

"El Niño Oscilación del Sur" y los fenómenos hidrometeorológicos en Baja California: el evento de 1997/98

Reyes-Coca, Sergio^{1,2} y Ricardo Troncoso-Gaytán¹

¹ Centro Regional de Investigación Pesquera de Ensenada. INP Apdo. Postal #1306 CP. Ensenada, B. C., México.

E-mail: ensenada@inp.semarnap.gob.mx; rtron@telnor.net

² Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. (CICESE). AP. 2732. Ensenada, BC.

REYES-COCA, S. y R. Troncoso-Gaytán. 2001. "El Niño Oscilación del Sur" y los fenómenos hidrometeorológicos en Baja California: el evento de 1997-1998. *INP. SAGARPA. México. Ciencia Pesquera No. 15*.

El fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) se caracteriza por un calentamiento anormal de las aguas superficiales del océano Pacífico ecuatorial oriental (El Niño) y por la inversión en el gradiente de presión atmosférica superficial entre Australia y el Pacífico Sur central (Oscilación del Sur). Este fenómeno favorece la transferencia de energía a la atmósfera tropical en forma de calor y humedad, que es distribuida a todo el mundo por la circulación atmosférica. Conforme este fenómeno evoluciona, se forman grandes sistemas de nubes convectivas en la atmósfera tropical que dan origen a fenómenos hidrometeorológicos tales como frentes de latitudes medias, "lenguas de humedad tropical", tormentas tropicales y huracanes. Científicamente se ha podido comprobar que los fenómenos hidrometeorológicos que causan las lluvias en Baja California dependen fuertemente de las condiciones climáticas (relación océano-atmósfera) a escala planetaria, en particular de fenómenos como El Niño Oscilación del Sur. En este trabajo se presenta una breve síntesis del impacto del ENOS en las lluvias invernales de Baja California y de expectativas en las principales regiones del Estado, en condiciones extremas como las observadas en 1997 y 1998. En general, el impacto de este evento ENOS fue mayor del esperado, un 12% por arriba de lo esperado. Los impactos de las lluvias sobre las pesquerías en el estado no es claramente conocido; no obstante, existe información cualitativa de ciertos efectos, obtenida principalmente de los pescadores y sus asesores técnicos. El presente trabajo considera aspectos relacionados solamente con la lluvia registrada sobre el estado de Baja California como una primera aproximación hacia estudios posteriores relacionados con las pesquerías.

The El Niño-Southern Oscillation phenomenon is characterized by a large sea surface water warming along the central and eastern equatorial Pacific and by a reversal in the sea level atmospheric pressure gradient between Australia and the south-central equatorial Pacific. This phenomenon favors a considerable energy and heat transfer from the ocean to the tropical atmosphere, which in turn are distributed around the world by the atmospheric circulation. As this phenomenon evolves, great convective cloud systems are formed in the tropical atmosphere which eventually give origin to a variety of hydrometeorological phenomena such as middle latitude frontal systems, moist tropical tongues, tropical storms and hurricanes. From different scientific results, it has been proven that the hydrometeorological phenomena that causes the precipitation over Baja California strongly depends on the planetary climatic conditions (ocean-atmosphere), particularly on phenomena such as the El Niño Southern Oscillation (ENSO). In this work, a brief synthesis about the ENSO impacts on the winter precipitation of Baja California is presented, as well as the possible scenarios that can be observed for the most important regions in the state in face to the extreme event observed in 1997/98. In general, the observed values for this ENSO event were about 12% above the most probable scenario. The precipitation impacts on state's fisheries are not clearly known; nevertheless, qualitative information on some effects exists, principally gathered from local fishermen and their technical advisors. Only the rain registered on Baja California state is analyzed in the present article as a first approximation to further studies related to fisheries.

Introducción

El fenómeno El Niño y la oscilación del sur

El fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS) es una perturbación interanual del sistema climático, oceánico y atmosférico con intensas y amplias consecuencias para la sociedad y los ecosistemas en todo el mundo (McPhaden, 1993). Este fenómeno se caracteriza en el océano por un calentamiento de las aguas superficiales y subsuperficiales (0-300m) en el Pacífico central y oriental, frente a las costas de Perú y Ecuador (Cane, 1983); mientras que en la atmósfera se caracteriza principalmente por un desplazamiento desde su posición normal, de los grandes sistemas de formación de nubes y ascenso de humedad del Pacífico tropical Indone-

siense hacia el Pacífico americano (Rasmusson y Wallace, 1983). Hasta fines de la década de los años setenta se había observado que el evento ENOS ocurría con una frecuencia de 2 a 10 años y duración de un año (Rasmusson y Wallace, 1983); sin embargo, durante los últimos veinte años se ha observado que los eventos ENOS se han hecho más frecuentes, más intensos y de mayor duración, que se pueden extender hasta dos años, como ocurrió con los eventos de 1991-1992 y 1992-1993 (Mc Phaden, 1993).

En condiciones normales (no ENOS), los vientos alisios del noreste en el hemisferio Norte y del sudeste en el hemisferio Sur, que convergen sobre la región ecuatorial del océano Pacífico, favorecen el transporte de considerables volúmenes de agua superficial hacia el occidente en donde se acumulan y aumentan el desnivel de la superficie del mar entre el Pacífico ecuatorial occidental (más alto) y el

oriental (más bajo). El agua superficial recibe grandes cantidades de radiación solar formando una gran poza cálida en una región que se extiende horizontalmente desde el sudeste de Asia e Indonesia hasta el nordeste de Australia. En ella comúnmente se observan temperaturas superficiales por arriba de los 28.5 °C, lo cual favorece que enormes cantidades de agua sean evaporadas, se formen grandes sistemas de nubes en la troposfera y que todo el sudeste de Asia e Indonesia sea normalmente muy lluvioso; mientras que, por el contrario, en la región oriental a lo largo del Pacífico tropical americano se observan condiciones de sequía, con pocas precipitaciones, dando a esa región su característica desértica ("The TAO Project Office", 1997, ver Fig.1).

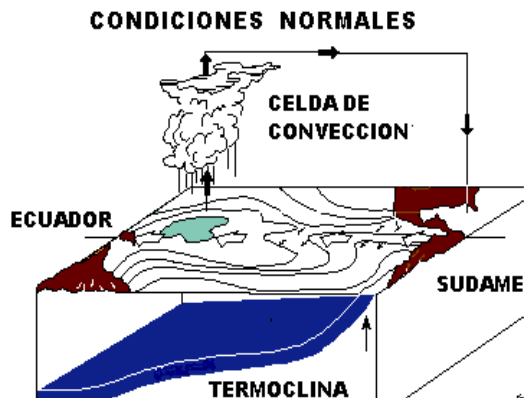


Fig. 1. Esquema de las condiciones normales sobre el océano Pacífico. Condiciones algo más cálidas y lluviosas se encuentran cercanas a la región asiática, mientras que la región oceánica cercana a Perú se caracteriza por ser fría y seca, con fuertes vientos alisios e intensas surgencias costeras favorables a las pesquerías (Modificada de "The TAO Project Office", 1997).

En condiciones anormales (condiciones ENOS) los vientos alisios se debilitan e incluso se invierten, la superficie oceánica tiende a nivelarse, se generan ondas oceánicas que se propagan desde la poza de agua cálida hacia el continente americano que hacen que el nivel de la superficie del mar varíe en unos cuantos centímetros (10 a 30 cm), se reduce la altura en la región asiática y aumenta en la americana. Este fenómeno se presenta casi simultáneamente en el océano y la atmósfera y genera intercambio de distintas propiedades alrededor del mundo (Philander, 1993; Trenberth, 1997). Al relajarse los vientos alisios se desplaza hacia el Este el sistema nuboso y, por tanto, el transporte neto a la atmósfera de calor, energía y humedad se desplaza desde el océano Pacífico asiático hacia el Pacífico oriental e incluso al mismo continente americano ("The TAO Project Office", 1997, ver Fig.2).

En el océano el transporte de calor se manifiesta en un aumento de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) frente a Perú y Ecuador y a lo largo de la costa americana desde Chile hasta California; el transporte de energía se manifiesta en un aumento del nivel medio del mar (Cane, 1983); en la atmósfera el transporte de humedad se manifiesta en una mayor evaporación en el Pacífico tropical central y oriental (Rasmusson y Wallace, 1983) y en la formación de lenguas de humedad que son arrastradas por la circulación atmosférica hacia el noroeste de México, para eventualmente mezclarse con los frentes y

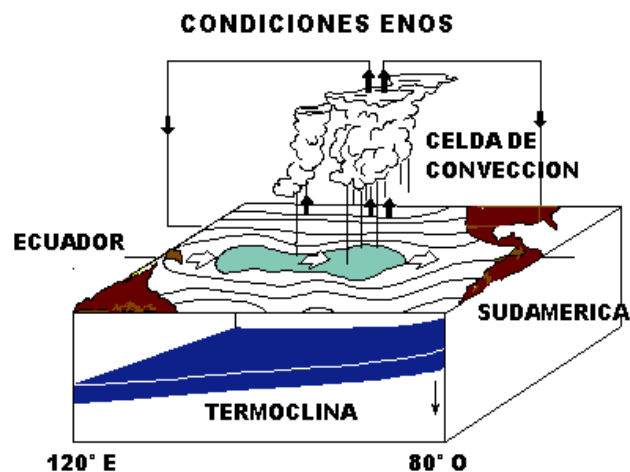


Fig. 2. Esquema de las condiciones ENOS sobre el océano Pacífico. Ahora las condiciones algo más secas se encuentran cercanas a la región asiática, mientras que la región oceánica cercana a Perú se caracteriza por ser cálida y lluviosa, con débiles vientos, sin surgencias costeras y desastrosas para las pesquerías (Modificada de "The TAO Project Office", 1997).

tormentas extratropicales, con posibilidad de causar fuertes lluvias e inundaciones repentinas, como se discutirá más adelante.

Posiblemente el fenómeno ENOS se ha presentado durante toda la historia del hombre; sin embargo, ha sido sólo durante las últimas dos o tres décadas cuando la tecnología ha tenido grandes avances que han permitido observar y registrar con mayor detalle las distintas características del fenómeno. En la actualidad se tiene definido un índice multivariado sobre la presencia e intensidad del fenómeno ENOS (Wolter y Timlin 1997, ver Fig.3).

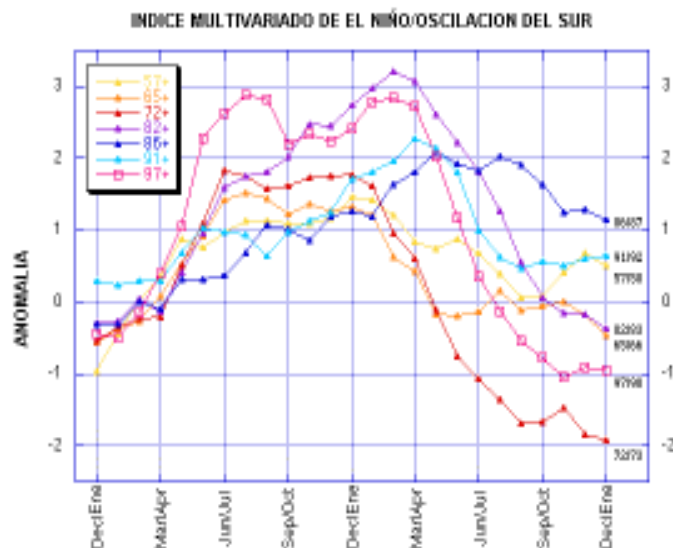


Fig. 3. Índice multivariado del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur en varios eventos fuertes y su comparación con el evento de 1997-1998 (Wolter y Timlin, 1997).

Dado que no todos los eventos ENOS son iguales, no se esperan siempre los mismos efectos, principalmente en cuanto a intensidad y duración. Por ejemplo, el evento de 1976-1977 (ver siguiente sección) estuvo dominado más por la componente oceánica (temperaturas por arriba de lo normal en el Pacífico tropical oriental) que por la componente atmosférica (oscilación del Sur). Esta última componente se manifestó más intensamente durante el invierno de 1977-1978, que fue cuando se tuvo un alto impacto por las altas precipitaciones en la región de Baja California, un año después de El Niño (Reyes y Miranda, 1991). Es decir, puede haber retraso en los efectos y, por tanto, en los impactos asociados a este fenómeno.

El evento ENOS de 1997-1998 fue uno de los más anómalos de todos los registrados: primero, y quizás lo más importante, por la gran intensidad y cobertura espacial que mostró hasta fines de 1997; segundo, por haber iniciado su gestación con unos dos meses antes que el promedio de todos los anteriores; y tercero, por la magnitud de las teleconexiones que se han podido derivar del mismo; es decir, por los distintos fenómenos directamente influidos por el ENOS, como son la intensa sequía en Oceanía, los incendios ocurridos en algunas regiones de Indonesia, las lluvias intensas en la región de Perú y norte de Chile y la intensidad de las tormentas y huracanes que causaron tanto daño en los estados de Oaxaca y Guerrero en México a fines del verano de 1997.

Fenómenos hidrometeorológicos en Baja California

De acuerdo a algunos pronósticos científicos, se espera que la temperatura global continuará incrementándose en los próximos decenios, aumentará la evaporación del agua de océanos y lagos, la transpiración vegetal en selvas y bosques y posiblemente también se vea afectada la precipitación; sin embargo, no se tiene certeza acerca de las regiones en las que podría aumentar o disminuir la precipitación pluvial. Algunos estudios predicen una disminución en el norte de México y sudoeste de los Estados Unidos, coincidente con el incremento de la temperatura global (Stockton y Boggess, 1979). Probablemente la circulación en la atmósfera y los océanos se altere y sus condiciones se vuelvan más inestables, pues aumentaría la energía calorífica disponible, con mayor efecto e intensidad de eventos extremos tales como huracanes, inundaciones, sequías y de fenómenos climáticos como El Niño Oscilación del Sur, entre otros.

Las características de la lluvia en Baja California muestran una alta variabilidad temporal y espacial en todas las escalas, con distintos patrones climáticos influenciados por fenómenos oceánicos y atmosféricos regulados por la topografía de la región (Hastings y Turner, 1965; García y Mosiño, 1967). En la región noroeste de Baja California se tiene un clima de tipo mediterráneo, con precipitación unimodal de noviembre a abril, con máximos en febrero y marzo (Reyes *et al.*, 1990). Aunque ya se ha detectado una tendencia al incremento en la lluvia y la temperatura del aire en el noroeste de Baja California, ésta no es continua y se observa una gran variabilidad, con años muy secos o muy lluviosos asociados al evento de El Niño Oscilación del Sur (Minnich *et al.*, 2000). De la precipitación pluvial, la recarga de acuíferos y represas, los escurrimientos a lo largo de arroyos y la descarga en las zonas costeras depende la disponibilidad de agua dulce para la irrigación de los campos agrícolas, para usos domésticos y para los ecosistemas costeros, que es fundamental para el Estado de Baja California y por supuesto varía notablemente durante los eventos ENOS. Consecuentemente, sería

posible prevenir la pérdida de millones de dólares si la población y el gobierno tomaran las medidas apropiadas para aprovechar este conocimiento técnico y científico.

Actualmente ya es muy aceptado que el fenómeno ENOS está relacionado con las lluvias en el noroeste mexicano y en Baja California (Daget y Reyes, 1990; Reyes y Rojo, 1985; Minnich *et al.*, 2000). Esta relación, aún no completamente clara y con muchas dudas, cobró importancia a partir de 1980 con el evento ENOS de 1982-1983, considerado como el más intenso de los últimos años. Se puede decir que cada vez que se presente un evento ENOS las posibilidades de lluvia en Baja California se incrementan; pero esto no es suficiente para predecir cuánta lluvia caerá en un momento y tiempo determinados en el estado. Como una primera aproximación se puede confiar en que, dado un evento de lluvia, ésta caerá principalmente en las zonas montañosas y escurrirá a través de los principales arroyos de la región, ya conocidos, en su camino al mar.

Antecedentes

Aunque ya se conozca y se acepte que los eventos ENOS incrementan las posibilidades de lluvia en Baja California (Reyes y Rojo, 1985), aún se desconocen los escenarios más probables de lluvias asociados a este fenómeno, lo cual es obviamente necesario para poder tomar medidas preventivas de deslaves, desbordamiento de presas y arroyos y de cualquier otro fenómeno hidrometeorológico que sobrepase los límites para los cuales fue diseñada tanto la infraestructura hidráulica como los asentamientos y crecimiento de las ciudades.

Las implicaciones del sistema hídrico y el clima en general sobre las pesquerías son tema de interés de muchos investigadores (Mantua *et al.*, 1997; Beamish 1993; Mysak 1986; Skud 1982), pero en el caso de Baja California son escasos los estudios sobre este tema. Aunque se sabe, por información cualitativa, que los escurrimientos derivados de las precipitaciones afectan a través del transporte de sedimentos y solutos. Los principales estudios realizados se refieren a los posibles efectos de la temperatura del mar sobre diversos recursos pesqueros (Lluch-Belda *et al.*, 1999, Troncoso 1999).

Área de estudio

Uno de los propósitos del trabajo que ahora se presenta es revisar las series de tiempo de lluvias con el fin de caracterizar con mayor claridad uno de los elementos más importantes de la climatología, lo cual se espera sea de utilidad para entender las múltiples interacciones entre los ecosistemas que soportan especies económicamente útiles y la variabilidad climática.

Por lo mismo, en este trabajo se hace un análisis estadístico de los posibles escenarios que se tendrían de la precipitación solamente en algunos sitios del estado de Baja California asociados al fenómeno El Niño Oscilación del Sur.

Métodos y materiales

Actualmente existe una amplia documentación accesible a través de Internet por medio de la cual se puede seguir la evolución de las condiciones planetarias tanto atmosféricas como oceánicas. También es posible copiar información sobre diversas variables ambientales des-

de diferentes bases de datos disponibles en este medio. Sin embargo, las bases de datos sobre México no están suficientemente estructuradas y verificadas como para hacerlas disponibles a través de la red mundial. Los datos de lluvia del estado de Baja California se obtuvieron, en parte, de un disco compacto del Servicio Meteorológico Nacional y se actualizaron con base en la consulta de los archivos de la Comisión Nacional del Agua en la delegación regional de Mexicali B. C. En términos generales, la base de datos usada consiste de series mensuales del total de lluvia registrada en las principales estaciones climatológicas de Baja California, desde enero de 1956 hasta diciembre de 1996, para tener un total de 40 años y de 480 datos mensuales para cada serie de tiempo. En la región de estudio, Baja California, las estaciones climatológicas consideradas en este trabajo son las que se indican en la *figura 4* y en la *tabla 1*. En esta última se enlistan las características de los sitios seleccionados donde se encuentran las estaciones climatológicas (ver Fig.4, para su ubicación geográfica)

Tabla 1: Acrónimos, localidad, altitud y coordenadas geográficas.

Ens a)	Ensenada	(24 m) 31 51, 116 37
Ero (d)	El Rosario	(60 m) 30 03 115 43
Lpu (f)	La Puerta	(480 m) 32 32, 116 40
Prr (j)	Presa	
	Rodríguez	(120 m) 32 26, 116 54
Scr (q)	Santa Cruz	(980 m) 30 52, 116 37

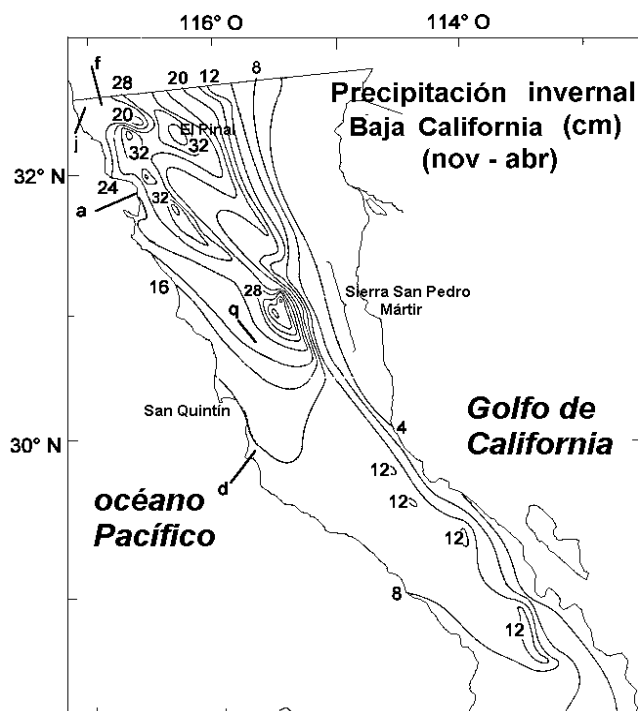


Fig. 4. Precipitación invernal (nov-abr) en Baja California. Las isolíneas de lluvia se muestran a intervalos de 4 cm. Nótese que en la región mediterránea (Tijuana-Ensenada) en condiciones normales llueven unos 25 cm en el invierno; mientras que en la vertiente del Golfo de California la lluvia es sólo del orden de 6 centímetros. En la región montañosa se registran más de 35 cm, particularmente en la Sierra de San Pedro Mártir (Modificada de Minnich y Franco, 2000).

Los métodos empleados en este trabajo corresponden a estadísticas básicas, agrupamiento de datos, cálculo de medias y elementos probabilísticos que podrían llevar a resultados confiables y consistentes, dada la magnitud de las series de tiempo y el análisis de calidad de los datos disponibles. El agrupamiento de los datos mensuales de lluvias se efectuó considerando que el régimen de lluvias en Baja California es invernal, por lo que se seleccionaron los meses de noviembre y diciembre de un año y los de enero, febrero, marzo y abril del siguiente año. El escenario normal (Fig. 5, segunda barra) se obtuvo del promedio general de cada mes seleccionado, considerando el periodo base de 1956 a 1996. El escenario mínimo (Fig. 5, tercera barra) se generó agrupando los ocho inviernos coincidentes con los eventos cálidos ENOS de 1956-1957, 1965-1966, 1972-1973, 1977-1978, 1982-1983, 1986-1987, 1991-1992 y 1992-1993. El escenario máximo (Fig. 5, cuarta barra) es el resultado de seleccionar el máximo valor registrado en cualquiera de los ocho eventos El Niño de cada mes y estación; de ahí que se consideren como un límite superior de posibles lluvias. Finalmente, para obtener el escenario más probable (Fig. 5, quinta barra) se agruparon los tres eventos ENOS, de entre la serie de ocho, con mayor precipitación y se promediaron. Dado que el evento de 1997-1998 se esperaba (y lo fue) de gran intensidad, se considera que este promedio daría una buena aproximación a la cantidad de lluvia más probable.

En particular, la comparación entre las cantidades de precipitación observada durante el invierno de 1997-1998 (Fig. 5, primera barra) y la calculada para los diferentes escenarios posibles, se hizo considerando los siguientes factores:

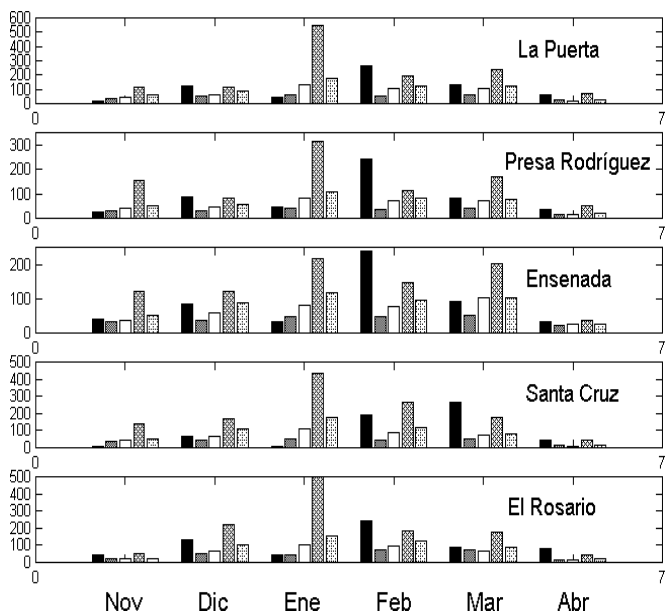


Fig. 5. Diagrama de barras que muestra la precipitación correspondiente a los escenarios posibles para cada mes y estación al oeste de Baja California. La primera barra (en negro) indica la precipitación observada durante cada mes y cada estación durante el invierno de 1997-1998. La segunda (sombreada) indica el promedio climático, la tercera (blanca) corresponde al escenario de mínima precipitación en condiciones ENOS; la cuarta (líneas cruzadas) corresponde al escenario de máxima precipitación en condiciones ENOS; la quinta (punteada) corresponde al escenario de precipitación esperada o más probable para el invierno de 1997-1998.

1. En escalas espaciales y temporales más bien pequeñas (del orden de meses y decenas de kilómetros) las lluvias son muy variables, por lo que las comparaciones estadísticas son poco confiables.
2. Se seleccionó la región oriental del estado de Baja California por tener un clima mediterráneo y ser la que muestra las principales lluvias invernales, comprendidas las estaciones climatológicas de La Puerta, Presa Rodríguez, Ensenada, Santa Cruz y El Rosario (Tabla 1 y Fig. 4), esto es, buscando una homogeneidad climática.
3. Las comparaciones se basaron en las estadísticas regionales de la lluvia invernal; es decir, se calculó la lluvia total para todo el invierno en cada estación climatológica y se obtuvo el promedio y la desviación estándar entre las cinco estaciones climatológicas de la región seleccionada. Esto se hizo tanto para los valores observados (noviembre de 1997 a abril de 1998) como para los calculados de los diferentes escenarios posibles.

Resultados

Durante los últimos meses de 1997 las condiciones en el océano Pacífico tropical se caracterizaron por el nacimiento de un evento ENOS de una gran magnitud y área de cobertura comparable al evento del siglo de 1982-1983. Todas las variables que lo representan estuvieron por arriba de lo normal; de tal manera que las condiciones planetarias se extremaron y esto se tradujo en condiciones anormales y gran aumento de la influencia tropical; esperando que las lluvias en la región de estudio estuviesen por arriba de sus rangos normales durante ese invierno de 1997-1998.

Impacto del fenómeno ENOS en el régimen de lluvias invernales en Baja California

En condiciones normales, considerando todos los años, las lluvias invernales en Baja California tienen una distribución e intensidad como se observa en la figura 4 (reproducida de Minnich *et al.*, 2000).

De este patrón de lluvias invernales se pueden distinguir varias características importantes: las zonas montañosas muestran los máximos de lluvias; la sierra de San Pedro Mártir recibe las lluvias más abundantes (cerca de 40 cm); la de El Pinal con registros de hasta 36 cm; la región mediterránea, a lo largo de la costa: Tijuana (estación *j* de la figura 4), Ensenada (estación *a*) y San Quintín tienen lluvias de aproximadamente 20, 25 y 16 cm de lluvia, respectivamente; la lluvia se incrementa rápidamente al acercarse a los cerros y zonas montañosas aledañas a las localidades citadas en aproximadamente 28, 32 y 24 cm; es decir, unos 8 cm más de lluvia en cada región.

En condiciones normales, las lluvias invernales provienen del extremo sur de los frentes fríos o tormentas extra tropicales; de tal manera las lluvias son de muy poca intensidad, aunque pueden durar varias horas, o incluso algunos días en forma discontinua, dándole tiempo suficiente al suelo para absorber la humedad o para que las represas y arroyos aumenten su nivel lentamente. Es decir, en condiciones normales estas lluvias son muy benéficas, pues difícilmente se presentan inundaciones en la zona rural, aunque sí pueden presentarse en las zonas urbanas, más por la mala planeación o deficiencia de la infraestructura hidráulica que por el exceso de agua (Reyes *et al.*, 1994).

En condiciones anormales (condiciones ENOS), las altas temperaturas de la superficie del mar a lo largo del ecuador producen un

aumento en el gradiente de temperatura entre el ecuador y los polos, lo cual favorece a su vez que la corriente de chorro subtropical se intensifique (Fu *et al.*, 1986); esto es, los vientos máximos de las latitudes medias, localizados a una altura aproximada de entre 8 y 10 kilómetros, se intensifican y propician la formación de un mayor número de frentes meteorológicos. Se ha podido observar que, cuando la corriente de chorro presenta estas anomalías favorece mucho las siguientes características climáticas sobre el sudoeste de Norte América (Pyke, 1972; Rasmusson and Wallace, 1983):

- a) mayor generación de frentes fríos o tormentas extra tropicales, originados en el Pacífico norte, los cuales pueden traer bajas temperaturas, lluvia y nieve en las montañas del sudoeste de Estados Unidos y del norte de Baja California;
- b) desprendimiento de "lenguas de humedad" originadas en el Pacífico tropical, que pueden traer altas temperaturas y lluvia a la vertiente occidental de México.

El sudoeste de Estados Unidos y el norte de Baja California han sido ordinariamente afectados por inundaciones a lo largo de su historia (Webb y Betancourt, 1992). Como ejemplo, se puede citar lo que ha pasado durante las últimas dos décadas: durante el invierno de 1992-1993 se observaron intensas y prolongadas lluvias en el noroeste de México que terminaron con las graves sequías que habían prevalecido en la región de 1985 a 1990 (Reyes, 1993). Las precipitaciones de ese invierno fueron similares a las registradas durante los inviernos de 1977-1978 y 1982-1983 (Figs. 6 y 7).

Durante esos inviernos ENOS la circulación atmosférica, asociada con aguas cálidas en el Pacífico ecuatorial, contribuyó a un clima cálido y húmedo con condiciones anormales de presión baja en el Pacífico norte, central y oriental, relacionado con una corriente de chorro intensa y más al sur de su posición normal, hay un mayor número de ciclones extra tropicales y de mayor intensidad, que son canalizados por la corriente de chorro hacia la vertiente oeste de California y la península de Baja California (Kahya y Dracup, 1994).

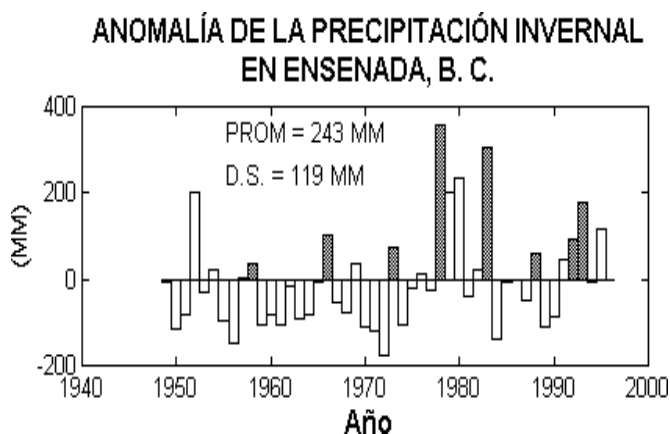


Fig. 6. Anomalías de la precipitación invernal (nov-abr) de 1948 a 1995 en Ensenada, BC. Nótese que durante la segunda mitad se ha incrementado la variabilidad anual de la precipitación; es decir, los inviernos se han hecho más lluviosos en general, aunque los años "secos" aún son muy recurrentes. Las áreas sombreadas indican los inviernos ENOS.

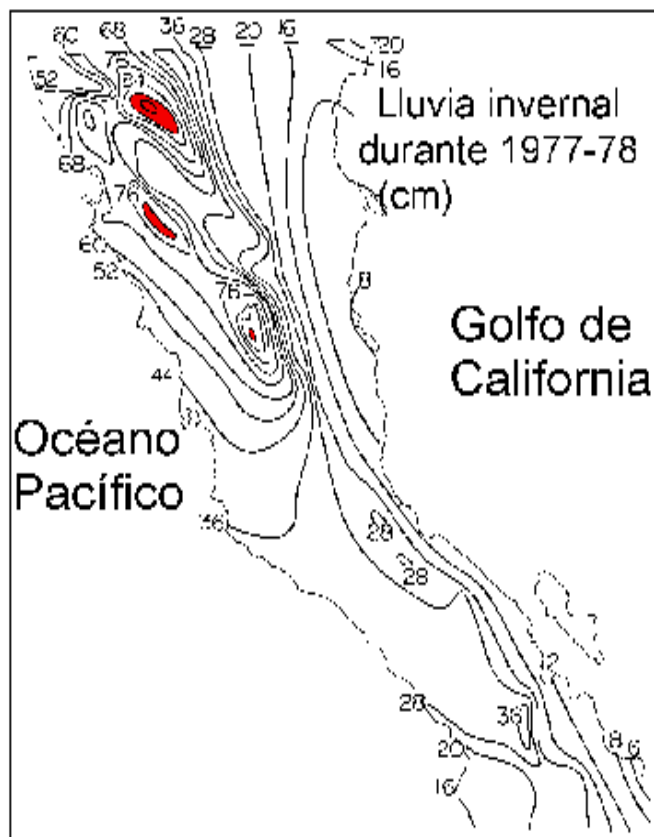


Fig. 7. Precipitación invernal de 1977-1978 (nov-abr) en Baja California. Las isolinéas de lluvia se muestran a intervalos de 4 cm. En condiciones normales en la región de Tijuana y Ensenada llueven unos 25 cm en el invierno y en la vertiente del Golfo de California sólo 6 cm. En la región montañosa se registran más de 35 cm, particularmente en la Sierra de San Pedro Mártir (Modificada de Minnich y Franco, 2000). Las letras indican la localidad.

Estas características del océano y la atmósfera durante eventos ENOS sugieren fuertemente que durante el invierno de 1997-1998, por ejemplo, se estaría generando un considerable número de tormentas y frentes extra tropicales, además de las "lenguas de humedad" provenientes del trópico, como había sido ya sugerido por Ropelewsky y Halpert (1987) cuando se presentan condiciones ENOS. Por sí solos, la nieve y la lluvia asociadas a cada uno de estos fenómenos no deberían ser de alarma, pues, como se sabe, Baja California tiene una gran deficiencia de agua dulce y siempre será benéfico tener lluvias por arriba de lo normal, que puedan recargar la superficie de la tierra y los acuíferos de la región para los usos agrícolas y urbanos necesarios. El problema se vuelve crítico cuando se presentan simultáneamente los dos fenómenos; es decir, cuando a un frente extra tropical se superpone una "lengua de humedad tropical" en las vecindades de la península, lo cual evidentemente producirá un "choque" entre estos sistemas y producirá gran precipitación pluvial du-

rante periodos más bien cortos (Schonher y Nicholson, 1989). Las características atmosféricas y orográficas, ante condiciones de tormenta de origen extra tropical, ocasionan nevadas en las cimas de las sierras del sur de California y norte de la península de Baja California: San Pedro Mártir, Sierra de Juárez y La Rumorosa (Minnich, 1986); sin embargo, cuando las tormentas extra tropicales se combinan con "lenguas de humedad" de origen tropical, con temperaturas altas, entonces no se produce nieve sino lluvias intensas y los arroyos crecen rápidamente, se forman verdaderos ríos en unas cuantas horas a lo largo de los cauces naturales y se generan inundaciones repentinas que destruyen todo a su paso (Duffy y Bryant¹). Estas inundaciones repentinas son causadas por las intensas lluvias durante los eventos de "El Niño".

Escenarios de lluvias posibles en el invierno de 1997-1998, como ejemplos de eventos "El Niño" en condiciones extremas

En la *figura 5* se muestran los resultados estadísticos del régimen de lluvias invernales en las principales regiones de Baja California (ver *Tabla 1* para ubicar la latitud y longitud de las estaciones climatológicas): La segunda barra de esta figura representa el promedio de lluvia invernal observado en condiciones 'normales' (considerando todos los años desde 1956 al 1996). Como se ha mencionado, las lluvias asociadas a estas condiciones se generan del paso de pocos frentes extra tropicales; normalmente el centro de estos frentes pasa al norte de Los Ángeles, California, llegando poca nubosidad a la península de Baja California, con lluvias continuas por varias horas e incluso días, de intensidad relativamente débil y muy benéficas para las distintas actividades socioeconómicas de Baja California.

La tercera barra de la *figura 7* representa los promedios de ocho inviernos en condiciones ENOS entre 1956 y 1996 (ver "Métodos y materiales"). Las lluvias asociadas a estas condiciones se generan del paso de frentes extra tropicales o 'lenguas de humedad', por separado; son lluvias de mayor intensidad, pero no necesariamente asociadas a desastres; al contrario, suelen ser muy benéficas para las distintas actividades socioeconómicas de Baja California. Estos valores se pueden considerar como el límite inferior de posibles lluvias del estado en condiciones de un evento ENOS.

La cuarta barra de la *figura 7* representa los eventos extremos de lluvias mensuales registradas durante los inviernos ENOS en el período de 1956 al 1996. Estos son los máximos de lluvia invernal mensual observados en condiciones "anormales" (condiciones ENOS). En general, estas lluvias están relacionadas con condiciones de mezcla entre los frentes extra tropicales y las lenguas de humedad; son lluvias de mayor intensidad y duración, casi siempre ligadas a inundaciones repentinas y posibles desastres hidrometeorológicos. Estos datos se pueden considerar como el límite superior de posibles lluvias en el estado.

La quinta barra de la *figura 7* representa los escenarios de lluvias mensuales esperadas durante el invierno ENOS de 1997 a 1998. Estos son los promedios de lluvia invernal mensual observados en condiciones 'anormales' (condiciones ENOS) durante los tres eventos de mayor impacto. En general, estas lluvias se relacionan con condiciones de mezcla entre los frentes extra tropicales y las lenguas de humedad, están asociadas a inundaciones repentinas y posibles desastres hidrometeorológicos. Estos promedios se pueden considerar como lo más probable en cuanto a lluvias en Baja California en un evento similar al de 1997-1998.

¹ Duffy, D. y P. J. Bryant The 1997-98 El Niño/Southern Oscillation (ENSO 1997/98) One of the most severe ENSO events in the history? 1998. (Inédito).

Discusión

Los resultados anteriores indican que el régimen de lluvia invernal estadísticamente observado en esos sitios, asociado a los eventos ENOS, varía aproximadamente de dos a cuatro veces la lluvia promedio observada en condiciones normales. Además, se puede observar que la lluvia aumenta hacia el sur; o sea, que los sitios del sur de Baja California son más susceptibles a recibir una mayor proporción de lluvia asociada al evento ENOS, en condiciones extremas, como ha sido discutido por Minnich *et al.* (2000).

Al comparar los datos observados durante el invierno de 1997-1998 con los escenarios posibles se tomaron los valores de lluvia invernal total de cada estación climatológica de la zona occidental de Baja California (La Puerta, Presa Rodríguez, Ensenada, Santa Cruz y El Rosario). Se calculó su promedio y desviación estándar tanto de los datos observados como de los distintos escenarios (Tabla 2).

Tabla 2. Comparación de datos observados y posibles escenarios de lluvia invernal en la zona occidental de Baja California, México en el invierno 1997-1998.

LLUVIA (mm)	DATOS OBSERVADOS	ESCENARIOS POSIBLES			
		I	II	III	IV
Promedio	584	251. 6	390. 2	109 5	511
Desviación Estándar	62.7	36.6	52.5	202	78. 9

Como se puede ver, los datos observados se acercan más a los correspondientes al escenario más probable (columna 5 de la tabla II), con una diferencia del orden 12.5% con el promedio. De los otros escenarios, el que más se aproxima sería el del valor mínimo esperado en condiciones ENOS (columna 3 de la tabla II), con una diferencia del orden del 33% con el promedio. De esta comparación se puede decir que las lluvias previstas con el escenario IV (el más probable) son las que más se acercaron a las observadas durante todo el invierno de 1997-1998. Debe advertirse que no se dan resultados de los análisis de cada mes, lo cual confirma que este tipo de pronósticos estadísticos sólo es confiable cuando se considera una muestra, como en este caso, de todo el periodo de invierno y todas las estaciones climatológicas.

En California, los americanos pueden hacer un buen pronóstico y seguimiento de un evento de lluvia, y tomar todas las medidas preventivas, porque cuentan con toda la infraestructura necesaria: una buena red de observaciones, personal altamente capacitado, buen sistema de información y comunicación, así como en general, una buena cultura de prevención.

En este trabajo se presentan escenarios de lluvias que pueden ocurrir en las distintas estaciones climatológicas de Baja California durante las diferentes características asociadas al evento ENOS. Es importante resaltar que estos resultados representan los totales para todo el invierno y para cada mes. Si estos datos se repartieran

homogéneamente a lo largo del mes o del invierno, la conclusión sería que se tendría el mejor invierno de la historia y no se tendría ninguna necesidad de prevenir nada, excepto cómo almacenarla. Sin embargo, sólo se observan unas seis lluvias por mes, una o dos de las cuales pueden durar varios días y traer casi el total de ese mes, lo que obviamente causa inundaciones repentinas. Es a estos eventos a los que se debe dar seguimiento continuo para prevenir desastres y pérdida de vidas humanas.

Conclusiones

1. La predicción de este estudio se cumplió satisfactoriamente para el total de lluvia en la mayor parte de las estaciones consideradas durante el evento cálido ENOS de 1997-1998.
2. En general, el impacto del evento ENOS fue mayor del esperado (con un 12% por arriba del valor esperado).
3. Actualmente casi toda la población de Baja California ya está informada sobre 'El Niño' y su efecto en el incremento de las lluvias; sin embargo, esto por sí solo no impedirá que pueda haber muertes y desastres cada vez que se presente este fenómeno. En Baja California la población está acostumbrada a creer que los pronósticos americanos se pueden aplicar directamente a nuestras regiones. Lo más probable es que la gente y las autoridades sigan con esa costumbre si no se ofrecen opciones convincentes de sistemas de prevención.
4. Actualmente es bastante fácil el acceso a las fuentes de información vía Internet. En ellas se puede seguir la evolución de los diferentes fenómenos meteorológicos, como los frentes, tormentas tropicales y extra tropicales, lenguas de humedad, corriente de chorro, etcétera. El problema del pronóstico de lluvia en el corto plazo (días) puede considerarse resuelto: hay infraestructura y personal capacitado. Lo que no está resuelto es el problema de las inundaciones repentinas, que dependen de la intensidad y duración de la lluvia en las cuencas hidrológicas; es decir, hace falta una cuantificación del volumen total de lluvia esperada en una tormenta dada.
5. Se ha podido inferir que las cifras de precipitación en las montañas no pueden explicar todas las características de vegetación e hidrología superficial observada, particularmente en las sierras de Juárez y de San Pedro Mártir, que es donde nacen los principales arroyos, de todo lo cual se puede concluir que se debe contar con una mejor red de observaciones hidrométricas suficientemente extensa, con capacidad de monitorear en tiempo real y poder cuantificar la intensidad y cantidad total de lluvia para tener la capacidad de evaluar el escurrimiento y crecimiento de arroyos para la debida prevención de inundaciones repentinas que, debido al gran transporte de sólidos suspendidos, pueden tener consecuencias directas sobre las comunidades bentónicas costeras.

Agradecimientos

Se agradece la amable cooperación y atención del personal del Servicio Meteorológico Nacional en la Ciudad de México y de la Comisión Nacional del Agua en Ensenada y Mexicali BC. Sin su apoyo habría sido imposible realizar este trabajo.

Referencias bibliográficas

- BEAMISH, R. J. 1993. Climate and exceptional fish production off the west coast of North America. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* Vol. 50:2270-2291.
- CANE, M. A. 1983: Oceanographic Events during El Niño. *SCIENCE*, Vol. 222, pp. 482-495.
- DAGET, Ph. et S. Reyes. 1990: Sur la variabilité de la précipitation dans la Basse Californie. *Geofísica Internacional* 29(3):123-135.
- FU, C. H.; H. F. Díaz and J. O. Fletcher. 1986. Characteristics of the response of SST in the central Pacific associated with the warm episodes of the Southern Oscillation. *Monthly Weather Review* 114:1716-1738.
- GARCÍA, E. y P. Mosiño. 1967. Los climas de Baja California. *Instituto de Geografía de la UNAM. México, DF.* 27 pp.
- HASTINGS, J.R. and R.M. Turner, 1965. Seasonal precipitation regimes in Baja California. *Geophysika Annaler.* 47:204-223.
- KAHYA, E. and J. A. Dracup. 1994. The influence of Type I El Niño and La Niña events on stream flows in the Pacific Southwest of the United States. *J. Climate* 7:965-976.
- LLUCH-BELDA, D.; S. E. Lluch-Cota; D. B. Lluch-Cota y S. Hernández-Vázquez. 1999. La variabilidad oceánica interanual y su impacto sobre las pesquerías. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.* 49:219-227.
- MANTUA, N. J.; S. R. Hare; Y. Zhang; J. M. Wallace and R. G. Francis. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* Vol. 78:1069-1079.
- McPHADEN, M.J. 1993. TOGA-TAO and the 1991-93 El Niño Southern Oscillation Event. *Oceanography Vol. 6 (2):*36-44.
- MINNICH, R. A. 1986. Snow levels and amounts in the mountains of Southern California. *J. Hydrology* 86. 37-58.
- MINNICH, R. A.; E. Franco Vizcaino and R. J. Dezzanni. 2000. The El Niño/Southern Oscillation and precipitation variability in Baja California, Mexico. *Atmósfera* 13:1-20.
- MYSAK, L. A. 1986. El Niño, interannual variability and fisheries in the Northeast Pacific ocean. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* Vol. 43. pp. 464-497.
- PHILANDER, S.G. 1993: El Niño Southern Oscillation phenomena. *Nature* Vol. 302. pp. 295-301.
- PYKE, C. B. 1972. Some meteorological aspects of the seasonal distribution of precipitation in the Western United States and Baja California. *University of California Water Resources Center Contribution No. 139.*
- RASMUSSEN, E. and M. Wallace. 1983. Meteorological aspects of the El Niño Southern Oscillation. *Science* Vol. 222. pp. 1195-1202.
- REYES, S.; F. Miranda y J. García. 1990. Climatología de la región noroeste de México. Parte I: Precipitación, series de tiempo del valor total mensual y estadísticas del año climatológico. *Publicación EBA No. 3, Reporte Técnico. CICESE Ensenada, BC. México.* 170 pp.
- . 1994. Prevención de desastres hidrometeorológicos en Baja California. *Memorias I Congreso Nacional de Universidades en Protección Civil. México, DF.* 7-9 Dic. 1993.
- REYES, S. y F. Miranda, 1991. Las lluvias en Baja California.. *Ciencias. UABC. Ensenada, BC. México. Revista Conciencia* 2(9):3-8.
- REYES, S. 1993. Más frío y lluvia. *Semanario ZETA, 1-7 enero 1993, Tijuana, BC, México.*
- REYES, S. y P. Rojo. 1985. Variabilidad de la precipitación en la península de Baja California. *Revista de Geofísica* 22/23. pp. 111-128.
- ROPELWSKY, 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.
- SCHONHER, T. and S. E. Nicholson. 1989. The relationship between California rainfall and ENSO events. *J. Climate* 2. pp. 1258-1269.
- SKUD, B. E. 1982. Dominance in fishes: The relation between environment and abundance. *Science* Vol. 216(9):114-149.
- STOCKTON, C. and W. Boggess. 1979. Geohydrological implications of climate change on water resources development. *U. S. Army Coastal Engineering Research Center. Fort Belvoir, Va.*
- THE TAO PROJECT OFFICE. 1997. NOAA/Pacific Marine Environmental Laboratory. *Internet: <http://www.pmel.noaa.gov/toga-tao/home.html>*
- TRENBERTH, K. E. 1990. Recent observed interdecadal climate changes in the northern hemisphere. *Bull of The American Meteorological Society* 71. 998 pp.
- TRONCOSO G., R. 1999. Integración de la variabilidad ambiental y climática en la administración de los recursos pesqueros. *Tesis de Especialidad en Administración de Recursos Marinos. FCM. UABC. Ensenada, BC. México.* 40 pp.
- WEBB, R. H. and J. L. Betancourt. 1992. Climatic variability and flood frequency of the Santa Cruz River, Pima County, Arizona. *U. S. Geological Survey, Water-Supply Paper* 2379. 40 pp.
- WOLTER, K. and M. Timlin. 1997: Multivariate ENSO. Index for the six strongest historic El Niño events versus the current event. NOAA - CIRES Climate Diagnostics Center, University of Colorado at Boulder, USA. *Internet: <http://www.cdc.noaa.gov/~kew/MEI/mei.html>*