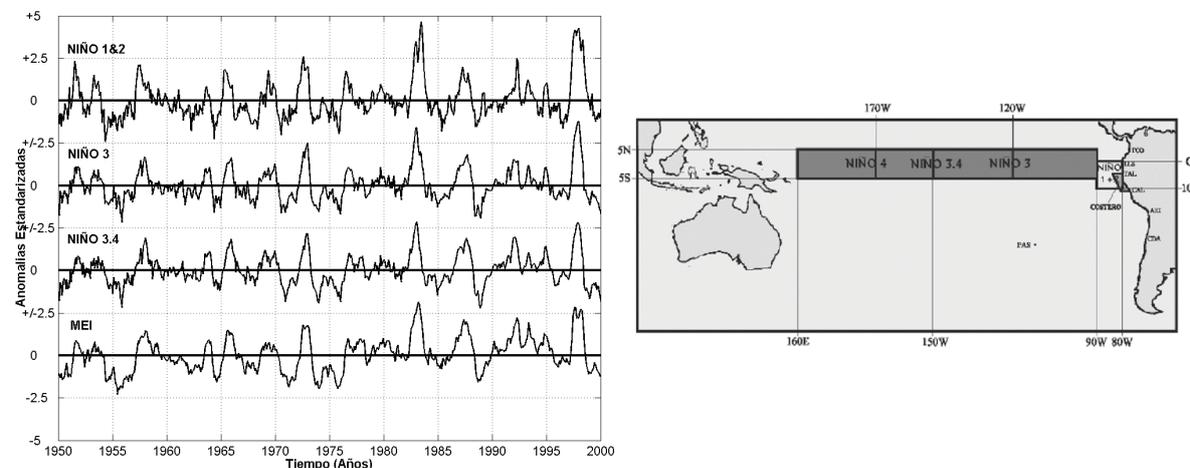
Es importante validar la utilidad y aplicabilidad de la metodología de las tabla de contingencia para aplicaciones climáticas, en la cual se basa el software "WFCC & WTC", el mismo que fue desarrollado por Alfaro *et al.* (2003) para lograr unificar la metodología usada en predicciones climáticas en América Latina dentro del proyecto *Una Propuesta Especial para mejorar los Foros de Perspectiva Climática en América Latina*, financiado por la Oficina de Programas Globales de la Administración Nacional para la Atmósfera y el Océano (OGP-NOAA) en conjunto con la Universidad de Costa Rica y el Laboratorio de Meteorología y Oceanografía del Atlántico (AOML) de la NOAA. En este estudio, se propone utilizar el software en modo de diagnóstico para tres eventos El Niño y tres La Niña en cuatro puntos de la costa ecuatoriana.

DATOS

Para el diagnóstico de lluvias se utilizó datos mensuales de precipitación en milímetros, pertenecientes a cuatro estaciones meteorológicas de la costa ecuatoriana manejadas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). (ver Tabla 1 y Fig. 1), datos que corresponden a variables dependientes en el WFCC & WTC. Los índices utilizados como predictores (o variables independientes) fueron: el Índice Multivariado de ENOS (MEI), Niño 3.4, Niño 3 y Niño 1+2 (Fig. 2). Una descripción completa de estos índices puede ser obtenida en Wolter & Timlin (1993) y Glantz (1996).

Tabla 1 Estaciones empleadas en este estudio y características de las series de tiempo de las mismas. Fuente: INAMHI.

Estación (nombre)	Ubicación	Altura (msnm)	Longitud de la serie	Datos perdidos (%)
Boyacá	00°34'07"S 80°12'20"W	370	1964–1998	22.38
Chone	00°39'26"S 80°02'30"W	40	1962–1998	9.23
Machala	03°16'00"S 79°57'31"W	25	1973–1999	7.72
Milagro	02°06'56"S 79°35'57"W	13	1950–1998	2.04

**Fig. 1** Series de tiempo para cada una de las estaciones en estudio (izq.) y ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio (der.) Fuente: INAMHI.**Fig. 2.** Índices Climáticos utilizados como variables independientes (izq.) y regiones correspondientes a los índices Niño 3.4, Niño 3 y Niño 1+2 (der.). Fuente: NOAA.

METODOLOGÍA

El software de la Tabla de Contingencia (Alfaro *et al.*, 2003) comprende dos programas cuyo principal objetivo es el análisis cuantitativo y categórico de dos variables usando la teoría de los terciles. El primer programa (WFCC) es el que realiza la correlación cruzada sesgada entre dos variables, además de permitir escoger el predictor apropiado. Para este estudio se resolvió diagnosticar las probabilidades de lluvia en el trimestre diciembre–enero–febrero (DEF) dada las condiciones en el trimestre previo septiembre–octubre–noviembre (SON). El segundo programa (WTC) permite establecer una validación cruzada, que contrasta el comportamiento de los datos, producto de un diagnóstico con respecto a los datos observados; además de realizar el análisis exploratorio entre dos variables que se suponen correlacionadas positiva o negativamente en el tiempo.

Los principales estadísticos que evalúan el grado de asociación entre las parejas de los dos conjuntos de datos son la FCC (Función de Correlación Cruzada), el ensayo de significancia y el G^2 . El FCC cuantifica la relación o el comportamiento común entre las variables independiente y dependiente. Si los valores estimados de FCC exceden los niveles de significación, entonces se rechaza la hipótesis nula (esto es, las series no están correlacionadas) y se acepta la hipótesis alternativa (las series están correlacionadas, Alfaro *et al.*, 2003). El WFCC calcula niveles de confianza al 90 y 95%. El G^2 evalúa que tanto se aleja una tabla de contingencia del caso aleatorio. Cuando las variables independientes y dependientes están asociadas positivamente, el G^2 obtiene valores altos y la significación tiende a uno que es el valor máximo posible.

Para comprobar si el total de lluvias en el trimestre seleccionado (DEF) responde a las condiciones de cada uno de los eventos ENSO estudiados, se procedió a calcular el cociente entre la sumatoria tri-mensual de lluvias y la sumatoria de la media inter-anual correspondiente a esos meses. Debido a que existe un sesgo hacia valores de lluvias por sobre el promedio, se resolvió aceptar la “normalidad” de este cociente entre 0.8 y 1.20. Valores por debajo de 0.8 indicarían déficit de lluvias con respecto a la normal y por sobre 1.20, superávit de lluvias. Así mismo, se calculó el cociente entre la sumatoria tri-mensual de lluvias y la sumatoria correspondiente a los meses DEF de una desviación estándar. Generalmente, un máximo sobre una desviación estándar es visto en años El Niño debido probablemente a la respuesta de los regímenes de lluvias durante el verano del hemisferio del sur (Marcos & Cornejo, 2005).

El porcentaje de acierto se obtuvo a través del análisis de los niveles de significancia de la FCC. Si el resultado es estadísticamente significativo, se le asigna un valor de 8.33, resultado de la división entre 100 (porcentaje total) y 12 (número de corridas por fase del ciclo ENOS para cada uno de los índices).

RESULTADOS

Análisis del campo de precipitación

El ciclo anual es el modo dominante de la variabilidad en la costa del Ecuador (Cornejo, 1999; Silva, 1990). La Fig. 3 registra claramente este ciclo anual. En términos generales, la estación lluviosa ocurre entre enero y abril y la seca entre mayo y diciembre (Marcos & Cornejo, 2005). Los rangos del ciclo anual oscilan entre 226 mm (Boyacá), 292 mm (Chone), 214 mm (Machala) y 335 mm (Milagro).

Durante los años El Niño descritos en este estudio, se observa que los regímenes de precipitación comienzan más temprano y terminan más tarde. El caso más extremo se dio en el 1997/1998, en donde las lluvias comenzaron en septiembre y se prolongaron hasta mayo-junio. Durante el trimestre DEF todos los casos de eventos El Niño en las estaciones aquí descritas se ubican por sobre la media y excepto en la estación Boyacá, cuya precipitación fue encontrada sobre una desviación estándar.

Para eventos La Niña, el campo de precipitación es muy cercano al ciclo anual en forma general. Los casos más deficitarios en el trimestre DEF se dieron en Machala y Milagro durante el año 1985. En los años 1975 en Boyacá y Chone, y del 1989 en Milagro, se presentaron valores de precipitación por encima de la media, aún cuando lo esperado son lluvias deficitarias.

Diagnóstico de probabilidades de lluvias en años del ciclo ENSO

Evento El Niño 1982–1983 En las estaciones Boyacá y Machala las probabilidades de lluvias para el período DEF fueron acertadas con todos los índices (50% y 67% por sobre lo normal–SN–, respectivamente), pero no estadísticamente significativas. En Chone, a pesar que la precipitación durante el trimestre DEF fue de 1.62 veces la desviación estándar, las probabilidades más altas estuvieron repartidas en los terciles normal (N) y SN en las corridas con todos los índices, excepto con el MEI, cuya probabilidad más alta se ubica en el tercil N. Milagro obtuvo probabilidades del 50% SN para los índices Niño 3, Niño 3.4 y Niño 1+2, significantes al 95% (excepto con el índice Niño 1+2). Distinto fue el caso al trabajar con el MEI, ya que este no diagnosticó lluvias por SN. El índice que mejor trabajó para el diagnóstico de lluvias de este año fue el Niño 3, ya que tuvo los mayores valores de FCC de todos los índices utilizados.

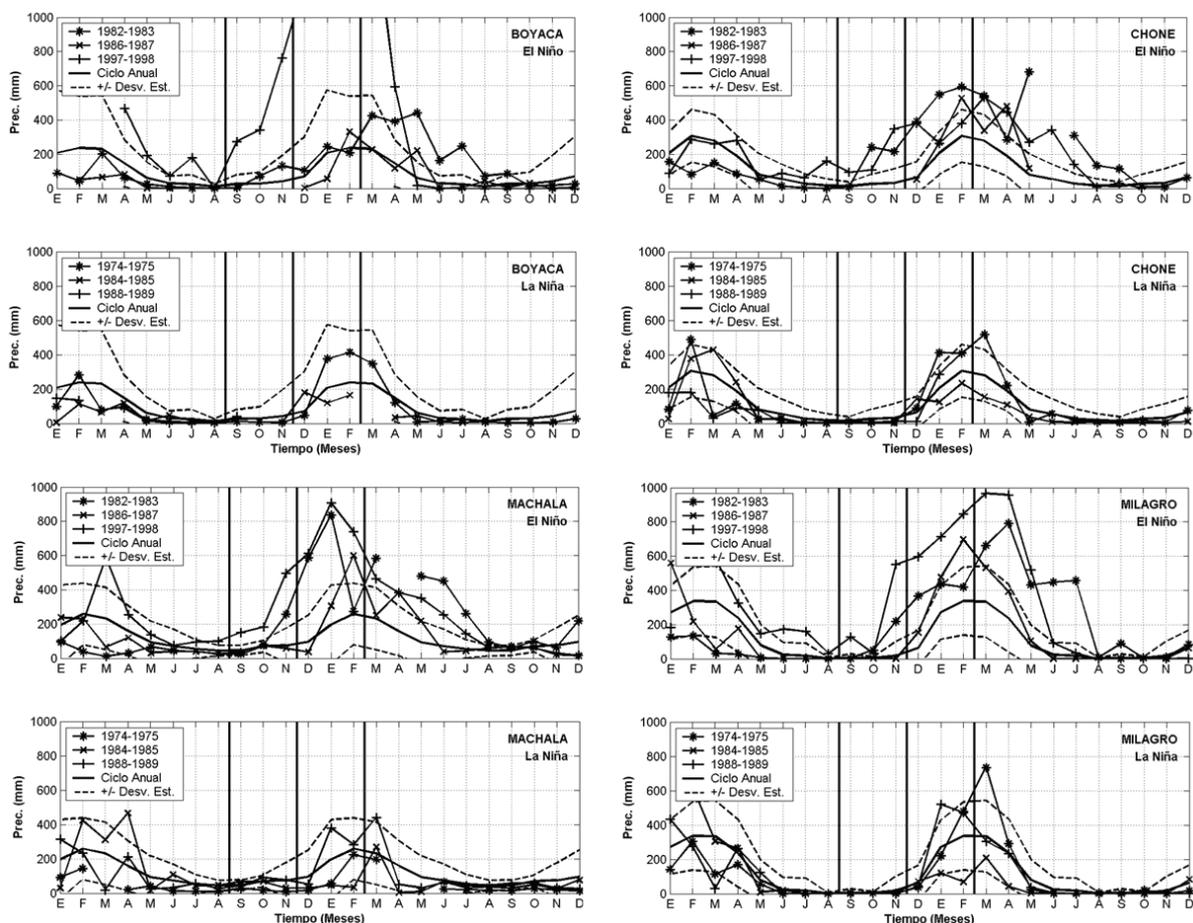


Fig. 3 Régimen de Precipitación durante tres años Niño y tres años Niña para todas las estaciones en estudio. Fuente: INAMHI.

Evento El Niño 1986–1987 Debido a la falta de datos en las series de tiempo de precipitación en el trimestre SON, no es posible diagnosticar probabilidades de lluvia en las estaciones Boyacá y Chone. Para las estaciones Machala y Milagro, el modelo arrojó probabilidades de lluvia SN, significantes al 90% en la mayoría de los casos y al 95% al trabajar con el índice Niño 3 para la estación de Milagro. Para la estación Machala, observamos que consistentemente los valores de G^2 son menores que los de Milagro cuando se ejecutan corridas con todos los índices para estas estaciones, pese a que el diagnóstico si se ajustó a la realidad. Esto se debería a que el registro de datos es menor en comparación con el resto de estaciones. Los mejores predictores para este período de lluvias son los índices Niño 3 y Niño 3.4.

Evento El Niño 1997–1998 En todas las estaciones llovió por sobre una desviación estándar, resultados que se vieron reflejados en las corridas del modelo (superior al 50% SN, significantes al 95%), mostrando coherencia con el régimen de lluvias. Resultados mixtos se obtuvieron con la estación Machala, ya que con los índices Niño 3, Niño 3.4 y Niño 1+2 las lluvias no pudieron ser diagnosticadas ya que la mayor probabilidad de lluvia recayó sobre el tercil N. Con el MEI, la probabilidad de lluvia fue del 50% SN, con una FCC de 0.50, significativa al 95%.

Evento La Niña 1975 Pese a que 1975 es considerado como un año Niña, en las estaciones Boyacá, Chone y Milagro llovió ligeramente por sobre el promedio histórico de lluvias (1.62, 1.58 y 1.10 veces, respectivamente para el trimestre DEF). La salida del modelo reflejó estas condiciones para con todos los índices, ya que las probabilidades más altas se encuentran en el tercil N; no obstante los valores de FCC fueron bajos en algunos casos y negativos en otros (no significantes ni al 90%). Para la estación Machala, no se obtuvo un resultado consistente a la realidad. Las salidas contradictorias obtenidas se deben a corta longitud de la serie de tiempo (ver Tabla 1).

Evento La Niña 1985 Las lluvias durante el trimestre DEF del 84/85 se presentaron por debajo de la media histórica para Machala y Milagro (0.20 y 0.38) y muy cercano al promedio en Boyacá y Chone (0.90 y 0.87). Durante las corridas del programa, observamos que las mayores probabilidad de lluvias se encontraron en el tercil N para todas las estaciones, lo cual se ajusta a la realidad únicamente para Boyacá y Chone. El mayor porcentaje de acierto lo obtuvo las corridas con el índice Niño 3, a pesar de que en Machala y Milagro fallara el diagnóstico. En la estación Chone hubo resultados mixtos, ya que en las corridas con los índices MEI y Niño 1+2 la mayor probabilidad de lluvias fue de 50% bajo el tercil BN (bajo lo normal), significativo al 90% solo con el Niño 1+2. Con el índice Niño 3.4, la probabilidad más alta en esta estación y en Boyacá se encontró en el tercil N, siendo coherente con la comprobación trimestral.

Evento La Niña 1988–1989 Durante las corridas, los porcentajes de probabilidades de lluvias más altos se encontraron bajo el tercil N; esto fue corroborado para las estaciones Chone, Machala y Milagro, donde los valores de precipitación acumulada en DEF son muy cercanos a una desviación estándar. Los valores de la FCC no lograron ser significantes ni al 90% en gran parte de los casos (solo en Chone con los índices Niño 1+2 y Niño 3; y Milagro con el Niño 3), por lo que se deduce que las series no se encuentran bien correlacionadas. Para el caso de Boyacá, hubo insuficiencia de datos de precipitación en el año utilizado como terminal para el diagnóstico de lluvias (1988).

CONCLUSIÓN Y DISCUSIÓN

Las salidas del modelo mostraron que los resultados del diagnóstico se ajustan a la realidad durante las corridas en años Niño (EN). Los porcentajes de aciertos al 90% y 95% de confianza se ubicaron en 83.33% y 58.33% respectivamente durante las corridas con el índice Niño 3, el cual resultó ser el mejor predictor para las estaciones en estudio. El porcentaje de aciertos más bajo lo obtuvo el índice MEI (Tabla 2).

Tabla 2 Porcentaje de aciertos de las corridas con referencia a las correlaciones existentes entre las series de datos (índices vs precipitación) y su significancia al 90% y 95% para los eventos de El Niño estudiados (1983, 1987 y 1998).

Estación	% De aciertos parciales (90%)				% De aciertos parciales (95%)			
	NIÑO 3.4	NIÑO 3	NIÑO 1+2	MEI	NIÑO 3.4	NIÑO 3	NIÑO 1+2	MEI
Boyacá	8.33	8.33	8.33	8.33	8.33	8.33	8.33	0.00
Chone	16.67	25.00	25.00	16.67	8.33	16.67	8.33	8.33
Machala	16.67	25.00	16.67	8.33	8.33	8.33	8.33	8.33
Milagro	25.00	25.00	8.33	8.33	8.33	25.00	8.33	8.33
% Total de aciertos	66.67	83.33	58.33	41.67	33.33	58.33	33.33	25.00

Tabla 3 Porcentaje de aciertos de las corridas con referencia a las correlaciones existentes entre las series de datos (índices vs precipitación) y su significancia al 90% y 95% para los eventos de La Niña estudiados (1975, 1985 y 1989).

Estación	% De aciertos parciales (90%)				% De aciertos parciales (95%)			
	NIÑO 3.4	NIÑO 3	NIÑO 1+2	MEI	NIÑO 3.4	NIÑO 3	NIÑO 1+2	MEI
Boyacá	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Chone	0.00	16.67	16.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Machala	0.00	8.33	8.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Milagro	8.33	16.67	0.00	0.00	0.00	8.33	0.00	0.00
% Total de aciertos	8.33	41.67	25.00	0.00	0.00	8.33	0.00	0.00

En la fase fría del ENOS los resultados obtenidos no fueron buenos. El sesgo que existe hacia valores positivos que marcan una tendencia por sobre el promedio en las series de precipitación es

un factor determinante a la hora de diagnosticar y pronosticar probabilidades de lluvias bajo los terciles N y BN. Al 95% de confianza, el porcentaje de aciertos se ubicó en cero para todos los índices trabajados con excepción del Niño 3 (8.33%, ver Tabla 3). Hay que anotar también que no siempre los predictores utilizados explican el régimen de precipitación de manera consistente, en especial cuando se analiza los años “Niña”, en donde se espera que hayan lluvias deficitarias en las estaciones en estudio.

Otra posible causa de la diferencia entre los resultados de corridas con el programa WFFC y WTC para las fases extremas de ENSO es la no-linealidad de las relaciones entre los parámetros oceánicos-atmosféricos estudiados, tal como la anota Hoerling *et al.*, 2001; Larkin & Harrison, 2002 y Hoerling *et al.*, 1997. A través de un análisis exploratorio de correlaciones entre las variables observadas, pudimos anotar que no necesariamente las variaciones entre ellas son lineales, por lo que la asunción de la no-linealidad inherente nuevamente queda en discusión.

Espacialmente, es probable que la diferencia de resultados entre las estaciones de Machala, Chone y Milagro se deba a condiciones océano-atmosféricas locales, ya que Chone está afectada más por variaciones en la posición del frente ecuatorial y por diferencias orográficas que Machala y Milagro. En cuanto a la estación de Boyacá, el estado de la serie de tiempo provocó que tuviera el menor porcentaje de aciertos debido a que acumuló el mayor porcentaje de datos perdidos de entre las estaciones estudiadas (ver Tabla 1).

Estos resultados son de particular importancia, ya que demuestra que el programa WFCC & WTC, que es utilizado para predecir probabilidades de lluvia en diversas regiones de Latinoamérica incluido el Ecuador, pronostica escenarios de precipitación SN de manera óptima. En escenarios BN, la probabilidad de aciertos es baja, más aún si se toma en cuenta los estadísticos que la corrida del propio programa genera como medida de confianza del pronóstico previo a su difusión.

Agradecimientos Los autores agradecen a David Enfield y Eric Alfaro por sus comentarios y sugerencias al manuscrito final. La presente investigación fue realizada con el soporte del Proyecto Cuatro del Programa VLIR-ESPOL y de la Fundación de Ciencia y Tecnología del Ecuador FUNDACYT.

REFERENCIAS

- Alfaro, E., Soley, F. & Enfield, D. (2002) Guía para el uso de una Tabla de Contingencia para Aplicaciones Climáticas. Ed. por FUNDESPOL-ESPOL, Guayaquil.
- Cornejo, M. P. (1999) Variaciones Estacionales e Interanuales de la Climatología en la Zona Costera del Ecuador. *Reporte Técn. FIMCM-ESPOL*. Guayaquil.
- Glanz, M. H. (1996) *Currents of Change: El Niño's Impact on climate and society*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Hoerling, M. P., Kumar, A., Xu, T. (2001) Robustness of the nonlinear climate response to ENSO's extreme phases. *J. Climate* **14**, 1277–1293.
- Hoerling, M. P., Kumar, A., Zhong, M. (1997) El Niño, La Niña and the non-linearity of their teleconnection. *J. Climate* **10**, 1769–1786.
- Larkin, N. K. & Harrison, D. E. (2002) ENSO warm (El Niño) and cold (La Niña) event life cycles: Ocean surface anomaly patterns, their symmetries, asymmetries, and implications. *J. Climate* **15**, 1118–1140.
- Marcos, J. G. & Cornejo, M. P. (2005) Adaptation Strategies to the Environmental and Socioeconomic Impacts of El Niño for Rural Communities in Ecuador and Peru. *Report of Community Assessments in Ecuador. ESPOL*, Guayaquil.
- Silva, G. (1992) Análisis de la variabilidad climática de la zona costera ecuatoriana utilizando Componentes Principales. Tesis de Grado de Oceanografía. FIMCM-ESPOL, Guayaquil
- Wolter, K. & Timlin M.S. (1993). Monitoring ENSO in CODAS with a seasonally adjusted principal components index. *Proc. of the 17th Climate Diagnostic Workshop, Norman, OK*. NOAA/ MC/CAC, NSSL, Oklahoma, USA.