

Modelo Estadístico de Pronóstico de las Precipitaciones en la Costa Norte del Perú

Ronald Woodman P.
Instituto Geofísico del Perú
14 de Octubre, 1999

El pronóstico de las variaciones interanuales del clima en cualquier lugar del globo con meses de anticipación es muy deseable, pero no es fácil hacerlo con precisión. Últimamente se han hecho avances al notar que en muchos lugares del globo parte de la aleatoriedad de estas variaciones se pueden atribuir al comportamiento del Pacífico Ecuatorial, esto es al estado y fase de las oscilaciones multianuales asociadas con El Niño-Oscilación del Sur (ENSO). Las correlaciones encontradas son usualmente débiles lo que permite a lo más atribuir probabilidades a tres posibles estados: normal, sobre lo normal y debajo de lo normal. Si bien esto permite la toma de ciertas decisiones, no satisface todos los requerimientos. En este trabajo nos ocuparemos de las posibilidades de pronóstico de una región particular, la costa norte del Perú, una región en que variaciones extremas de El Niño se presentan como una amenaza de desastre y que a la vez tienen mejores posibilidades de pronóstico. Un trabajo similar, pero introductorio y preliminar ha sido presentado por *Woodman* [1998].

La situación del clima en la costa norte del Perú es muy especial por dos razones: por su alta variabilidad, sobre todo en sus precipitaciones, y por su alta correlación con las condiciones y fase del fenómeno ENSO, más específicamente con la temperatura superficial del mar (TSM) frente a sus costas. Su alta variabilidad y condiciones normalmente secas y desérticas hace por ejemplo que el tercio superior de los tres estados ya mencionados incluyan años que se podrían considerar todavía relativamente secos (condiciones de no-Niño) así como los lluviosos y extremadamente lluviosos. El asignar luego una alta probabilidad al tercio superior, no nos dice si el año sería necesariamente lluvioso y menos aún si tendrá condiciones catastróficas como las ocurridas en los años 1983 y 1998. Las precipitaciones promedio, por ejemplo, en la ciudad de Piura y alrededores son del orden de los 50 mm anuales. Durante los años considerados como un Niño, éstas tienen precipitaciones superiores a los 120 mm anuales, mientras que en los dos años mencionados, éstas llegaron a cerca de los 3000 mm anuales (!!). Notar luego que en el tercio superior se encuentran los años no-Niño con precipitaciones por debajo de 120 mm así como los desastrosos con 1000-3000 mm anuales. Para que un pronóstico climático sea útil a las actividades agrícolas del norte del Perú y a las actividades de prevención de desastres, se necesitaría que el tercio superior mencionado sub-clasifique por lo menos tres estados adicionales: 1) por encima de lo normal pero condiciones de no-Niño, 2) condiciones de El Niño normales, como las muchas ocurridas en el pasado, y 3) condiciones El Niño extraordinarias y catastróficas como las de los años 1983, 1998. Para apreciar mejor lo extraordinario de estos años hay que tener presente que las lluvias experimentadas en 1983 fueron, muy probablemente, las mayores sufridas por la región en sus más de 450 años de historia escrita y de tradición hispánica [*Woodman, 1985; Mabres, Woodman y Zeta, 1993*]. Las del año 1998 fueron comparables e igualmente desastrosas.

El agricultor piurano depende mucho del nivel de precipitaciones experimentadas en su corta estación lluviosa. Soy testigo, al haber nacido y haberme criado en Piura, de las muchas y largas conversaciones de los agricultores (y otros) al comienzo de la estación lluviosa, sobre si el año sería seco o lluvioso; y si llovía intensamente un día, la conversación giraba sobre si llovería tanto como el famoso año de 1925. Si había alguien de mayor edad, se incluían los recuerdos de niñez experimentados en 1891. Hasta antes de 1983, estos dos años eran recordados como los más lluviosos en la historia de la región. El piurano buscaba indicios que le pudieran satisfacer de sus necesidades de pronóstico. Si escuchaba el canto nocturno del güerequeque, ave regional asociada a los años lluviosos, lo interpretaba como augurio de un año lluvioso. Observaba la dirección de los vientos, con la creencia que cuando estos soplaban del norte era presagio de una estación lluviosa. Una creencia y observación más moderna, que yo también tuve ocasión de observar y compartir, estaba asociada con la ocurrencia de mareas altas en Colán y Paita, balneario y puerto de la región. Cuando éstas ocurrían y la temperatura del mar estaba alta, se consideraba presagio de que el año era lluvioso. El presente trabajo es una elaboración de estas últimas observaciones tratando de ponerlas en una base más científica y cuantitativa.

La razón física de esta dependencia y alta variabilidad en las precipitaciones es fácil de aceptar si recordamos que la latitud de Piura es $\sim 5^\circ$ S, una latitud a la cual le corresponde un clima tropical. Su

Lluvias en Piura vs Temperatura frente a Lobos(C6)

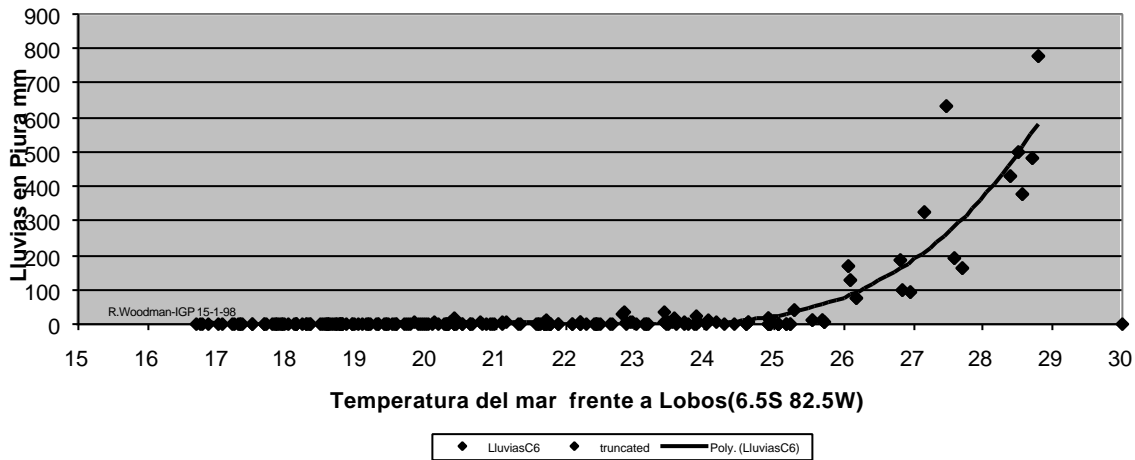


Figura 1. Precipitaciones en la ciudad de Piura vs. la temperatura de la superficie del mar frente a la isla Lobos de Tierra.

condición desértica, en condiciones normales, se debe a la temperatura baja del mar que la rodea, aproximadamente 10°C -- en condiciones de no-Niño — por debajo de las temperaturas de los países vecinos del norte y del caribe. Estas bajas temperaturas enfrían los aires que barren estas aguas y sus costas, produciendo una gran inversión de temperatura a los aproximadamente 1000 metros de altura. Por encima de ésta tenemos aires tropicales y ligeros y por debajo aires húmedos pero fríos y pesados, los que están imposibilitados de ascender por encima de la inversión y así poder producir los movimientos convectivos necesarios para que la lluvia ocurra. En el lenguaje meteorológico decimos que la condición es extremadamente estable y que no hay posibilidades de precipitación. Esta situación cambia drásticamente en condiciones de la ocurrencia de un El Niño, sobre todo en los meses de verano, cuando la temperatura del mar alcanza los 27-28°C, y aún los 29°C en condiciones extremas. Bajo estas condiciones la estabilidad desaparece, no hay inversión de temperatura y tenemos precipitaciones como cualquier otro país tropical. La dependencia con respecto a la altura de las mareas se puede entender también por el disturbio, ahora bastante conocido, que experimenta el nivel promedio del mar en condiciones de El Niño, pero dejaremos para otra ocasión su discusión y potencial de pronóstico.

Relación empírica entre la TSM frente a la costa norte del Perú y las precipitaciones en la ciudad de Piura.

La Figura 1 muestra dramática y estadísticamente la dependencia de las lluvias en esta región de la TSM frente a sus costas. En esta Figura se ha tomado las precipitaciones acumuladas mensuales en la ciudad de Piura ocurrida durante los últimos 15 años y la TSM frente a la Isla Lobos de Tierra. La localización del punto fue seleccionada por ser una de las que presenta mayor correlación, aunque algo similar ocurre con las temperaturas desde frente a Tumbes hasta Chicama. No es de extrañar que estas temperaturas sean las que mayor correlación muestran ya que los aires bajos sobre la ciudad son transportados desde el mar por la brisa y vientos provenientes del Sur. Los sólo 15 años de duración del proceso incluidos en la Figura está limitada por la existencia de datos de temperatura tomadas por medio de satélites sólo desde 1982. La Figura muestra un gráfico de correlación y dispersión estadística. Cada punto corresponde a la TSM y la correspondiente precipitación en Piura para cada mes en el período estudiado. La correlación entre los dos parámetros es obvia. Podemos apreciar que si la TSM es inferior a los 24.5°C no llueve en Piura, si lo hace éstas no llegan a los 30 mm mensuales y sólo en el extremo superior de éste rango de temperaturas. Se aprecia a la vez que las precipitaciones se incrementan drásticamente cuando las mismas temperaturas sobrepasan los 26-27°C. Cuando ésta llega a los 28°C éstas son ya bastante intensas,

alcanzando niveles catastróficos al llegar y sobrepasar los 29°C. Los puntos por encima de los 300 mm por

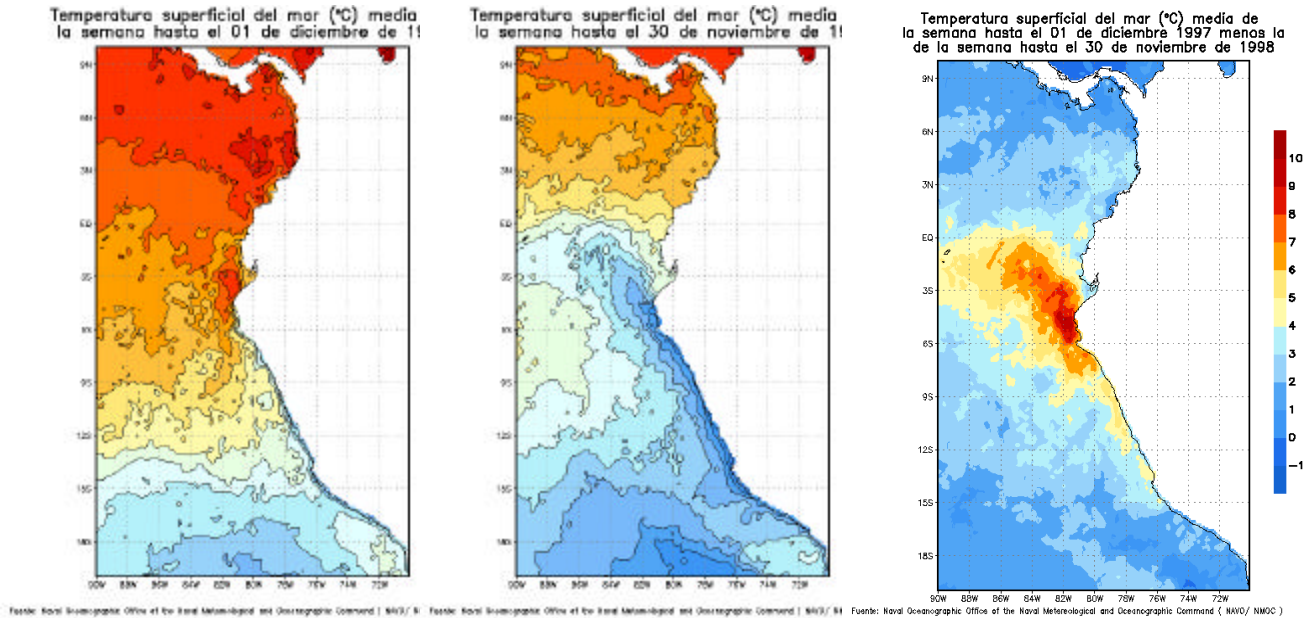


Figure 2. Los dos primeros paneles muestran las temperaturas superficiales del mar para la misma época durante condiciones de El Niño (Nov-1997) y no Niño (Nov-1998). El tercer panel muestra la diferencia de temperatura en estas dos condiciones

mes corresponde a los meses de lluvias extraordinarias acaecidas en los años 1983 y 1998.

La variabilidad extrema del nivel de precipitaciones en la ciudad de Piura y en esta región costera se explica por la correlación con la TSM discutida y por la gran variabilidad de esta última, la que se ilustra en los tres paneles de la Figura 2. En ésta Figura se muestran las temperaturas de la TSM frente a las costas del Perú en dos ocasiones extremas pero correspondientes a la misma época del año, la una correspondiente a un El Niño fue de fines del 1997 y la otra para la misma época pero durante condiciones La Niña (fines de Noviembre de 1998). El panel central muestra la diferencia en la TSM para estas dos ocasiones. En ésta se puede apreciar la gran diferencia entre estas dos temperaturas para la misma época del año y a la vez la concentración de estas grandes diferencias en las cercanías de la costa norte del Perú. No conozco otra región del mundo en que la temperatura varíe tanto de un año a otro en la misma época estacional. Es esta gran variabilidad de la TSM frente a sus costas es lo que hace que el clima del norte del Perú sea tan especial.

La Figura 1, si bien muestra una correlación alta entre las dos variables involucradas, muestra también una dispersión que es deseable reducir si es que queremos usarla, como discutiremos después, como herramienta de pronóstico. Lo primero que viene a mente es el cuestionamiento sobre el uso de una sola temperatura, aquella del punto escogido, como único indicador de las condiciones del mar que influye en la región. Conociendo que los vientos, sobre todo en épocas de lluvias, sufren variaciones en intensidad y dirección y que la TSM presenta una gradiente en dirección norte a sur, podemos esperar que los aires que barren la región puedan provenir de diferentes zonas del mar, a diferentes latitudes, y que una caracterización de su estado requiera más de una temperatura en la zona. Esta hipótesis nos ha llevado al uso de técnicas estadísticas que consideren más de una temperatura del mar, y que por último permitan la inclusión de otras variables que puedan influenciar en forma independiente. Las técnicas estadísticas de regresión multivariable nos permiten esta inclusión [ver, por ejemplo, *Draper y Smith, 1981*].

Resultados usando técnicas de regresión multivariable.

La Figura 3 muestra --- en forma comparativa --- los resultados de las “predicciones” hechas usando técnicas de regresión multivariable. En ésta se muestran las precipitaciones en la ciudad de Piura obtenidas

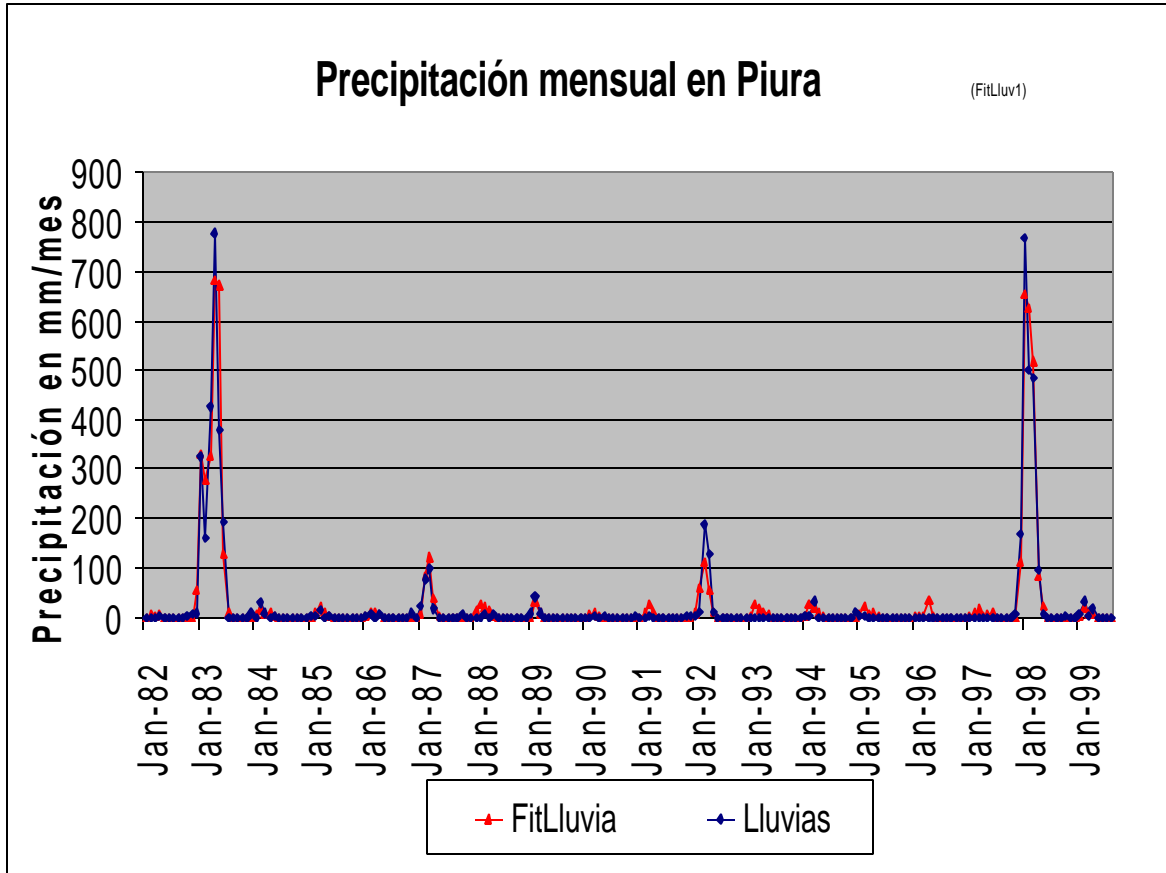


Figure 3. Precipitación mensual en la ciudad de Piura. Los puntos azules son las precipitaciones medidas y los rojos las precipitaciones predichas sobre la base de una regresión múltiple usando las temperaturas de los puntos G3, C2 a C8 de la Figura 5 y el mes del año.

sobre la base de una regresión que incluye las temperaturas medidas en las costas circundantes concurrentemente con las precipitaciones medidas el mismo mes. Se puede apreciar que la precisión lograda es bastante buena, lo suficiente como para pronosticar con alta probabilidad diferentes regímenes de lluvias, incluyendo su carencia, lluvias ligeras, ocurrencia de Niños normales y tal vez lo más importante desde el punto de vista de prevención, la ocurrencia de lluvias a niveles desastrosos como los ocurridos en 1983 y 1998. La predicción se hace posible si se conoce o se ha predicho las temperaturas del mar en la región. Esto último se hace ahora factible con los avances de los modelos numéricos acoplados como discutiremos más adelante.

En el proceso de ajuste se ha asumido que la dependencia es lineal entre el logaritmo de la precipitación (P) y las temperaturas superficiales del mar (T). El ajustar el logaritmo presume una relación exponencial entre la precipitación y la temperatura, relación hasta cierto punto arbitraria, pero sugerida por la forma del ajuste de la precipitación a los datos mostrada en la Figura 1. Se podrían tomar otras funciones, como por ejemplo una polinomial, pero se ha preferido la exponencial ya que reduce el número de grados de libertad de la función ajustada y necesita un menor número de coeficientes en la ecuación empírica resultante.

Las variables usadas son las temperaturas de la superficie del mar dadas por NCEP/NOAA (series oimonth) en su página Web, para las longitudes y latitudes mostradas en la Figura 4 identificadas por las letras C2 a C8 correspondientes a cuadrados de $1^\circ \times 1^\circ$ de latitud a lo largo de la costa norte del Perú y de Ecuador, entre Guayaquil y Pacasmayo. Se ha incluido también una temperatura de una zona más alejada de la costa a la altura de Guayaquil, identificada como G3. Se ha usado también la estación del año

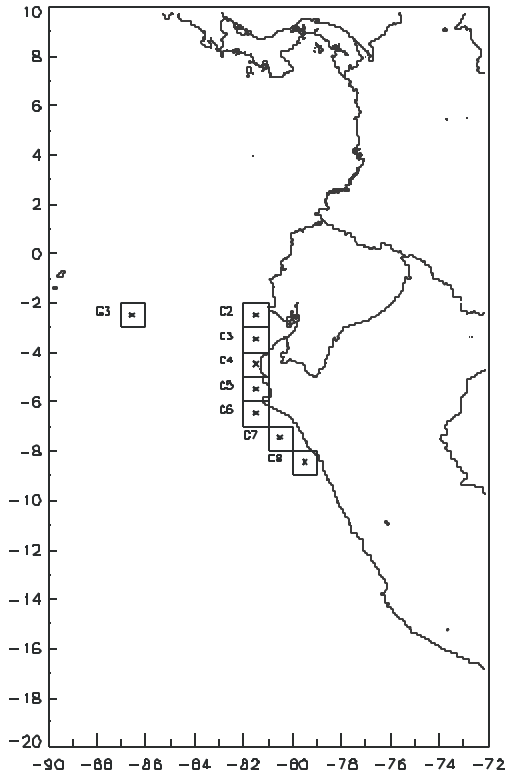


Figure 4. Mapa del Perú mostrando las regiones del mar cuyas temperaturas promedio han sido usadas en las fórmulas de regresión

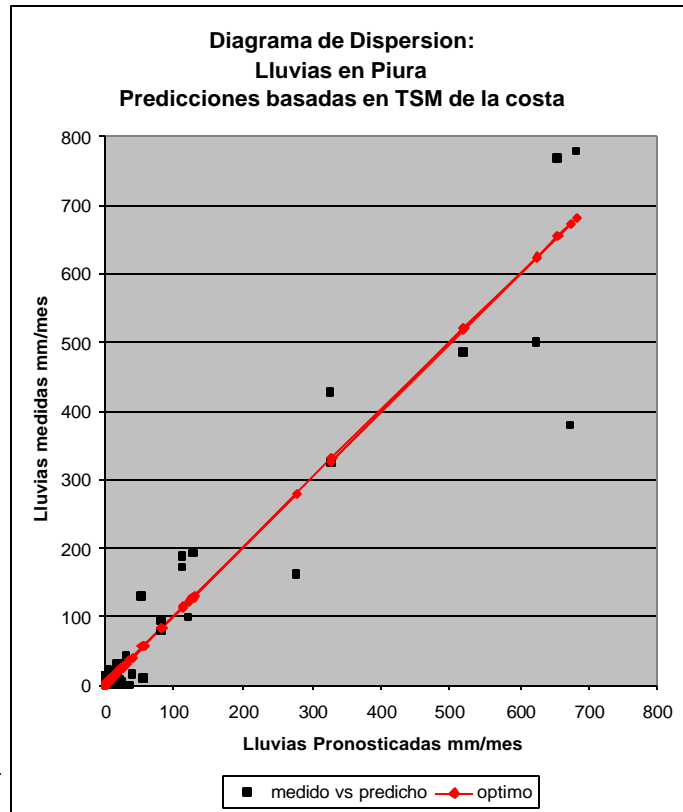


Figura 5. Forma alternativa de comparar las precipitaciones predichas (puntos en rojo) con los valores medidos (puntos en negro)

como variable y la temperatura de C3 del mes anterior. Se ha incluido esta última, una temperatura del mes anterior, como un proxy de la vegetación y humedad del suelo como consecuencia de las lluvias acaecidas anteriormente, ya que el grado de humedad en los aires de la región dependerá también de la humedad del suelo y la evotranspiración de la vegetación.

De todos los puntos disponibles en la serie se han tomado solamente el rango de T superior a los 24.5° C, esto es las condiciones donde existe algo de precipitación, para evitar problemas con el logaritmo de cero. Esto no presenta mayor limitación ya que cuando la temperatura es inferior a este valor, se puede asegurar prácticamente que la precipitación en la ciudad de Piura es cero, lo que está de acuerdo con los valores muy bajos obtenidos de la fórmula de regresión cuando se extrapola a valores por debajo del rango usado en los datos. Cuando, en el rango evaluado, la precipitación es cero, ésta se le ha reemplazado por un valor pequeño pero finito igual a 0.001mm/mes.

El ajuste se ha efectuado usando una iteración doble. En la primera iteración se ha asumido una varianza del error constante. Para la segunda iteración se ha asumido una varianza que varía en forma lineal en el rango de precipitaciones considerado de acuerdo a la varianza del error observado en el primer ajuste. La inversa de la varianza asumida es usada por el algoritmo de ajuste para dar diferentes pesos a los puntos de la serie por ajustar.

La bondad del ajuste como predictor de las precipitaciones se puede apreciar tanto en la Figura 3 como en la Figura 5. En esta última se muestran las temperaturas realmente medidas en función de las temperaturas evaluadas de acuerdo a la fórmula de regresión.

De la dispersión del diagrama deducimos que los errores esperados de un pronóstico de precipitación usando las TSM indicadas sería de unos 200 mm/mes en los rangos de precipitaciones mayores a los 250 mm/mes (excepto por un punto en (673,379)), del orden de los 80 mm para pronósticos

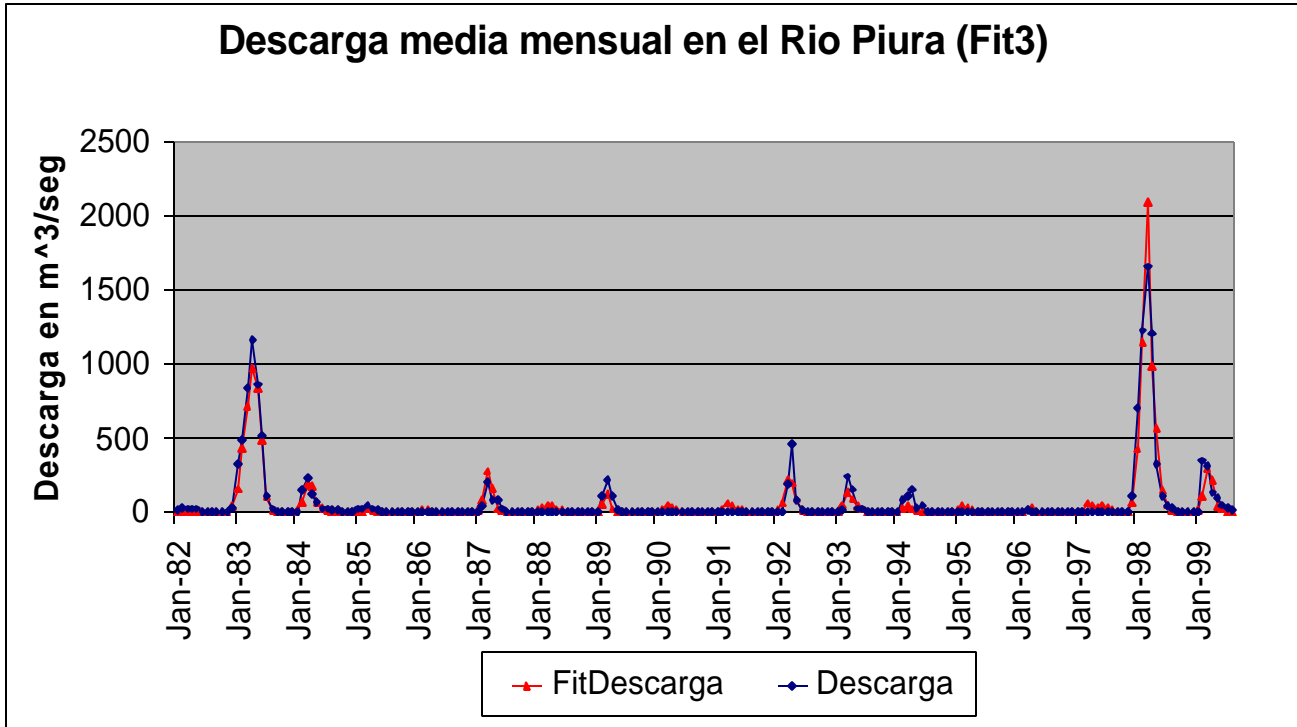


Figura 6. Igual que la Figura 3 pero referida a los caudales mensuales promedio del río Piura en m^3/seg medidos en su paso por la ciudad. Se ha considerado también en la regresión la historia pasada de los caudales.

comprendidos entre los 50 y 250 mm, y del orden de los 30 mm/mes cuando éste es menor que los 50 mm/mes. Para los años y estaciones secas donde las temperaturas frente a Talara y Paita bajan de los $25^{\circ}C$, las precipitaciones pronosticadas son casi nulas con un gran nivel de certeza.

Cabe notar que en años extremadamente lluviosos las precipitaciones en Piura pueden llegar a los 150 mm al día, por lo que sería casi imposible pronosticar las lluvias con mayor certeza, ya que bastaría con que el período de un mes se corra un día antes o después de un día de fuertes lluvias para que el pronóstico tenga este error. Una manera de mejorar el pronóstico es considerar el promedio de más de un pluviómetro en una área comparable o mayor al de una celda de precipitación, lo que tenemos planeado como una actividad futura.

Pronóstico de los caudales del Río Piura.

Otro buen indicador del régimen de lluvias en la costa norte del Perú es el caudal del río Piura. La cuenca del río Piura se limita a la región circundante al Desierto de Sechura y al mismo desierto cuando se presenta el Fenómeno el Niño. Como veremos tiene también una alta sensibilidad a las temperaturas de la superficie del mar en las costas de la región. Tiene la ventaja sobre las precipitaciones en la ciudad en que el caudal del río integra las precipitaciones en una región más amplia, por lo que depende menos de las grandes fluctuaciones en las precipitaciones en un sólo lugar.

En la Figura 6 se muestran las descargas medias del mes para el mismo período de 15 años discutidos anteriormente y “predicciones” hechas por medio de una fórmula de regresión. Nuevamente la correspondencia es bastante buena. La dependencia de los errores en la magnitud del caudal predicho se puede apreciar mejor en el diagrama de dispersión mostrado en la Figura 7. Estos son del orden de los 250 m^3/seg para el promedio del mes cuando estos superan los 250 m^3/seg y del orden de los 100 m^3/seg para las descargas menores que 250 m^3/seg . Las predicciones definitivamente nos permitirían diferenciar entre los años secos, los años de aguas y los de grandes avenidas.

Las variables usadas en la regresión son las mismas usadas para el caso de la precipitación en la ciudad de Piura, con la diferencia que se ha añadido el promedio de la temperatura C3 un año antes de la fecha como un proxy del acumulado de las precipitaciones del año anterior. La idea asume que la escorrentía es mayor cuando los suelos se encuentran saturados por precipitaciones anteriores.

Hay que tener en cuenta que la predicción se refiere al promedio mensual. Por otro lado, la amenaza que presenta el río está determinada por las tasas máximas. Se espera que ambas estén correlacionadas. Esta correlación debe mejorar si se considerara promedios en plazos de tiempo menores. Esto requeriría una regresión para promedios a menor plazo tanto para las TSM como para la descarga promedio, lo que está considerado en nuestros planes futuros.

Pronósticos de precipitaciones con varios meses de antelación.

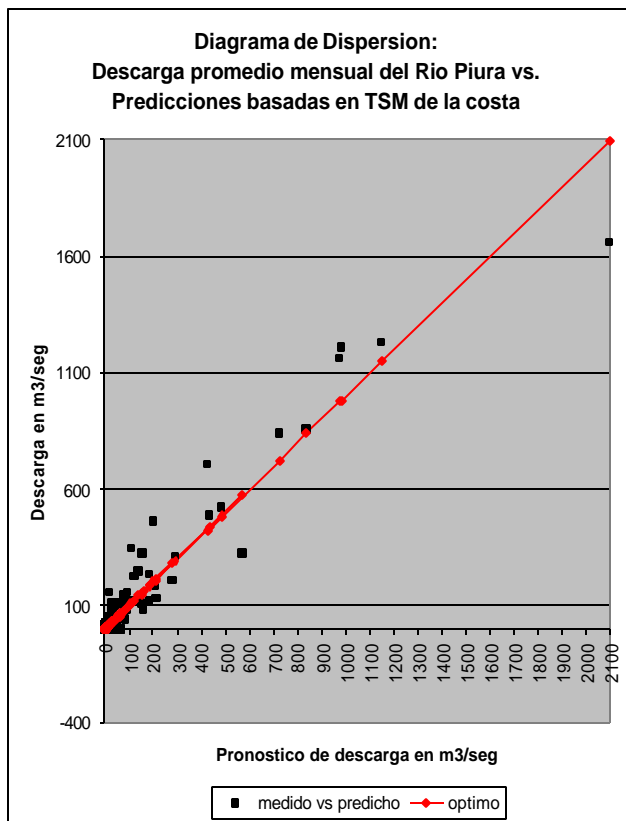


Figura 7. Comparación entre los valores de descarga predichos para el río Piura sobre la base de la temperatura superficial del mar y los realmente medidos

del Pacífico Ecuatorial durante el último El Niño extraordinario 1997-1998. Si bien existen otros modelos desarrollados y en desarrollo, nosotros nos limitaremos a discutir las posibilidades de pronóstico y las limitaciones del modelo CMP12.

Las prestaciones del modelo CMP12 se pueden apreciar en la Figura 8 en forma de contornos de la correlación obtenida entre las variaciones de la TSM predicha y las observadas durante los años 1982 a 1996 [Ming Ji et al., 1998]. Las predicciones evaluadas son aquellas con 6 meses de antelación. Se puede observar que las prestaciones son óptimas para longitudes 140-160 O, entre las latitudes 5 N y 5 S

La relación empírica encontrada entre las precipitaciones en Piura o las descargas del río y las TSM no serían de mayor utilidad a menos que las temperaturas del mar se sepan con alguna antelación. Si bien podemos usar las temperaturas medidas al momento en la relación empírica encontrada para estimar las precipitaciones, éste "pronóstico" no proveería nueva información ya que poseeríamos ya la información predicha.

Afortunadamente la capacidad de pronóstico en el Pacífico ecuatorial ha mejorado mucho en la última década con el mejor entendimiento que se tiene de los procesos físicos responsables del fenómeno El Niño y de la instrumentación moderna existente para monitorear en forma continua las temperaturas del mar y los vientos en su superficie, ya sea por medio de boyas ancladas en lugares estratégicos o por técnicas satelitales. A esto se suma la existencia hoy en día de modelos matemáticos complejos capaces de predecir el comportamiento futuro de la TSM hasta con un año de antelación. Uno de los modelos recientemente mejorados es el modelo numérico CMP12 de la dinámica acoplada de la atmósfera y el océano desarrollado por el laboratorio National Center of Environmental Prediction (NCEP) de la National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA) de los EE.UU. de América [Ming Ji et al., 1998]. El modelo ha mostrado una alta capacidad de acierto al predecir el comportamiento futuro

6-MON-LEAD SSTA TEMPORAL CORRELATION

Winter Seasons Centered in DEC. JAN. FEB.

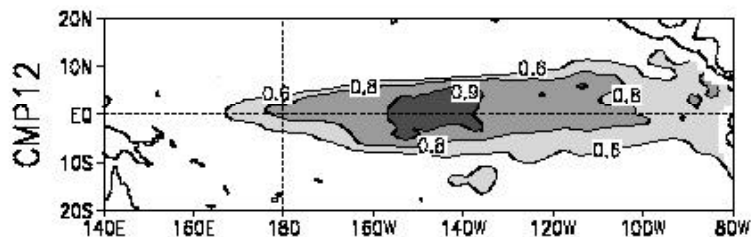


Figura 8. Prestaciones del modelo CMP/12 de NCEP/NOAA en términos de la correlación existente entre las TSM predichas (con 6 meses de antelación) y las medidas en el período 1982-1997 (según Ming Ji et al., 1997).

correspondientes al límite entre las regiones El Niño 3 y El Niño 4. En ésta zona la correlación llega a niveles de 0.9. Si ampliamos la zona y consideramos la franja ecuatorial comprendida entre los 120 O y 170 O encontramos todavía correlaciones por encima de los 0.85 a las cuales corresponden errores del orden de 0.5°C rms. para los mismos 6 meses de antelación. La prestación del modelo mejora, como es de esperar, cuando la predicción se hace con menos meses de antelación.

Performance del pronóstico CMP12 para El Niño 1997-1998 y su impacto en las predicciones de las precipitaciones en Piura

Desafortunadamente, la prestación del modelo CMP12 no es igualmente buena para la zona cercana a la costa del Perú. En ella la correlación es de 0.6, degradándose aún más al llegar a la zona de afloramiento frente a las costas, al punto que los resultados de los pronósticos, publicados periódicamente en la pagina Web de los laboratorios de NCEP, excluye una franja de aproximadamente 300 km. adyacente a la costa de Perú y Ecuador. Los puntos en el mar escogidos en nuestra fórmula de regresión son aquellos que muestran mayor correlación con las precipitaciones en la zona y se encuentran, con excepción del punto G3, dentro de esta zona. Si bien no existe un estudio detallado de las prestaciones del modelo en ésta región (Región Niño 1) los autores del modelo no claman ningún "skill" en esta zona (*Ming Ji*, comunicación personal). Esto no es de extrañar ya que la región Niño 3 y 4 es la que más influencia el clima de los EE.UU., por lo que es de esperar que sea la región en la que los científicos de la NOAA pongan mayor interés. La región Niño 1 y 2 está correlacionada al comportamiento de las regiones 3 y 4 pero no afectan directamente el clima de los EE.UU., definitivamente no en el grado que lo hacen con respecto a las costas del Perú y Ecuador. En todo caso podemos comparar los pronósticos para El Niño 1997-98 y La Niña 1998-99 con los valores medidos por NOAA en un punto específico lo más cerca a los puntos usados en la regresión discutida anteriormente y que todavía estén dentro de las regiones incluidas en los pronósticos. Luego veremos el impacto de estos errores en el pronóstico de las precipitaciones para el caso específico de las lluvias en Piura en 1998 y 1999 así como en el de las descargas en el río Piura. En una última sección veremos cómo podemos mejorar esta debilidad de los pronósticos globales de NCEP. En la Figura 9 se muestra la TSM observada en el punto P3 frente a Paita (ver Figura 10) para los meses afectados por El Niño de 1997-98 (de los archivos oimonth publicados por NCEP en su página Web). Hemos incluido también los meses posteriores correspondientes a la fase fría de la oscilación (La Niña) 1998-99. En el mismo gráfico hemos trazado la TSM predichas por el modelo CMP12 con 1, 2, 3 y

4 meses de antelación. Debemos recordar que las TSM en grandes extensiones del oriente del Pacífico ecuatorial estuvieron 4 y hasta 5° C por encima de lo normal desde el mes de Mayo de 1997 hasta Abril de 1998, esto es bajo condiciones de un El Niño extraordinario. Notamos que durante éste periodo excepto los meses entre septiembre 1997 y enero 1998, las temperaturas observadas estuvieron 0.5 a 1.5°C por encima de los pronósticos, aún de aquellos hechos con sólo un mes de anticipación. Esta es una performance inferior a la esperada, y definitivamente inferior a la lograda en las otras regiones del Pacífico ecuatorial. De haberse usado las temperaturas predichas por el modelo CMP12 de NCEP (las más confiables al momento) para estimar las lluvias en Piura hubiéramos subestimado éstas, como en realidad sucedió con los pronósticos informales del suscrito hechos sobre la base de estos mismos pronósticos de la TSM. Resulta irónico que las expectativas basadas en las (malas) interpretaciones de los pronósticos publicados

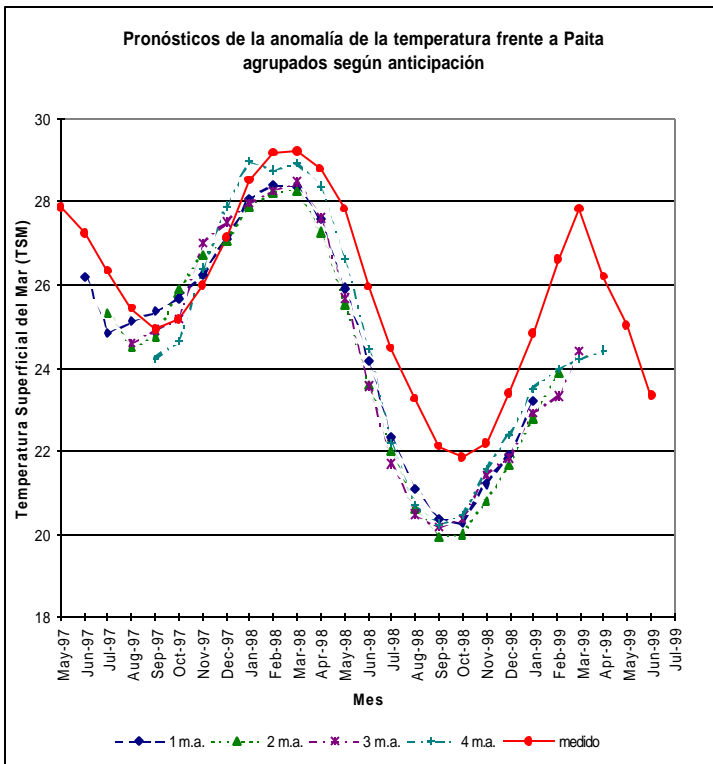


Figura 9. Temperatura Superficial del Mar (TSM) pronosticada y medida para el punto P3 (Figura 10) durante EL Niño de 1997-1998 y “La Niña” de 1998-1999. Los pronósticos graficados corresponden a 1, 2, 3 y 4 meses de anticipación. Notar las discrepancias de ~1°C durante El Niño de 1998 y de más de 2.5°C durante “La Niña” de 1999.

por la prensa internacional, que no se referían a estas regiones del Pacífico sino más bien a las regiones Niño 3 y Niño 4 (longitudes entre Galápagos y la línea de la fecha, 180° O) estuvieron más acertadas.

Terminado El Niño de 1998 la prensa mundial recogió los pronósticos de una “La Niña”, esto es TSM de 2°C por debajo de lo normal. Estos pronósticos son evidentes en las temperaturas bajas pronosticadas para los últimos meses de 1998 y comienzos de 1999 mostrados en la Figura 8. Los errores del modelo muestran una sobreestimación de este enfriamiento en forma sistemática durante todo este período. Los errores son generalmente mayores de 1°C llegando a los 2.5°C en algunos meses. Estos no tuvieron mayor impacto en el pronóstico de las lluvias en los meses de estío y los primeros meses de la estación de lluvias, ya que ambas TSM --- pronosticada y real --- estaban por debajo de los niveles críticos necesarios para que haya precipitaciones, excepto para el mes de febrero y marzo de 1999, lo que merece discusión aparte.

Condiciones hoy en día definidas como La Niña significan temperaturas por debajo de lo normal, lo que para la costa norte del Perú significa sequía en un grado aún mayor que lo normal (lo normal es sequía, razón de las condiciones desérticas de nuestra costa). Por esto causó sorpresa la ocurrencia de lluvias en la ciudad de Piura (32 mm en el mes de febrero), cuando en años normalmente secos no llueve, causando una sorpresa más grande aún las tasas máximas de descarga del río Piura que llegaron a los 2447 m³/seg. (promedio diario) con un promedio mensual de 348 m³/seg., tal como se muestra en la Figura 6. Estas descargas son comparables a las descargas del año 1987 y 1992 los que son considerados como años El Niño y que definitivamente no corresponden a un año La Niña. La sorpresa desaparece si es que tomamos nota de las verdaderas temperaturas frente a la costa norte del Perú. Podemos apreciar en la Figura 10 anomalías por encima de los 1°C y hasta 2°C de lo normal para el mes de Marzo y temperaturas de 27-28°C frente a las costas del Perú a fines de Febrero (ver Figura 11) a las que corresponden lluvias y descargas como las mostradas en los pronósticos en las Figuras 3 y 6 las que comparan con los Niños de 1987 y 1992 mostrados en las mismas Figuras.

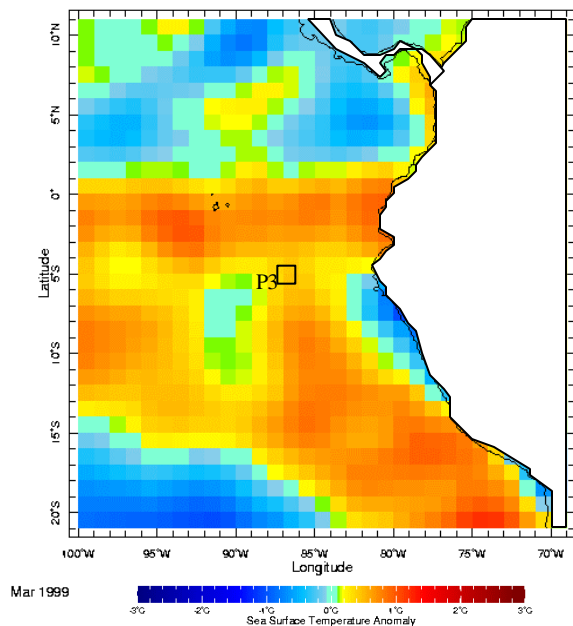


Figura 10. Mapa mostrando las anomalías de la TSM frente a las costas de Perú y Ecuador para Marzo de 1999. Se esperaba una Niña, pero las anomalías corresponden más bien a un El Niño moderado.

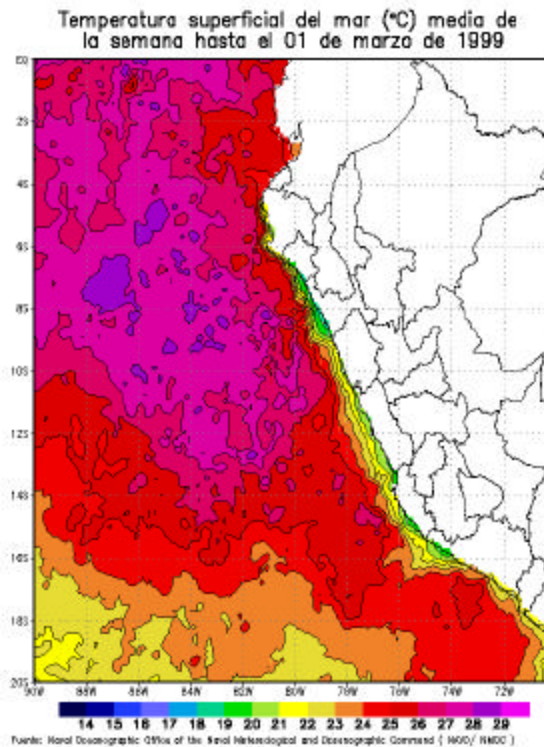


Figura 11. Como en la Figura 10, pero mostrando las temperaturas absolutas para fines del mes de Febrero

¿Cómo mejorar los pronósticos?

Recapitulando lo dicho, existe una correlación muy estrecha entre las temperaturas superficiales del mar (TSM) y las precipitaciones --- y por ende el caudal de los ríos --- en la costa norte del país. Esta correlación permite pronosticar las precipitaciones, si se conoce o se pronostica la TSM, usando técnicas estadísticas a nuestra disposición. Se ha mencionado que los modelos numéricos como el CMP12 tienen una capacidad de pronóstico bastante acertada de la TSM en la Región Niño 3 y Niño 4. Pero la exactitud de estos pronósticos se deteriora al acercarnos a las costas ecuatoriales de Sudamérica, al punto que no se publican pronósticos para las regiones de afloramiento frente a las costas del Perú. Aun así, esta capacidad de pronóstico es mucho mayor a la que se tenía algunos años y nos permitió programas de prevención con anticipación a las lluvias de El Niño 1997-98. Está claro que para explotar al máximo la alta correlación entre la TSM y las precipitaciones tenemos que mejorar el pronóstico de las primeras en la región cercana a la costa norte del Perú y sur del Ecuador.

Felizmente el conocimiento actual que se tiene sobre el Fenómeno El Niño y la capacidad de las computadoras modernas para modelar su comportamiento permite esta mejora. Así en 1997 el Instituto Geofísico del Perú, en colaboración con el Servicio de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú, presentaron una propuesta ante el Banco Mundial para mejorar la capacidad de pronóstico de la TSM motivada por esta factibilidad y por su importancia en la predicción del clima en el Perú. La propuesta incluía otros esfuerzos para mejorar la calidad de pronóstico del clima en general y se ha convertido ahora en una propuesta más ambiciosa incluyendo el modelado dinámico del clima y las predicciones meteorológicas día a día con la participación de otras entidades científicas y de servicios

peruanas como el SEHNAMI e IMARPE, coordinadas por ENFEN. La propuesta ha sido endosada por el Gobierno Peruano y aprobada por el Banco Mundial. Una descripción más completa ha sido presentada en este taller de trabajo por los organismos participantes.

Hay dos razones primordiales por las que el modelo acoplado Océano-Atmósfera, CMP12, de NCEP no ofrece prestaciones frente a las costas orientales del Pacífico ecuatorial con el mismo nivel de precisión que la alcanzada en la región central del mismo: (1) La resolución del modelo, diseñado para modelar el Pacífico ecuatorial a un nivel global, no tiene la resolución necesaria para modelar los procesos físicos finos que ocurren relacionados con el afloramiento de las aguas profundas y frías en la vecindad de la costa del Perú, y (2) la instrumentación detallada que ofrece el sistema de boyas TOGA a lo largo del Pacífico ecuatorial, termina abruptamente al oeste de las Islas Galápagos.

La propuesta mencionada da solución a estas limitaciones incluyendo 4 boyas --- similares a las del proyecto TOGA --- en las cercanías a la región coloreada en el tercer panel de la Figura 2 y que muestra tanta sensibilidad a la ocurrencia o no ocurrencia del Fenómeno El Niño. El proyecto incluye una cadena de estaciones marino-meteorológicas a lo largo de la costa y sus islas. Adicionalmente se hará un modelado numérico regional de los procesos oceanográficos y atmosféricos en la zona de afloramiento y circundantes, usando los pronósticos globales de NCEP como condiciones de contorno. Los pronósticos de NCEP y cualquier otro que se desarrolle sobre el tema, se verán mejorados a su vez por la inclusión de medidas más precisas en la zona de interés. Se espera que las 4 boyas sean el inicio de un esfuerzo internacional mayor. Estas mediciones serán complementadas por IMARPE con mediciones de TSM hechas por la flota pesquera nacional como parte de la implementación de un sistema telemétrico satelital de parámetros oceanográficos los que incluye un sistema de posicionamiento automático de la embarcación. La instrumentación regional incluirá dos radares perfiladores de viento, uno en la isla Lobos de Afuera (o en las costas de Paita) y el otro en la ciudad de Piura. El perfilador de la Isla Lobos se usará también como radar marino para la medición de las corrientes superficiales en la zona. Estos últimos instrumentos permitirán un mejor entendimiento de los procesos oceanográficos y atmosféricos de la región y su variabilidad con respecto al Niño.

Independientemente de lo anterior, se proseguirá con esfuerzos para tratar de mejorar los pronósticos estadísticos de las precipitaciones basadas en la TSM. Es necesario reducir los residuales que se aprecian en las Figuras 3, 5, 6 y 7. Es muy probable que estos se deban a que no se ha considerado ningún parámetro que sea un proxy del estado de los aires por encima de los de la capa límite atmosférica (boundary layer) directamente influenciados por la temperatura del mar. Estos se ven alterados por la componente "SO" del fenómeno ENSO. Un proxy representativo de este estado serían las precipitaciones en el otro extremo y la región central del Pacífico, las que a su vez se ven influenciadas por la TSM en estas regiones. Se tiene planeado incorporar una o dos temperaturas en esta región en la fórmula de regresión.

Cabe mencionar que otra aplicación a las relaciones estadísticas encontradas es la de determinar la intensidad de Fenómenos El Niño en el pasado, haciendo uso de la larga historia de las lluvias en la región como un índice de lo que sucedió con las temperaturas del mar. . Esto implicaría hacer uso de la relación empírica encontrada pero en reversa. Hay que recordar que Piura, aparte de su sensibilidad al Niño, fue fundada hace 470 años y fue la primera ciudad fundada por los españoles al sur de Panamá. Las precipitaciones en Piura ya han sido usadas cualitativamente en este sentido por *Woodman* [1985] y por *Quinn et al.* [1987]. Este uso de las precipitaciones en Piura no es de extrañar ya que el nombre El Niño significando la presencia de aguas cálidas en la costa norte del Perú se debe a los pescadores de Sechura y Paita, pueblos de pescadores de la región.

Bibliografía

Draper, N.R. y H. Smith, "Applied Regression Analysis, Second Edition", Wiley Interscience, New York, NY., 1981

Ji-Ming, D. W. Behringer y A. Leetman, An Improved Coupled Model for ENSO Prediction and Implications for Ocean Initialization . Part II: The Coupled Model . Mon. WEA. Rev., 126, 1022-1034, 1998.

Mabres, A.; R. F. Woodman y R. Zeta; "Algunos apuntes históricos adicionales sobre la cronología de El Niño", Bull. De l'Institut Francais d'Etudes Andines, 22(1), 395-406, 1993.

Quinn, W.H., Neal , W.T. Y Antunez de Mayolo,S. El Niño occurrences over the past four and a half centuries. J. of Geophys. Res., 92(C13), 14449-14461, 1987.

Woodman, R.F.; “Recurrencia del fenómeno El Niño con intensidad comparable a la del Niño 1982-1983”, en “Ciencia, Tecnología y Agresión Ambiental: El Fenómeno El Niño”, CONCYTEC, Lima, Perú, 301-333, 1985.

Woodman, R. , “El Fenómeno El Niño y el Clima en el Perú” en “El Perú en los Albores del Siglo XXI/2”; Ciclo de Conferencias 1997-1998”, Ediciones del Congreso del Perú, Lima, Perú, 201-242, 1998.