

## Predictibilidad de El Niño-Oscilación del Sur

### Contexto histórico

El pronóstico estacional tiene como objetivo anticipar las fluctuaciones del clima en el corto plazo, es decir, anticipar las condiciones climáticas del próximo mes, estación o año<sup>1</sup>. Hacia fines del siglo XIX, se hicieron los primeros intentos por desarrollar sistemas de pronósticos basados en ciclos recientemente descubiertos (manchas solares, bianual) y en el análisis de la creciente red de estaciones meteorológicas<sup>2</sup>. Hoy en día, con el desarrollo de súper-computadores, un mejor entendimiento del sistema climático y el desarrollo de modelos numéricos complejos, los pronósticos estacionales o climáticos de corto-plazo se hacen rutinariamente<sup>3</sup>.

El descubrimiento de la Oscilación del Sur, componente atmosférica del Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), se produjo en las primeras décadas del siglo XX, como resultado de la búsqueda de predictores de las lluvias monzónicas, a través de la utilización de la correlación lineal como un estadístico que permitía encontrar relaciones útiles para anticipar las lluvias en India<sup>4,5</sup>. Así, gracias a la búsqueda de mejores predictores, Sir Gilbert Walker descubrió un modo climático que ha resultado ser responsable de una parte significativa de la variabilidad interanual de muchas variables atmosféricas y oceanográficas en diferentes regiones del planeta<sup>6,7</sup>. Debido a su reconocida importancia, ENOS se estableció desde hace algunas décadas como el principal objetivo de predicción estacional de los centros mundiales de pronóstico climático<sup>8</sup>.

Un paso fundamental en la comprensión de ENOS fue dado por Jacob Bjerknes hacia fines de los sesenta, al darse cuenta sobre la existencia del acoplamiento entre la atmósfera (la Oscilación del Sur) y el océano (El Niño) en el Pacífico Tropical<sup>9</sup>. De hecho, gracias a este acoplamiento, es posible pronosticar el ENOS mediante métodos estadísticos y dinámicos. A partir de entonces, el creciente entendimiento de la dinámica de ENOS ha permitido el desarrollo de modelos dinámicos (numéricos) y estadísticos capaces de pronosticar la aparición de los eventos El Niño y La Niña<sup>10</sup>. En particular, el evento El Niño de 1986-87 fue pronosticado satisfactoriamente por tres diferentes modelos numéricos, aunque su magnitud, junto con el momento de ocurrencia, no fueron perfectos<sup>11</sup>.



**Aldo Montecinos, Dr.**

Profesor asociado, Departamento de Geofísica, Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y Minería - Instituto Milenio de Oceanografía, Universidad de Concepción, Chile.

*Doctor en Oceanografía de la Universidad de Concepción (Chile), Magister en Ciencias Atmosféricas de la Universidad de Chile y Oceanógrafo de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (Chile). Actualmente es Profesor Asociado en el Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Concepción. Su principal interés de investigación es la variabilidad climática en la región oriental del Pacífico Sur y en Sudamérica, en distintas escalas de tiempo. En particular, le interesan los procesos de interacción entre el océano y la atmósfera, especialmente aquellos que involucran teleconexiones entre el trópico y el extratropico, y tiene varias publicaciones sobre los impactos de El Niño-Oscilación Sur y sobre la variabilidad climática a escala interdecadal en el Pacífico Sur.*

Desde entonces hemos podido presenciar fracasos y aciertos respecto de la capacidad de pronosticar (predictibilidad) con exactitud la ocurrencia de El Niño-La Niña.

### Definiciones

Inicialmente, el análisis de la predictibilidad de los modelos para anticipar las condiciones de El Niño se basó en la comparación de las anomalías observadas y pronosticadas de la temperatura superficial del mar (TSM) en la región Niño 3 (5°N-5°S, 150°W-90°W). Esto a pesar de que, a comienzos de los ochenta, un grupo de trabajo de un comité internacional (*Scientific Committee for Ocean Research*, SCOR) definió El Niño cuando en tres de cinco estaciones peruanas se observaban anomalías estandarizadas de TSM por sobre una desviación estándar, durante cuatro meses consecutivos<sup>12</sup>.

A mediados de los noventa, se cambió la región que se usaba para definir la ocurrencia de El Niño y La Niña, utilizando una intermedia entre las regiones Niño 3 y 4<sup>13,14</sup>. Los argumentos fueron: esta región es la que presenta la mayor correlación con la Oscilación del Sur y otras variables esenciales en la dinámica del ENOS; es la región que presenta la mayor predictibilidad; y representa mejor los impactos de ENOS en regiones remotas del planeta<sup>13</sup>. Hoy en día, para muchos centros internacionales, la definición operacional de la presencia de El Niño y La Niña se basa en las anomalías de TSM en la región ecuatorial (5°S-5°N) que va desde 170°W hasta 120°W (Niño 3.4). Por ejemplo, se exige que las anomalías sean superiores a 0,5°C (inferiores a -0,5°C) durante cinco

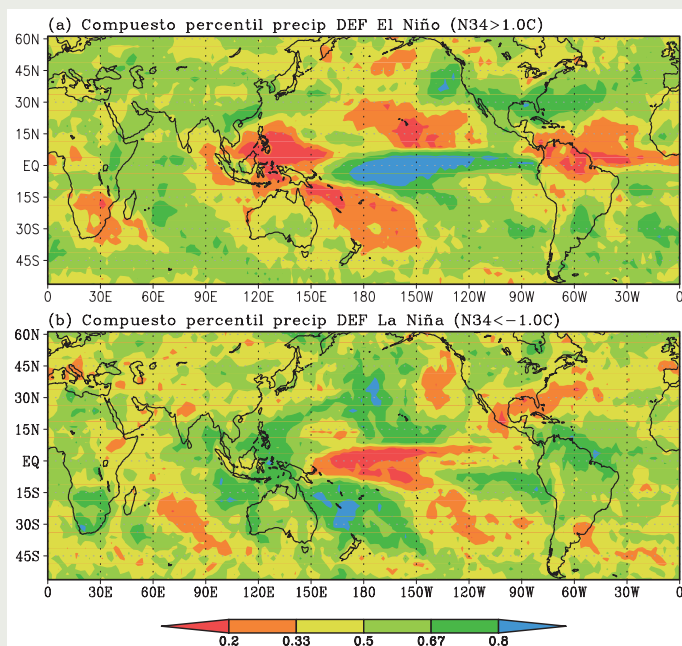


Figura 1. Percentil promedio de la precipitación de verano (diciembre-enero-febrero) bajo condiciones de El Niño (panel superior) y La Niña (panel inferior). Se define un evento El Niño (La Niña) cuando la anomalía promedio de la TSM de verano, en la región Niño 3.4 (5°S-5°N, 170°W-120°W), es superior (inferior) a 1°C (-1°C). Los veranos El Niño son: 1983, 1987, 1992, 1995, 1998, 2003, 2010 y 2016. Los veranos La Niña son: 1985, 1989, 1999, 2000, 2008 y 2011. Periodo base: 1983-2016. La base de datos de precipitación corresponde al CPC Merged Analysis of Precipitation (CMAP). Fuente: CMAP Precipitation data provided by the NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, from their Web site at <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>.

meses consecutivos para determinar la presencia de un evento El Niño (La Niña) en el Pacífico Central<sup>14</sup>.

Respecto de las alteraciones climáticas que provocan El Niño y La Niña, las Figuras 1 y 2 muestran los impactos típicos del ENOS en la precipitación de verano e invierno, respectivamente. El ENOS es representado por la anomalía de TSM en la región Niño 3.4 y el impacto como el percentil promedio de la precipitación bajo condiciones de El Niño y La Niña en el Pacífico Central. Es decir, se transforman los valores de milímetros acumulados por estación del año en el percentil correspondiente: cerca de 0 los valores muy bajos y cerca de 1 los valores muy altos (0,5 se conoce como mediana). Cabe mencionar que los percentiles corresponden a la probabilidad acumulada empírica. Se define una condición seca (muy seca) como los percentiles bajo 1/3 (0,2), que corresponde al 33% (20%) de los valores más bajos observados. Lo mismo con la condición lluviosa (muy lluviosa): se define como los percentiles sobre 2/3 (0,8), que corresponde al 33% (20%) de los valores más altos observados. Es importante indicar que para el análisis se utilizan umbrales diferentes de la anomalía de TSM para verano (1,0°C) e invierno (0,5°C), en consideración a la mayor varianza que

se observa en verano. En ambas estaciones del año se ven amplias regiones del planeta, sobre océanos y continentes, con condiciones secas y lluviosas, bajo condiciones de El Niño y La Niña. En verano (Figura 1), momento en que los eventos El Niño y La Niña presentan su mayor intensidad, se observan condiciones muy lluviosas y muy secas sobre el Pacífico Ecuatorial Central, respectivamente. En Oceanía, al este y oeste de Australia, en la región

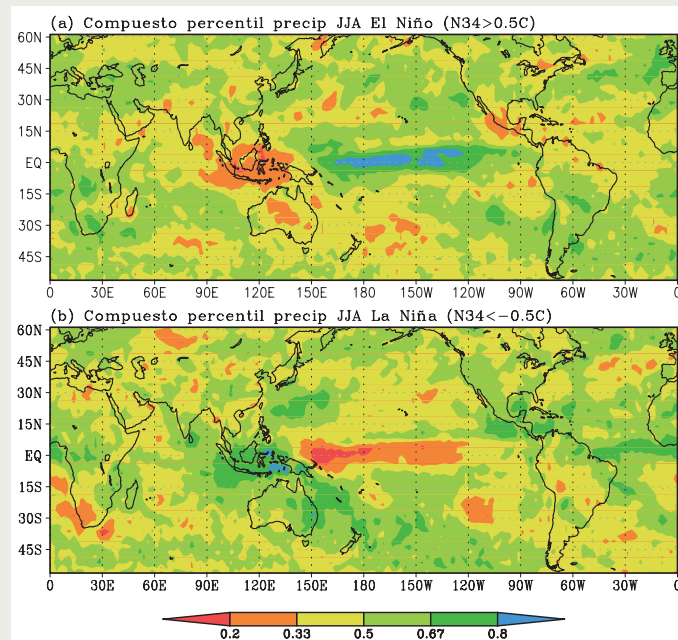


Figura 2. Como en la Figura 1, pero para el invierno (junio-julio-agosto). Se define un evento El Niño (La Niña) cuando la anomalía promedio de la TSM de verano es superior (inferior) a 1°C (-1°C). Los inviernos El Niño son: 1982, 1987, 1991, 1997, 2002, 2009, 2012 y 2015. Los inviernos La Niña son: 1984, 1985, 1988, 1989, 1998, 1999 y 2010. Periodo base: 1982-2015.

de Hawái, en el sector subtropical de Norteamérica, en el sector norte y suroriental de Sudamérica, al sur de África, en el sector nororiental del Pacífico Norte, al este del Atlántico norte, y en muchas otras regiones, se muestran condiciones pluviométricas secas y lluviosas, dependiendo si El Niño o La Niña están presentes. En invierno (Figura 2), cuando estos eventos suelen comenzar su evolución, las anomalías pluviométricas parecen menos extensas e intensas, aunque de todas maneras se observan condiciones secas y lluviosas en Centroamérica, Oceanía, África, Australia, Nueva Zelanda, entre otras regiones.

## Predictibilidad

A mediados de los noventa, un análisis de los pronósticos de la anomalía de TSM en la región Niño 3.4 obtenidos con cinco modelos (tres dinámicos y

dos estadísticos) mostró que se habían alcanzado niveles moderados de predictibilidad, con una correlación entre observaciones y pronósticos del orden de 0,6 con seis meses de anticipación<sup>8</sup>. Tanto los modelos dinámicos como estadísticos superaban en ese tiempo la simple persistencia cuando la anticipación era entre seis y doce meses<sup>15</sup>. Por persistencia se entiende el uso de anomalías observadas anteriormente que se suponen se mantendrán en el futuro. Por ejemplo, para anticipar las anomalías del invierno de 2016 con seis meses de anticipación, se usa la anomalía observada en el verano de 2016. Es importante destacar el hecho que estos niveles moderados de predictibilidad eran similares tanto para los pronósticos dinámicos como estadísticos. Este comportamiento de la predictibilidad, se vio incluso en el caso del evento El Niño extraordinario de 1997-98 donde los modelos dinámicos y estadísticos presentaron los mismos problemas: no pudieron anticipar ni siquiera la mitad de los valores observados y no consiguieron anticipar con más de seis meses el inicio y término de los eventos<sup>16</sup>. Aun así, los modelos estadísticos tienen un límite de predictibilidad que depende de la escala de tiempo de los fenómenos que se quieren pronosticar. Es decir, dependen de la memoria del sistema, que en el caso de ENSO está dado por el océano y su mayor persistencia térmica. Por esto, es lógico pensar que la predictibilidad de los modelos dinámicos debería superar la predictibilidad de los modelos estadísticos.

Luego de algunas décadas de evolución de los modelos, de los sistemas de observación (especialmente gracias al programa que mantiene boyas en el Pacífico Tropical<sup>15</sup>), métodos de asimilación para mejorar las condiciones iniciales, de un mejor entendimiento de la física del ENOS y por lo tanto de mejores parametrizaciones, de una mejor capacidad de cómputo, algunos investigadores indican que se ha llegado a un máximo, donde se mantienen los niveles moderados de predictibilidad<sup>17</sup>. Este límite puede ser natural o propio del sistema dinámico, o bien, se mantienen aún los problemas de inicialización, de falta de mejores parametrizaciones de procesos claves, entre otros factores.

Sin embargo, también se plantea que la predictibilidad del ENOS presenta cambios decadales<sup>15</sup>. Un análisis detallado de los pronósticos en la primera década del siglo XXI muestra que los modelos dinámicos han superado a su contraparte estadística, especialmente a tiempo de anticipación o "lead". Se mantiene la tendencia a prolongar la duración de los eventos El

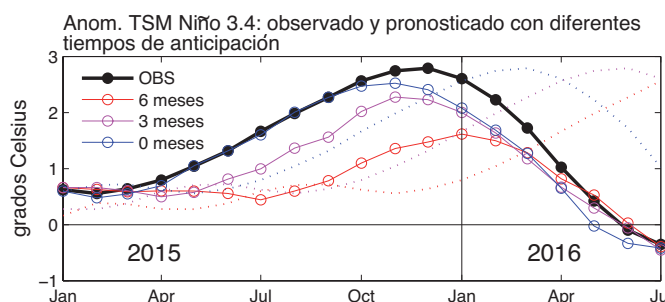


Figura 3. Evolución de la anomalía trimestral, observada y pronosticada, de la TSM en la región Niño 3.4 ( $5^{\circ}\text{S}$ - $5^{\circ}\text{N}$ ,  $170^{\circ}\text{W}$ - $120^{\circ}\text{W}$ ) entre el verano de 2015 (diciembre 2014, enero y febrero 2015) hasta el invierno de 2016 (junio, julio y agosto de 2016). En el eje horizontal de la figura se indica el mes central del trimestre. La anomalía de agosto de 2016 se estimó como la misma anomalía de julio de 2016. Los pronósticos corresponden al promedio de 16 modelos dinámicos y nueve modelos estadísticos. Se muestran tres desfases: con cero meses de anticipación (línea y círculo azul), con tres meses de anticipación (línea y círculo magenta) y con seis meses de anticipación (línea y círculo rojo). Como referencia se muestran los pronósticos por persistencia a cero (línea punteada azul), tres (línea punteada azul) y seis (línea punteada azul) meses de desfase. Fuente de los pronósticos: International Research Institute for Climate and Society (IRI), <http://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/current/>.

Niño y La Niña, así como a pronosticar inicios más suaves y lentos que los que ocurren en realidad. Es importante destacar que la razón señal-ruido es un índice de la predictibilidad de un sistema: si disminuye la señal y se mantiene el ruido, la predictibilidad disminuye. Se argumenta que durante el siglo XXI, la señal del ENSO ha disminuido, razón por la cual

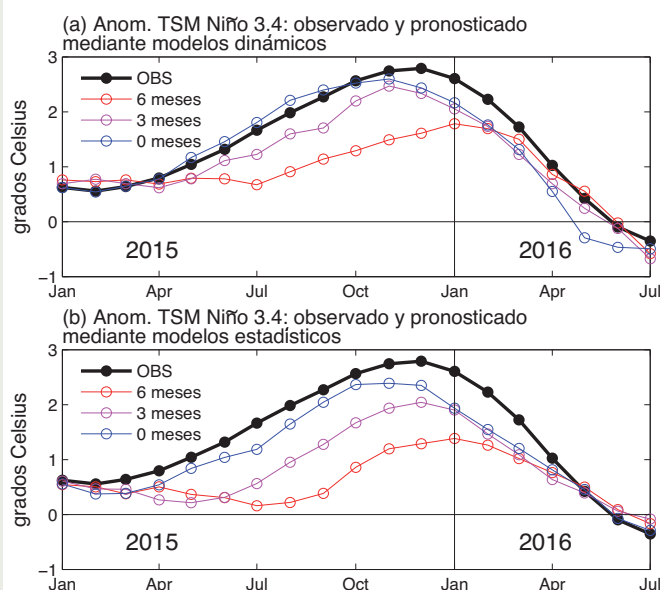


Figura 4. Como en la Figura 3, pero para el promedio de los 16 modelos dinámicos (panel superior) y para el promedio de los nueve modelos estadísticos (panel inferior).

también lo ha hecho su predictibilidad (ver Fig. 15 en la referencia 18).

## El evento El Niño 2015-16

Una manera simple y didáctica de ver la predictibilidad del ENOS es analizar lo que ocurrió con el pasado evento El Niño 2015-16. Se utilizan 16 modelos dinámicos y nueve modelos estadísticos, que se presentan operacionalmente en el sitio web del International Research Institute for Climate and Society (IRI). En la Figura 3 se muestra la anomalía en la región Niño 3.4 desde el verano de 2015 al invierno de 2016: observados y pronosticados a cero, tres y seis meses de anticipación. Se muestran los promedios de los 25 modelos. Para comparar, también se muestran los pronósticos por persistencia. Se puede notar que, con seis meses de anticipación, el inicio del evento se pronosticaba para septiembre de 2015, con un máximo valor cerca de 1,5°C en diciembre de 2015, y el regreso a condiciones normales en mayo de 2016. Con tres meses el pronóstico es bastante mejor, previendo el inicio del evento en junio de 2015, con un máximo de 2,4°C en noviembre y su término en mayo de 2016. Sin meses de anticipación, es decir, pronosticando para los próximos tres meses inmediatos, el inicio es perfecto, con un máximo de 2,6°C en noviembre a solo un mes del máximo observado en diciembre de 2,8°C, anticipando la caída del evento en solo un mes. La persistencia estuvo, en todo momento, muy lejos de la evolución pronosticada del promedio de los modelos dinámicos y estadísticos. Luego, se notan mejorías respecto de lo que ya se ha comentado anteriormente. El inicio e intensidad sí se

pudo prever, aunque con pocos meses de antelación. Sin anticipación, el pronóstico fue realmente exacto, aunque tiene poca utilidad práctica. Al menos para este evento, el término parece haber sido anticipado incluso con seis meses.

Respecto de la calidad de los modelos dinámicos en comparación con los estadísticos, en la Figura 4 se muestran por separado. Se puede notar que, para el caso del evento El Niño 2015-16, los errores (diferencia entre lo observado y pronosticado) son efectivamente menores en los modelos dinámicos que en los estadísticos. En las Tablas 1 a 4 se muestran distintos parámetros de comparación: el trimestre cuando se supera 1,0°C de anomalía en la región Niño 3.4 (Tabla 1), el trimestre cuando se alcanza el máximo (Tabla 2), el valor de la anomalía máxima (Tabla 3) y el trimestre cuando se disminuye por debajo de 1,0°C (Tabla 4). Se observa, para el evento analizado, que el retraso (o anticipo) del máximo o de la declinación se anticipa bien en ambos tipos de modelos, desde seis a cero meses de anticipación. Sin embargo, el inicio de condiciones cálidas por sobre 1°C siempre es mejor anticipado por los modelos dinámicos en dos meses. Lo mismo para la magnitud del evento. Siempre los modelos estadísticos están por debajo de los modelos dinámicos en algunas décimas de grado.

Por último, se destaca claramente el promedio de los modelos dinámicos con tres meses de anticipación. Una buena planificación depende de la confianza que hay en los pronósticos y, además, de la cantidad de meses con los que se cuenta para realizar actividades de mitigación de los efectos negativos.

Tabla 1. Trimestre en que la anomalía de TSM (ATSM) en la región Niño 3.4 aumenta por sobre 1°C. Se indican los trimestres con las letras iniciales de cada mes. Por ejemplo, AMJ corresponde al trimestre abril-mayo-junio. La diferencia positiva corresponde al retraso del momento en que aumenta la ATSM.

| Trimestre Observado | Promedio modelos dinámicos |            | Promedio modelos estadísticos |            | Anticipación |
|---------------------|----------------------------|------------|-------------------------------|------------|--------------|
|                     | trimestre                  | diferencia | trimestre                     | diferencia |              |
| AMJ 2015            | ASO 2015                   | 4          | OND 2015                      | 6          | 6 meses      |
| AMJ 2015            | MJJ 2015                   | 1          | JJA 2015                      | 3          | 3 meses      |
| AMJ 2015            | AMJ 2015                   | 0          | MJJ 2015                      | 1          | 0 meses      |

Tabla 2. Trimestre en que la anomalía de TSM (ATSM) en la región Niño 3.4 alcanza el máximo. Se indican los trimestres con las letras iniciales de cada mes. Por ejemplo, AMJ corresponde al trimestre abril-mayo-junio. La diferencia positiva (negativa) corresponde al retraso (anticipo) del momento en que se alcanza el máximo.

| Trimestre Observado | Promedio modelos dinámicos |            | Promedio modelos estadísticos |            | Anticipación |
|---------------------|----------------------------|------------|-------------------------------|------------|--------------|
|                     | trimestre                  | diferencia | trimestre                     | diferencia |              |
| NDE 2015-16         | DEF 2015-16                | 1          | DEF 2015-16                   | 1          | 6 meses      |
| NDE 2015-16         | OND 2015                   | -1         | NDE 2015-16                   | 0          | 3 meses      |
| NDE 2015-16         | OND 2015                   | -1         | OND 2015                      | -1         | 0 meses      |

Tabla 3. Anomalía de TSM (ATSM) en la región Niño 3.4 cuando se alcanza el máximo. La diferencia negativa indica una subestimación del máximo.

| Trimestre Observado | Promedio modelos dinámicos |            | Promedio modelos estadísticos |            | Anticipación |
|---------------------|----------------------------|------------|-------------------------------|------------|--------------|
|                     | anomalía                   | diferencia | anomalía                      | diferencia |              |
| 2,8°C               | 1,8°C                      | -1,0°C     | 1,4°C                         | -1,4°C     | 6 meses      |
| 2,8°C               | 2,5°C                      | 0,3°C      | 2,0°C                         | -0,8°C     | 3 meses      |
| 2,8°C               | 2,6°C                      | 0,2°C      | 2,4°C                         | -0,4°C     | 0 meses      |

Tabla 4. Trimestre en que la anomalía de TSM (ATSM) en la región Niño 3.4 disminuye por debajo de 1°C. Se indican los trimestres con las letras iniciales de cada mes. Por ejemplo, AMJ corresponde al trimestre abril-mayo-junio. La diferencia negativa corresponde al adelanto del momento en que disminuye la ATSM.

| Trimestre Observado | Promedio modelos dinámicos |            | Promedio modelos estadísticos |            | Anticipación |
|---------------------|----------------------------|------------|-------------------------------|------------|--------------|
|                     | trimestre                  | diferencia | anomalía                      | diferencia |              |
| AMJ 2016            | MAM 2016                   | -1         | MAM 2016                      | -1         | 6 meses      |
| AMJ 2016            | MAM 2016                   | -1         | MAM 2016                      | -1         | 3 meses      |
| AMJ 2016            | MAM 2016                   | -1         | MAM 2016                      | -1         | 0 meses      |

## Referencias

1. Van den Dool, H., 2007: *Empirical Methods in Short-term Climate Prediction*, Oxford University Press, 215 pp.
2. Burroughs, W.J., 2003: *Weather cycles: Real or imaginary?*, Cambridge University Press, second edition, 317 pp.
3. Goddard, L., S.J. Mason, S.E. Zebiak, C.F. Ropelewski, R. Basher, and M.A. Cane, 2001: Current approaches to seasonal-to-interannual climate predictions, *International Journal of Climatology*, 21: 1111–1152.
4. Walker, G.T., 1924: *World Weather IX, Memorandum of the Indian Meteorological Department*, 24, 275–332.
5. Walker, G.T., and E.W. Bliss, 1932: *World weather V. Memoirs of the Royal Meteorological Society*, 4:53–84.
6. Ropelewski, C.F., and M.S. Halpert, 1987: Global and regional scale precipitation patterns associated with El Niño–Southern Oscillation, *Monthly Weather Review*, 115, 1606 – 1626.
7. Glantz, M.H., R.W. Katz, and N. Nicholls (Eds.), 1991: *Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies*, Cambridge University Press, New York, 535 pp.
8. Barnston, A. G., et al., 1994: Long-lead seasonal forecasts-Where do we stand?, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 75, 2097–2114.
9. Bjerknes, J., 1969: Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific, *Monthly Weather Review*, 97, 163–72.

10. Sarachik, E.S., and M.A. Cane, 2010: *The El Niño–Southern Oscillation Phenomenon*, Cambridge University Press, 384 pp.
11. Barnett, T. P., N. Graham, M. Cane, S. Zebiak, S. Dolan, J. O'Brien, and D. Legler, 1988: On the prediction of the El Niño of 1986–1987, *Science*, 241,192–196.
12. SCOR, 1983: *Prediction of El Niño. Proc. No. 19, Paris, France, Scientific Committee for Ocean Research Working Group 55*, 47–51.
13. Barnston, A.G., M. Chelliah, and S.B. Goldenberg, 1997: Documentation of a highly ENSO-related SST region in the equatorial Pacific: Research note, *Atmosphere - Ocean*, 35, 367–383, doi:10.1080/07055900.1997.9649597.
14. Trenberth, K.E., 1997: The definition of El Niño, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 2771–2777.
15. Latif, M., et al., 1998: A review of the predictability and prediction of ENSO, *Journal of Geophysical Research*, 103, 14375–14393.
16. Landsea, C.W., and J.A. Knaff, 2000: How much skill was there in forecasting the very strong 1997/98 El Niño?, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81, 2107–2119.
17. Chen, D., and M.A. Cane, 2008: El Niño prediction and predictability, *Journal of Computational Physics*, 227.
18. Barnston, A.G., M.K. Trippett, M.L. L'Heureux, S. Li, and D.G. DeWitt, 2012: Skill of real-time seasonal ENSO model predictions during 2002–11: Is our capability increasing?, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 631–651.