

## 8 Métodos empleados para identificar El Niño

Para los científicos, existen varias maneras de reunir información sobre El Niño y sobre los eventos fríos que deben usarse para identificar a los precursores, para pronosticar su inicio, para vigilar su crecimiento y desaparición y para identificar sus teleconexiones en los trópicos y en otros lugares. Algunos métodos se han enfocado en las observaciones directas de características del ciclo de evento cálido/evento frío, otro sobre mediciones indirectas. Incluso otros han empleado información aproximada, o sea, la observación de fenómenos relacionados con el clima que se perciben como unidos a estos eventos tales como, las inundaciones, las sequías, o los incendios de arbustos y bosques. Cada uno de estos riesgos naturales deja su marca imborrable en el ambiente.

Además de las observaciones y de las mediciones directas in situ, otros métodos de evaluación incluyen los sensores remotos desde satélites, la investigación estadística y las actividades y simulaciones con modelos computacionales. Aunque los resultados de los diversos enfoques pudieran no concordar entre ellos, en su mayor parte cada estudio científico, cada nuevo método estadístico de evaluación y cada nuevo esquema de vigilancia se suma a nuestra comprensión del fenómeno de El Niño. Incluso los descubrimientos negativos pueden verse bajo una luz positiva debido a que ellos identifican vías de investigación "ciegas".

Antes de la era de los satélites y de los modelos de computador, los investigadores interesados en el Océano Pacífico (o en cualquier otro océano) solamente tenían la opción de apoyarse mayoritariamente en los buques de oportunidad (buques comerciales que atraviesan diversas partes de los océanos del mundo y efectúan observaciones científicas durante su desplazamiento). Estos buques suministran información in situ sobre corrientes oceánicas, vientos, temperaturas de la superficie del mar, etc. Pero el Océano Pacífico es una gran masa de agua, y el hecho de tener que confiar en las observaciones oportunistas de las condiciones oceánicas dejó grandes brechas en la información, tanto espacial como temporal, sobre una serie de características relacionadas con El Niño.

### Métodos estadísticos

La estadística desempeña un importante rol en casi todos los aspectos de la investigación sobre El Niño y sus teleconexiones, dado que relativamente escasos eventos El Niño han sido experimentando en forma directa y a conciencia por la generación de investigadores actuales. Fue el uso de los métodos estadísticos (tales como la correlación y la regresión múltiple), cuyo pionero fue Sir Gilbert Walker en las primeras décadas del siglo XX, quienes ayudaron a identificar muchas de las teleconexiones asociadas con la ocurrencia del fenómeno de la Oscilación del Sur. Walker, se apoyó en las técnicas estadísticas (en especial en el análisis de series tiempo) para identificar y modelar las características casi periódicas de la Oscilación del Sur. El uso de métodos estadísticos permitió a los modeladores incorporar todo tipo de procesos físicos importantes en el modelamiento y predicción de El Niño. Los actuales pronósticos de largo plazo de las anomalías del clima (por ejemplo, emitidos por el Centro de Predicción del Clima del Servicio Nacional de Meteorología de los Estados Unidos) combinan los resultados de modelos de circulación general atmósfera-océano acoplados con técnicas estadísticas multivariadas (tales como el análisis de correlación canónico o el análisis de componente principal).

La importancia de la estadística en la investigación relacionada con El Niño no puede exagerarse. Las evaluaciones estadísticas invaden todos los aspectos de la investigación de El Niño, desde la reconstrucción de registros paleoecológicos para identificar las potenciales teleconexiones hasta para proyectar las posibles implicancias de diversas características de un El Niño en un calentamiento global de la atmósfera. Las evaluaciones estadísticas han sido una parte necesaria, como también integral, del empleo de la información de El Niño, por ejemplo, en el desarrollo de un mecanismo para predecir la frecuencia de huracanes sobre una base estacional, (por medio del uso de tablas de contingencias).

Por su parte, los científicos sociales, conjuntamente con otros usuarios potenciales de la

información de El Niño, tales como los agrónomos, hidrólogos y gerentes de pesquerías, también dependen mucho del uso apropiado de la estadística para identificar la ubicación y fuerza precisa de cada episodio El Niño, de modo que puedan adaptarse en forma más efectiva para mitigar o prevenir sus potenciales consecuencias para las actividades humanas.

### En la Historia

El público tiende a pensar que gran parte de nuestro conocimiento respecto a El Niño ha surgido sólo en la última década. Sin embargo, tal como se mencionó antes, el interés en los aspectos de El Niño y la investigación sobre el mismo no tienen un origen reciente y puede seguirse con facilidad hasta por lo menos fines de los años 1800. Fue un fuerte El Niño, en 1891, que motivó la discusión local de los peruanos respecto a El Niño como un fenómeno que les debía preocupar. Luego de ese evento, el Capitán de la Armada peruana, Camilo Carrillo describió la historia del interés científico en las aguas costeras del Perú remontándose hasta fines de los 1700 y los 1800. Su conocimiento respecto a El Niño sugiere que los peruanos tenían una gran cantidad de información a mano a fines del siglo XIX. Él habló de cambios en los vientos costeros y en la productividad biológica, junto con destacar que se tenía conocimiento de excesivas precipitaciones en la parte norte del Perú y brotes de enfermedades, asociadas con lo que hemos llegado a conocer como cambios relacionados con El Niño en el ambiente oceánico. De modo que en la actualidad, gran parte de la información de El Niño que están empleando los científicos asociada con Perú como su base de estudio tiene que haber sido conocida en forma pública por alrededor de 100 años.

### Evidencia anecdótica

La información anecdótica puede aparecer en una diversidad de formas, tales como los diarios personales y las interpretaciones históricas de eventos pasados. Por ejemplo, en 1895, el geólogo Norteamericano, Alfred Sears, expuso ante la Sociedad Geográfica Norteamericana sobre el "Desierto Costero del Perú". Además una breve descripción de la flora, fauna y geología de la región costera, él mencionó las "lluvias siete-anales" que se producen en la región del norte usualmente árida del Perú.

Estas lluvias parecen haberse repetido cada siete años, o algo así, desde entonces se han visto, con buena razón, como las lluvias que acompañan a los eventos de El Niño. Sears informó respecto a los grandes cambios que él observó en el panorama del desierto: "hasta ahora tierra sin vida brota con fuerza; las plantas recientes y floridas aparecen en cada mano creciendo hasta la altura de la cabeza de un caballo" (Sears, 1895, p. 262). Él también dio cuenta de la historia local. En 1531 cuando el conquistador español Francisco Pizarro comenzó su conquista del Perú, las lluvias siete-anales demostraron ser sus aliadas. Aparentemente él desembarcó con sus tropas a lo largo de la costa peruana del norte durante un año húmedo (léase ahora como El Niño). Esto le permitió encontrar alimentos y aguas a lo largo de la ruta de su conquista - alimento y agua que en la mayoría de los años no habría estado disponible. Sears escribió lo siguiente:

llueve en la costa Norte del Perú sólo una vez en siete años. Todos los años restantes son amargamente secos. Pizarro no pudo haber ido desde Tumbes, donde él desembarcó por primera vez después de su lucha con los indios en Puna, hasta el valle de Tangarara y encontrado alimentos para sus animales, ni tampoco él hubiera encontrado las pequeñas colonizaciones a lo largo del camino en cualquier otra estación que no fuera la húmeda. Otra vez, él hubiera sido forzado a dejar el valle Chira, Tangarara, por las fiebres de malaria excepto durante un seguro año húmedo, tal como se presenta ese valle solo en los años húmedos.

(Sears, 1895, pp. 263-4)

Es muy interesante que, en 1985, luego de El Niño de 1982-83, varios artículos se escribieron para *Disasters*, una revista internacional de estudios de desastres y prácticas asociadas referente al impacto y la salud humana. Uno de los trabajos discutía los resultados de una investigación relacionado con los brotes de la malaria (como también de la disentería y el cólera)

que tienden a acompañar a los eventos el Niño. Nuevamente, a comienzos de 1995 aparecen artículos de diarios sobre los recientes descubrimientos de investigaciones sobre las conexiones entre El Niño y los efectos en la salud. Sin embargo, Sears cien años antes había expuesto la creencia local de la relación entre estas lluvias siete-anales (un indicador para un evento El Niño) y los brotes de la malaria en el norte de Perú. Tales conexiones identificadas en observaciones anecdóticas aparentemente están siendo "redescubiertas" en la actualidad por los investigadores en una diversidad de campos. Tal vez los investigadores debieran asignar más valor a la revisión de información histórica anecdótica que la que le han prestado hasta hoy.

William Quinn y sus colegas creyeron con fuerza en el uso de la información histórica de todo tipo. Cualquier información que proporcionara pistas respecto a posibles eventos El Niño se tomaba en consideración. Esto permitió a Quinn y a sus colaboradores construir una historia cronológica de los eventos El Niño de varios cientos de años. La cronología se basó en observaciones y registros históricos tal como los encontrados en diarios personales, bitácoras de buques, registros de precipitaciones, etc. Más adelante, ellos extendieron la cronología empleando ubicaciones más distantes de consecuencias asociadas a El Niño, tales como las inundaciones del Nilo, con registros que se remontan al siglo VII.

### Evidencia Paleoecológica

Ha habido una cantidad de intentos hechos por investigadores de reconstruir la historia de El Niño remontándose hasta los tiempos prehistóricos. Estos estudios, designados como paleo estudios, buscan identificar signos indirectos de ocurrencia, frecuencia y magnitud de los eventos de El Niño de edades pasadas. Algunos investigadores incluso han tratado de identificar características más específicas de esos eventos usando datos asociados, que incluyen los resultados de los análisis de los anillos de los árboles, de núcleos de hielo, de depósitos de suelo fósil, de registros de sedimentos marinos de abundancia de peces, de evidencias de grandes incendios muy extendidos, de inundaciones, de sequías, etc. Estos tipos de datos proporcionan una identificación indirecta de la ocurrencia (y posible fuerza) de episodios pasados de El Niño, y de impactos ambientales locales y sus posibles teleconexiones (consultar Díaz y Markgraf, 1992.).

Está claro que tal información ha sido fundamental en la identificación de cambios ocurridos sobre prolongados períodos de tiempo en las características de los eventos: no obstante, existen varios supuestos que necesitan validarse: (a) que los eventos El Niño del pasado prehistórico distante fueron similares a aquellos de la actualidad; (b) que sus patrones de teleconexiones, tal como los conocemos en la actualidad, hubieran sido los mismos bajo diferentes condiciones atmosféricas y oceánicas que se producían entonces; y (c) que ellos respondían a las mismas condiciones de forzamiento, a pesar de los períodos de frío y calor de siglos de duración, con respecto a las temperaturas globales promedio. (¿Podría un calentamiento global inducido por el hombre evocar cambios ecológicos similares a aquellos que acompañarían a un cambio natural del clima?). Existe también un problema con la información generada por eventos alternativos y que pudieran ya sea enmascarar la ocurrencia de un evento El Niño (tal como podría producirse en períodos de erupciones volcánicas activas en el mundo) o producir impactos similares en ausencia de este evento. En estadísticas, esto se menciona como un problema de atribución, tratando de identificar las relaciones causales cuando existen muchos contribuyentes potenciales a un cambio ambiental.

A pesar de estas palabras de precaución, el interés por reconstruir la historia pasada de El Niño ha sido bastante fructífera y ha conducido a una mejor comprensión científica de sus causas e impactos, como también de los cambios en sus características.

### Evidencia Biológica

Las consecuencias del evento 1957-58 atrajeron la atención de científicos en un simposio en California a fines de los años 1950. Los participantes en el simposio destacaron la importancia de los indicadores de cambios biológicos en el ambiente oceánico, observando que "era muy evidente... que la evidencia más fuerte y más espectacular del cambio marcado en la contra corriente costera... venía de la observación biológica, en vez de la observación física" (CalCOFI, 1959). Los cambios iniciales en las condiciones oceánicas pudieran tener impactos aparentemente insignificantes, pero aún así detectables, sobre algunos tipos de recursos marinos

vivientes, mucho antes de que los indicadores que se pueden medir con más facilidad se hagan evidentes a los investigadores.

Se pueden usar varios indicadores biológicos potenciales y reales para identificar el posible inicio de un evento El Niño. Uno de estos indicadores es la estructura de la edad de los peces capturados. Durante el evento de 1972-73, bolsas de aguas frías aparecieron cerca de la costa en medio del calentamiento general de la superficie del mar a lo largo de la costa peruana. Tales bolsas contenían grandes cantidades de anchoveta que fueron de fácil acceso para los pescadores. Los pescadores traían anchoveta al interior de sus botes a unas velocidades de captura muy alta y transportaban sus capturas de vuelta hacia las fábricas procesadoras de harina de pescado a lo largo de la costa, para volver más tarde (algunas veces en el mismo día) en búsqueda de capturas adicionales. Por desgracia, escasos eran los que estaban observando estrechamente las características de la captura; estaban capturándose peces adultos en cantidades extraordinarias, aunque esta porción de la población era la que se esperaba que produjera futuras generaciones. Cuando los investigadores se dieron cuenta de lo que había sucedido, la población de anchoveta estaba en medio de un colapso, del cual no se recuperaría durante muchos años.

Otro indicador biológico del inicio de un El Niño está asociado al contenido de grasa del pez. Durante los eventos el contenido de grasa se reduce a medida que el pez usa sus reservas como sustento en presencia de aguas superficiales pobres en nutrientes. Unido a esto existe todavía otro indicador biológico de cambios de las condiciones ambientales, el Índice Gonádico. Los investigadores chilenos emplearon el Índice Gonádico en el evento 1982-83 para identificar la disminución en la fertilidad (en este caso) de la sardina Chilena. Cuando estos peces tienen un bajo contenido de grasa disponen de escasa grasa para el desarrollo Gonádico y, por consiguiente, para la producción de huevos, lo que provoca una disminución en la fertilidad general. En consecuencia, los aumentos y disminuciones en el contenido de grasa pueden usarse como una información adicional para identificar sutiles cambios ecológicos en el ambiente marino.

Las poblaciones de aves marinas, también, son indicadores importantes de cambio ambiental relacionado con las interacciones aire-mar en el Océano Pacífico. Durante los eventos El Niño, las poblaciones de aves en diversas islas en el Pacífico Tropical, por ejemplo en ubicaciones tan distantes como la Isla Christmas y las Islas Galápagos, abandonan sus colonias, dejan de reproducirse y sufren altas tasas de mortalidad, en especial entre los polluelos. Esto puede asociarse a cambios en las poblaciones de peces locales, de los cuales dependen las aves para su sustento. Con los eventos cálidos, declina la disponibilidad de nutrientes, fracasa la reproducción de peces, los peces restantes se dispersan y se hace más difícil para que las aves los ubiquen. Así, la redistribución y la reducción en la cantidad de nutrientes que alcanzan la zona iluminada por el sol (zona fótica) en torno a esas islas y a áreas costeras, característica que fue prominente durante el evento El Niño 1982-83, se han relacionado con el fracaso de la reproducción observado en las aves marinas y en los mamíferos marinos en las Islas Galápagos.

Una investigación reciente, que utilizó observaciones satelitales del color del océano y que fue complementada por mediciones oceanográficas coincidentes, ha demostrado que existe una estrecha relación entre la distribución de poblaciones de fitoplancton en torno a las islas Galápagos y las condiciones oceanográficas observadas durante El Niño 1982-83.

(Feldman, 1985, p. 125)

Otro indicador de El Niño es la presencia de especies de agua cálida en regiones normalmente ocupada por especies de agua fría. En parte, esto se debe al debilitamiento de los procesos de surgencia y, en parte, a la aparición de grandes extensiones de aguas superficiales inusualmente cálidas. Como resultado, las capturas de especies de aguas cálidas por los pescadores aumentan durante El Niño.

#### Observaciones, vigilancia y modelamiento

Las observaciones (mediciones) de las temperaturas del océano, desde la superficie hasta mayores profundidades son críticas. Tales mediciones son necesarias en forma continua de modo que los investigadores puedan calibrarlas contrastándolas con la realidad física de sus parámetros

de modelamiento, como también con el resultado de los modelos y de sus análisis. Esta información también es requerida por los especialistas en sensores remotos, quienes utilizan las mediciones y observaciones in situ para el desarrollo y mejoramiento de sus herramientas de sensores remotos.

### Sensores remotos

Con la incorporación de los satélites, el potencial para mejorar la capacidad de la sociedad de vigilar, predecir y responder ante la ocurrencia de El Niño y los eventos fríos a aumentado grandemente. Los investigadores de la NASA, Lau y Busalacchi han sugerido que:

el cuadro de una variación coherente a escala global [i.e. El Niño] no emerge sino hasta fines de la década de 1960 y comienzos de la década de 1970, cuando los satélites meteorológicos comenzaron a aparecer en la escena. De hecho...[Bjerknes]...conclusión de gran escala, variaciones coherentes a través del Pacífico se basaron en gran medida en fotografías satelitales de nubosidad combinadas procedentes de ESSA 3 y 5.

(Lau and Busalacchi, 1993,p.281)

### **Zona de Convergencia Inter-Tropical**

Los estudios y observaciones de los procesos atmosféricos que producen precipitaciones están entre las más importantes contribuciones a la habilidad de los países tropicales para cultivar suficiente comida para alimentar a sus pueblos. En los trópicos, estos procesos están localizados en la región que los científicos denominan Zona de Convergencia Inter-Tropical o ZCIT. Este es uno de las más importantes siglas para aquellos interesados en los problemas que enfrentan los países tropicales.

La ZCIT es la región que circunda el globo donde los vientos alisios del hemisferio norte encuentran (convergen) con aquellos del hemisferio sur. Las temperaturas oceánicas más altas están asociadas con la posición anual promedio de la ZCIT. La ZCIT no ocurre exactamente sobre la línea del ecuador, está localizada entre 5 a 10 grados al norte de ésta.

La convergencia de los vientos, conjuntamente con las altas temperaturas de la superficie del mar en esta región, causan un movimiento ascendente de la atmósfera, que tiende a producir sistemas de nubes propensos a las precipitaciones. La ubicación normal de la ZCIT está relacionada con la progresión anual de las estaciones. Como resultado de esto, su ubicación general y su comportamiento estacional de un año a otro es generalmente conocido. Pero en una estación cualquiera, su ubicación exacta y muchas de sus características tales como su intensidad o sus procesos productores de precipitaciones pueden variar.

En gran medida, la vida en muchos países tropicales depende del comportamiento usual (léase esto como "esperado") de la ZCIT. Las actividades humanas relacionadas a la producción agrícola, crianza de ganado, administración de recursos hídricos y otros pueden de algún modo adaptarse a un grado de variación en la ZCIT. Algunas veces, ellos no pueden adaptarse, especialmente cuando se enfrentan a eventos extremos como sequías o inundaciones. El Niño y la Oscilación del Sur son fenómenos que generan "anormalidades" en el comportamiento de la ZCIT.

Desde comienzos de la década de 1980, los eventos más recientes de El Niño se han estado vigilando en forma extensa, tanto desde la superficie como desde el espacio. Desde el espacio se pueden observar diversos parámetros temporales a través de grandes extensiones del océano. Lau y Busalacchi han dicho que el grado de éxito, así como también los problemas enfrentados, muestran una creciente dependencia en las mediciones efectuadas por los sensores remotos de satélites de los parámetros claves del evento, tales como: temperatura superficial del

mar, calor latente y flujos de humedad (esto se relaciona con los procesos atmosféricos productores de lluvia y con el enfriamiento o calentamiento atmosférico del océano), el contenido de vapor de agua en la columna atmosférica (esto se relaciona con el potencial de lluvia de la atmósfera y la dinámica del océano y la atmósfera), la rugosidad del mar, medición indirecta del viento superficial (vientos que arrastran las capas superiores de los océanos), la circulación del océano y los cambios en el nivel del mar (Lau y Busalacchi, 1993, p. 282). Elogiando el valor de los sensores remotos, estos investigadores concluyen que

Debido al estrecho acoplamiento de estas variables atmosféricas y oceánicas, la vigilancia simultánea y coordinada de todo el sistema océano-atmósfera por medio de diferentes instrumentos satelitales es sobresaliente.

(Lau y Busalacchi, 1993, p. 291).

En otras palabras, al utilizar satélites, los investigadores pueden observar los resultados de la integración de numerosos procesos ambientales sin tener que enfocar ni observar cada proceso en forma aislada. Un buen ejemplo, entre muchos, del "poder" potencial de los sensores remotos como herramienta de vigilancia es la habilidad para medir indirectamente (o sea, por aproximación) la actividad de tormenta de truenos, al medir la emisión de radiación de onda larga (OLR). La energía recibida desde el sol (radiación solar) que llega a la superficie de la tierra es re-emitida hacia el espacio como una radiación de onda larga. La OLR puede ser intersectada por una cubierta de nubes Cumulus. Las nubes Cumulus son buenas candidatas para producir lluvias. Por lo tanto, en aquellas regiones donde existe dicha formación de nube las lecturas de OLR son más bajas que en aquellas regiones de la superficie de la tierra donde las nubes no bloquean la salida de la radiación de onda larga. El desplazamiento de la actividad convectiva en dirección hacia el Pacífico Central y Oriental (desde el Pacífico Occidental), es un indicador del inicio de un episodio El Niño y puede captarse por medio de mediciones de OLR efectuadas por satélites.

#### Actividades de modelamiento

En el pasado, la información respecto al comportamiento del Océano Pacífico provenía de mediciones in situ procedentes de boyas estacionarias o a la deriva y desde buques en tránsito de un lugar a otro. Y, aunque la era del satélite ha conducido a nuevas herramientas y a nuevas formas de medir diversos aspectos de los ambientes oceánicos y atmosféricos, no puede confiarse plenamente en los métodos antiguos y en los nuevos para proporcionar por completo todas las piezas del puzzle de El Niño. Los métodos anteriores demorarían mucho y serían muy costosos para reunir información con respecto a una extensión tan grande y durante tantas décadas y siglos con el fin de observar una cantidad estadísticamente significativa de eventos de El Niño. Con respecto a los satélites, las limitaciones de la tecnología de los sensores remotos, tal como la imposibilidad de hacer observaciones directas por debajo de la superficie del mar, también hacen que cierta información sea menos confiable. Debido a estas limitaciones, una cantidad creciente de investigadores cree que debemos confiar en gran medida en los modelos de computador con el fin de obtener un panorama de los procesos de El Niño para la predicción, como también para otros propósitos de investigación científica relacionados con El Niño.

Aunque tales modelos son por definición, necesariamente, simplificaciones de la realidad, los científicos han identificado expresiones matemáticas que representan lo que ellos consideran aspectos claves del océano, la atmósfera y sus interacciones. Luego los modelos se prueban para ver si son capaces de reproducir la ocurrencia de eventos pasados. Una vez satisfechos que estos modelos pueden reproducir una etapa precursora de El Niño con cierto grado de confiabilidad, los modeladores entonces vuelven sus esfuerzos y modelos hacia (a) la proyección del inicio de futuros eventos de El Niño, (b) el intento de comprender la forma en que interactúan la atmósfera y el océano para producir el fenómeno de El Niño o (c) identificar las teleconexiones en las regiones tropicales y extratropicales.

Existen diferentes tipos de modelo, desde el simple hasta el muy complejo. Ningún modelo único puede capturar todos aspectos de los eventos observados. En general, los modelos más ampliamente usados se denominan modelos acoplados de océano-atmósfera. Estos tipos de

modelos se usan para capturar las interacciones dinámicas entre los procesos oceánicos y atmosféricos y se clasifican en tres clases principales:

**Modelos de área limitada.** Estos modelos se centran en una región geográfica relativamente pequeña dentro del Océano Pacífico y en la correspondiente limitada parte de la atmósfera, en vez de hacerlo respecto de todo el globo o incluso de toda la cuenca del Pacífico. En forma típica la cobertura del área es la parte tropical de la cuenca del Pacífico. Estos modelos de computador son más bien simples en su formulación matemática. Son fáciles de hacerlos correr en los modernos microcomputadores y por lo tanto son económicos. Uno de estos modelos de área limitada fue empleado por los oceanógrafos Cane y Zebiak en 1986 para predecir con éxito El Niño de 1986-87. Algunos investigadores lo ven como un buen candidato para hacer predicciones operacionales de El Niño. Una serie de investigadores han empleado los modelos de área limitada para investigar el desarrollo y los efectos de las ondas oceánicas internas (en otras palabras, las ondas Kelvin y Rossby (consultar pp.39, 41)) en la producción ya sea de eventos fríos o de El Niño. Este tipo de modelo ha sido criticado debido a que su relativa simplicidad y su dominio limitado (o sea, el área de cobertura geográfica) excluyen procesos tales como la posible influencia sobre los trópicos de regiones fuera de los trópicos que pueden demostrar ser importantes para comprender el fenómeno de El Niño.

**Modelos Globales de Circulación General Atmosférica (GCM).** Un tipo de modelo de circulación atmosférica global que está conectado por medio de fórmulas matemáticas a un modelo oceánico de área limitada. En forma típica el modelo oceánico de área limitada es muy detallado y capaz de reproducir en forma correcta la dinámica de las ondas internas del océano. Debido a que la parte oceánica del modelo tiene un alcance geográfico limitado, con frecuencias se producen problemas para reproducir los procesos oceánicos que se originan fuera del dominio geográfico del modelo, en particular aquellos procesos en el océano Pacífico Occidental.

**Modelos de Circulación General Acoplados.** Otro tipo de GCM atmosférico global es aquel que está unido a un GCM oceánico global. Estos modelos acoplados son especialmente útiles para generar escenarios de calentamiento o enfriamientos globales y para identificar sus posibles impactos sobre diversos aspectos de un El Niño, tales como los cambios en su intensidad, magnitud y duración. No obstante, estos modelos son excesivamente caros de operar, ya que requieren grandes cantidades de tiempo en super computadoras. De modo que, los científicos deben transar entre la complejidad matemática de un modelo que puede representar mejor el mundo real, y el costo de operar modelos relativamente más simples durante períodos más cortos de tiempo.

En la actualidad, ningún tipo de modelo es capaz, por sí solo, de reproducir todos los aspectos de los eventos observados de El Niño. Dado que la mayoría de las actividades de modelamiento en computadores son proyectos más bien recientes, y como cada uno de los modelos tiene limitaciones significativas, su uso y/o aplicación para predecir o para propósitos de investigación de los impactos sociales se debate con intensidad dentro de la comunidad científica. En particular, existe una discusión de modeladores y elaboradores de políticas por igual con respecto a si estos modelos deben emplearse para hacer pronósticos estacionales o de largo plazo de El Niño sobre una base operacional, o para proporcionar estimaciones de cómo el proceso de El Niño podría ser afectado por el calentamiento global. Los modelos de computador, en su condición de herramientas de investigación más bien recientes, probablemente sufrirán mejoramientos rápidos durante los próximos años. En consecuencia, los resultados relacionados con las predicciones estacionales deben verse en el contexto de errores contenidos dentro de los modelos de la actualidad, resaltando el hecho de que aquellos quienes buscan usar dichos resultados para fines de toma de decisión deben tener un gran cuidado. Sin embargo, el modelamiento de El Niño proporciona esperanza para el futuro con respecto a la predicción del evento con suficiente tiempo de adelanto para permitirle a la sociedad prepararse para sus posibles consecuencias.